Analiza svojstva zavarenog spoja čelika 10CrMo9-10 MAG postupkom

Brković, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:903805

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Brković

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing. Nikola Brković

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju i strpljenju te vođenju kroz izradu završnog rada.

Posebno hvala asistentici dr. sc. Maji Jurici, mag. ing. na velikoj pomoći, strpljenju i stručnom vođenju te svim korisnim savjetima tijekom izrade završnog rada.

Također, zahvaljujem roditeljima i sestri na podršci tijekom cijelog preddiplomskog studija.

Nikola Brković

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **NIKOLA BRKOVIĆ** Mat. br.: 0035205428

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA ČELIKA 10CrMo9-10 MAG POSTUPKOM**

Naslov rada na engleskom jeziku: **10CrMo9-10 GMAW WELD JOINT PROPERTIES ANALYSIS**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu zadatka potrebno je ukratko opisati MAG postupak zavarivanja s posebnim osvrtom na specifičnosti zavarivanja niskolegiranih čelika za rad na visokim i povišenim temperaturama. Detaljno opisati i analizirati niskolegirani 10CrMo9-10 čelik te navesti primjenu istog. Navesti koji se postupci zavarivanja koriste pri zavarivanju čelika za rad na povišenim temperaturama s povećanom otpornošću na puzanje.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno za lim odgovarajuće debljine definirati tehnologiju zavarivanja kao i eventualno potrebnu naknadnu toplinsku obradu zavarenog spoja. Dobiveni zavareni spoj potrebno je podvrgnuti ispitivanjima mehaničkih svojstava kao i analizi geometrijskih karakteristika. Pomoću dobivenih rezultata potrebno je ocijeniti adekvatnost odabranih parametara zavarivanja (i eventualne naknadne toplinske obrade) prema kriterijima iz norme HRN EN ISO 15614-2.

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

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA IV

POPIS OZNAKA V

POPIS KRATICA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA 2

2.1. Općenito o postupku 2

2.2. Žice kod MAG zavarivanja 4

2.3. Uređaj i pribor 4

2.4. Zaštitni plinovi 6

2.5 Parametri 7

2.5.1. Jakost struje zavarivanja 7

2.5.2. Napon zavarivanja 8

2.5.3. Brzina zavarivanja 8

2.5.4. Slobodni kraj žice 8

2.5.5. Induktivitet 9

2.5.6. Tehnika rada 9

2.6. Načini prijenosa metala 10

2.6.1. Prijenos metala kratkim spojevima 10

2.6.2. Prijenos metala štrcajućim lukom 11

2.6.3. Prijenos metala prijelaznim lukom 11

2.6.4. Prijenos metala impulsnim lukom 11

3. ČELICI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA 13

3.1. Promjene svojstva materijala pri povišenim temperaturama 14
3.1.1. Puzanje materijala 15
4. NISKOLEGIRANI ČELICI 18
4.1. Niskolegirani CrMo čelici 19
4.2. Kemijski sastav i mehanička svojstva 10CrMo9-10 čelika 19
4.3. Mikrostruktura 10CrMo9-10 čelika 20
5. ZAVARLJIVOST 10CrMo9-10 ČELIKA 23
5.1. Promjene mikrostrukture u zoni utjecaja topline 23
5.2. Posljedice zavarivanja 25
5.2.1. Zaostala naprezanja 25
5.2.2. Tople pukotine 25
5.2.3. Vodikove pukotine 26
5.3. Toplinska obrada 26
5.3.1. Predgrijavanje 26
5.3.2. Održavanje međuprolazne temperature 26
5.3.3. Naknadna toplinska obrada 27
6. EKSPERIMENTALNI DIO 28
6.1. Osnovni i dodatni materijal 28
6.1.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva osnovnog materijala 28
6.1.2. Kemijski sastav i mehanička svojstva dodatnog materijala 28
6.2. Zavarivanje uzorka 29
6.3. Analiza makroizbruska i mikrostrukture 30
6.4. Mjerenje tvrdoće 34
7. ZAKLJUČAK 37
LITERATURA 38
PRILOZI 40

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema MAG postupka [2] 2
Slika 2. Presjeci praškom punjenih žica [1] 4
Slika 3. Prikaz opreme za MAG zavarivanje [5] 5
Slika 4. Prikaz završnog dijela pištolja za MAG zavarivanje [5] 6
Slika 5. Utjecaj plina na geometriju zavara [1] 7
Slika 6. Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zavara [8] 8
Slika 7. Utjecaj slobodnog kraja žice na profil zavara [8] 9
Slika 8. Prikaz tehnika rada [10] 10
Slika 9. Promjena struje u ovisnosti o vremenu [1] 12
Slika 10. Prikaz ovisnosti statičke izdržljivosti o radnoj temperaturi [13] 14
Slika 11. Promjena mehaničkih svojstava s povišenjem temperature [12] 15
Slika 12. Dijagram puzanja [14] 16
Slika 13. Utjecaj legirnih elemenata na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim temperaturama [15] 17
Slika 14. Niskolegirani čelici za rad pri radnim temperaturama nižim od 550 ^{O}C [12] 18
Slika 15. Mikrostruktura 10CrMo9-10 čelika u početnom stanju [19] 21
Slika 16. Mikrostruktura 10CrMo9-10 čelika nakon normalizacije i popuštanja pri 500 ^{O}C u trajanju od 1h [20] 21
Slika 17. Osnovna područja zavarenog spoja [13] 23
Slika 18. ZUT 10CrMo-9-10 čelika 24
Slika 19. Oblikovanje pripreme spoja 29
Slika 20. Redoslijed zavarivanja spoja 30
Slika 21. Mikroskop (Olympus GX51) 31
Slika 22. Oprema za slikanje makroizbruska (Kaiser RS2 + Canon) 31
Slika 23. Uređaj za brušenje (Nintech 233) 32
Slika 24. Prikaz makrostrukture uzorka 32
Slika 25. Prikaz mikrostrukture osnovnog materijala 33
Slika 26. Prikaz mikrostrukture ZUT-a 33
Slika 27. Prikaz mikrostrukture metala zavara 34
Slika 28. Tvrdomjer Reicherter TM12 [5] 35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav 10CrMo9-10 čelika[17] 19
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika 10CrMo9-10 [18] 20
Tablica 3. Kemijski sastav osnovnog materijala 28
Tablica 4. Mehanička svojstva osnovnog materijala 28
Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala 29
Tablica 6. Mehanička svojstva dodatnog materijala 29
Tablica 7. Parametri zavarivanja 30
Tablica 8. Rezultati dobiveni mjerenjem tvrdoće 36

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezljivost
E	MPa	Modul elastičnosti
I	A	Jakost stuje zavarivanja
KV	J	Udarni rad loma
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
$R_{p1/10000}$	N/mm^2	Granica puzanja
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
T	K	Temperatura
t	s	Vrijeme
U	V	Napon zavarivanja
ε	%	Deformacija, istezanje
ϑ	^{O}C	Temperatura
σ	N/mm^2	Naprezanje

POPIS KRATICA

Oznaka	**Opis**
ASME	Američko društvo inžinjera strojarstva
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale
B	Bor
Co	Kobalt
CO_2	Ugljični dioksid
Cr	Krom
Cu	Bakar
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Nb	Niobij
Ni	Nikal
OM	Osnovni materijal
P	Fosfor
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
S	Sumpor
Si	Silicij
Ti	Titanij
V	Vanadij
W	Volfram
Zr	Cirkonij
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U ovom završnom radu obrađena je analiza svojstva zavarenog spoja niskolegiranog čelika 10CrMo9-10 MAG postupkom. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu završnog rada opisan je MAG postupak zavarivanja i načini na koji se može izvoditi. Uz to obrađeni su i čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama te promjene do kojih dolazi prilikom rada na povišenim i visokim temperaturama. Poseban naglasak stavljen je na niskolegirani 10CrMo9-10 čelik koji je detaljno opisan. Nakon teorijskog dijela rada uslijedio je eksperimentalni dio.

U eksperimentalnom dijelu rada na spoju zavarenom MAG postupkom zavarivanja provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava i analizirane su geometrijske karakteristike zavarenog spoja. Ispitivanja obavljena u sklopu eksperimentalnog rada su: ispitivanje tvrdoće, ispitivanje mikrostrukture i makrostrukture.

Ključne riječi: MAG, čelici za rad pri povišenim i viskom temperaturama, CrMo čelik, zavarljivost.

SUMMARY

In this undergraduate thesis analysis of properties of welded joint of low-alloy 10CrMo9-10 steel with MAG method have been processed. The thesis consists of a theoretical and an experimental part.

The theoretical part of the final paper describes the MAG welding process and the ways in which it can be performed. In addition the high temperature resistant steels and changes that occur when working at elevated and high temperatures have been discussed. Special emphasis is placed on low-alloy 10CrMo9-10 steel which is described in detail. The theoretical part of the paper was followed by the experimental one.

In the experimental part of the work on a weld welded by the MAG welding process, tests of mechanical properties were performed and the geometric characteristics of the welded joint were analysed. The tests performed as part of the experimental work are: hardness testing and analysis of microstructure and macrostructure.

Key words: MAG, high temperature resistant steels, CrMo steel, weldability

1. UVOD

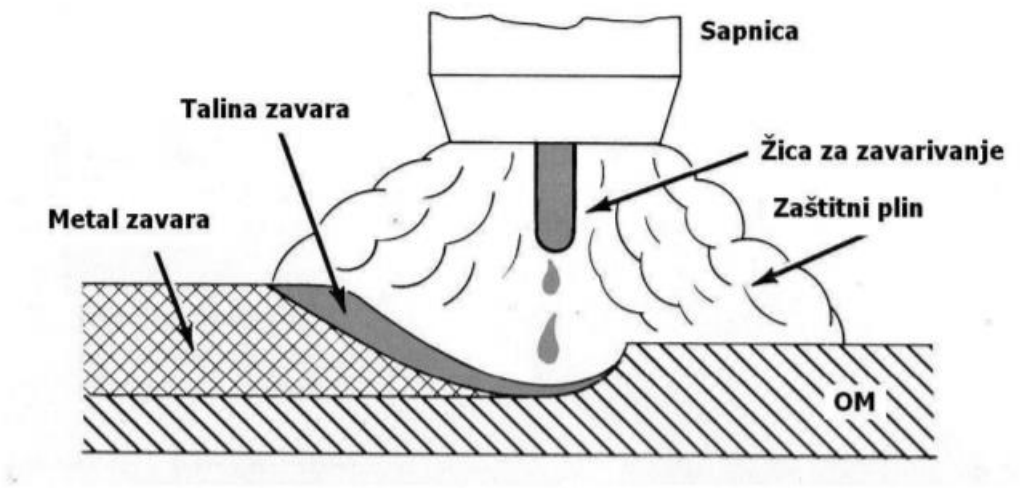
Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više materijala taljenjem ili pritiskom pri čemu se može koristiti dodatni materijal, ali i ne mora. Cilj zavarivanja je dobiti homogeni zavareni spoj. Zavarivanje je vrlo raširenо u današnjoj industriji i jedna je od najčešće primjenjivanih tehnologija spajanja metalnih materijala. Pojave novih izvora energije utjecale su na razvoj i pojavu novih postupaka zavarivanja. Danas postoji veliki broj različitih postupaka te njihovih varijanti. Jedan od poznatijih postupaka zavarivanja niskolegiranih čelika je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi, odnosno MAG postupak zavarivanja. Zbog svoje ekonomičnosti te mogućnosti da se ispune brojni zahtjevi kvalitete MAG zavarivanje primjenjuje se na različitim konstrukcijama kao što su: mostovi, automobili, brodogradnja, izrada strojeva, cjevovodi, spremnici. Čelici predstavljaju materijale koji imaju relativno visoku temperaturu tališta i bolju mehaničku otpornost pri povišenim temperaturama u odnosu na aluminij, bakar i njihove legure, stoga se koriste za rad pri povišenim temperaturama. Prilikom izbora materijala za dijelove koji su izloženi povišenim temperaturama najvažnija je mehanička otpornost. Željena svojstva dobivaju se legiranjem određenim elementima. [1, 12]

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MAG (*Metal Active Gas*) postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom, kontinuirano dobavljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina. Najčešći plin je ugljikov dioksid (CO_2), moguće je koristiti i mješavine ugljikovog dioksida sa argonom, helijem ili kisikom. [1]

2.1. Općenito o postupku

Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Žica istovremeno čini i elektrodu i dodatni materijal, odnosno njezinim taljenjem se popunjava pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski ili automatski. Poluautomatski postupak znači da je dodavanje žice mehanizirano a vođenje pištolja ručno. Kod automatskog postupka pištolj može biti pokretan nekim mehanizmom ili pištolj može biti fiksan, no onda radni komad ima mehanizirano gibanje. Slika 1 prikazuje shematski prikaz MAG postupka zavarivanja.



Slika 1. Shema MAG postupka [2]

Kao i ostali postupci tako i MAG postupak ima brojne prednosti i nedostatke. Prednosti [2]:

- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina
- zavarivanje u svim položajima

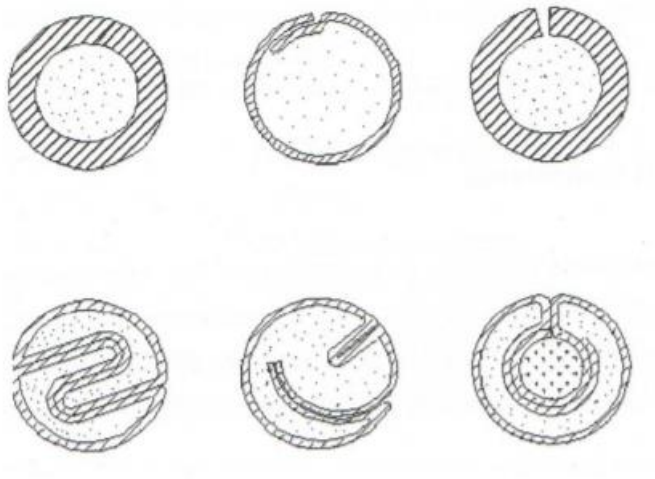
- visoka iskoristivost dodatnog materijala
- visoka učinkovitost postupka u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- odličan izgled zavarenih spojeva
- relativno jednostavna obuka zavarivača
- manji utjecaj zavarivača na proces zavarivanja
- manja količina štetnih zavarivačkih plinova u usporedbi s REL postupkom
- lako i brzo čišćenje zavarenih spojeva, minimalno rasprskavanje kod prijenosa štrcajućim lukom
- nizak unos vodika u metal zavara
- jednostavnija automatizacija procesa
- niža cijena dodatnih materijala i općenito niža cijena zavara po jedinici duljine u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- manji unos topline kod prijenosa metala kratkim spojevima – pogodno za zavarivanje tanjih komada
- velik unos topline kod prijenosa metala štrcajućim lukom – pogodno za zavarivanje debljih komada

Nedostaci [2]:

- nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe prijenosa metala štrcajućim lukom
- potreba za primjenom skupljih zaštitnih plinova kod prijenosa metala štrcajućim lukom
- mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima kod terenskih radova zbog vanjskih utjecaja
- problemi kod dovođenja žice kod zavarivanja aluminija i aluminijevih legura
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- opasnost od pogrešaka u početku i završetku zavarivanja
- složenost uređaja i opreme za zavarivanje

2.2. Žice kod MAG zavarivanja

Najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Žice su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Površina žice mora biti glatka, dimenzije vrlo točne i treba biti uredno namotana na kolutove koji se postavljaju u uređaj za dodavanje. Uz pune žice može se i koristiti praškom punjene žice. One mogu biti raznovrsnih presjeka kao što je pokazano na slici 2, ovisno o načinu proizvodnje. Praškom punjene žice koriste se uz plinsku zaštitu, no postoje i žice koje same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre pa nije potrebna dodatna plinska zaštita. [1]

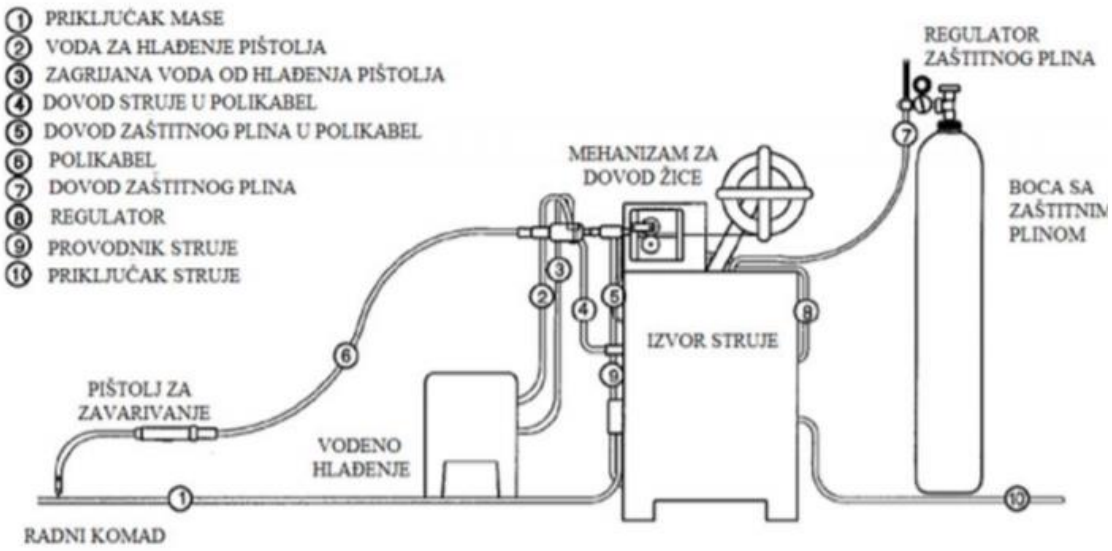


Slika 2. Presjeci praškom punjenih žica [1]

2.3. Uređaj i pribor

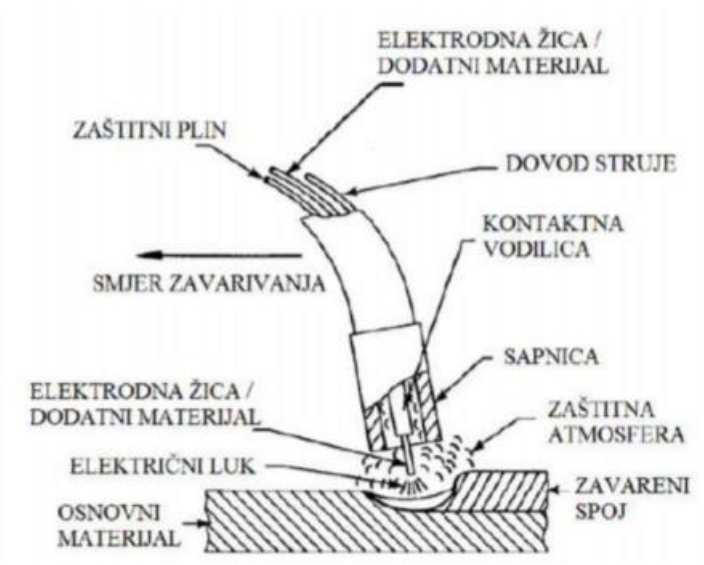
Oprema za MAG zavarivanje sastoji se od:

- izvor struje zavarivanja
- pištolj za zavarivanje
- uređaj za dovođenje žice
- polikabel
- boca sa zaštitnim plinom
- regulator protoka plina
- uređaj za hlađenje



Slika 3. Prikaz opreme za MAG zavarivanje [5]

Struja potrebna za početak procesa dovodi se iz izvora struje. Proces započinje tako da se zatvori strujni krug, jedan kabel spojen je na radni komad dok drugi kabel povezuje uređaj i pištolj putem polikabela. Pištolj, odnosno elektroda koja se nalazi u njemu spojena je na plus (+) pol. Struja ne prolazi cijelom duljinom žice, već samo na dijelu kontaktne vodilice u pištolju, na taj se način izbjegava grijanje cijele elektrode odnosno pištolja. Polikabel služi za dovod zaštitnog plina na sapnicu pištolja za zavarivanje kao i cijevi za hlađenje ako je pištolj vodeno hlađen. Vodeno hlađenje obično se koriste za struje veće od 400 A. [4] Slika 4 prikazuje završni dio pištolja s pripadajućim dijelovima.



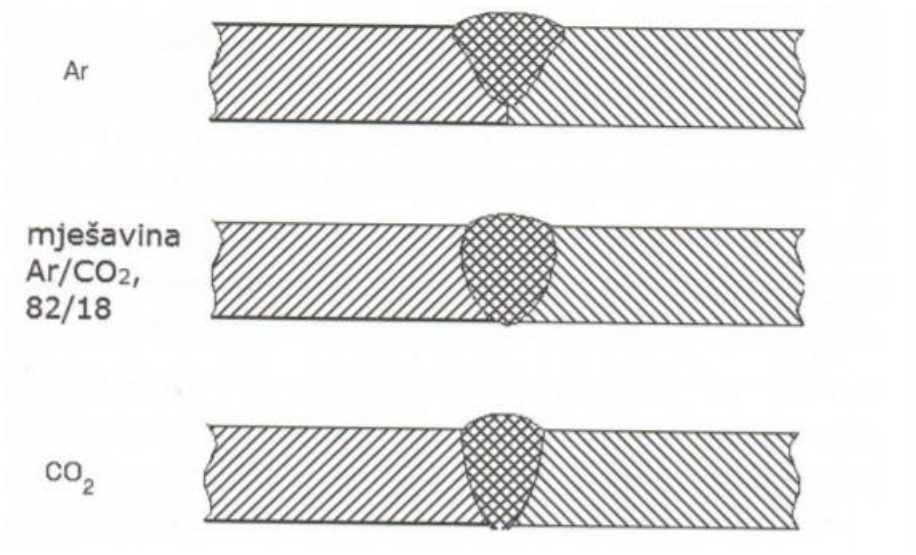
Slika 4. Prikaz završnog dijela pištolja za MAG zavarivanje [5]

Glavna zadaća uređaja za dovođenje žice je osigurati ravnomjerno dovođenje žice odnosno dodatnog materijala od mjesta gdje je namotana do mjesta uspostavljanja električnog luka. Promjene brzine dovođenja utječu negativno na zavareni spoj, stoga je bitno da bude ravnomjerno i konstantno. Brzina dovođenja može se odrediti i kontrolirati na upravljačkoj ploči uređaja. Uređaji za dovođenje žice mogu se nalaziti unutar kućišta izvora struje pri čemu se dobije na većoj mobilnosti uređaja ili mogu biti kao zasebna jedinica.

2.4. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi dovode se na mjesto zavarivanja kroz sapnicu na pištolju. Oni štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere. Na taj se način izbjegava onečišćenje oksidima iz zraka koji uzrokuju greške u zavaru i narušavaju njegova mehanička svojstva. Najčešći plinovi koji se koriste su ugljični dioksiod (CO_2) i mješavine. Mješavine su uglavnom dvokomponentne ili trokomponentne, a sastoje se od argona (Ar), kisika (O_2), helija (He) i ugljičnog dioksida (CO_2). Moguće je i korištenje vodika (H_2) i dušika (N_2) u manjim postotcima. Udio pojedinog plina utječe na geometriju zavara, oblik električnog luka, unos topline, prijenos metala i druga svojstva. Argon (Ar) je najčešće korišten plin koji daje zavaru oblik „prsta“ odnosno ima veću penetraciju od helija (He). Povećavanjem udjela ugljičnog dioksida (CO_2) u mješavini smanjuje se stabilnost luka, povećava štrcanje i gubitak metala. Stoga se miješa s argonom i helijem koji

su dosta skuplji. Najčešća mješavina koja se koristi je mješavina argona i ugljikovog dioksida u omjeru 82 – 18 % u korist argona. [1] Slika 5 prikazuje utjecaj plina na geometriju zavara.



Slika 5. Utjecaj plina na geometriju zavara [1]

2.5 Parametri

Izbor parametara utječe na kvalitetu zavarenog spoja, stoga je važno da zavarivač dobro poznaje i odabere parametre ovisno o traženim svojstvima. Izbor parametara povezan je s [7]:

- kemijskim sastavom i debljinom osnovnog materijala
- kemijskim sastavom žice/elektrode
- potrebnom kvalitetom zavarenog spoja

2.5.1. Jakost struje zavarivanja

Vrlo važan parametar koji ovisi o brzini dovođenja žice. Što je veća brzina dovođenja žice, time je veća i jačina struje zavarivanja. Povećanje jakosti dovodi do povećanja dubine penetracije i nadvišenja zavara kao i do povećanja količine taline. [7]

2.5.2. Napon zavarivanja

O naponu ovisi širina i duljina električnog luka. Povećanjem napona dolazi do povećanja širine zavara i smanjenja penetracije. Napon se podešava na kućištu izvora struje. Uređaji za zavarivanje sami reguliraju odnos napona i jakosti struje, odnosno potrebno je unijeti samo jedan od ova dva parametra. [8]

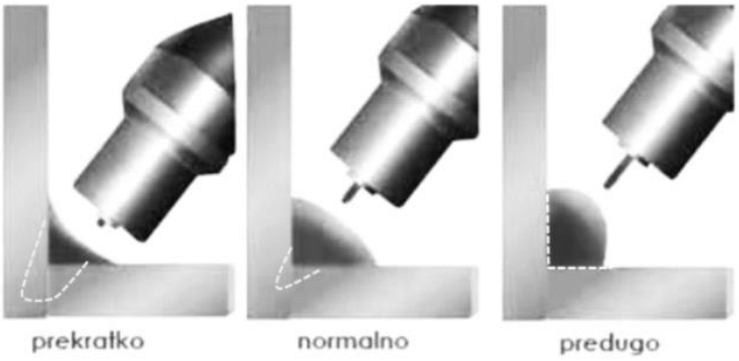
2.5.3. Brzina zavarivanja

Pod brzinom zavarivanja podrazumijeva se brzina kojom se električni luk pomiče po liniji zavara. Određena je jačinom struje i položajem zavarivanja. Povećanjem brzine smanjuje se profil (širina i visina) zavara kao i količina taline. [7] Slika 6 prikazuje utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zavara.

Slika 6. Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zavara [8]

2.5.4. Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice računa se od kraja kontaktne vodilice do vrha žice/elektrode. Kao što je već spomenuto, samo taj dio je spojen na strujni krug. Dužina slobodnog kraja žice utječe na otpor, odnosno veća dužina slobodnog kraja žice znači slabiju struju. [9]



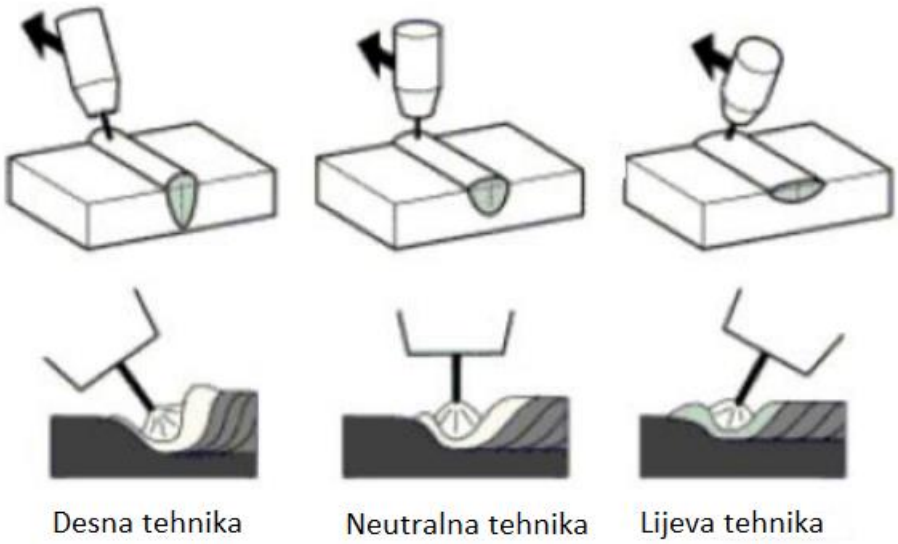
Slika 7. Utjecaj slobodnog kraja žice na profil zavara [8]

2.5.5. Induktivitet

Induktivitet je parametar koji opisuje brzinu porasta jakosti struje unutar vremenskog perioda nakon što se ostvari kratki spoj. Može se podesiti na izvoru struje, a koristi se samo kod zavarivanja kratkim spojevima. Kod drugih načina nema utjecaja jer je jakost struje skoro konstantna. Najviše utječe na efikasnost prijenosa materijala u električnom luku. [8]

2.5.6. Tehnika rada

Tehnika rada odnosi se na držanje pištolja u ovisnosti o radnom komadu. Tehnika rada može biti lijeva, desna ili neutralna. Prilikom korištenja desne tehnike dobivaju se uži zavari veće penetracije, pogodna je za zavarivanje debljih materijala. Lijeva tehnika daje širi zavar i manju penetraciju, pogodna je za zavarivanje tanjih materijala. Neutralna tehnika daje svojstva zavara koja su između onih od lijeve i desne, odnosno daje širi zavar i srednju penetraciju. [10]



Slika 8. Prikaz tehnika rada [10]

2.6. Načini prijenosa metala

Prijenos materijala je zapravo gibanje rastaljenog materijala s vrha elektrode do radnog komada. Ima nekoliko načina prijenosa materijala, oni se dobivaju namještanjem različitih parametara te shodno tome imaju različita svojstva i različite načine primjene. Razlikuju se četiri karakteristična načina prijenosa [1]:

- kratkim spojevima
- štrcajući luk
- prijelazni luk
- impulsni luk (modificirani način)

2.6.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima izvodi se pri malim strujama zavarivanja i malim naponima električnog luka. Na taj način se ostvaruje mala količina rastaljenog metala, pa je takav način zavarivanja pogodan za zavarivanje tankih limova, zavarivanje korijena i zavarivanje u prisilnim položajima. Prijenos metala kratkim spojevima za žicu promjera 1,2 mm postiže se sa strujama u rasponu 30 – 170 A, naponom u rasponu od 13 – 21 V. [1, 11]

2.6.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

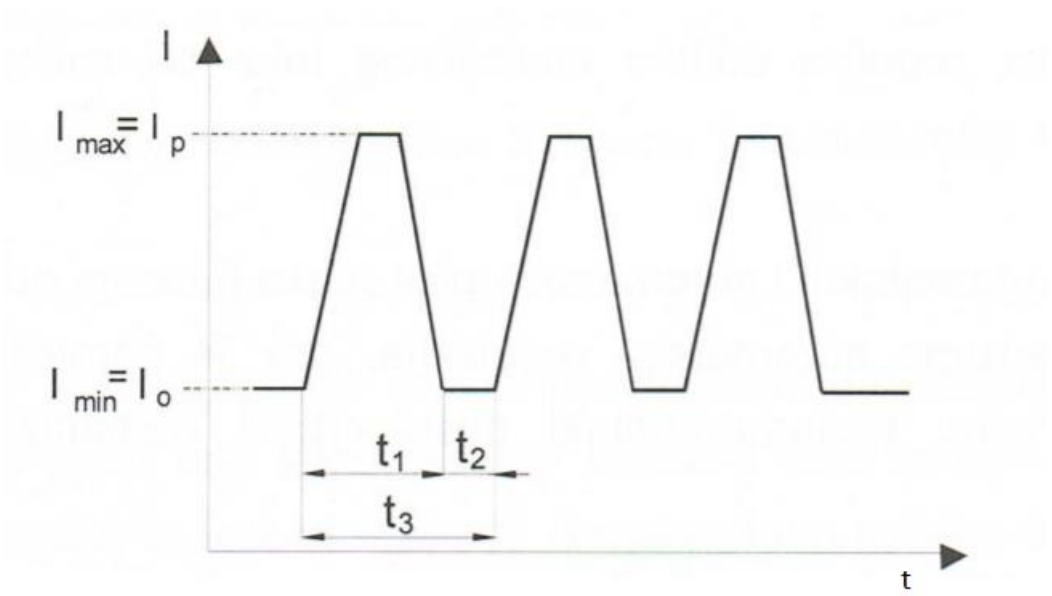
Prijenos metala štrcajućim lukom ostvaruje se uz jake struje zavarivanja i velike napone električnog luka. Time se ostvaruje velika penetracija i veliki unos topline, što je pogodno za zavarivanje debelih materijala. Prijenos metala štrcajućim lukom za žicu promjera 1,2 mm postiže se sa strujama u rasponu 250 – 600 A, naponom u rasponu 25 – 40 V. [1, 11]

2.6.3. Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom ima svojstva oba gore navedena prijenosa. Pojavljuje se prijenos štrcajućim lukom, ali se povremeno pojavi i kratki spoj. Ovaj način se pokušava izbjeći zato što je pojava kratkih spojeva slučajna i dolazi do nepredvidivog prskanja materijala. Prijenos metala prijelaznim lukom za žicu promjera 1,2 mm postiže se strujama u rasponu 170 – 235 A, naponom u rasponu 22 – 25 V. [11]

2.6.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom je zapravo kontrolirani prijenos štrcajućim lukom. Postupak namještanja parametara je prilično kompliciran zato što je potrebno uskladiti pet različitih parametara, a to su: vrijednost osnovne struje, vrijednost vršne struje, trajanje osnovne struje, trajanje impulsa i brzina dodavanja žice. Na novijim uređajima potrebno je namjestiti samo jedan parametar, ostali se automatski podese. Na primjer odabirom brzine dodavanja žice automatski se podešavaju ostali parametri. Zadatak osnovne struje je održavanje električnog luka, a vršne struje je odvajanje jedne kapljice. [1] Slika 9 prikazuje promjenu struje u ovisnosti o vremenu kod impulsnog luka.



Slika 9. Promjena struje u ovisnosti o vremenu [1]

I_o – jakost osnovne struje

I_p – jakost vršne struje

t_1 – vrijeme trajanja impulsa

t_2 - vrijeme trajanja osnovne struje

t_3 - vrijeme jednog ciklusa

3. ČELICI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

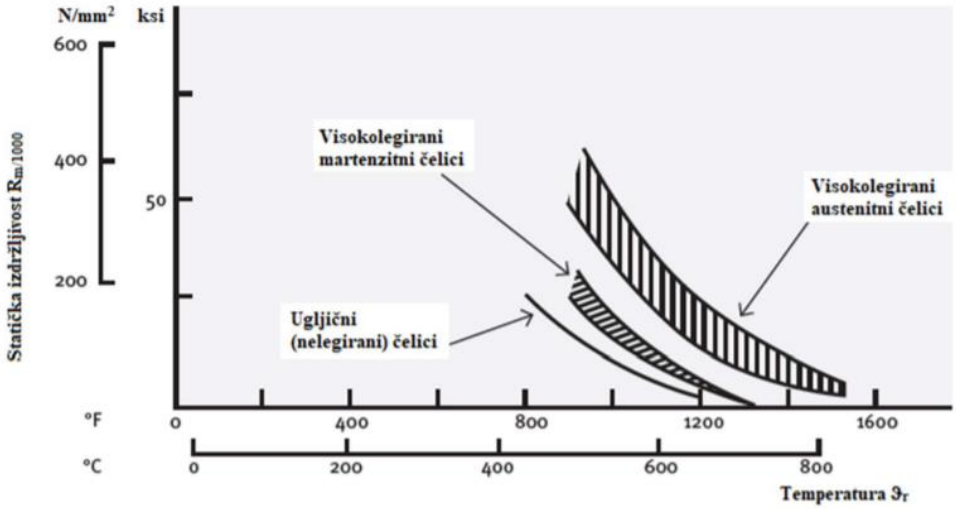
Čelici predstavljaju materijale čija je temperatura tališta relativno visoka. Do 180 ^{O}C nema bitnijih promjena mehaničkih svojstava, pa se te temperature smatraju niskim. Radne temperature u rasponu od 180 – 450 ^{O}C nazivaju se povišene, a one iznad 450 ^{O}C visoke jer pri njima počinje puzanje čelika. Povišene i visoke temperature vladaju u [12]:

- termoenergetskim postrojenjima (parni kotlovi)
- plinske i parne turbine
- kemijska postrojenja
- motori s unutarnjim izgaranjem

Čelici namijenjeni za rad na povišenim i visokim temperaturama dijele se na [12]:

- ugljični (nelegirani) čelici
- niskolegirani čelici
- visokolegirani martenzitni čelici
- visokolegirani austenitni čelici

Na slici 10. prikazana je ovisnost statičke izdržljivosti o temperaturi za gore navedene čelike. Vidljivo je kako najbolje karakteristike pri visokim temperaturama imaju visokolegirani austenitni čelici, a ugljični (nelegirani) čelici imaju najslabije karakteristike. [13]

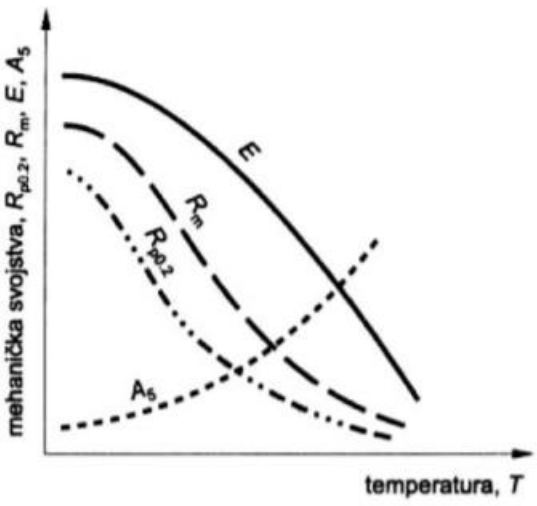


Slika 10. Prikaz ovisnosti statičke izdržljivosti o radnoj temperaturi [13]

3.1. Promjene svojstva materijala pri povišenim temperaturama

Kako bi se odabrali materijali za rad pri povišenim temperaturama koriste se dijagrami ovisnosti mehaničkih svojstava o radnoj temperaturi. Do radnih temperatura iznad kojih počinje puzanje dijelovi se proračunavaju prema vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih statičkim vlačnim i kratkotrajnim opterećenjem. Iznad granične temperature od 450 ^{o}C koriste se veličine statička izdržljivost i granica puzanja. Osim puzanja i smanjenja statičke izdržljivosti prilikom povišenih temperatura javljaju se još i: sniženje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti uz istovremeno povišenje istezljivosti, suženje poprečnog presjeka i žilavosti. [13]

Slika 11. prikazuje kako veličine koje karakteriziraju otpornost materijala pri povišenim i visokim temperaturama (R_e, $R_{p0,2}$, R_m i E) se smanjuju, dok se veličine koje karakteriziraju deformabilnost materijala (A_5) povećavaju s porastom temperature. [12]



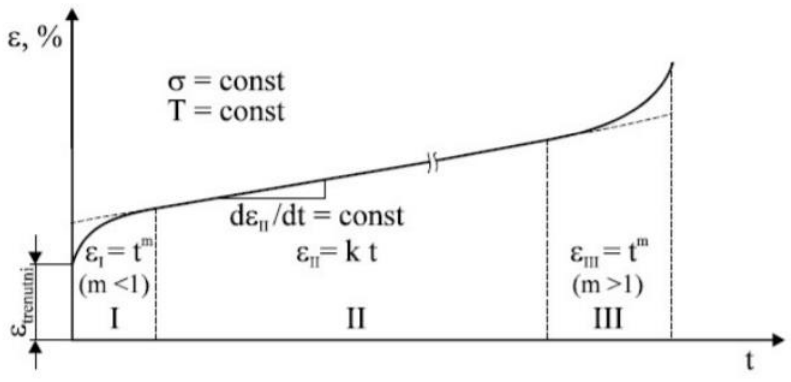
Slika 11. Promjena mehaničkih svojstava s povišenjem temperature [12]

- $R_{p0,2}$ – vrijednost konvencionalne granice razvlačenja pri radnoj temperaturi
- R_m– vrijednost vlačne čvrstoće pri radnoj temperaturi
- E – vrijednost modula elastičnosti pri radnoj temperaturi
- A_5 – vrijednost istezljivosti pri radnoj temperaturi

3.1.1. Puzanje materijala

Puzanje materijala je spora deformacija materijala nastala uslijed djelovanja dugotrajnog konstantnog opterećenja pri povišenoj temperaturi. Puzanje materijala je toplinski aktivirani proces pa nastupa u temperaturnom području [14]:

$$T > 0,3 \times T_{tališta}$$



Slika 12. Dijagram puzanja [14]

Slika 12 prikazuje dijagram puzanja koji je podijeljen u tri karakteristična dijela, odnosno proces puzanja u tri stadija [14]:

- I stadij puzanja: u tom stadiju krivulja ne počinje iz ishodišta dijagrama budući da je deformacija nastala istog trenutka kad je ispitni uzorak opterećen. Prvi stadij karakterizira u početku povećana i promjenjiva brzina puzanja $\Delta\varepsilon/\Delta t$.
- II stadij puzanja: naziva se stadijem konstantnog gradijenta brzine puzanja. Dijagram je približno pravac s koeficijentom smijera $\Delta\varepsilon/\Delta t$ (brzina puzanja). Taj nagib govori o sklonosti materijala na puzanje, što je nagib strmiji to je sklonost puzanju veća. Ukoliko je paralelan s osi apscisa onda je materijal potpuno otporan na puzanje.
- III stadij puzanja: to je završni stadij gdje se brzina puzanja povećava i više ne postoji linearna ovisnost između istezanja i vremena. Završni stadij završava lomom epruvete.

Mehanička svojstva koja karakteriziraju otpornost materijala puzanju su [14]:

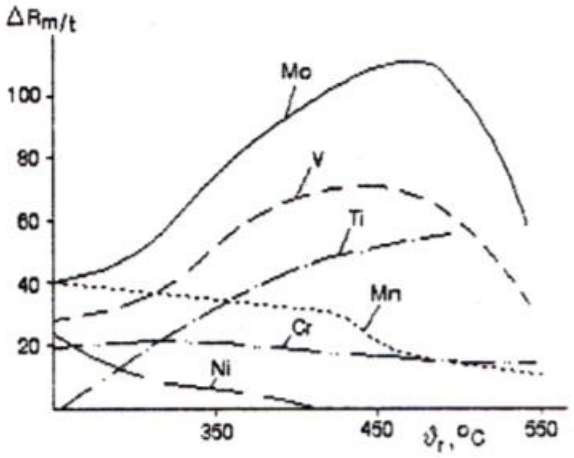
- Granica puzanja $R_{p\varepsilon/t/\vartheta}$ - to je vlačno naprezanje koje pri temperaturi ispitivanja (ϑ) nakon određenog trajanja ispitivanja (t) ostavlja u epruveti trajnu deformaciju (ε)
- Statička izdržljivost $R_{m/t/\vartheta}$ - je ono vlačno naprezanje koje pri temperaturi (ϑ) nakon zadanog trajanja ispitivanja (t) dovodi do loma epruvete.

Na otpornost materijala prema puzanju može se utjecati na nekoliko načina [15]:

- izbor legura što viših temperatura rekristalizacije i tališta
- očvrsnuće kristalima mješancima – odnosno čelici trebaju sadržavati legirne elemente koji koče pokretljivost atoma, na primjer Mo i Co.

- legirati s elementima koji tvore stabilne spojeve – karbide, nitride i intermetalne faze koji u obliku sitno disperziranih čestica otežavaju gibanje dislokacija, na primjer Cr, Mo, W, V, Ti.
- izbor legura s plošno centriranom (FCC) rešetkom za koju je pokretljivost atoma znatno manja nego kod prostorno centrirane (BCC) kubične rešetke. Iz tog razloga je austenitna mikrostruktura s gusto složenom FCC rešetkom otpornija puzanju nego feritna s BCC rešetkom.

Slika 13 prikazuje utjecaj legirnih elemenata na mehanička svojstva.



Slika 13. Utjecaj legirnih elemenata na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim temperaturama [15]

4. NISKOLEGIRANI ČELICI

Prilikom dugotrajne izloženosti nelegiranih čelika temperaturama većim od 450 ^{O}C dolazi do rekristalizacije matrice i koagulacije cementita (Fe_3C). Takve se pojave kod niskolegiranih čelika za rad pri visokim i povišenim temperaturama reduciraju legiranjem karbidotvorcima (Mo, Cr, V) i legiranjem elementima koji povisuju temperaturu rekristalizacije (Mo). Molibden i krom stvaraju posebne karbide koji usporavaju puzanje, povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje, a sam Mo sprječava pojavu krhkosti, popuštanja i povisuje temperaturu rekristalizacije. Krom sam djeluje i na povišenje mehaničke otpornosti, istezljivosti i oksidacijske postojanosti. Ovi čelici imaju nizak maseni udio ugljika (< 0,25 %). Razlog tome je kako bi bili dobro zavarljivi. Temperaturno područje primjene je od 450 do 580 ^{O}C jer pri višim temperaturama dolazi do osiromašenja željezne matrice i do nakupljanja karbida. Na slici 14 prikazani su neki od najčešćih niskolegiranih čelika.

Oznaka čelika		Sastav "ostalo", maseni %	Mehanička svojstva										
EN	stara HRN		R_m, N/mm^2, pri 20°C	$R_{p0.2}$, N/mm^2, pri °C				$R_{p1/10000}$, N/mm^2, pri °C				A_5, %, min.	KV, J, min.
				20	200	400	500	450	500	530	580		
C35E	Č1431	-	500...650	280	216	147	-	59	25	-	-	21	-
15Mo3	Č7100		440...570	260	255	177	147	216	147	85		23	48
13CrMo4-4	Č7400		440...590	290	275	206	177		186	78		22	48
22CrMo4-4	Č7431		640...790	490		343		255	172	74		18	41
10CrMoV8-10	Č7401		440...590	260	245	206	186		157	83	47	20	55
24CrMoV5-5	Č7432	0,1V	690...830	540	412	304	235	324	206	98		17	57

Slika 14. Niskolegirani čelici za rad pri radnim temperaturama nižim od 550 ^{O}C [12]

Mikrostruktura im je feritno-perlitna ako su normalizirani ili bainitna ako su poboljšani. Pretežno se izrađuju u obliku cijevi i limova, a primjenjuju se za [12,15]:

- dijelovi parnih kotlova
- veliki otkovci
- vijci, matice, svornjaci

4.1. Niskolegirani CrMo čelici

U današnje vrijeme teži se što većoj produktivnosti uz što manje troškove u svim industrijama pa tako i u termoenergetskoj industriji. Stoga rastu radne temperature i tlakovi, pa samim time se i više opterećuju materijali koji se koriste u izgradnji potrebnih dijelova. Osnovna svojstva koja se traže za rad u takvim uvjetima su dobra otpornost na puzanje, visoka korozijska otpornost u vodi i pari, dobra toplinska vodljivost, dobra zavarljivost i druge. Niskolegirani CrMo čelici odgovaraju svojim svojstvima na zahtjeve, stoga zauzimaju sve veće mjesto u termoenergetskoj industriji. Osnovni CrMo čelici legirani su sa 0,5%Mo – 1%Cr/0,5%Mo – 2,25%Cr/1%Mo – 5%Cr/1%Mo – 9%Cr/1%Mo i 12%Cr/1%Mo. Daljni razvoj doveo je do dodavanje elemenata poput vanadija (V), volframa (W), nikla (Ni), titana (Ti), niobija (Nb), bora (B) i/ili dušika (N). Tako su nastali novi razredi kao što su T/P22V, T/P23, T/P24, T/ P91, T/P92 i VM 12-SHC. Tipični proizvodi koji se izrađuju od ovog čelika su kotlovi, grijači, izmjenjivači topline, reaktori, cijevi, kolektori pare. [16]

4.2. Kemijski sastav i mehanička svojstva 10CrMo9-10 čelika

10CrMo9-10 je oznaka čelika prema EN standardu, dok je prema američkom ASTM-u T/P 22. U tablici 1 prikazan je kemijski sastav 10CrMo9-10 čelika [17].

Tablica 1. Kemijski sastav 10CrMo9-10 čelika[17]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	Cu
0,08 – 0,14 %	≤ 0,5 %	0,4 – 0,8 %	≤0,02 %	≤ 0,01 %	2 – 2.5 %	0,9 – 1.1 %	≤ 0,012 %	≤ 0,3 %

Iz tablice 1 vidljivo je kako se uz glavne legirne elemente krom i molibden pojavljuju još i mangan te u vrlo malim količinama silicij, fosfor, sumpor, dušik i bakar. Ugljik pripada samom čeliku pa se ne smatra legirnim elementom. On je za veliki broj čelika najvažniji element i utječe na njihova svojstva. Udio ugljika je mali kako bi se ostvarila dobra zavarljivost. Krom povisuje prokaljivost čelika i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita. Tvori karbide i povisuje trajnu toplinsku čvrstoću, otpornost na komprimirani vodik i vatrootpornost. Vatrootpornst je otpornst na visokotemperaturnu koroziju odnosno stvaranje ogorine. Njegov učinak se posebno ističe na temperaturama iznad 500 ^{O}C. Tada krom formira tanki sloj oksida uslijed čega dolazi do usporavanja unutarnje difuzije kisika. Molibden se legira zajedno s

drugim legiranim elementima. Povećava prokaljivost čelika i sprječava pojavu visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Povisuje trajnu čvrstoću pri povišenim temperaturama, a uz krom povisuje i otpornost na opću koroziju. Silicij povisuje čvrstoću i otpornost na trošenje, a posebno granicu razvlačenja. Mangan je dezoksidator i austenitotvorac pa snižava temperature A_{c3} i A_{c1} u odnosu na ugljične čelike. [13]

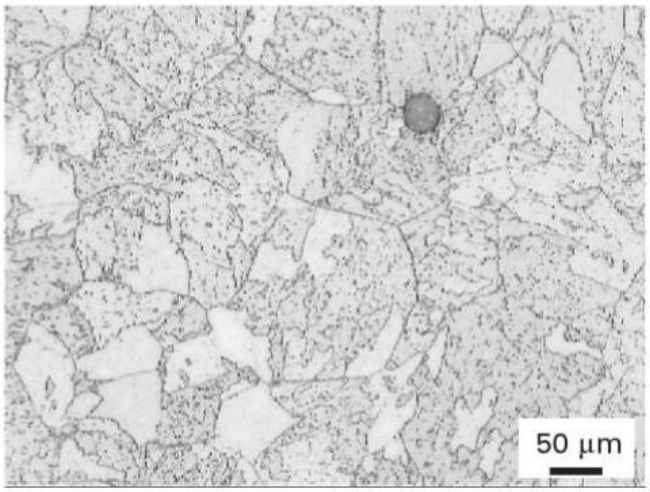
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika 10CrMo9-10 [18]

Oznaka	**Mehanička svojstva**								
	Rm, N/mm^2, pri 20 ^{O}C	$R_{p0,2}$, N/mm^2, pri ^{O}C				$R_{p1/10000}$, N/mm^2, pri ^{O}C			KV, J, pri 20 ^{O}C
		20	200	400	500	500	550	600	40
10CrMo9-10	480...620	290	240	180	175	147	83	44	

U tablici 2 prikazana su mehanička svojstva čelika 10CrMo9-10 pri određenim temperaturama. Ova svojstva služe za izbor materijala i proračun mehaničkih opterećenih dijelova konstrukcija izvrgnutih povišenim temperaturama. KV označava udarni rad loma, odnosno pokazatelj je žilavosti ili krhkosti materijala. To je utrošena energija potrebna za lom ispitne epruvete. Što je udarni rad loma veće vrijednosti to je materijal žilaviji.

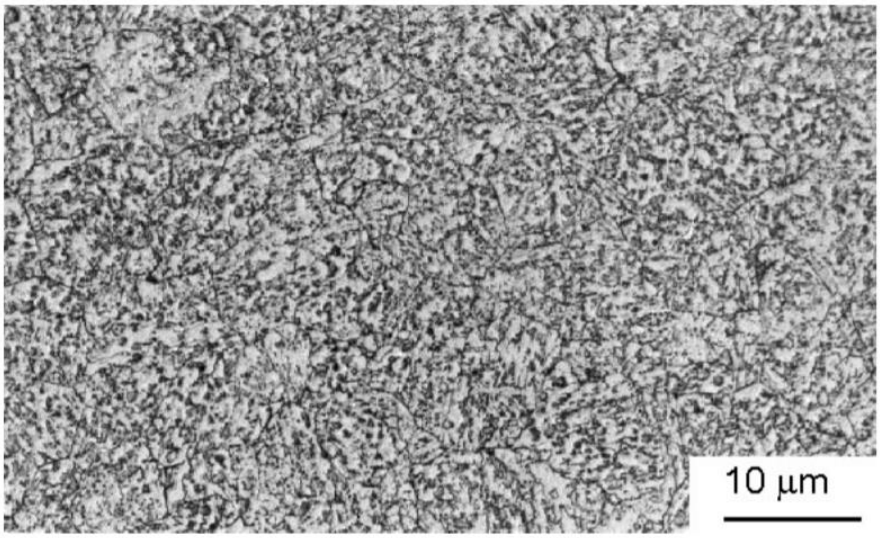
4.3. Mikrostruktura 10CrMo9-10 čelika

Kao što je već i spomenuto mikrostruktura CrMo čelika je feritno perlitna ako su normalizirani, ili bainitna ako su poboljšani. Toplinska obrada osnovnog materijala je složena ali je potrebna kako bi se dobila potrebna mehanička svojstva. Ovisno o sadržaju legirnih elemenata provodi se normalizacija, popuštanje i žarenje. Čelik 10CrMo9-10 je poboljšan na zraku i ima bainitnu mikrostrukturu. [12]



Slika 15. Mikrostruktura 10CrMo9-10 čelika u početnom stanju [19]

Bainit je vrsta niskotemperaturnog eutektoida i sastoji se od ferita i cementita, ali mu mikrostruktura nije lamelarna nego igličasta. Poboljšavanje čelika je postupak toplinske obrade koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Prilikom popuštanja na temperaturama od oko 200 do 300 ^{O}C dolazi do pretvorbe nelegiranog i niskolegiranog austenita u bainit. Što je viša temperatura popuštanja niže su vrijednosti vlačne čvrstoće, granice tečenja i tvrdoće, a više su vrijednosti žilavosti, istezanja i kontrakcije. No zbog molibdena kao legirnog elementa tvrdoća čelika 10CrMo9-10 ne opada tako intenzivno.



Slika 16. Mikrostruktura 10CrMo9-10 čelika nakon normalizacije i popuštanja pri 500 ^{O}C u trajanju od 1h [20]

Mikrostruktura je bainitna s feritom i nakupinama karbida. Tipične nakupine su karbidi bogati kromom i molibdenom $M_{23}C_6$, M_7C_3 i M_3C. Nakupine $M_{23}C_6$ i M_7C_3 uglavnom se nalaze na granici zrna gdje tvore takozvane lance. M_7C_3 još se pojavljuje i na mjestima nekadašnjeg austenita. Takva mikrostruktura sprječava klizanje ravnina i daje dobru otpornost na puzanje stoga je važno da su nakupine jednoliko raspoređene u pravilnom omjeru kako bi se dobila homogena struktura s homogenim svojstvima. [16,21]

5. ZAVARLJIVOST 10CrMo9-10 ČELIKA

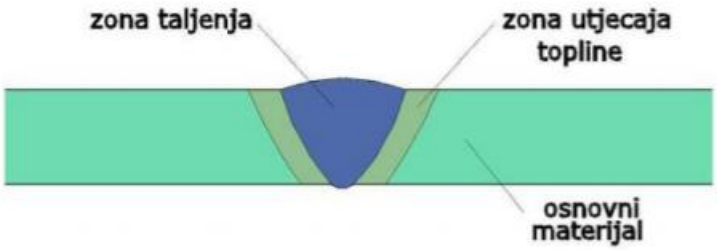
Niskolegirani čelici generalno su dobro zavarljivi, pa tako i 10CrMo9-10 čelik. Unatoč tome potrebno je odrediti pravilnu temperaturu predgrijavanja, paziti na postizanje i održavanje međuprolazne temperature te paziti da ne dođe do prekida zagrijavanja. Potrebno je provesti i naknadnu toplinsku obradu kako bi se dobila zadovoljavajuća mehanička svojstva.

5.1. Promjene mikrostrukture u zoni utjecaja topline

Zona utjecaja topline (ZUT) je dio osnovnog materijala, koji se nalazi neposredno uz zonu taljenja, a gdje dolazi do promjene kristalne strukture i mehaničkih svojstava zbog unesene topline prilikom zavarivanja. Sukladno tome zavareni spoj moguće je podijeliti na tri područja [13, 22]:

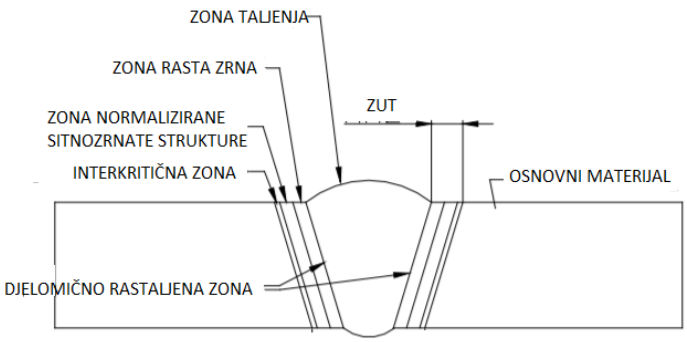
- zona taljenja
- zona utjecaja topline
- osnovni materijal

Osnovni materijal predstavlja dio spoja u kojem se nisu dogodile promjene u mikrostrukturi, a samim time niti promjene mehaničkih svojstava. Zona taljenja je dio spoja koji je bio u rastaljenom stanju te čijim je skrućivanjem došlo do formiranja spoja. [13]



Slika 17. Osnovna područja zavarenog spoja [13]

Na slici 18 prikazan je presjek zavara i mikrostrukturne promjene unutar zone utjecaja topline. [23]



Slika 18. ZUT 10CrMo-9-10 čelika

Zona taljenja – obuhvaća dio zavarenog spoja koji je pri zavarivanju bio potpuno rastaljen. Prilikom ohlađivanja dolazi do kristalizacije pri čemu nastaje struktura različita od osnovnog materijala. Razlog tome je isparavanje određenih elemenata, reakcija s okolnim medijem te mikrolegiranje s elementima iz dodatnog materijala. Kristali najčešće rastu okomito na rubove spoja, a dodiruju se u sredini, stvarajući zonu segregacija nečistoća s nižim talištem, koja može uzrokovati nastanak vrućih pukotina ili biti koncentrator naprezanja pri opterećenju. [13]

Djelomično rastaljena zona – predstavlja dvofazno područje koje se sastoji od taline i krutine, odnosno vezu između osnovnog materijala i metala zavara. Bogata je legirnim elementima, nečistoćama koje imaju nižu temperaturu taljenja, a sadrži i plinove. Pri visokim temperaturama dolazi do slabljenja metalnih veza u materijalu što omogućuje pojavu toplih pukotina. [13]

Zona rasta zrna (pogrubljena zrna) – nalazi se ispod solidus linije, a značajno iznad temperature A_{c3} (~ 894 ^{O}C za 10CrMo9-10). Karbidi koji predstavljaju glavnu prepreku rastu austenitnih zrna se otapaju i pretvaraju u austenit. Za 10CrMo9-10 čelik karbidi se otapaju zagrijavanjem u temperaturnom području od 1000 – 1050 ^{O}C. Ova zona ima najveću tvrdoću. [13,23]

Zona normalizirane sitnozrnate strukture – nalazi se neznatno iznad temperature A_{c3}. Iako visoka, ta temperatura nije dovoljna da bi se karbidi potpuno otopili, time se ograničava rast austenitnih zrna. Takva zrna kod 10CrMo9-10 čelika stvaraju feritnu mikrostrukturu. [13,23]

Interkritična zona – nalazi se u temperaturnom području između A_{c1} i A_{c3}. U ovoj zoni dolazi do djelomične pretvorbe i nastanka martenzita. Ima malu veličinu zrna što za posljedicu ima najniže vrijednosti tvrdoće. [13]

Zona popuštanja – nalazi se u temperaturnom području ispod A_{c1}. U ovoj zoni nema pretvorbe u austenit, no još uvijek može doći do promjene u osnovnom materijalu. [13]

5.2. Posljedice zavarivanja

Nakon zavarivanja potrebno je obratiti pozornost na moguće posljedice koje mogu dovesti do slabljenja mehaničkih svojstava i pojava pukotina u materijalu. Pukotine se smatraju najopasnijim pogreškama u zavarenom spoju. One smanjuju nosivi presjek zavarenog spoja i čvrstoću.

5.2.1. Zaostala naprezanja

Zaostala toplinska naprezanja posljedica su nejednolike temperaturne raspodjele u materijalu koja se odnosi na zonu zavara. Tijekom hlađenja metal šava nastoji se skratiti te tlači okolni materijal, a pri tome je šav opterećen vlačnim naprezanjima. Vrijednost tih naprezanja može preći granicu tečenja. Zaostala naprezanja smanjuju nosivost konstrukcije, povećavaju sklonost vodikovim pukotinama, te smanjuju otpornost na puzanje. [23]

5.2.2. Tople pukotine

Nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Prostiru se po granicama zrna materijala i to najčešće po dužini u sredini zavara, a moguće su i u ZUT-u. Postoje dvije vrste toplih pukotina, a to su kristalizacijske i likvacijske. Kristalizacijske nastaju pri kristalizaciji u zoni taljenja, dok likvacijske pukotine najčešće nastaju u zoni utjecaja topline. One nastaju zbog nečistoća koje su raspoređene po granicama zrna osnovnog materijala. Zbog omekšavanja i taljenja nečistoća dođe do pada čvrstoće po granicama zrna i samim time do pojave tople pukotine. Ove pukotine su moguće i pojavljuju se kod starijih 10CrMo9-10 čelika čiji su legirni elementi niže čistoće. [23,24]

5.2.3. Vodikove pukotine

Ove pukotine mogu se pojaviti u zoni utjecaja topline i u metalu zavara. Glavni čimbenik koji djeluje na pojavu ovih pukotina kao što i samo ime kaže je vodik. Vodik ulazi u metal zavara iz vlage iz okoline, plinova zaštitne atmosfere, obloge elektrode, praška te defundira prema ZUT-u i skuplja se u porama i mikropukotinama. Atomi vodika se pretvaraju u molekule i dolazi do rasta pritiska koji može uzrokovati lokalno razaranje materijala i širenje pukotina. Svojstva 10CrMo9-10 čelika čine ga osjetljivim na vodikove pukotine stoga većina postupaka koja se koristi za zavarivanje zahtjeva korištenje elektroda s malim udjelom vodika i naknadnu toplinsku obradu. [23,24]

5.3. Toplinska obrada

Toplinska obrada kod 10CrMo9-10 čelika je vrlo bitna. Njome se smanjuje mogućnost pojave pukotina i uz to poboljšavaju mehanička svojstva. Kod zavarivanja 10CrMo9-10 čelika potrebno je provesti predgrijavanje prije samog zavarivanja te nakon zavarivanja provesti naknadnu toplinsku obradu.

5.3.1. Predgrijavanje

Predgrijavanjem se smanjuje razlika između zagrijanog i nezagrijanog mjesta u području zavarivanja. Na taj način se i smanjuje brzina odvođenja topline, a time i mogućnost otvrdnuća u ZUT-u. Otežava se nastanak vodikovih pukotina i smanjuju se naprezanja u zavaru i osnovnom materijalu uslijed stezanja materijala pri hlađenju. Predgrijavati se može cijeli radni komad ili može biti lokano. Ovisno o normi preporučena temperatura predgrijavanja za 10CrMo9-10 kreće se između 200-300 ^{O}C [13,23]

5.3.2. Održavanje međuprolazne temperature

Međuprolazna temperatura odnosi se na temperaturu materijala u blizini spoja neposredno nakon prvog prolaza te nakon svakog sljedećeg prolaza u slučaju višeslojnih zavara. Ova temperatura također utječe na mikrostrukturu i na mehanička svojstva zavara. Granica tečenja

i vlačna čvrstoća su funkcije međuprolazne temperature. Kod čelika 10CrMo9-10 međuprolazna temperatura je između 200 – 300 ^{O}C. [13,16]

5.3.3. Naknadna toplinska obrada

Naknadna toplinska obrada je proces koji se izvodi nakon završetka procesa zavarivanja u kojem se zavareni dio podvrgava toplinskoj obradi. Za ovu vrstu čelika izvodi se u cilju poboljšavanja svojstava kao što su smanjivanje zaostalih naprezanja. Također naknadna toplinska obrada poboljšava žilavost tako što smanjuje mogućnost sekundarnog otvrdnuća kao i otpornost na puzanje. Prema ASME standardu 10CrMo9-10 zahtijeva naknadnu toplinsku obradu na 725 ^{O}C u trajanju od 3 sata. Takva obrada određena je za sve veličine. [23]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio završnog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. U eksperimentalnom dijelu zavarena su dva lima od niskolegiranog 10CrMo9-10 čelika. Zavarivanje je provedeno MAG postupkom sa žicom debljine 1,2 mm. Dobiveni uzorak podvrgnut je analizi makrostrukture, mikrostrukture i ispitivanju tvrdoće.

6.1. Osnovni i dodatni materijal

6.1.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva osnovnog materijala

U tablici 3 prikazan je kemijski sastav osnovnog materijala korištenog u eksperimentu, dok su u tablici 4 prikazana mehanička svojstva pri sobnoj temperaturi.

Tablica 3. Kemijski sastav osnovnog materijala

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	Cu
0,114%	0,176%	0,424%	0,011%	0,0005%	2,16%	0,900%	0,0071%	0,232%

Tablica 4. Mehanička svojstva osnovnog materijala

$R_{p0,2}$, N/mm^2	Rm, N/mm^2	A5, %
442	564	28

6.1.2. Kemijski sastav i mehanička svojstva dodatnog materijala

Kao dodatni materijal korištena je žica A5.28 ER90S-G (CrMo2Si) promjera 1,2 mm tvorničkog naziva OK ARISTOROD 13.22. U tablici 5 prikazan je kemijski sastav dodatnog materijala, a u tablici 6 prikazana su mehanička svojstva dodatnog materijala pri sobnoj temperaturi.

Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala

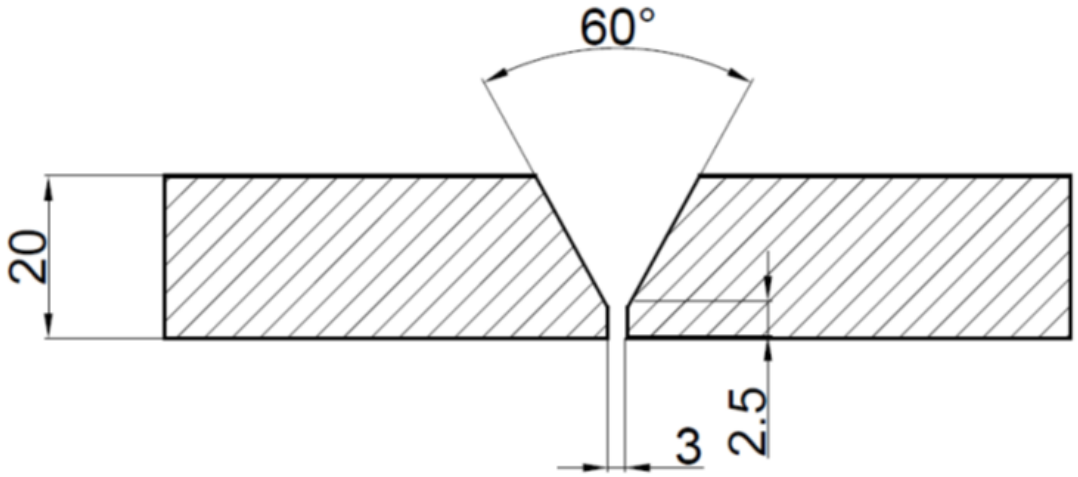
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,075 %	0,77 %	1,14 %	0,013 %	0,011 %	2,48 %	1,070 %
V	**Al**	**Ti**	**Zr**	**Nb**	**Ni**	**Cu**
0,016 %	0,019 %	0,003 %	0,007 %	0,010 %	0,08 %	0,068 %

Tablica 6. Mehanička svojstva dodatnog materijala

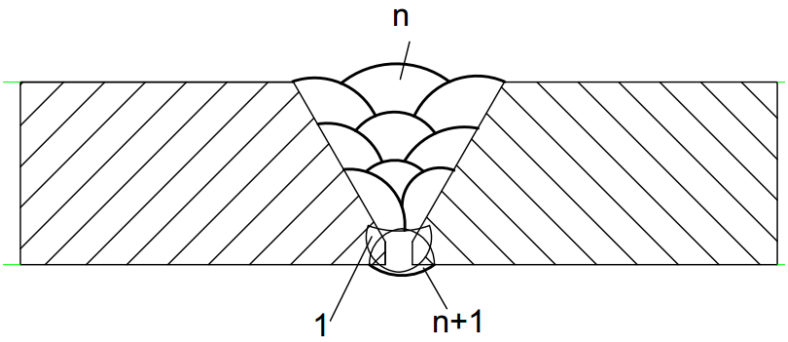
$R_{p0,2}$, N/mm^2	Rm, N/mm^2	A5, %
480	590	25

6.2. Zavarivanje uzorka

Zavarivanje je provedeno MAG postupkom zavarivanja impulsnim načinom prijenosa materijala u deset prolaza. Priprema žlijeba je V- priprema, vrsta zavara i spoja je sučeoni spoj i položaj zavarivanja je 1G. Kao zaštitni plin korištena je mješavina Ar/CO_2 u omjeru 82/18. Protok zaštitnog plina je 12-15 l/min. Slika 19 prikazuje pripremu zavarenog spoja. Slika 20 prikazuje redoslijed zavarivanja spoja.



Slika 19. Oblikovanje pripreme spoja



Slika 20. Redoslijed zavarivanja spoja

U tablici 7 prikazani su parametri zavarivanja.

Tablica 7. Parametri zavarivanja

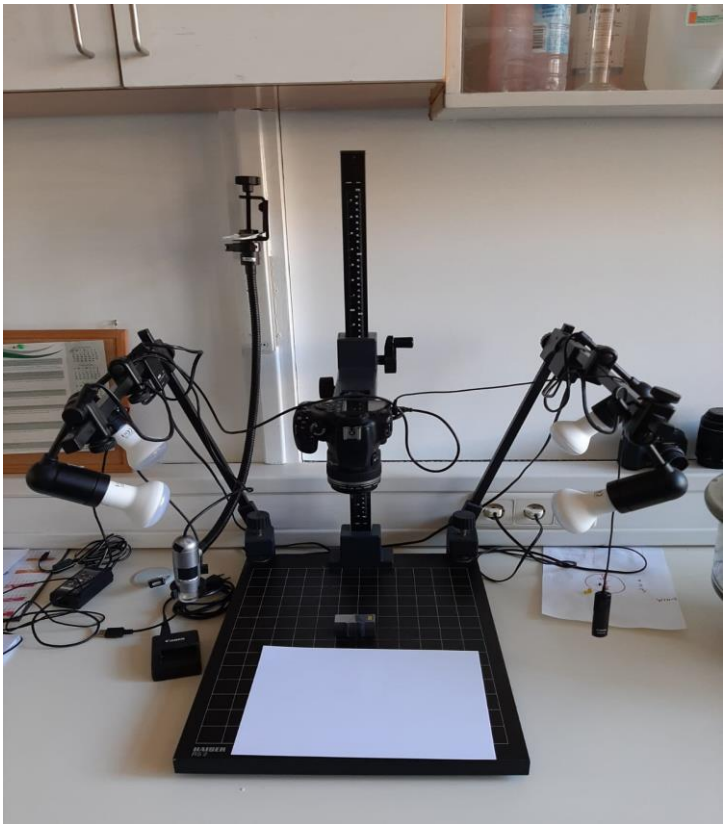
Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, m/s	Unos topline, J/mm
1	190 – 200	23 – 26	2,2 – 3	1,64
n	220 – 255	30 – 33	4 – 5	1,68
n + 1	220 – 255	30 – 33	4 – 5	1,68

Prije samog zavarivanja provedeno je predgrijavanje na temperaturu od 200 ^{O}C, maksimalna temperatura međuprolaza je 250 ^{O}C. Provedena je i naknadna toplinska obrada pri temperaturi 675 ^{O}C u trajanju od 40 minuta. Grijanje kao i hlađenje provedeno je pri brzini od 150 ^{O}C/h.

6.3. Analiza makroizbruska i mikrostrukture

Nakon zavarivanja uzorka izrezan je makroizbrusak koji je zatim podvrgnut ručnim brušenjem s brusnim papirima granulacije 100, 180 i 200. Nakon provedenog ručnog brušenja makroizbrusak je strojno brušen i poliran kako bi se pripremio za proces nagrizanja u otopini. Strojno brušenje odvijalo se pri brzini od 300 o/min uz vodeno hlađenje. Korišten je brusni papir granulacije 320, 600, 1200, 2400, 4000. Nagrizanje se odvijalo u 3% otopini nital-a (otopina klorovodične kiseline u etilnom alkoholu). Nakon poliranja makroizbrusak je promatran svjetlosnim mikroskopom prikazanim na slici 21 i fotografiran s opremom na slici 22. Slika 23 prikazuje uređaj za brušenje.

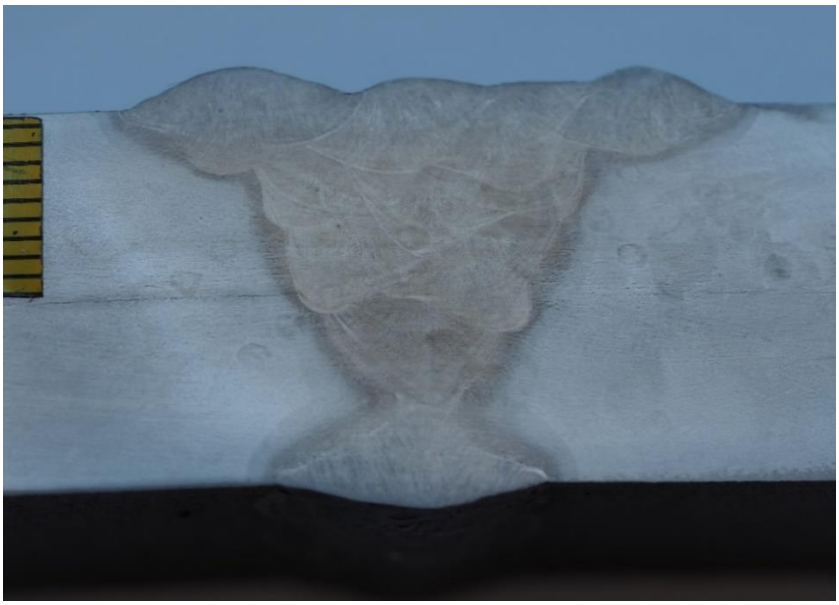
Slika 21. Mikroskop (Olympus GX51)



Slika 22. Oprema za slikanje makroizbruska (Kaiser RS2 + Canon)

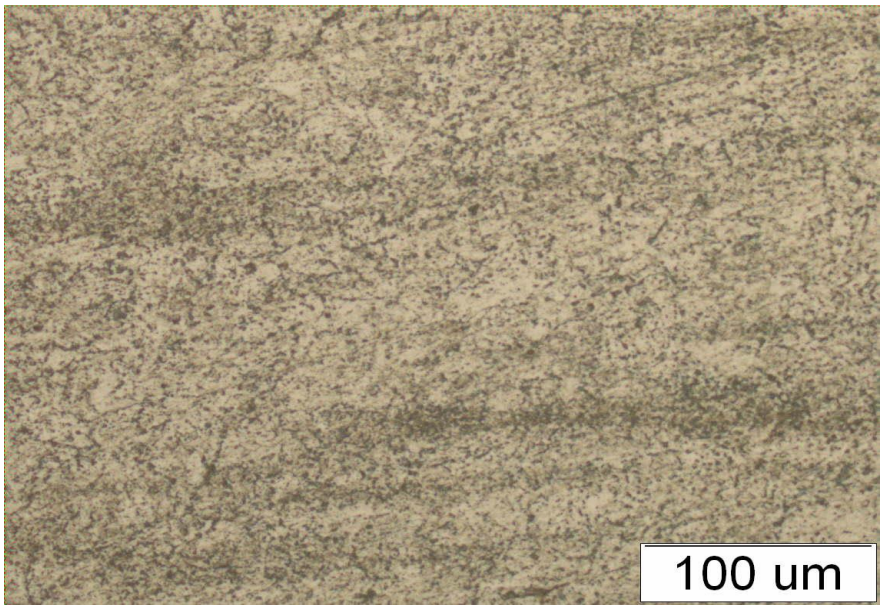
Slika 23. Uređaj za brušenje (Nintech 233)

Na slici 24 je prikazana makrostruktura uzorka. Vidljivo je kako uzorak zadovoljava ispitivanje makrostrukture zavarenog spoja. Korijen je potpuno provaren, vidljivi su prolazi i naliježu jedan na drugi. Zona utjecaja topline je jasno vidljiva i jednoliko raspoređena duž zavara. Nema vidljivih pukotina i pojave naljepljivanja.

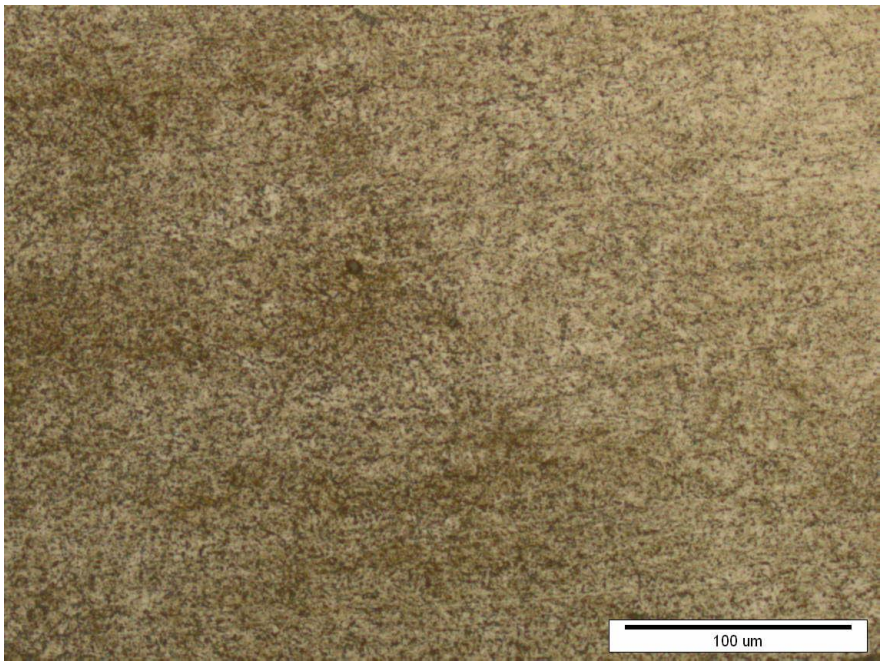


Slika 24. Prikaz makrostrukture uzorka

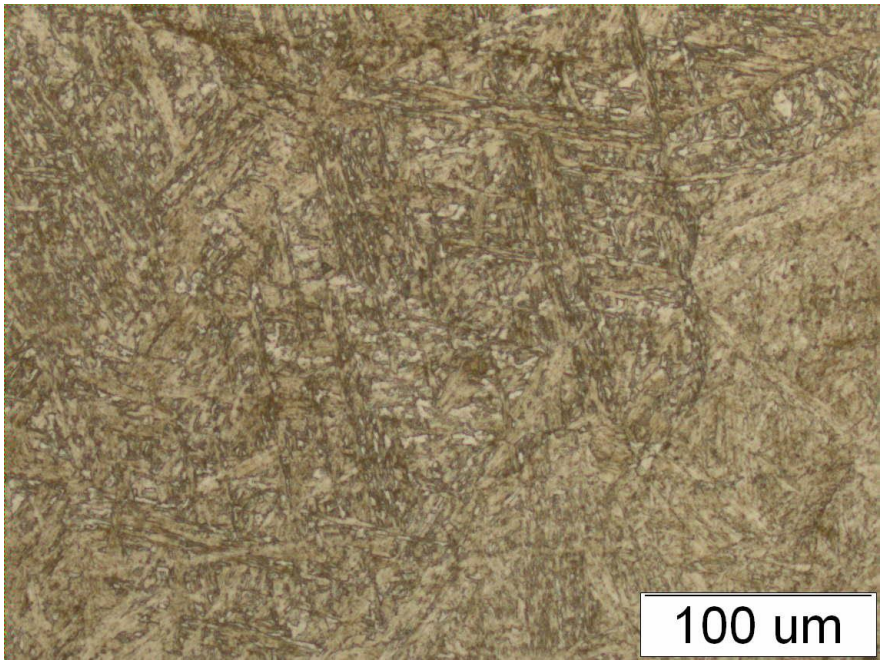
Uzorak je promatran svjetlosnim mikroskopom pri povećanju od 200 puta, te se iz toga dobio izgled mikrostrukture uzorka. Slikane su mikrostruktura osnovnog materijala, ZUT-a i metal zavara.



Slika 25. Prikaz mikrostrukture osnovnog materijala



Slika 26. Prikaz mikrostrukture ZUT-a



Slika 27. Prikaz mikrostrukture metala zavara

Analizom makrostrukture i mikrostrukture nisu uočene nikakve nepravilnosti u vidu grešaka u zavarenom spoju (pore, pukotine, uključci i slično). Mikrostruktura metala zavara je Widmanstattenova što je tipična mikrostruktura zavarenih spojeva.

6.4. Mjerenje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je Vickersovom metodom (HV10) na makroizbrusku uzorka prema uputama u normi HRN EN ISO 15614-1. Ispitivanje je provedeno u 2 prolaza (gornja i donja strana) s ukupno trideset mjerenja. Mjerenje je provedeno na tvrdomjeru Reicherter TM12 koji je prikazan na slici 28.

Slika 28. Tvrdomjer Reicherter TM12 [5]

Primijenjena sila iznosila je 10 kiloponda, odnosno 98,04 N. Vickersovoa metoda zasniva se na utiskivanju dijamantnog indentora koji ima oblik četverostrane piramide u materijal, te se nakon toga mjeri veličina otiska. Tvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, ZUT-u i metalu zavara. Vrijeme utiskivanja iznosilo je 10 s. Tablica 8 prikazuje rezultate dobivene mjerenjem.

Tablica 8. Rezultati dobiveni mjerenjem tvrdoće

Područje	Mjerenje	Osnovni materijal	ZUT	Metal Zavara	ZUT	Osnovni materijal
1. prolaz	1	187	266	254	289	170
	2	185	272	297	317	167
	3	189	264	266	297	169
2. prolaz	1	218	281	304	317	215
	2	202	302	306	314	213
	3	205	285	317	313	227

Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti kako je tvrdoća najveća u ZUT-u, nešto manja u metalu zavara, a najmanja u osnovnom materijalu. Prema uputama u normi HRN EN ISO 15614-1 maksimalna vrijednost ne bi smjela prelaziti 320 HV10 kao što su rezultati mjerenja i pokazali.

7. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme energetska postrojenja zbog zahtjeva za što većom iskoristivosti rade na vrlo visokim temperaturama i tlakovima što utječe na materijale koji se nalaze u takvom okruženju. Kako se razvija industrija tako su sve veći tlakovi i temperature koji djeluju na materijal. To dovodi do razvijanja novih i boljih materijala koji su izdržljivi u takvim uvjetima. Dodaju se novi legirni elementi osnovnom materijalu i tako se poboljšavaju svojstva materijala. Osnovna svojstva koja se traže za rad u takvim uvjetima su dobra otpornost na puzanje, visoka korozijska otpornost u vodi i pari, dobra toplinska vodljivost, dobra zavarljivost i druge. Jedan od materijala koji ispunjava zahtjeve je niskolegirani 10CrMo9-10 čelik. Kao jedan od najzastupljenijih postupaka zavarivanja današnjice, MAG postupak je primijenjen za zavarivanje uzorka na kojem je proveden eksperimentalni dio rada. U eksperimentalnom dijelu rada zavaren je lim debljine 20 mm MAG postupkom zavarivanja impulsnim načinom prijenosa materijala. Nakon zavarivanja provedena je dodatna toplinska obrada uzorka kako bi se dobila dobra kvaliteta zavara i smanjila zaostala naprezanja. Nakon toga uzet je uzorak i ispitan. Prema normi HRN EN ISO 15614-1 provedena su ispitivanja tvrdoće, makrostrukture i mikrostrukture. Rezultati eksperimenta su unutar dozvoljenih granica norme, to pokazuje kako su parametri zavarivanja, naknadna toplinska obrada kao i sam proces zavarivanja dobro odabrani.

LITERATURA

[1] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: Zavarivački i srodni postupci, priručnik, Zagreb, 2015.

[2] Golubić M.: Usporedna analiza zavarenih spojeva izrađenih konvencionalnim MAG i D-Arc postupkom, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2018.

[3] Torer I.: Primjena MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2017.

[4] Kudumović Dž.: Zavarivanje i termička obrada, Fakultet elektrotehnike i mašinstva Tuzla, Tuzla, 1998.

[5] Grd D.: D-Arc zavarivanje limova velikih debljina, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2019.

[6] Bilandžija I.: Pregled i razvoj dodatnih materijala za MAG zavarivanje, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2015.

[7] INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON SEAM WELDED QUALITY WITH MAG WELDING http://www.quality.unze.ba/zbornici/QUALITY%202005/057-Q05-003.pdf (dostupno 24.6.2020)

[8] Car L.: Izračun unosa energije analizom dinamičke karakteristike kod MAG postupka zavarivanja, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2019.

[9] Parametri zavarivanja http://www.alatistherm.co.rs/pdf.zavarivanje/ParametriZavarivanja.pdf (dostupno 24.6.2020)

[10] Klobučar M.: Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja, Završni rad, Sveučilište Sjever, 2016.

[11] Garašić I.: Bilješke s predavanja iz kolegija „Zavarivanje i Montaža“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[12] Filetin T., Kovačiček F.,Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[13] Čukman J.: Primjena dodatnog materijala Inconel 625 za zavarivanje čelika P91 u razonorodnim spojevima, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2019.

[14] Ivušić V.,Franz M., Španiček Đ., Ćurković L.: Materijali 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.

[15] Ćorić D.: Posebni metalni materijali - III Dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.

[16] Hilkes J., Gross V.: Welding CrMo steels for power generation and petrochemical applications – past, present and future, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2013.

[17] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=447 (dostupno 2.7.2020)

[18] http://www.woite-edelstahl.com/17380en.html (dostupno 2.7.2020)

[19] Grabke H.J., Schütze M.: Corrosion by Carbon and Nitrogen: Metal Dusting, Carburisation and Nitridation, Woodhead publishing limited, Cambridge, England, 2007.

[20] Ławrynowicz Z.: Bainitic Reaction and microstructure evolution in two normalized and tempered steels designed for service at elevated temperatures, University of Science and Technology UTP, Poljska, 2017.

[21] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab5fc8/pdf (dostupno 5.7.2020)

[22] https://hr.wikipedia.org/wiki/Zona_utjecaja_topline (dostupno 5.7.2020)

[23] King B.: Welding and post weld heat treatment of 2.25%Cr-1%Mo steel, Diplomski rad, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2005.

[24] https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/3_1.pdf (dostupno 6.7.2020)

PRILOZI

I. CD-R Disc