

Mikrostruktura i tvrdoća zavarenog niskougličnog čelika

Jerković, Kristijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:115:675076>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Kristijan Jerković

ZAVRŠNI RAD

Sisak, lipanj 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Kristijan Jerković

MIKROSTRUKTURA I TVRDOĆA ZAVARENOG NISKOUGLJIČNOG
ČELIKA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: prof.dr.sc. Stjepan Kožuh

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof.dr.sc. Mirko Gojić – predsjednik

prof.dr.sc. Stjepan Kožuh – član

prof.dr.sc. Zoran Glavaš – član

doc.dr.sc. Ivana Ivanić – zamjenski član

Sisak, lipanj 2021.

IME: Kristijan
PREZIME: Jerković
MATIČNI BROJ: LJ - 18 - 1

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:

MIKROSTRUKTURA I TVRDOĆA ZAVARENOG NISKOUGLJIČNOG
ČELIKA

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

Sisak, _____

(vlastoručni potpis)

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

SAŽETAK

MIKROSTRUKTURA I TVRDOĆA ZAVARENOG NISKOUGLJIČNOG ČELIKA

Zavarivanje je interdisciplinarna tehnologija spajanja istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala. Cilj provođenja zavarivanja je da se dobije homogen zavareni spoj. Postupci elektrolučnog zavarivanja su bili među prvim postupcima koji su se razvili u 20. stoljeću. U ovom radu provedeno je proučavanje literature koja opisuje teorijske osnove različitih postupaka zavarivanja. Posebna pažnja je posvećena detaljnom proučavanju postupka zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom plina (TIG). U eksperimentalnom dijelu rada samostalno je provedeno zavarivanje niskougljičnog čelika st 35.8 (Č.1214, DIN17175, W. Nr. 1.0305, EN-P235GH) TIG postupkom. Nakon zavarivanja provedena je analiza mikrostrukture optičkim mikroskopom. Mikrostrukturna analiza je provedena na osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i zoni taljenja. Uočeno je da osnovni materijal ima feritno-perlitnu mikrostrukturu, dok je u zoni utjecaja topline prisutna također feritno-perlitna mikrostruktura s mjestimično prisutnim Widmanstattenovim feritom. U zoni taljenja zamijećena je lijevana mikrostruktura koja se sastoji od ferita i bainita. Zona taljenja je pokazala najveće vrijednosti tvrdoće (228,7 HV10).

Ključne riječi: zavarivanje, niskougljični čelik, mikrostruktura, tvrdoća

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF WELDED LOW-CARBON STEEL

Welding is an interdisciplinary technology of joining identical or diverse materials, by melting or pressing, with or without the addition of additional material. The aim of process welding is to obtain a homogeneous welded joint. Arc welding processes were among the first processes to be developed in the 20th century. In this thesis, a study of the literature describing the theoretical foundations of different welding procedures was obtained. Special attention is paid to the detailed study of the process of welding with a non-fusible electrode under gas protection (TIG). In the experimental part of the work, low-carbon steel st 35.8 (Č.1214, DIN17175, W. Nr. 1.0305, EN-P235GH) was independently welded by TIG process. After welding, microstructure analysis was performed with an optical microscope. Microstructural analysis was performed on the base material, the heat affected zone and the melting zone. It was observed that the base material has a ferrite-perlite microstructure, while in the heat affected zone a ferrite-perlite microstructure with Widmanstatten ferrite is also present in places. A cast microstructure consisting of ferrite and bainite was observed in the melting zone. The melting zone showed the highest hardness values (228.7 HV10).

Key words: welding, low-carbon steel, microstructure, hardness

Sadržaj

1.	UVOD	1
2.	TEORIJSKI DIO	2
2.1.	Općenito o zavarivanju.....	2
2.2.	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom	4
2.3.	Zavarivanje s taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi.....	5
2.4.	Postupak zavarivanja netaljivom elektrodom.....	6
2.4.1.	Najvažniji utjecajni čimbenici	7
2.4.2.	Priprema spoja za zavarivanje	9
2.4.3.	Netaljiva elektroda i dodatni materijal	10
2.4.4.	Oprema za zavarivanje netaljivom elektrodom	11
2.5.	Zavarivanje nelegiranih čelika	11
2.5.1.	Predgrijavanje čelika	12
2.5.2.	Primjena bazičnih elektroda i optimalno oblikovanje konstrukcije	12
2.5.3.	Popuštanje zaostalih napreznja	13
3.	EKSPERIMENTALNI DIO	14
3.1.	Priprema zavarenog spoja.....	14
3.2.	Zavarivanje čelika TIG postupkom	14
3.3.	Metalografska priprema.....	16
3.4.	Ispitivanje tvrdoće	18
4.	REZULTATI I RASPRAVA	19
5.	ZAKLJUČAK	24
6.	LITERATURA.....	25
7.	ŽIVOTOPIS	26

1. UVOD

Zavarivanje je interdisciplinarna tehnologija spajanja istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen zavareni spoj [1]. Sve do kraja 19. stoljeća jedino je bilo poznato kovačko zavarivanje, s kojim su kovači stoljećima spajali željezo i čelik grijanjem i udaranjem čekića.

Elektrolučno zavarivanje i plinsko zavarivanje kisikom su bili među prvim postupcima koji su se razvili u 20. stoljeću. Nakon toga su se razvili mnogi procesi, ali među najzastupljenijim je postalo ručno elektrolučno zavarivanje [2]. Zavarivanje je spajanje materijala gdje se materijali koje želimo spojiti na spojnom mjestu omekšavaju ili rastale. Na tome mjestu se materijali spajaju uz dodavanje ili bez dodavanja dodatnog materijala. Takav spoj nazivamo "zavareni spoj", a on se sastoji od "zavara" i susjednog materijala koji je strukturno promijenjen uslijed zavarivanja [1]. Zavareni spoj se sastoji od osnovnog materijala (OM), zone utjecaja topline (ZUT) i zone taljenja (ZT).

Zavarivanje je od osobite važnosti u industrijskoj izgradnji čeličnih konstrukcija, primjerice u brodogradnji, gradnji mostova, automobilskoj industriji, izgradnji teških strojeva, naftnoj i energetske industriji [1].

Od svih metalnih materijala najčešće se zavaruje čelik. Moguće je zavarivati i većinu drugih metala, ali i materijale poput stakla i polimernih materijala (plastika) [1]. Metal smatramo zavarljivim onda kada primjenjujući određeni postupak zavarivanja dobivamo kontinuirani, homogeni zavareni spoj koji zadovoljava predviđene zahtjeve i koji ima zahtjevana mehanička i druga potrebna svojstva [1].

Zavarivanje je drukčije od lemljenja, jer je to spajanje taljenjem legure s nižim talištem od materijala predmeta koji se spajaju. Različiti izvori energije se mogu koristiti za zavarivanje, kao što je mlaz vrućih plinova (plinski plamen ili mlaz plazme), električni luk, tok nabijenih čestica (mlaz elektrona ili iona u vakuumu), tokovi zračenja (laser), električna struja (elektrootporno zavarivanje), trenje, ultrazvuk i sl. [2]. Zavarivanje se može obavljati u radionici, na otvorenom prostoru, u vodi ili u svemiru [2].

Većina tehnika spajanja materijala je razvijena u zadnjih stotinjak godina no neke tehnike spajanja poput kovačkog zavarivanja željeza i lemljenja postoje mnogo duže. Tijekom brončanog doba pojavljuju se lemljenje i kovačko zavarivanje zlata, ali nisu našli širu uporabu već su se koristili za izradu detalja uglavnom na nakitu. Zavarivanje postaje tehnika od velike ekonomske važnosti onog trena kada uporaba željeza postaje znatno raširenija. Tijekom srednjeg vijeka spajanjem metala proizvode se razna oružja poput mačeva, strijela, oklopa i topova [3]. Tijekom 1. i 2. svjetskog rata razvijaju se nove metode spajanja metala zbog potrebe za pouzdanim i jeftinim metodama spajanja. Po završetku 2. svjetskog rata razvijeno je nekoliko modernih tehnika zavarivanja, a razvojem tehnologije razvijaju se i lasersko zavarivanje te zavarivanje sa snopom elektrona. Danas je sve rasprostranjenije automatsko zavarivanje, a znanstvenici kontinuirano rade na razvoju novih tehnologija [4]. U okviru ovog završnog rada provest će se zavarivanje niskougličnog čelika te karakterizacija zavarenog spoja.

2. TEORIJSKI DIO

Prema definiciji zavarivanje je spajanje dvaju ili više dijelova sa ili bez dodatnog materijala. Na taj način dobiva se kontinuirani nerastavljivi spoj jednoličnih svojstava (mehanička svojstva, žilavost, otpornost na trošenje itd.) [5]. Tijekom zavarivanja zona spoja dovedena je u tekuće ili plastično stanje. Zavarivanjem se mogu spajati metalni materijali (čelici, aluminij, bakar, nikal i njihove legure) i nemetalni materijali (termoplastični dijelovi i dr.) [5]. Zavareni spoj sastoji se od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT) [5].

Zona taljenja je dio zavarenog spoja koji je tijekom zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i skrućivanja. U ovoj zoni odvijaju se procesi slični kao pri proizvodnji metala u pećima (međusobno djelovanje rastaljenog metala, troske i okoline) [5]. Zona taljenja može se sastojati od osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. Zona utjecaja topline dio je osnovnog materijala koji se nalazi neposredno uz rastaljenu zonu, gdje dolazi do promjene kristalne strukture [5].

Širina zone utjecaja topline (ZUT) ovisi o unosu topline i najčešće je 2 – 8 mm. Zavarivanje je danas najšire primjenjiva tehnika spajanja metalnih konstrukcija. Ono je istodobno kvalitetno i učinkovito te je u opću praksu izradbe čeličnih konstrukcija uvedeno nakon 1920. godine [5]. U odnosu na spajanje zakovicama, tri su osnovne značajke zavarivanja kao tehnike spajanja: sile se s jednog na drugi spajani dio ne prenose diskontinuirano (od jednog do drugog zakivka), već preko kontinuiranog metalnog spoja, ostvareni spoj se ne može prekinuti bez razaranja, te zbog unosa topline zavarivanje može značajno utjecati na mehanička i metalurška svojstva osnovnih materijala [5].

Neki materijali zahtijevaju uporabu određenih postupaka i tehnika. Neki se od njih smatraju 'nesvarljivim', dijelovi koji su spojeni poznati su kao matični materijal. Materijal dodan kao pomoć u oblikovanju spoja naziva se punilo ili potrošni materijal. Potrošni materijal obično se bira da bude po sastavu sličan matičnom materijalu, tvoreći tako homogeni zavar, ali postoje slučajevi, poput zavarivanja lomljivih lijevanih željeza, kada se koristi punilo vrlo različitog sastava i svojstava. Ti se zavari nazivaju heterogenim [6].

2.1. Općenito o zavarivanju

Mnogo različitih faktora utječe na čvrstoću zavara i materijala oko njega, uključujući odabir procesa zavarivanja, količinu i koncentraciju ulazne topline, zavarljivost osnovnog materijala, dodatni materijal elektrode, vrsta obloge, geometrija zavarenog spoja i konačno međudjelovanje svih tih faktora [2].

Od svih postupaka zavarivanja najviše rasprostranjeno je elektrolučno zavarivanje. Elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom se također može koristiti za podvodno zavarivanje. Prvo zavarivanje u svemiru izveli su 1969. sovjetski astronauti, koji su testirali elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom, zavarivanje plazmom i zavarivanje s elektronskim mlazom [2]. Da bi ispitali kvalitetu zavara, postoje kontrola bez razaranja (NDT) i kontrola s razaranjem. Greške kod zavarivanja mogu biti pukotine, deformacije, plinski uključci (poroznost), nedostatak provara, nemetalni uključci, zarezi, površinski i podpovršinski lamelarni prekidi. Riječ "zavarljivost" je ključni pojam u zavarivačkoj tehnologiji, a odnosi se kako na osnovni i dodatni materijal, tako i na zavarivani proizvod ili strukturu, parametre, režim i postupak zavarivanja. Na zavarljivost metala utječu: kemijski sastav, dimenzije dijelova koji se zavaruju, vrsta dodatnog materijala, priprema spoja za zavarivanje i drugo [2].

Homogenost zavarenog spoja se može narušiti pojavom pukotina, nemetalnih uključaka i poroznosti, pa se zavarljivost metala često ocjenjuje na temelju sklonosti pojavi pukotina. Zahtjevi za dobro zavarljive čelike su: zadovoljavajuća žilavost osnovnog metala; kemijski sastav (mora biti takav da nakon hlađenja ne dolazi do porasta krhkosti); što manje ugljika (jer ugljik utječe na porast zakaljivosti, tvrdoće i krhkosti) [2].

Pojave grešaka u zavaru su moguće jer svaki tehnološki postupak nosi stalnu opasnost od nastajanja određenih grešaka, s obzirom na veliki broj utjecajnih čimbenika na kvalitetu zavarenih spojeva. Na tu opasnost je potrebno obratiti posebnu pozornost kako pri izradi zavarene konstrukcije, tako i u njenoj primjeni [2].

Greške u zavarenim spojevima koje nastaju u izradi mogu se podijeliti s obzirom na uzrok nastajanja grešaka (konstrukcijske, metalurške i tehnološke greške), te s obzirom na vrstu grešaka (plinski uključci, uključci u čvrstom stanju, naljepljivanje, nedostatak provara, pukotine i greške oblika i dimenzija).

Greške položaja mogu biti unutrašnje, površinske, podpovršinske greške i greške po cijelom presjeku. Greške po obliku mogu biti kompaktne, izdužene, oštre (jako izraženo zarezno djelovanje), zaobljene (manje izraženo zarezno djelovanje), ravninske (može se zanemariti treća dimenzija grešaka) i prostorne greške (uzimaju se obzir sve tri dimenzije greške). Greške po veličini mogu biti male greške, greške srednje veličine, i velike greške, te greške po brojnosti koje su pojedinačne, učestale i "gnijezdo grešaka" [2].

Postupak navarivanja je postupak nanošenja dodatnog materijala zavarivanjem na površinu radnog predmeta radi postizanja željenih svojstava, mjera i oblika [2]. Navarivanje se obično provodi u vodoravnom položaju, rjeđi su slučajevi nekih drugih položaja. Zbog velikih količina topline, plinova izgaranja te rasprskavanja potrebno je predvidjeti odgovarajuće mjere zaštite na radu. Gotovo svi klasični postupci zavarivanja mogu biti primijenjeni u svrhu navarivanja.

Izvori struje za zavarivanje ili napajanje za zavarivanje su takvi uređaji koji daju na mjestu zavarivanja električnu struju s karakteristikama pogodnim za zavarivanje. Najčešće se koristi napajanje s konstantnom jačinom struje i drugi tip tj. napajanje s konstantnim naponom. Kod elektrolučnog zavarivanja, dužina električnog luka je u direktnoj vezi s naponom, dok je s jačinom struje direktno povezan unos topline na zavarenom spoju.

Napajanje s konstantnom jačinom struje se često koristi za ručne postupke zavarivanja, kao što je zavarivanje netaljivom elektrodom (TIG postupak) i elektrolučno zavarivanje s obloženom elektrodom (REL postupak). To je važno, jer je vrlo teško održavati elektrodu mirno, a time se razmak i napon mijenjaju. Napajanje s konstantnim naponom se češće koristi za automatske postupke, kao što je elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog ili inertnog plinom (MIG ili MAG). Kod tih procesa dužina električnog luka se održava konstantnim, mijenjajući jačinu struje po potrebi.

Vrsta električne struje kod elektrolučnog zavarivanja isto igra vrlo važnu ulogu. Procesi s potrošnim elektrodama, kao što je elektrolučno zavarivanje s obloženom elektrodom, uglavnom koriste istosmjernu struju, ali elektroda može biti pozitivno ili negativno nabijena. Kod zavarivanja, pozitivno nabijena anoda će imati veću koncentraciju zagrijavanja i zavar će biti dublji [2]. Zaštita pri radu zavarivača podrazumijeva obaveznu zaštitnu opremu. Zavarivanje bez odgovarajućih mjera zaštite može biti opasno po život i zdravlje. Danas se s novim tehnologijama i odgovarajućom zaštitom taj rizik znatno smanjio. Da bi se smanjio utjecaj plamena i električnog luka, zavarivači moraju nositi zaštitnu odjeću i opremu, kao što su maske, rukavice, zaštitna odjeća i sl. Zbog visokog intenziteta ultraljubičastog i infracrvenog zračenja i mogućeg oštećenja očiju (upala rožnice i opekotine na mrežnici oka), maske i naočale trebaju

biti opremljene sa specijalnim staklima [2]. Često se i mjesta zavarivanja trebaju prekriti sa zaštitnim zavjesama i pregradama, posebno od polivinil klorida, da se zaštite ostali radnici koji ne zavaruju. Može se reći da je odabir pravog postupka zavarivanja od ogromne važnosti za uspješnu i ekonomičnu proizvodnju. Svaki zavarivač ima svoj vlastiti individualni zadatak, ali svima im je zajedničko jedno a to da s povećanjem ručnih vještina potencijal zarade industrijskog zavarivača izuzetno je zanimljiv [7].

Postupci zavarivanja topljenjem koriste se osobito često za metalne materijale, ali i za staklo (za potrošačke proizvode ili za staklena vlakna u komunikacijskoj tehnologiji) i za termoplastiku. Ovisno o postupku zavarivanja, povezivanje se provodi u šavu zavarivanja ili mjestu zavarivanja [8].

2.2. Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom

Temperatura u centru toplog, ioniziranog, plinskog stupa električnog luka je obično od 5000 do 7000 °C, kod zaštitnih plinova je i do 20000 °C. Na ovim temperaturama se plin u električnom luku nalazi u stanju plazme pa se zbog toga to područje i naziva područje plazme. Pod plazmom se smatra plin u kojem su elektroni oslobođeni od atoma. Također se vrlo intenzivno svjetlo iz električnog luka stvara u području plazme. Svjetlost nastaje kada određeni elektroni prelaze u niže energetske nivoe, zbog toga se višak energije oslobađa kao elektromagnetskog zračenja koje je u obliku vidljive svjetlosti, te ultraljubičastog i infracrvenog zračenja. Intenzivni sjaj i ultraljubičaste zrake iz električnog luka su opasni za nezaštićene oči i ljudsku kožu [1].

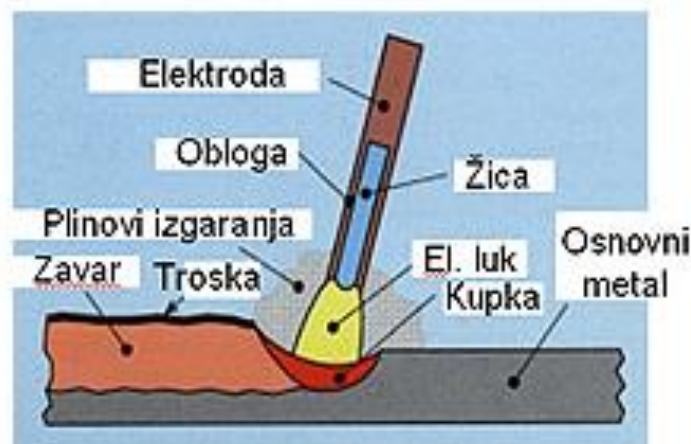
Ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL) je postupak zavarivanja koji je jednostavan za rukovanje, primjenjuje se za zavarivanje i navarivanje svih vrsta metala istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Kod ovog postupka se električni luk uspostavlja između vrha elektrode i radnog komada. Postupak je ručni što znači da je za zavarivanje neophodan zavarivač. Električni luk je završni dio strujnog kruga kod kojeg električna struja prolazi zračni prostor između elektrode i radnog komada, zbog toga što zrak ne provodi struju zračni prostor mora biti ioniziran. Iz sigurnosnih razloga maksimalni napon kod elektrolučnog zavarivanja je 120 V za istosmjernu struju i 80 V za izmjeničnu struju [2]. Navedeni naponi zavarivanja su premali za nastajanje električnog luka, koji zahtjeva napone od 5000 V/mm u zračnom razmaku. Kako bi se uspostavio zavarivački električni luk potrebno je da metalna elektroda dodirne radni komad jer tada dolazi do kratkog spoja i prolaza električne struje [2]. Zbog velike jakosti struje (200 – 1000 A) dodirne površine se zagrijavaju. Napon generatora djeluje kroz zračni razmak i uzrokuje gibanje emitiranih elektrona u smjeru anode (radni komad). U električnom polju se elektroni ubrzavaju te je njihova kinetička energija tako velika da oni mogu ometati nastajanje atoma u zračnom razmaku. Duž područja dužine luka atomi u zračnom razmaku će se ionizirati (izgubiti će jedan elektron). Elektroni putuju dalje prema anodi gdje izgaraju i njihova kinetička energija se pretvara u toplinsku energiju. Na isti se način prema katodi ubrzavaju ioni. Katoda tako zadržava temperaturu i sposobnost emitiranja novih elektrona. U izmjeničnom električnom luku, koji se obično mijenja 100 puta u sekundi, toplina se jednako raspoređuje prema anodi i katodi. Električna struja se sastoji iz elektrona koji se zbog elektromotorne sile izvora struje gibaju od negativnog nabijenog pola prema pozitivnom, a smjer električne struje definiran je suprotno tj. od pozitivnog pola prema negativnom polu izvora [2]. Slikom 1 shematski je prikazan elektrolučni postupak zavarivanja obloženom elektrodom.

Obložene elektrode za REL zavarivanje pogodne su za zavarivanje svih vrsta čelika, uključujući CrNi čelike, čeličnog i sivog lijeva i različitih neželjeznih metala.

Osnovni tipovi obloga elektroda su: Rutilne (R): Daju glatke i čiste šavove. Malo prskaju i troska se dobro odstranjuje. Stvaraju relativno mnogo troske.

Celulozne (C): Posebno pogodne za zavarivanje odozgo nadolje. Dobre su za zavarivanje pocinčanih materijala. Dobro popunjavaju uske prostore i provaruju korijen. Stvaraju malo troske, koja se lako skida. Sklone su lijepljenju i teže se pale.

Bazične (B): Stvaraju šavove s vrlo dobrim mehaničkim karakteristikama. Dobro se oblikuju i popunjavaju uske prostore. Upotrebljive su za čelike s većim sadržajem ugljika. Ponovno paljenje je otežano. Sklone su lijepljenju, zbog toga je eventualno potrebno zagrijavanje elektroda [9].



Slika 1. Shematski prikaz elektrolučnog postupka zavarivanja [2]

Prednosti elektrolučnog postupka zavarivanja obloženom elektrodom su: jeftina oprema, širok spektar elektroda, koristi se za sve konstrukcijske čelike, bakra, nikla, titanija, za sve debljine zavara (od 1 mm do 100 mm), izvedivo je višeslojno zavarivanje i zavarivanje u svim položajima [1]. Najvažniji nedostaci su: postupak se obavlja ručno (mogućnost greške), puno dimova (potrebna ventilacija), stvaranje troske (opasnost pojave troske u zavaru), otpad (moraju se ukloniti, prekidi i ponovno uspostavljanje luka) [1].

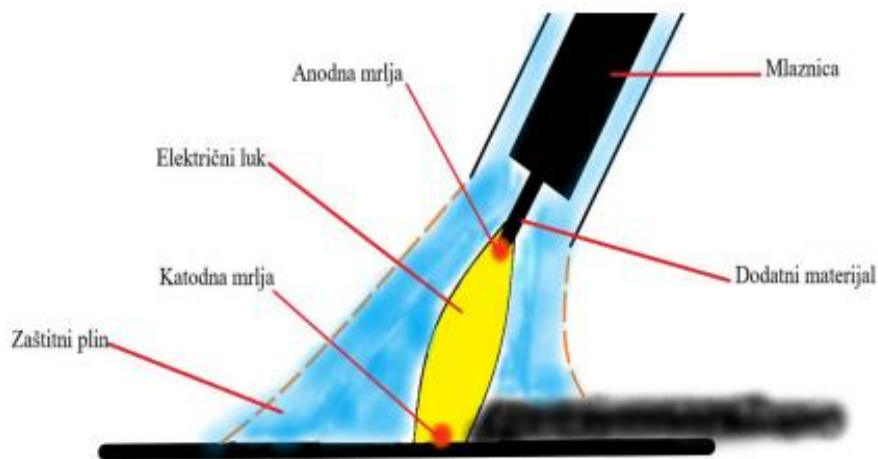
Funkcije obloge elektrode su električna funkcija (važna jer utječe na stabilnost električnog luka), fizikalna funkcija (utječe na zaštitu taline od zraka jer plinovi štite talinu) i metalurška funkcija (u oblozi se nalaze komponente kojima se provodi legiranje zone taljenja te utječe na deoksidaciju taline) [1].

2.3. Zavarivanje s taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi

Električni se luk, kod zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi (MIG/MAG) uspostavlja i održava između vrha taljive metalne elektrode, odnosno žice i zavarenog metala, slika 2. Električni luk stvara potrebnu toplinu i osigurava taljenje dodatnog metala i spajanih rubova osnovnog metala u okruženju zaštitnog plina. Kao zaštitni plinovi koriste se neutralni ili inertni plinovi, npr. argon, helij ili mješavina plinova (MIG - Metal Inert Gas) [1]. Kada se kao zaštitni plin koriste aktivni plinovi, najčešće CO₂ i njegov

mješavine s drugim plinovima, onda se postupak naziva MAG (Metal Active Gas). Metalna elektroda u obliku žice namotane na kolut potiskuje se pomoću potisnog mehanizma kroz pištolj za zavarivanje do mjesta taljenja gdje se u električnom luku tali i prenosi u rastaljeni metal. Pri tome inertni plin štiti talinu od štetnog utjecaja kisika i dušika iz zraka. Vođenje i upravljanje zavarivačkog pištolja je ručno ali može biti potpuno i automatizirano. Promjeri žica i parametri zavarivanja MIG ili MAG postupkom odabiru se prema debljini zavarenih izradaka i položaju zavarivanja [1]. Najčešće se koristi žica punog presjeka promjera 0,6 do 2,4 mm zbog boljeg električnog kontakta. U procesu MIG-MAG električni luk gori između taljenja, automatski napunjene žice za zavarivanje. Zasebno dodan plin štiti luk i zonu zavarivanja od ulaska vanjskog zraka. Zaštitni plin i žica za zavarivanje moraju biti prilagođeni osnovnom materijalu [10].

Ovaj postupak se najčešće koristi za zavarivanje obojenih metala, visokolegiranih čelika i drugih metala koji se rado vežu s kisikom kao i zavarivanje tankih limova [1]. Slikom 2 shematski je prikazan postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi.



Slika 2. Shematski prikaz postupka zavarivanja s taljivom elektrodom [11]

Prednosti MIG/MAG postupka su: povoljne brzine zavarivanja (do 1 m/min), mogu se zavarivati tanki, srednji i debeli komadi, koristi se za sve vrste metala, u svim položajima zavarivanja, postupak se može automatizirati i robotizirati. S druge strane nedostaci MIG/MAG postupka su: skupa oprema, velika pozornost oko zaštite zbog plina, treba se zavarivati s dvije ruke te moguća opasnost od pojave naljepljivanja [1].

2.4. Postupak zavarivanja netaljivom elektrodom

Postupak zavarivanja netaljivom elektrodom (TIG) je elektrolučni postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (argon, helij) ili rjeđe smjesi plinova. Skraćenica imena postupka dolazi od punog naziva "Tungsten Inert Gas", a često se naziva i WIG (Wolfram Inert Gas) ili GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) [12].

Prema literaturi [12], početak razvoja TIG postupka povezuje se s početkom 2. Svjetskog rata (1941./1942. Godina) I razvojem u svrhu zamjene plinskog zavarivanja u avionskoj industriji (zavarivanje legura na bazi magnezija).

Russell Meredith koji je radio za Northrup Aircraft patentirao je postupak pod imenom "Heli-Arc Welding" što se smatra pretečom današnjeg TIG/GTAW postupka zavarivanja [12]. Razvoj ovog postupka zavarivanja nastavljen je u tvrtci Linde koja je otkupila patent I to prvenstveno zbog upotrebe inertnih plinova u postupku. Razvoj je nastavljen kroz konstrukciju I primjenu različitih tipova gorionika, sapnica I proučavanja strujanja zaštitnog plina. Komercijalna primjena postupka zavarivanja netaljivom elektrodom započela je u 50-tim godinama prošlog stoljeća. Danas ovaj postupak, uz vrlo male konstrukcijske promjene, ali zbog značajnih prednosti ili primjene modificiranih izvedbi predstavlja značajan elektrolučni postupak zavarivanja primjenjiv na širokom spektru materijala. Ovim postupkom mogu se zavarivati čelici, plemeniti čelici, teški i laki obojeni metali itd. i to u ručnoj, poluautomatiziranoj ili automatiziranoj primjeni. Karakteristika postupka zavarivanja netaljivom elektrodom je stabilan električni luk i visoko kvalitetan zavar, ali zahtjeva se izuzetna vještina zavarivača pa je to relativno spor postupak zavarivanja. Iako se može koristiti za skoro sve vrste materijala, najčešće se koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika i lakih metala (aluminijeve legure i titanijeve legure). Postupak je pogodan za zavarivanje tankih limova (do debljine 6 mm), a često se koristi kod proizvodnje bicikla, zrakoplova i brodova, te kod zavarivanja u prinudnim položajima [13].

Zavarivanje TIG postupkom se koristi u područjima poput lagane gradnje u automobilskoj industriji, gdje su aluminijeve legure uobičajena pojava. Proizvođači ne moraju samo zavarivati profile različitih debljina, već i oblikovati samonoseće konstrukcije [14]. U pravilu se volframova elektroda priključuje na (-) pol izvora istosmjerne struje, zbog znatno manjeg trošenja volframove elektrode uz korištenje pulsirajuće struje zavarivanja [13]. Tijekom zavarivanja električni luk se uspostavlja pomoću visokofrekventnog generatora (VF generator), koji se uključuje samo u djeliću sekunde, neposredno pred zavarivanje. Nakon uspostavljanja električnog luka između netaljive volframove elektrode i radnog komada tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne ili izmjenične), generator se isključuje, a postupak zavarivanja se odvija s ili bez dodavanja dodatnog materijala (žice) u električni luk. Nakon toga slijedi taljenje ivica žlijeba za zavarivanje (kod materijala manje debljine), odnosno ravnomjerno ručno dodavanje žice za zavarivanje u električni luk, te taljenje i stvaranje zavarenog spoja (kod debljih materijala). TIG postupak zavarivanja je visoko kvalitetan postupak koji ima puno prednosti pred ostalim postupcima ali ga njegova sporost, mali depozit i viša cijena opreme sprječava da se koristi u puno većoj mjeri [13]. Zbog inertnog zaštitnog plina nema kemijskih reakcija s rastaljenim metalom što iz metalurške perspektive donosi određene prednosti. Ovaj postupak omogućuje proizvodnju ultračistih šavova s iznimnim mehaničkim i tehnološkim svojstvima. Za posebne materijale ili tamo gdje postoje specifični zahtjevi za zavarivanje TIG zavarivanje je prvi izbor. Postupak je također karakteriziran koncentriranim i stabilnim lukom; glatkim ujednačenim šavom izostankom prskanja u gotovo svim položajima [14].

2.4.1. Najvažniji utjecajni čimbenici

Električni luk kod TIG postupka zavarivanja sastoji se od tri područja: katodnog, anodnog i područja stupa električnog luka. Anodno područje (područje plus pola) i katodno područje (područje minus pola) malih su duljina, a sastoji se od oblaka iona koji udaraju u anodu tj. katodu te oslobađaju određenu količinu energije (topline) [1]. Kod zavarivanja netaljivom

elektrodom elektroni se kreću s negativne elektrode na pozitivni osnovni materijal, ubrzavajući kroz električni luk, a pozitivni elektroni imaju suprotan smjer. Pri tome, količina kinetičke energije elektrona značajno je veća nego od iona pa dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada, a manjeg vrha elektrode. Zbog toga TIG zavarivanje omogućuje rad s manjim promjerima elektroda tj. rad s velikim strujama. Vrh netaljive elektrode može biti zašiljen što daje stabilnost električnom luku. Također ovaj način zavarivanja daje dobru penetraciju dodatnog materijala. Slikom 3 prikazano je uspostavljanje električnog luka visokofrekventnim generatorom [12].



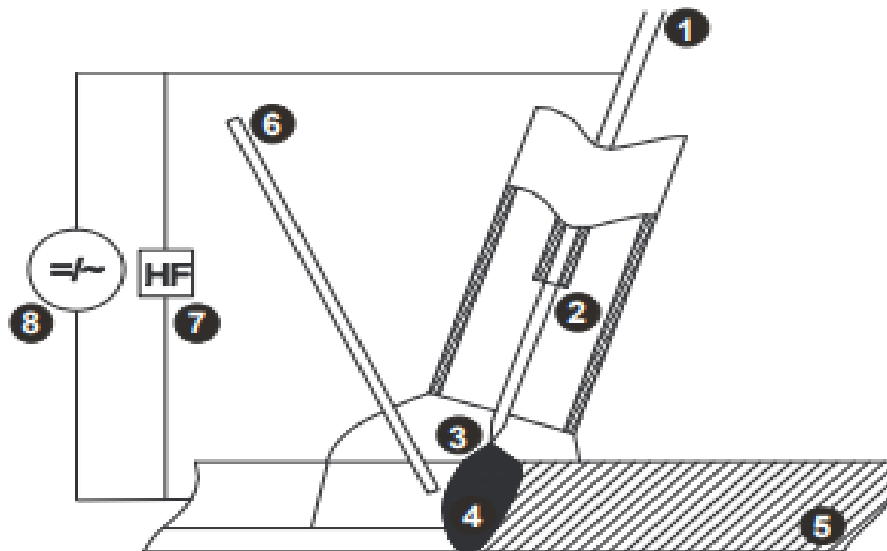
Slika 3. Fotografija uspostave električnog luka visokofrekventnim generatorom [12]

Područje stupa električnog luka, tj. njegova duljina ovisi o naponu električnog luka, a najčešće odgovara promjeru netaljive elektrode. Kako je po definiciji nositelj električni luk intenzivno izbijanje u smjesi plinova i para, slijedi da je glavni nosilac ionizacije kod ovog postupka zavarivanja upravo zaštitni plin, a o njemu ovisi također i uspostava i stabilnost luka [12].

Osnovne prednosti TIG postupka su koncentriranost električnog luka, smanjena zona utjecaja topline, nema prskanja, nema troske, minimalna količina štetnih plinova, zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura, mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala, mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima, mogućnost zavarivanja pozicija male debljine, pogodno za izvođenje reparaturnih radova, pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom, odličan izgled zavarenog spoja [12].

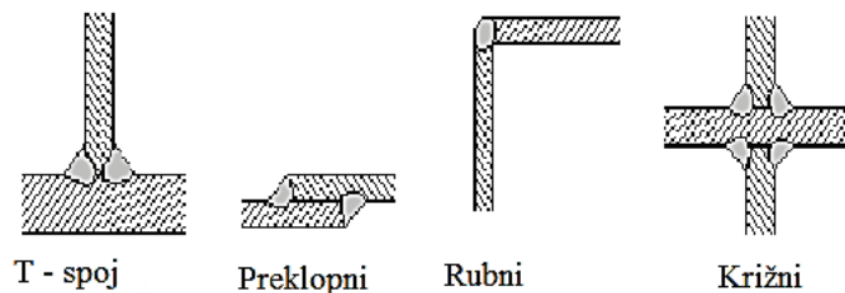
Osnovni nedostaci TIG postupka su mala brzina zavarivanja, mali depozit dodatnog materijala, viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova, duža izobrazba zavarivača, otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima, potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod izvođenja zavarivanja u skućenim prostorima, pojačana svjetlost i UV zračenje. Slikom 4 shematski je prikazan proces zavarivanja netaljivom elektrodom [12].

TIG postupak zavarivanja vrlo je svestran i može se koristiti za zavarivanje bilo kojeg metala ili sustava legura u širokom rasponu debljina, ali je obično ograničen do 10 mm i ispod iz ekonomskih razloga. To je posebno prikladno za zavarivanje limova i za korijenski navoj u cijevnim zavarenim spojevima [15].



Slika 4. Shematski prikaz postupka TIG zavarivanja: 1 – netaljiva elektroda, 2 – sapnica gorionika, 3 – električni luk, 4 – rastaljeni materijal, 5 – osnovni materijal, 6 – dodatni materijal, 7 – visokofrekventni generator, 8 – izvor struje [12]

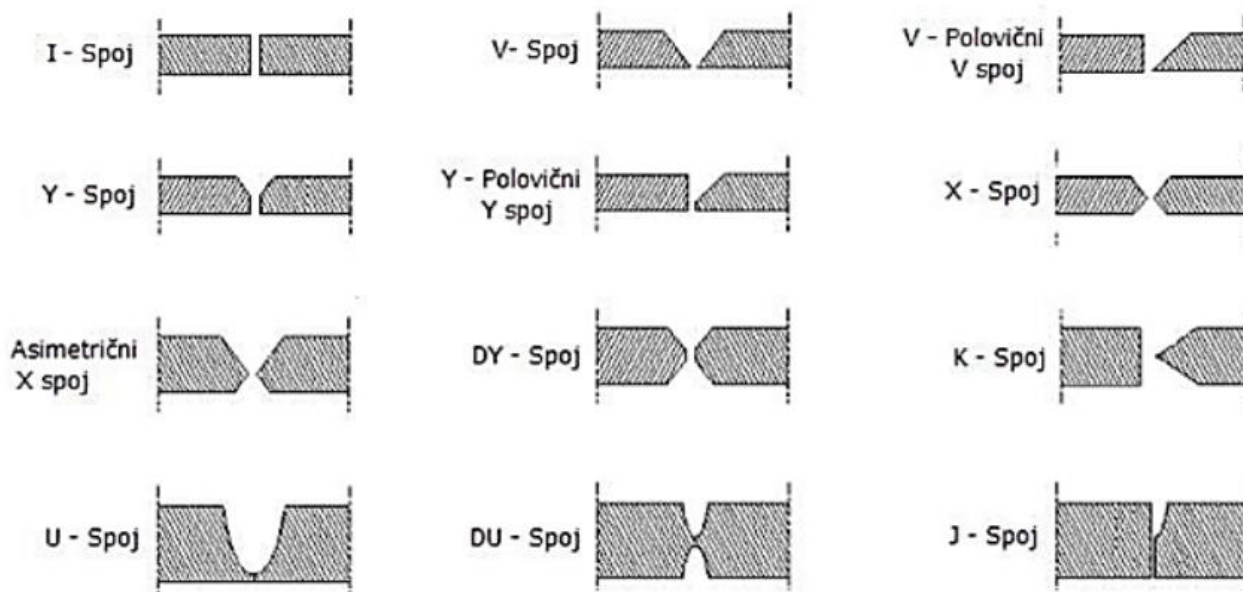
Fotografija uspostave električnog luka visokofrekventnim generatorom [13].



Slika 5. Varijante kutnih zavarenih spojeva [13]

2.4.2. Priprema spoja za zavarivanje

Priprema žlijeba zavarenog spoja može se izvoditi različitim postupcima rezanja ili mehaničkom obradom, pri čemu sredstvo, odnosno alat, kojim se provodi postupak može biti vođeno ručno ili mehanički. Kod visokih tehničkih zahtjeva spojevi se strojno obrađuju ili se postupak robotizira. Izbor oblika zavarenog spoja za zavarivanje ovisi o nizu čimbenika, od kojih su najvažniji debljina i vrsta materijala, položaj i postupak zavarivanja te vrsta spoja. Tri su osnovne skupine zavarenih spojeva: sučeljeni, kutni i naliježući. Prikaz najčešće korištenih spojeva dan je slikom 6 [13].



Slika 6. Prikaz oblika obrade spojeva prije zavarivanja [13]

2.4.3. Netaljiva elektroda i dodatni materijal

Netaljiva elektroda služi za uspostavu električnog luka između gorionika i radnog materijala, tj. kao provodnik električne struje. Budući da se ne tali, njezino trošenje isključivo je povezano s oblikovanjem njezine geometrije brušenjem ili eventualno oštećenjima zbog nepravilne tehnike rada. Prosječni vijek trajanja netaljive elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Elektrode se izrađuju od volframa, metala velike gustoće i tališta 3422 °C. Elektrode se izrađuju u promjerima 0,5; 1,0; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0; 6,4 i 8,0 mm, a duljine najčešće 150 mm. Priprema elektrode se sastoji od zaobljena ili zašiljenja vrha prilikom čega treba imati na umu da geometrija netaljive elektrode direktno utječe na geometriju električnog luka. Zaobljeni vrh elektrode koristi se uglavnom kod zavarivanja aluminija, magnezija i njihovih legura. Ostali materijali zahtijevaju šiljatu geometriju vrha elektrode [12].

Izvođenje TIG zavarivanja moguće je s ili bez dodatnog materijala. Zavarivanje bez dodatnog materijala (pretaljivanje) upotrebljava se najčešće do debljina cca 3 mm. Ukoliko postoji potreba za dodatnim materijalom on se dodaje ručno ili automatizirano. Kod ručnog dodavanja materijala u zavareni spoj govori se o šipkama različitih promjera i duljine cca 915 mm. Kod automatiziranog dodavanja dodatnog materijala dodatni materijal se mehanizirano dovodi do rastaljenog osnovnog materijala u "hladnom" ("cold wire") ili predgrijanom stanju ("hot wire"). Osnovna prednost ovakvog načina dovođenja dodatnog materijala kod TIG zavarivanja je znatno povećanje produktivnosti procesa (veća količina depozita) [12]. Kod TIG postupka zavarivanja elektroda je izrađena da izdrži visoke temperature. Elektroda i rastaljeni metal zaštićeni su od atmosferskih utjecaja strujom inertnog plina koja teče uokolo elektroda i usmjerava se na zavareni spoj [16].

2.4.4. Oprema za zavarivanje netaljivom elektrodom

Osnovni dijelovi konvencionalnog uređaja za TIG postupak zavarivanja su: izvor struje za zavarivanje, vodiči struje i plina, gorionik, sustav za hlađenje, sustav za dovođenje zaštitnog plina. Iako je TIG postupak zavarivanja elektrolučni postupak s čestom primjenom u praksi, baš kao i kod ostalih postupaka zavarivanja primjetan je konstantan razvoj opreme za zavarivanje te njezino unapređenje u cilju smanjenja nekih nedostataka ili poboljšanja kvalitete zavarenog spoja. Izvori struje za zavarivanje imaju strmopadajuću karakteristiku pošto se zavarivanje uglavnom izvodi ručno.

Osnovne karakteristike izvora struje su vrsta struje zavarivanja (AC/DC, impulsna), mogućnost visokofrekventnog paljenja luka, raspon struje zavarivanja, priključni napon, mogućnosti upravljanja parametrima (početna i završna struja, predplin, završni plin, upravljanje impulsima, frekvencijom itd.). Važan dio gorionika jest i vanjska sapnica. Ona direktno utječe na karakteristike zaštite metala zavara, ali i netaljive elektrode. Konstrukcijski sapnica može utjecati i na turbolentnost zaštitnog plina. Vanjske sapnice izrađuju se najčešće od keramičkih materijala koji podnose visoke temperature [12]. Slikom 7 prikazani su dijelovi TIG gorionika.



Slika 7. Dijelovi TIG gorionika [8]

2.5. Zavarivanje nelegiranih čelika

Najvažniji element kod nelegiranih konstrukcijskih čelika je ugljik, čiji sadržaj je od 0,1 do 0,6%. Veća vlačna čvrstoća i granica razvlačenja nelegiranih čelika postižu se porastom sadržaja ugljika. Sadržaj ostalih elemenata za ovu skupinu čelika je silicij < 0,5%, mangan < 0,8%, aluminij < 0,1%, titanij < 0,1%, sumpor < 0,035%, bakar < 0,25%. Ugljik je najutjecajniji element na zavarljivost čelika. Ugljični čelici sa sadržajem ugljika $\leq 0,20\%$ tj. $C_E \leq 0,45$ i debljinom materijala ispod 25 mm ne zahtijevaju predgrijavanje [17].

Bitan čimbenik koji utječe na zavarljivost čelika je i način njegove proizvodnje. Neumireni čelici nemaju jednoličnu mikrostrukturu po presjeku i znatan dio kisika je vezan na željezne okside. Ti oksidi imaju nisku točku taljenja i počinju se otapati u unutarnjem dijelu zavarenog spoja. Oslobođeni kisik može izazvati poroznost koja se toplim valjanjem zavari i kasnije se ne uočava. Neumireni čelici kao i čelici pri čijoj proizvodnji nije korišteno magnetno miješanje,

dovode do tzv. središnji segregacija ugljika ili nekih drugih elemenata i stoga se ne bi trebali koristiti za zahtjevnije konstrukcije. Te zone kasnije dovode do brojnih problema (zakaljena mikrostruktura, krhkost itd.) [17].

Poluumireni (s aluminijem) ili umireni (aluminij + silicij) čelici su skuplji, ali ne ostavljaju slične posljedice. Oni su zavarljivi, a posebno je veća udarna žilavost, odnosno lomna žilavost. Treba naglasiti da i visok sadržaj silicija (~ 0,5% silicija) povećava osjetljivost konstrukcijskih čelika na tople pukotine. Za čelike sa sadržajem ugljika više od > 0,25% zavarljivost je uvjetna, pa je nužno provoditi određene tehnološke postupke za dobivanje željenih svojstava i smanjenje vjerojatnosti pojave pukotina. Neke od mjera koje su potrebne za kvalitetno zavarivanje nelegiranih konstrukcijskih čelika su: predgrijavanje, zavarivanje s većim unosom topline, primjena bazičnih elektroda, optimalno oblikovanje konstrukcije, te popuštanje zaostalih napetosti [17].

2.5.1. Predgrijavanje čelika

Temperatura predgrijavanja čelika ovisi o sadržaju ugljika i ostalih elemenata, debljini stijenke, napetosti i sadržaju difuzijskog vodika. Predgrijavanje čelika podrazumijeva zagrijavanje iznad temperature okoliša prije početka zavarivanja te održavanje te temperature tijekom zavarivanja [17]. Najčešće se (za nelegirane, niskolegirane i visokočvrste čelike) predgrijavanje provodi radi izbjegavanja nastanka hladnih pukotina. Predgrijavanjem se postiže smanjenje brzine hlađenja zone utjecaja topline i zone taljenja (smanjuje se sadržaj nastalih tvrdih faza), izlazak difuzijskog vodika te se smanjuju zaostala naprezanja.

Je li uopće potrebno i na kojoj temperaturi materijal valja predgrijati, određuje se na temelju iskustva, pokusa ispitivanja, sklonosti hladnim pukotinama (mjeri se veličina i broj pukotina), klasifikacijom (atestom) postupka, proračuna temperature predgrijavanja i sl. U slučaju predgrijavanja potrebno je zagrijati šire područje zavarivanja (3-4 debljine lima sa svake strane spoja) na temperaturu predgrijavanja. Brzina zagrijavanja na temperaturu predgrijavanja ne treba biti velika, jer bi moglo doći do većih toplinskih naprezanja. Zagrijavanje i održavanje temperature predgrijavanja najpovoljnije je elektrootpornim ili indukcijskim uređajima.

2.5.2. Primjena bazičnih elektroda i optimalno oblikovanje konstrukcije

Spoj zavaren s bazičnim elektrodama ima veće parametre plastičnosti (istezljivost i udarnu žilavost), a time i manju mogućnost pojave pukotina [17]. Ovom mjerom mogu se smanjiti napetosti i debljina korištenog materijala kao posljedica izbora čelika sa što nižim sadržajem sumpora i fosfora. Takvi su čelici otporniji na pojavu toplih pukotina, pukotina zbog naponske korozije itd. [17].

2.5.3. Popuštanje zaostalih naprezanja

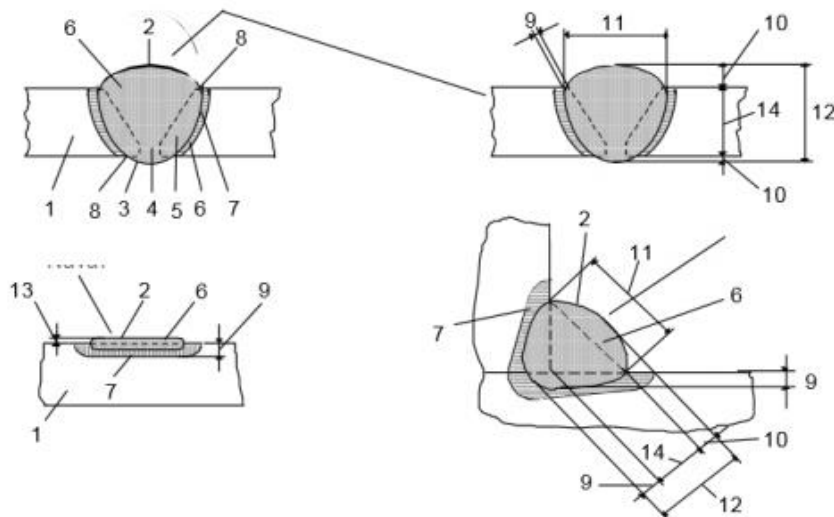
Ovu mjeru treba primijeniti posebno za deblje zavarene proizvode (gdje su prisutna zaostala troosna naprezanja i sklonosti krhkom lomu). Žarenje se obično provodi na 550-650 °C u vremenu od 2 minute po jednom milimetru debljine materijala. Popuštanje zaostalih naprezanja moguće je provoditi i mehaničkim obradama (vibracijama, prednaprežanjem i eksplozijom). Za zavarivanje konstrukcijskih čelika bira se dodatni materijal sličnog kemijskog sastava kao i osnovni materijal. Za povećanje žilavost, potrebno na temperaturama ispod 0 °C, mogu se koristiti i elektrode s 0.5 % molibdena. Primjeri elektroda za zavarivanje prema HRN EN 499 armco željeza i čelika s niskim sadržajem ugljika je E 35 A RR 12 (EZ-12RA), a za zavarivanje konstrukcijskih čelika (Č0261 do Č0563), kotlovskih limova (Č1202, Č1204, Č3130), čelika za cijevi (Č0146 do Č0148) brodskih limova (A, B, D, AH 32 do DH 36) su E 38 O RR12(EZ-11F), E 35 O RR 12 (EZ- 5KSP), E 42 O RR 53 (EZ-8RC) itd. [17].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Priprema zavarenog spoja

Prije zavarivanja uzorka napravljena je vrlo dobra priprema, prvi korak bio je rezanje cijevi (uzorka). Rezanje je izvedeno s tračnom pilom za rezanje metala, nakon rezanja na željenu dužinu cijev je kutnom brusilicom dodatno brušena u tzv. V-spoj pri čemu se područje oko mjesta zavarivanja pomno brusilo zbog otklanjanja nečistoća i produkata oksidacije. Nakon što su izvršene operacije potrebne za izvođenje korijenskog zavara, cijevi su pozicionirane na radni stol i osiguran je pravilan razmak između cijevi te se započelo sa zavarivanjem.

Slikom 8 prikazana je priprema i oblik žljeba koja se određuje prema standardima kao što su API, ASME, EN, DIN, HRN, a odnose se na: osnovni materijal (1), lice zavara (2), naličje zavara (3), korijen zavara (4), granicu taljenja (5), zonu taljenja (6), zonu utjecaja topline (7), rub zavara tj. liniju zavara između lica i osnovnog materijala (8), dubinu uvara (9), nadvišenje lica zavara i nadvišenje u korijenu zavara (10), širinu zavara (11), debljinu zavara (12), debljinu navara (13) i proračunsku debljinu zavara (14) [18].



Slika 8. Osnovni elementi žljeba i zavarenog spoja [18]

3.2. Zavarivanje čelika TIG postupkom

Zavarivanje cijevi iz niskougličnog čelika izvedeno je postupkom zavarivanja netaljivom elektrodom u radionici tvrtke HEP – Proizvodnja d.o.o. Osnovni materijal bila je valjana cijev za više temperature oznake Č.1214, DIN17175, W. Nr. 1.0305, st 35.8, EN-P235GH i kemijskog sastava: C: do 0,17 % ; Si: 0,10 - 0,35 % ; Mn: do 0,40 % . Pmax: 0,05 % ; Smax: 0,05, debljine stjenke 4 mm, a unutarnjeg promjera 41 mm. Postupak je podijeljen u faze koje su uvjetovane primjenjenim postupcima zavarivanja netaljivom elektrodom i dimenzijama te svojstvima korištenih materijala.

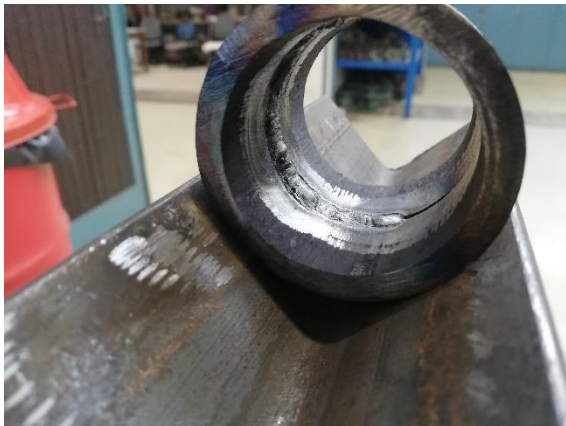
Debljina stjenke cijevi uvjetovala je da zavareni spoj bude izveden u tri prolaza. Priprema je izvedena kao V- spoj te je cijev zavarena u sva tri prolaza na vodoravnoj površini u razmaku od 3 mm. Dodatni materijal korišten za zavarivanje cijevi (korijena, popune i završnog sloja) bila je žica oznake AWS A5.28 ER70S-A1, kemijskog sastava: ugljik - 0,12 mangan - 1,3 P - 0,025 sumpor - 0,025 silicij - 0,3 - 0,7 krom, nikal - 0,2 molibden - 0,4 - 0,65 bakar - 0,35.

Smjer zavarivanja je bio s donje strane (odozdo) prema naviše (gore). Nakon zavarivanja polovice zavarenog spoja s netaljivom elektrodom prelazi se na drugu stranu cijevi gdje je smjer zavarivanja također bio identičan kao i na početku (odozdo) prema naviše (gore). Slikom 9 prikazana je cijev iz niskougličnog čelika st 35.8 pripremljena za zavarivanje.



Slika 9. Fotografija pripremljenog osnovnog materijala za zavarivanje

Slika 10 prikazuje djelomičan korijen zavara i konačan rezultat zavarivanja i postizanja zavarenog spoja.



a)



b)

Slika 10. Fotografija korjena zavara a) i konačnog zavarenog spoja b)

3.3. Metalografska priprema

Uzorci zavarenog spoja niskougličnog čelika st 35.8 su izrezani uz hlađenje vodom na uređaju Isomet Buehler koji je prikazan na slici 11. Tijekom rezanja uzorci se hlade emulzijom da se spriječi promjena strukture zbog povišene temperature na uzorku.



Slika 11. Fotografija uređaja za rezanje uzoraka Isomet Buehler

Brušenje i poliranje tj. metalografska priprema uzorka provedeno je nakon izrezivanja. Brušenje uzorka provedeno je strojno na uređaju Phoenix Beta Buehler uz konstantno hlađenje vodom, slika 12.

Korišten je brusni papir (SiC) gradacije 120, 240, 400 i 600 uz konstantno hlađenje vodom da bi se spriječilo zagrijavanje uzorka. Brzina brušenja uzorka je bila 150 rpm, pod tlačnom silom od 30 N. Vrijeme brušenja je bilo 5 minuta za svaku gradaciju papira uz 150 - 200 okretaja podloge (rotacijskog diska) u minuti i tlačnu silu (opterećenje uzorka) od 30 N.

Poliranje se provodilo na posebnoj podlozi od "filca" uz dodatak vodene otopine glinice (Al_2O_3 ; $0,3 \mu\text{m}$). Ispiranje uzorka se provodilo običnom vodom nakon poliranja uz čišćenje alkoholom. Sušenje uzorka bilo je vrućim zrakom. Vrijeme poliranja uzorka nakon brušenja je trajalo cca. 10 minuta.

Poslije poliranja uzorak je nagrižen otopinom nitala (otopina dušične kiseline i alkohola) u trajanju od 2 sekunde. Slikom 12 je prikazan uređaj za brušenje i poliranje Phoenix Beta Buehler.



Slika 12. Fotografija uređaja za brušenje i poliranje Phoenix Beta Buehler

Za metalografsku analizu mikrostrukture uzorka korišten je optički (svjetlosni) mikroskop proizvođača Olympus BX 61s s mogućnošću povećanja od 50X do 1000X koji je prikazan na slici 13. Mikroskop je opremljen integriranom kamerom i povezan s računalom.



Slika 13. Fotografija optičkog mikroskopa proizvođača Olympus BX61

3.4. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća je ispitivana Vickersovom metodom na uređaju prikazanom na slici 14.



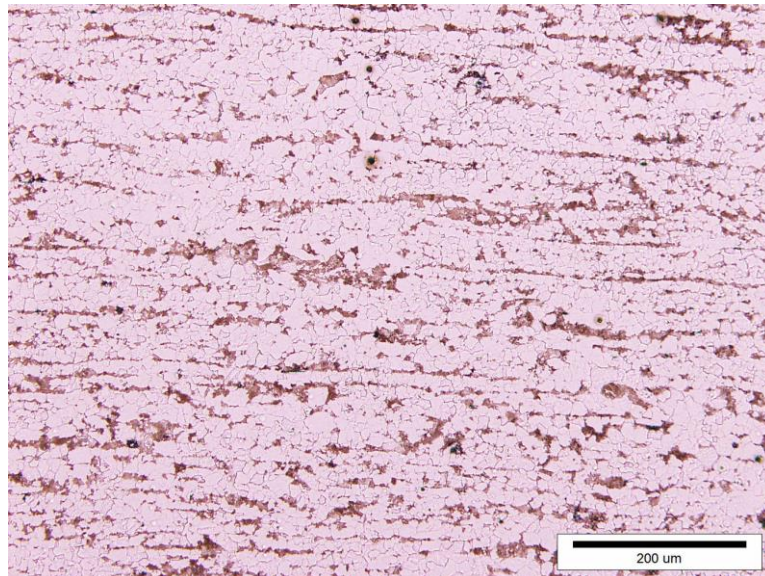
Slika 14. Fotografija uređaja za ispitivanje tvrdoće po Vickersu

Tvrdoća po Vickersu (oznaka: HV) je mjera otpornosti što ga neki materijal pruža prodiranju dijamanatne četverostrane piramide s vršnim kutom od 136° , opterećene silom F (N). Taj je vršni kut odabran prema čeličnoj kuglici promjera D (mm), koja se koristi kod ispitivanja tvrdoće po Brinellu, a ostavlja udubljenje promjera $d = 0,375 D$ (to odgovara prosječnoj vrijednosti donje i gornje granice promjera udubljenja, koje se kreće od 0,25 do 0,5 promjera kuglice D , unutar kojih su upotrebljivi rezultati ispitivanja tvrdoće po Brinellu). Udubljenje piramide daje kvadrat na površini uzorka, ali zbog netočnosti rada, nesavršenosti uzorka i sličnog (često puta je kvadrat iskrivljen), mjere se obje dijagonale kvadrata (d_1 i d_2) i uzima se srednja vrijednost dijagonale d . Zbog toga se rezultati ispitivanja tvrdoće po Brinellu i tvrdoće po Vickersu dobro podudaraju do 4500 N/mm^2 [8].

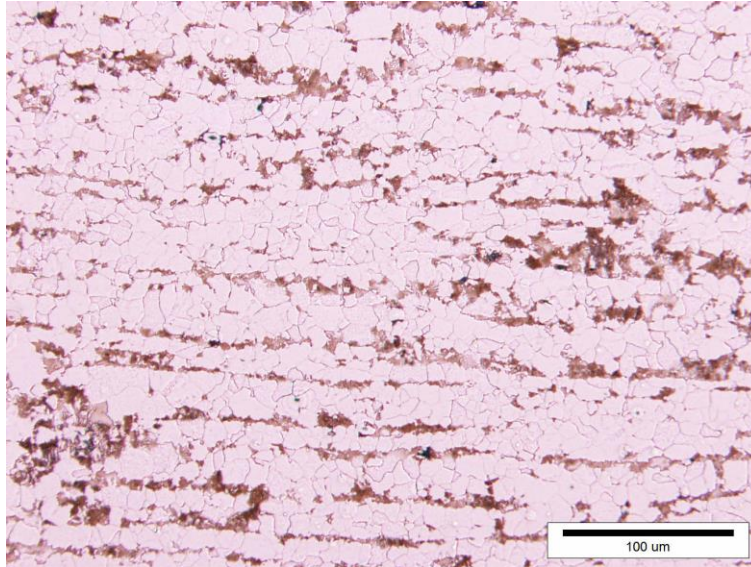
Tvrdoća po Vickersu je razvijena u tvrtci Vickers Ltd., kao zamjena za ispitivanja tvrdoće po Brinellu. Tvrdoća po Vickersu (oznaka: HV) iskazuje se kao naprezanje na površini udubljenja. Mjerilo tvrdoće po Vickersu je odnos sile ispitivanja i površine otiska dijamanatne četverostrane piramide s kutom od 136° i kvadratnom osnovom na površini ispitivanog uzorka.

4. REZULTATI I RASPRAVA

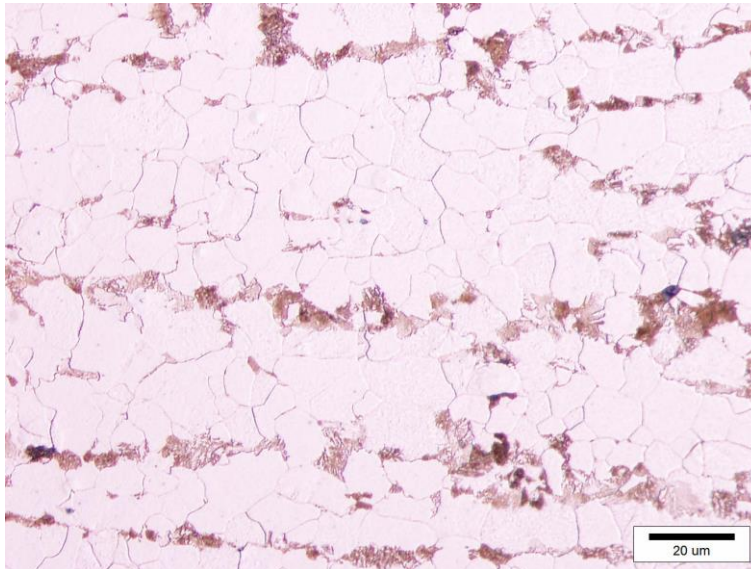
Slikama 15-17 prikazane su optičke mikrografije osnovnog materijala, zone taljenja i zone utjecaja topline. Optičke mikrografije su snimane pri različitim povećanjima (200X-1000X) i pri različitim pozicijama. U ovom završnom radu su prikazane samo neke odabrane pozicije. Analizom dobivenih mikrografija može se uočiti feritno-perlitna mikrostruktura osnovnog materijala sa zrnima izduženim u smjeru valjanja (slika 15). Budući istraživani čelik pripada skupini podeutektoidnih niskougličnih nelegiranih čelika u mikrostrukturi je zamijećen znatno viši udio ferita nego perlita. Tijekom proizvodnje čelika najvažnije reakcije se odnose na raspad iz austenitnog područja kod različitih brzina hlađenja. Polagano hlađenje podeutektoidnog čelika karakterizira to da na temperaturi iznad 800 °C čelik ima austenitnu mikrostrukturu. Na temperaturi malo iznad 723 °C mikrostruktura tog istog čelika se sastoji od ferita i austenita. Međutim, na temperaturi ispod 723 °C austenit se pretvara u perlit, pa se mikrostruktura sastoji od ferita i perlita. Pritom perlit predstavlja eutektoidnu mješavinu ferita i cementita. Lamelarna struktura perlita sastoji se od bijele feritne osnove ili matrice (koja čini većinu eutektoidne mješavine) i tankih pločica cementita. Zona utjecaja topline (slika 17) pokazuju također feritno-perlitnu mikrostrukturu s mjestimično prisutnim Widmanstattenovim feritom po granicama primarnih austenitnih zrna. U zoni utjecaja topline nije zamijećena značajna promjena veličine zrna. Nasuprot tome, u zoni taljenja zamijećena je lijevana mikrostruktura koja se sastoji od ferita i bainita (slika 16).



(a)

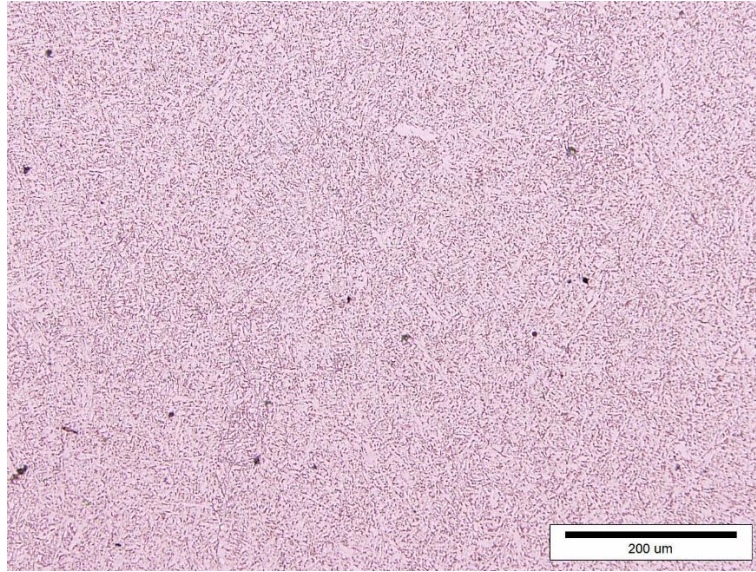


(b)

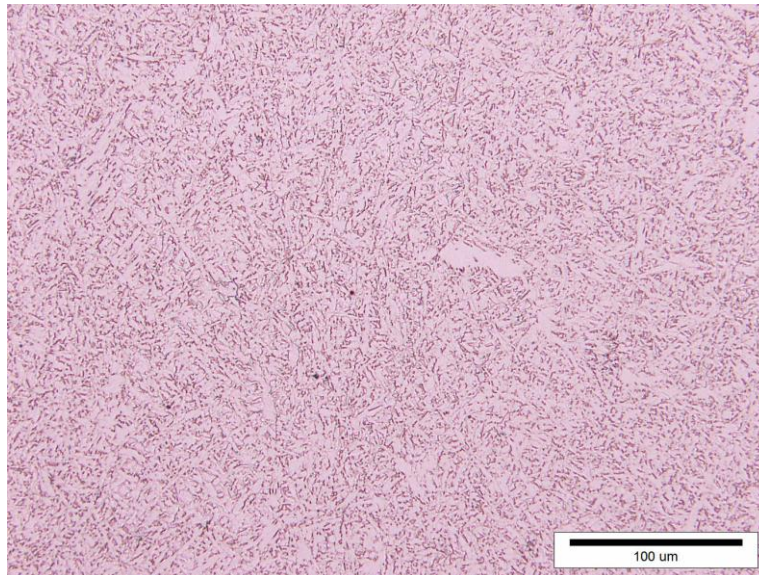


(c)

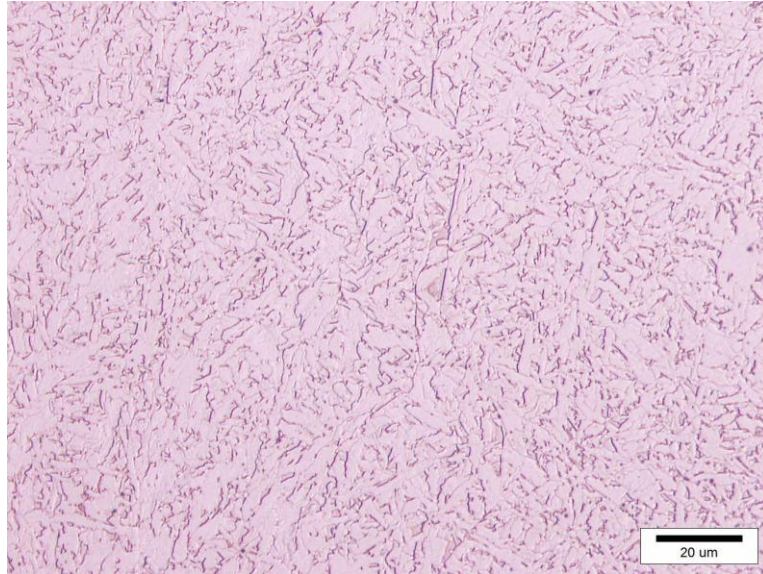
Slika 15. Optičke mikrografije osnovnog materijala pri različitim povećanjima
a) povećanje 200X, b) povećanje 500X, c) povećanje 1000X



(a)

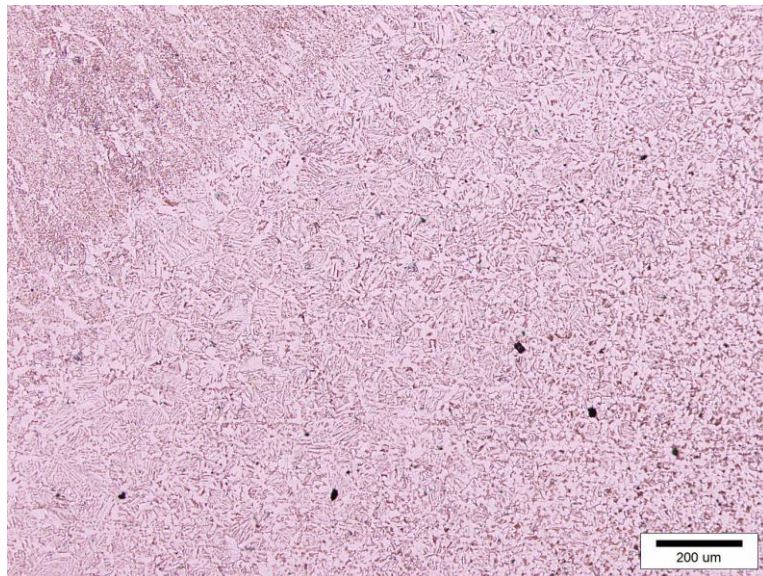


(b)

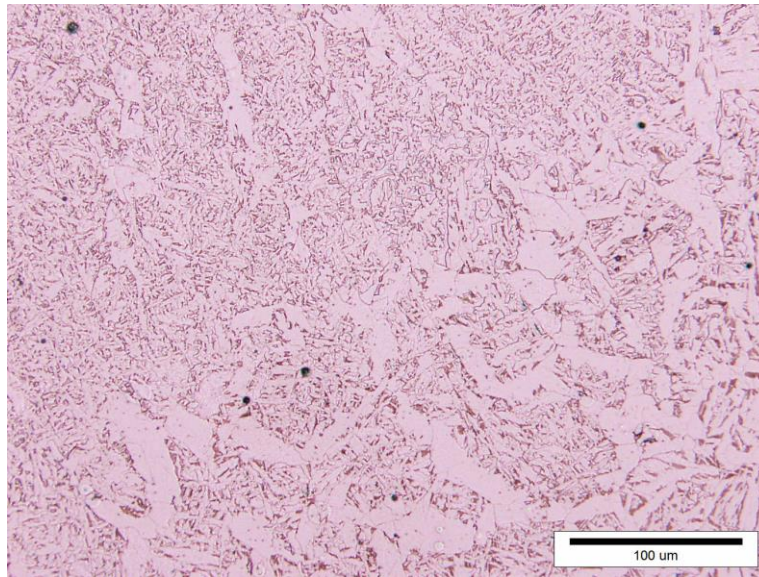


(c)

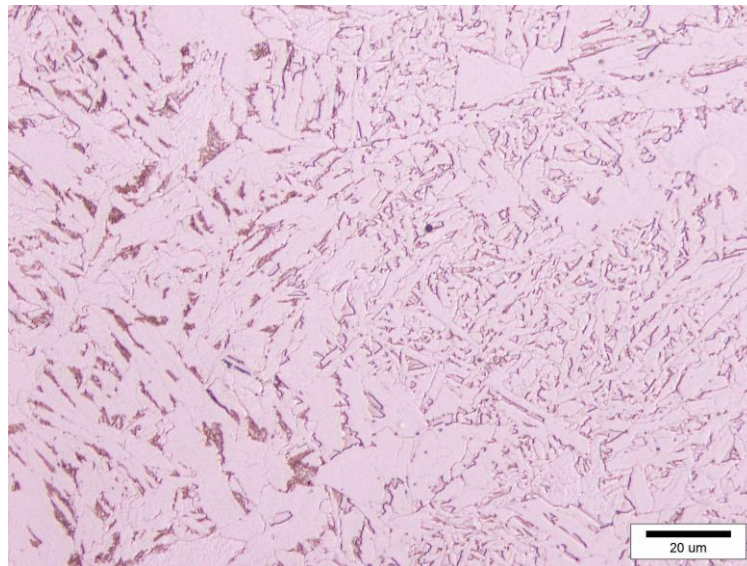
Slika 16. Optičke mikrografije zone taljenja pri različitim povećanjima
a) povećanje 200X, b) povećanje 500X, c) povećanje 1000X



(a)



(b)



(c)

Slika 17. Optičke mikrofografije zone utjecaja topline pri različitim povećanjima
a) povećanje 200X, b) povećanje 500X, c) povećanje 1000X

U tablici 1 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće. Tvrdoća je izmjerena na tri mjesta u osnovnom materijalu, zoni taljenja i zoni utjecaja topline. Detaljnom analizom dobivenih rezultata može se uočiti najmanja vrijednost tvrdoće kod osnovnog materijala (148,3 HV10). Zona taljenja je pokazala najveće vrijednosti tvrdoće (228,7 HV10), dok je tvrdoća zone utjecaja topline bila između vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala i zone taljenja te je iznosila 176,0 HV10. Može se zaključiti da je do porasta tvrdoće u zoni utjecaja topline došlo zbog unosa topline uslijed zavarivanja. Budući je tijekom zavarivanja zona taljenja bila u rastaljenom stanju te je tijekom hlađenja došlo do njenog skrućivanja i nastanka lijevane strukture (ferit i bainit) bilo je za očekivati da će ona imati i najveću tvrdoću.

Tablica 1. Rezultati mjerenja tvrdoće, HV10

Uzorak	Tvrdoća, HV10			Srednja vrijednost
	1	2	3	
Osnovni materijal (OM)	151	146	148	148,3
Zona taljenja (ZT)	225	230	231	228,7
Zona utjecaja topline (ZUT)	176	172	180	176,0

5. ZAKLJUČAK

Na temelju proučavanja teorijskih spoznaja o različitim tehnikama zavarivanja i provedenoj analizi mikrostrukture i tvrdoće zavarenog niskougličnog čelika st 35.8 (Č.1214, DIN17175, W. Nr. 1.0305, EN-P235GH) može se zaključiti sljedeće:

- Zavarivanje je najšire primjenjiva tehnika spajanja metalnih konstrukcija kojom se spaja dva ili više dijelova sa ili bez dodatnog materijala radi dobivanja kontinuiranog nerastavljivog spoja jednoličnih svojstava.
- Zavareni spoj se sastoji od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT).
- Od svih postupaka zavarivanja najviše rasprostranjeno je elektrolučno zavarivanje.
- Postupak zavarivanja netaljivom elektrodom (TIG) je elektrolučni postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (argon, helij) ili rjeđe smjesi plinova.
- Optičke mikrografije ukazuju na feritno-perlitnu mikrostrukturu osnovnog materijala.
- Feritno-perlitna mikrostruktura s mjestimično prisutnim Widmanstattenovim feritom po granicama primarnih austenitnih zrna uočena je i u zoni utjecaja topline.
- Zona taljenja upućuje na lijevanu strukturu koja se sastoji od ferita i bainita.
- Zona taljenja je pokazala najveće vrijednosti tvrdoće (228,7 HV10), dok je tvrdoća zone utjecaja topline bila između vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala (148,3 HV10) i zone taljenja te je iznosila 176,0 HV10.

6. LITERATURA

1. RAM: Osnovni postupci zavarivanja, Rijeka, 2018.
<https://www.zavarivanje.info/cd/2689/osnovni-postupci-zavarivanja> (15.03.2021.)
2. M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki, Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Tehnički glasnik **8** (2014) 4, 426-432.
<https://hrcak.srce.hr/131573> (15.03.2021.)
3. J.F. Lancaster, Metallurgy of welding, George Allen & Unwin, London, 1980.
4. O. Gil, Welding engineering, Research World, New York, 2016.
5. Wikipedia: TIG postupak zavarivanja 2009 – 2018.
https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_TIG_postupkom (15.03.2021.)
6. Welding - Definition, processes and types of welds
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-welding> (15.03.2021.)
7. Die vier Handschweiß Prozesse, Arten von schweissen
<https://www.schweissen.blog/post/artikel/2018/08/03/welche-arten-von-schweissen-gibt-es> (15.03.2021.)
8. Chemie - Schweissen
<https://www.chemie.de/lexikon/Schwei%C3%9Fen.html> (15.03.2021.)
9. Würth MIG/MAG zavarivanje
http://wuerth.com.hr/UploadedFiles/brosure-akcije/Zavarivanje_2018.pdf (15.03.2021.)
10. MIG-MAG-Schweißen
https://www.hdb-schweiss-shop.de/Schweissen-Grundlagen:_:10.html?language=en (15.03.2021.)
11. L. Horvat, Smanjenje pojave prskanja pri zavarivanju malim strujama kod MIG/MAG postupka zavarivanja, Završni rad, Međimursko veleučilište u Čakovcu, Čakovec 2020.
<https://repositorij.mev.hr/islandora/object/mev%3A1200/datastream/PDF/view> (15.03.2021.)
12. I. Samardžić, D. Bogovac, T. Jorgić, K. Kovačić, Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija, Tehnički glasnik **9** (2015) 2, 202-208.
<https://hrcak.srce.hr/140768> (15.03.2021.)
13. Sigmat: Specijalizirana oprema za zavarivanje / TIG - oprema za zavarivanje,
<https://www.sigmat.hr/industrijska-oprema/zavarivanje/tig-oprema> (15.03.2021.)
14. Fronius: Perfect welding – TIG welding / THE MAGAZINE EDITION 2020.
<https://www.fronius.com/en-us/usa/welding-technology/info-centre/magazine/2017/tig-welding-old-welding-process-limelight> (15.03.2021.)
15. TIG welding BOC
https://www.boconline.co.uk/wcsstore/UK_BOC_Industrial_Ntl_Store/pdf/downloads/TIG-welding.pdf (15.03.2021.)
16. TIG welding - weldability
https://www.weldability-sif.com/media/docs/Intro_TIG_Welding.pdf (15.03.2021.)
17. M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak 2003.
18. N. Ibiši, Tehnologija zavarivanja i ispitivanje kvalitete zavarenog spoja bešavnih cijevi, Završni rad, Politehnika Pula - Visoka tehničko-poslovna škola s pravom javnosti, 2015.

7. ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Kristijan Jerković

Datum i mjesto rođenja: 17. svibnja 1987. Zenica BiH

Adresa: Branka Perice 1, 10000 Zagreb

Telefon: 098/902-7653

E-mail: kristijan87jerkovic@gmail.com

OBRAZOVANJE:

1992. – 2000. Osnovna škola Aueschule Finkenwerder, Hamburg, Njemačka

2002. – 2005. Srednja škola Isidora Kršnjavoga Našice, smjer bravar, Našice

2014. – 2015. Pučko otvoreno učilište Zagreb, smjer tehničar zaštite osoba i imovine, Zagreb

2018. – 2021. Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni stručni izvanredni studij ljevarstva, Sisak.

VJEŠTINE:

21.8.2005. – 21.2.2006. Odsluženi redovni vojni rok, Virovitica rod; Topništvo

Strani jezik: Engleski i Njemački jezik

Računalne vještine: MS Office, Internet

Ostale vještine: Vozački ispiti A i B kategorija, certificirani TIG zavarivač.