

# Utjecaj parametara MIG zavarivanja na strukturalna svojstva zavarenog spoja

---

Komar, Marijan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:265207>

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

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



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





# Sveučilište Sjever

**Završni rad br. 340/PS/2020**

**UTJECAJ PARAMETARA MIG ZAVARIVANJA NA OBLIK I SVOJSTVA  
ZAVARENOG SPOJA**

**Marijan Komar, 1697/601**

Varaždin, 2021. godine



# Sveučilište Sjever

**Odjel Proizvodno Strojarstvo**

**Završni rad br. 340/PS/2020**

## **UTJECAJ PARAMETARA MIG ZAVRIVANJA NA OBLIK I SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA**

**Student**

Marijan Komar, 1697/601

**Mentor**

izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić

Varaždin, 2021. godine

## **SAŽETAK**

Tehnologija zavarivanja spada u najzastupljeniju tehnologiju spajanja materijala u industriji. U ovom završnom radu, u njegovom teorijskom dijelu, opisan je razvoj, a zatim i podjela postupaka tehnologije zavarivanja. Opisani su i načini prijenosa metala, a posebna je pozornost pridana prijenosu metala MIG/MAG postupkom.

Eksperimentalni dio završnog rada donosi rezultate ispitivanja utjecaja triju različitih kombinacija parametara zavarivanja na mikrostrukturu i mikrotvrdoću zavara i zone utjecaja topline. Ispitivanje je obuhvatilo zavarivanje triju ispitnih uzoraka pomoću robota s MIG/MAG impulsnim postupkom pod zaštitom jednakih plinskih mješavina i dodatnog materijala, ali različitih jakosti struje te brzina zavarivanja.

Nakon dijela o zavarivanju, opisan je postupak pripreme uzoraka za ispitivanje mikrostrukture i mikrotvrdoće te su na kraju prikazani dobiveni rezultati ispitivanja.

## **SUMMARY**

Welding technology is one of the most common material joining technology in the industry. In this final paper, in its theoretical part, the development and then the division of welding technology procedures is described. Methods of metal transfer are also described, and special attention is paid to metal transfer by MIG/MAG process.

The experimental part of the final work brings the results of testing the influence of three different combinations of welding parameters on the microstructure and microhardness of welds and heat affected zones. The test included welding three test specimens using a robot with a MIG/MAG pulse process under the protection of the same gas mixtures and additional material, but different current strengths and welding speeds.

After the part about welding, the procedure of preparation of samples for testing the microstructure and microhardness is described, and finally the obtained test results are presented.

## Popis slika

Slika 1. Elementi zavarenog spoja [1].....	1
Slika 2. Kovačko zavarivanje [4] .....	3
Slika 3. Podjela postupka zavarivanja taljenjem [7] .....	6
Slika 4. Podjela postupka zavarivanja pritiskom [7] .....	7
Slika 5. Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja [8].....	8
Slika 6. Utjecaj vrste zaštitnog plina na zavar [9].....	10
Slika 7. Parametri zavarivanja [10] .....	11
Slika 8. Sinergijski aparat za zavarivanje [11].....	11
Slika 9. Shematski prikaz zavarivanja kratkim lukom [12].....	12
Slika 10. Štrcajući luk [9].....	13
Slika 11. Prijelazni luk [9].....	14
Slika 12. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [1] .....	15
Slika 13. Robot za zavarivanje [13] .....	16
Slika 15. WeldPRO program za OFF-line programiranje [15] .....	19
Slika 16. Izgled programa za zavarivanje .....	20
Slika 17. Registar zavarivanja .....	20
Slika 18. Dodavač žice [11] .....	21
Slika 19. Aparat za robotsko zavarivanje [11].....	21
Slika 20. Robot za zavarivanje [13] .....	22
Slika 21. Prikaz omjera između snage.....	24
Slika 22. Zavarivanje uzoraka.....	27
Slika 23. Rezanje zavarenih uzoraka .....	29
Slika 24. Izrezani uzorci.....	29
Slika 25. Buehler Pneumet press .....	30
Slika 26. Polimerni kalup .....	31
Slika 27. Buehler Phoenix Alpha .....	31
Slika 28. Uzorci nakon brušenja .....	31
Slika 29. Struers DAP-V .....	32
Slika 30. Uzorci nakon poliranja .....	32
Slika 31. Makroanaliza uzoraka.....	33
Slika 32. Svjetlosni mikroskop .....	34

Slika 33. Mikrostruktura korijena zavara pri povećanju 200 x - Uzorak 1 .....	37
Slika 35. Mikrostruktura korijena zavara pri povećanju 200 x - Uzorak 3 .....	38
Slika 36. Mikrostruktura zone utjecaja topline pri povećanju 200x - Uzorak 1 .....	38
Slika 37. Mikrostruktura zone utjecaja topline pri povećanju 200x - Uzorak 2 .....	39
Slika 38. Mikrostruktura zona utjecaja topline pri povećanju 200x - Uzorak 3 .....	39
Slika 39. Mjerni uređaj za ispitivanje tvrdoće metodom Vickers .....	40
Slika 40. Očitavanje vrijednosti kod ispitivanja tvrdoće .....	41
Slika 41. Rezultati ispitivanja korijena zavara .....	43
Slika 42. Rezultati ispitivanja lica zavara .....	43

## **Popis tabela**

Tabela 1. Vrste prijenosa metala električnog luka .....	12
Tabela 2. Tehnički podaci robota serije Arc Mate 100iC/7L.....	17
Tabela 3. Postavke aparata za zavarivanje [16].....	23
Tabela 4. Karakteristike dodatnog materijala za zavarivanje .....	24
Tabela 5. Kemijski sastav dodatnog materijala [17].....	25
Tabela 6. Oznaka čelika .....	26
Tabela 7. Karakteristike čelika [18].....	26
Tabela 8. Usporedba parametara zavarivanja ispitnih uzoraka .....	28
Tabela 9. Mikrostruktura korijena zavara i ZUT-a pri povećanju 50X .....	35
Tabela 10. Mikrostruktura korijena zavara i ZUT-a pri povećanju 100X .....	36
Tabela 11. Mikrotvrdoća po Vickers-u .....	42

## Popis korištenih kratica

ZT	- zona taljenja
MZ	- metal zavara
OM	- osnovni materijal
ZUT	- zona utjecaja topline
MIG	- (Metal Inert Gas) elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova
MAG	- (Metal Active Gas) elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnih plinova
TIG	- (Tungsten Inert Gas) elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova
EPP	- elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
CO <sub>2</sub>	- Ugljikov dioksid
Ar	- Argon
Al	- Aluminij
Cu	- Bakar
Ni	- Nikal
C	- Ugljik
Mn	- Mangan
Si	- Silicij
Cr	- Krom
Ti	- Titanij

## Popis korištenih oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
I	A (amper)	Jakost električne struje
U	V (volt)	Razlika električnog potencijala (napon)
F	N (Newton)	Mjerna jedinica za silu ( $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ )
W	J (Joule)	Mjerna jedinica za rad
$\mu\text{m}$	mikrometar	Izvedena mjerna jedinica dužine ( $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ )

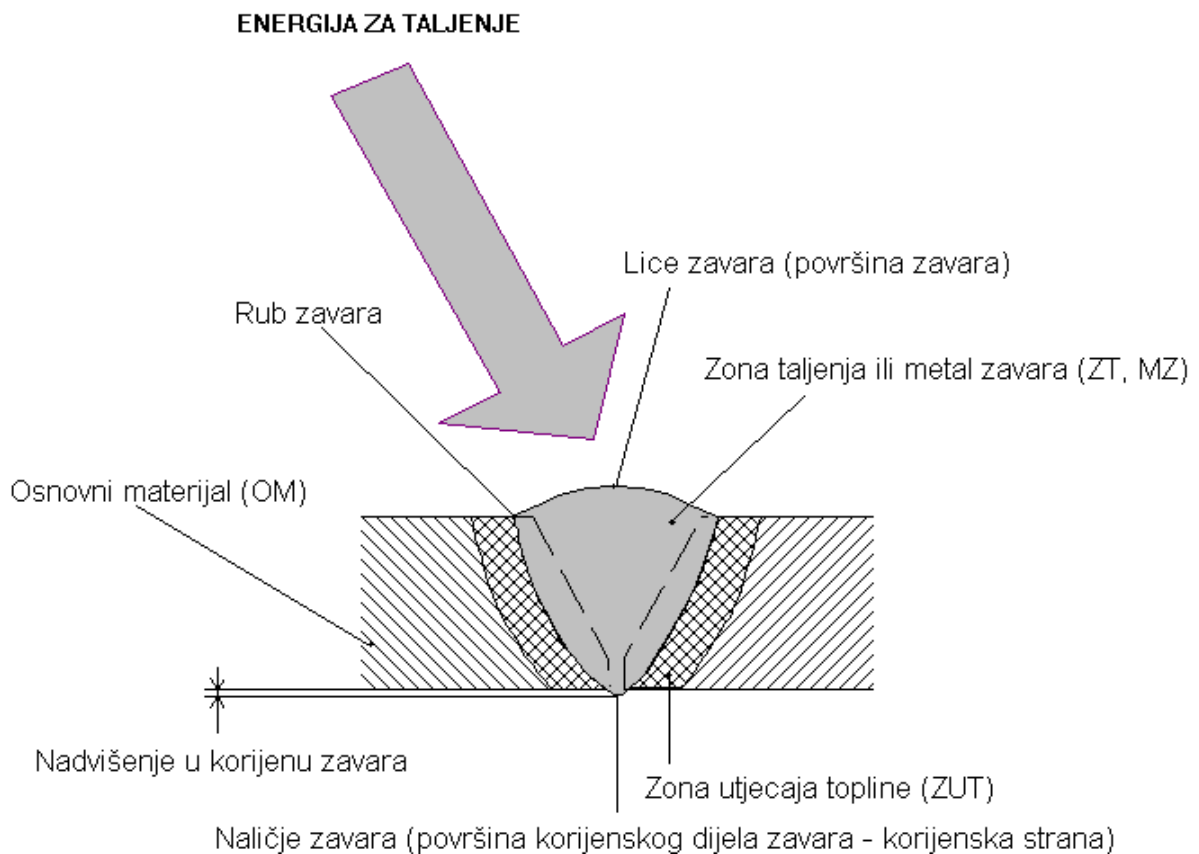
## Sadržaj

1.	UVOD.....	1
2.	POVIJEST I RAZVOJ ZAVARIVANJA.....	3
2.1.	Razvoj zavarivanja u Hrvatskoj.....	5
3.	POSTUPCI ZAVARIVANJA.....	6
3.1.	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom plinova.....	8
3.2.	Prijenos metala električnim lukom pri MIG/MAG zavarivanju.....	12
3.2.1.	<i>Kratki luk</i> .....	12
3.2.2.	<i>Štrcajući luk</i> .....	13
3.2.3.	<i>Prijelazni luk</i> .....	14
3.2.4.	<i>Pulsirajući luk</i> .....	15
4.	EKSPERIMENTALNI DIO - ZAVARIVANJE UZORAKA.....	16
4.1.	Oprema za zavarivanje.....	16
4.2.	Programiranje robota.....	17
4.3.	Aparat za zavarivanje.....	21
4.3.1.	Postavke aparata za zavarivanje.....	22
4.4.	Dodatni materijal.....	24
4.5.	Osnovni materijal.....	25
4.6.	Zavarivanje uzoraka.....	27
5.	EKSPERIMENTALNI DIO – ISPITIVANJE UZORAKA.....	30
5.1.	Priprema uzoraka za ispitivanja.....	30
5.2.	Ispitivanje mikrostrukture.....	34
5.3.	Ispitivanje mikrotvrdoće.....	40
6.	ANALIZA REZULTATA.....	44
7.	ZAKLJUČAK.....	46
8.	LITERATURA.....	47



# 1. UVOD

Zavarivanje je jedna od najzastupljenijih tehnologija u industriji, a možemo ga definirati kao spajanje dvaju ili više materijala (istorodnih ili raznorodnih) s dodatnim materijalom ili bez njega, na način da se dobije homogeni nerastavljivi spoj. Slika 1. prikazuje poprečni presjek zavarenog spoja s označenim osnovnim elementima.



Slika 1. Elementi zavarenog spoja [1]

Zavareni spoj čine zona taljenja (ZT) i zona utjecaja topline (ZUT). Zona taljenja dio je zavarenog spoja koji je tijekom zavarivanja bio rastaljen, a prilikom hlađenja dolazi do pojave kristalizacije i skrućivanja. U kupki zavara dolazi do sličnih pojava kao pri proizvodnji metala pri čemu dolazi do međusobnog djelovanja rastaljenog metala, troske i okolne atmosfere. Djelovanjem izvora topline dolazi do izgaranja pojedinih kemijskih elemenata (C, Mn, Si, Cr, Ni, Ti i drugi), a iz troske (obloga elektrode, prah, žica za zavarivanje) moguće je dodavanje legiranih elemenata u

rastaljeni metal. Zbog djelovanja atmosfere oko rastaljenog metala u metalnoj kupci dolazi do stvaranja oksida, nitrida, karbida, karbonitrda, sulfida, eutektika, intermetalnih spojeva i drugih faza [2].

Metalna kupka sastoji se od osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. Zona utjecaja topline dio je osnovnog materijala koji se nalazi neposredno uz rastaljenu zonu, gdje se zbog unesene topline tijekom zavarivanja osnovnom materijalu mijenjaju kristalna struktura i mehanička svojstva. Njena širina ovisi o unosu topline, a najčešće iznosi od 2 do 8 milimetara.

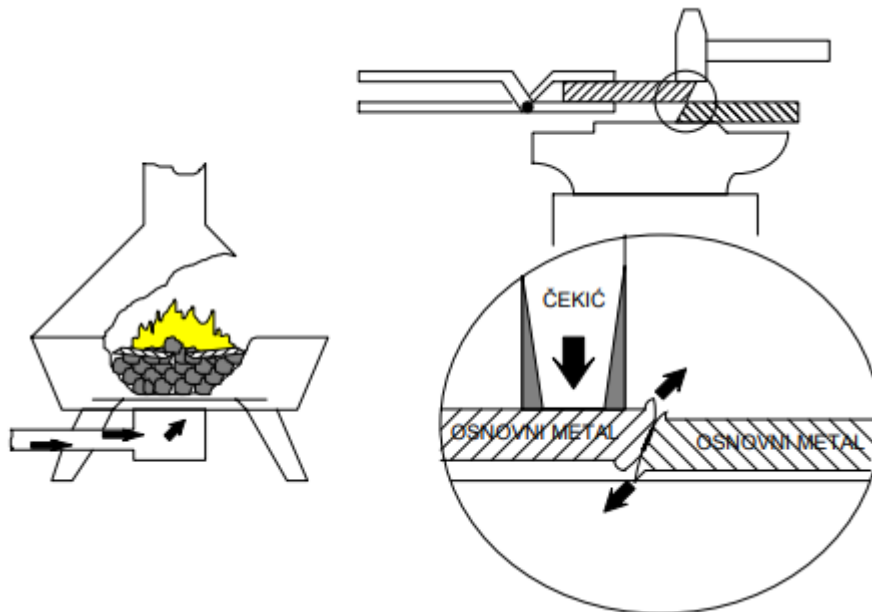
Zbog sve većih zahtjeva za kvalitetom i ekonomičnošću zavarivanja razvijaju se novi postupci zavarivanja koji se prilagođavaju zahtjevima industrije. Uz razvoj novih tehnologija, industrija također ima zadatak optimiranja postupaka, tj. smanjenja troškova same izrade proizvoda kako bi se proizveli novi proizvodi uz što niže troškove i uz ostvarivanje što većeg profita. Sve veća fleksibilnost proizvodnje rezultat je modernizacije postrojenja, kao i njegove automatizacije, što je, primjerice, vidljivo kod suvremene auto industrije (važna je uloga robota koji doprinose uštedi vremena i materijala proizvodnje, zamjenjuju čovjeka kod određenih poslova, dovode do najveće moguće razine automatizacije postrojenja) [2].

## 2. POVIJEST I RAZVOJ ZAVARIVANJA

U starom su vijeku poznati bili oblici spajanja kovanjem, lijevanjem i lemljenjem. Pritom su korišteni bakar i bronca koji su zbog nižeg tališta mogli biti izdvojeni iz rude taljenjem u vatri [3].

Zavarivanje je bilo vještina koju su kovači, zlatari i ljevači razvijali pri izradi oruđa, oružja, nakita, raznih posuda, kao i kod izrade građevina. Ljevačko se zavarivanje razvilo usporedno s razvojem vještine lijevanja, pa, primjerice, kod tankostjenih lijevanih vaza iz bronce nalazimo i zavarene dijelove. Kasnijim su se lijevanjem na tijelo vaze, neke druge posude ili predmeta spajale razne figure, držači i slično [3].

U srednjem vijeku razvilo se kovačko zavarivanje koje se izvodi tako da se krajevi dvaju dijelova koje se želi zavariti zagriju u kovačkoj vatri, sve dok ne dođe do bijelog usijanja te se, ako je potrebno, pospu određenim prahom (pijeskom) za „čišćenje“. Zatim se rastaljeni oksid ili trosku istiskuje s dodirnih površina čekićanjem spoja, a djelovanjem međuatomskih sila dvaju dijelova dolazi do sučeljavanja čistih metalnih površina te nastaje čvrsti zavareni spoj, prikazano na slici 2 [3].



Slika 2. Kovačko zavarivanje [4]

Ruski znanstvenik Vasilij Petrov 1802. godine istražuje električni luk za opću namjenu te predlaže primjenu električnog luka za zavarivanje. Nikolaj Benardos, poznati ruski izumitelj, 1882. godine prvi koristi električni luk između ugljene elektrode

i metala i to dodavanjem žice u metalnu kupku, a ruski inženjer Nikolaj Slavjanov šest godina kasnije predlaže elektrolučno zavarivanje korištenjem metalne elektrode.

Obložena elektroda pojavljuje se 1907. godine, proizvodila se uranjanjem metalne žice u rastaljenu kupku određenog kemijskog sastava, a od 1936. obloga se nanosi isprešavanjem ili ekstrudiranjem. Od 1925. godine počinje zavarivanje u zaštitnoj atmosferi vodika „arcatom“, a s vremenom se počinju koristiti helij i argon. Od 1930. godine u brodogradnji SAD-a počinje se koristiti automatsko zavarivanje pod praškom [3].

Zavarivanje MIG postupkom počinje se primjenjivati 1948. godine, a od 1953. započinje se s primjenom zavarivanja MAG postupkom s CO<sub>2</sub> zaštitnim aktivnim plinom.

Lyubavshkii i Novoshilov doprinijeli su razvoju boljih struja zavarivanja te razvoju elektroda s manjim promjerom. Naime, oni su predstavili MIG/MAG postupak zavarivanja koji je uključivao korištenje elektroda većih promjera te zaštitni plin CO<sub>2</sub>. Taj je način zavarivanja imao određene nedostatke, no rezultirao je daljim istraživanjima koja su na kraju dovela do razvoja zavarivanja u kratkom spoju. Zavarivanje u kratkom spoju omogućilo je zavarivanje ne samo u horizontalnom položaju, već i u kosom i vertikalnom položaju. Kasnije dolazi do razvoja žica za zavarivanje i tu se razvijaju praškom punjene žice.

Početak 1960-ih godina razvijena je nova tehnika prijenosa metala – prijenos metala pulsirajućim lukom. Postupak zavarivanja je jako sličan prijenosu metala štrcajućim lukom uz kontrolu odvajanja kapljice dodatnog materijala u metalnu kupku. Sljedećih godina, a posebice pod utjecajem pojave prvih tiristora, MAG zavarivanje impulsnim lukom postiže veliki razvoj. Karakteristike tiristora koje mu daju prednost u usporedbi s drugim uređajima za zavarivanje su mala masa i manji gubici u transformatoru, što se postiže smanjivanjem dimenzija transformatora [5].

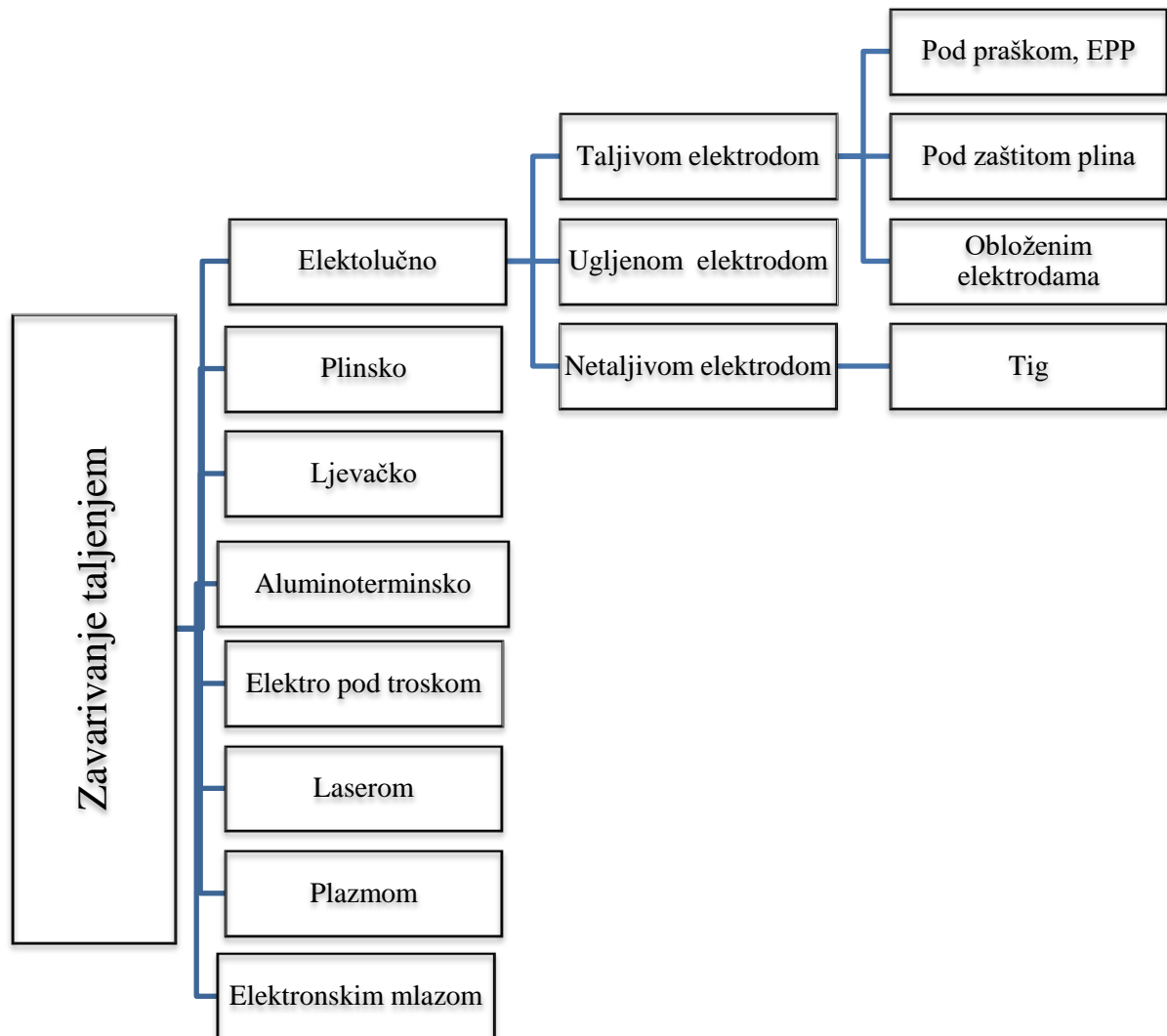
## **2.1. Razvoj zavarivanja u Hrvatskoj**

Kada se govori o zavarivanju u Hrvatskoj, važno je istaknuti kako je njegov istaknutiji razvoj vidljiv za vrijeme Drugog svjetskog rata. Prije tog razdoblja razne čelične konstrukcije spajale su se zakovicama, a primjenjivalo se plinsko zavarivanje i ručno elektrolučno zavarivanje s elektrodama. Među prvim većim projektom koji je u cijelosti izveden u zavarenoj tehnici bio je most na rijeci Savi u Zagrebu. Most na Savi bio je jedan od prvih uspješno zavarenih mostova u svijetu, a izrađen je zavarivanjem limova debljine do 95 mm, čvrstoće 440 MPa, uz predgrijavanje i kontrolu industrijskom radiografijom.

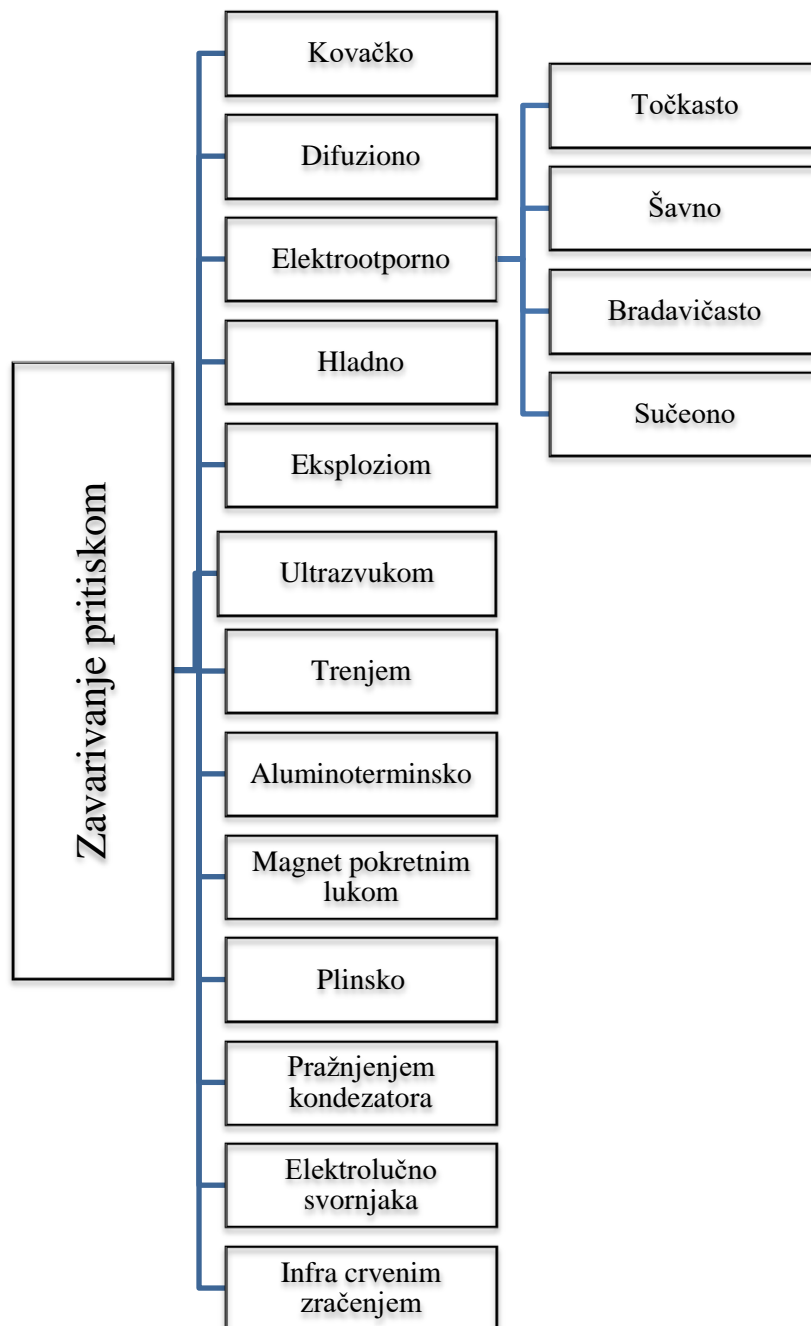
U razdoblju od 1950. do 1960. napuštaju se konstrukcije spajane zakovičnim spojem, a pored elektrolučnog zavarivanja postepeno se uvode ostali postupci zavarivanja [3].

### 3. POSTUPCI ZAVARIVANJA

Kod postupaka zavarivanja razlikuju se dva osnovna načina: zavarivanje pritiskom i zavarivanje taljenjem. Kod zavarivanja pritiskom za ostvarenje zavarenog spoja koristi se toplinsko-mehanička ili samo mehanička energija, a zavarivanje taljenjem koristi toplinsku energiju. U nastavku, na slici 3. prikazana je podjela postupka zavarivanja taljenjem, dok slika 4. prikazuje podjelu postupka zavarivanja pritiskom.



Slika 3. Podjela postupka zavarivanja taljenjem [7]



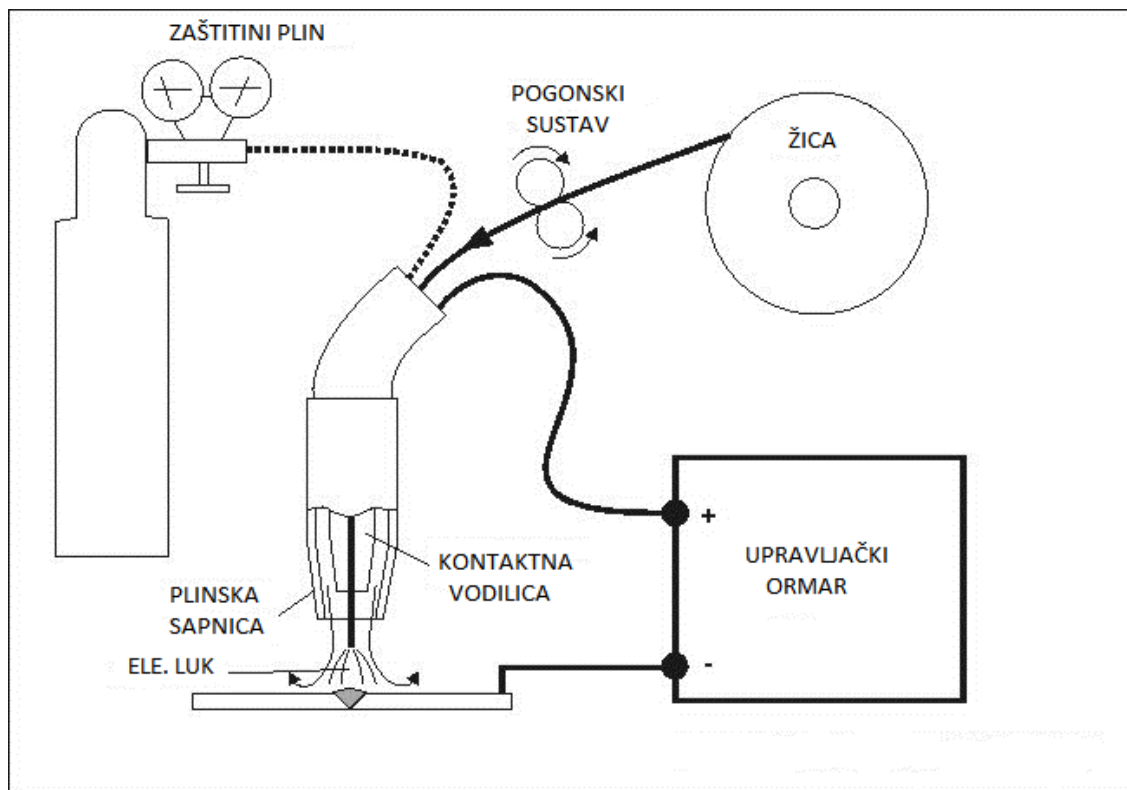
Slika 4. Podjela postupka zavarivanja pritiskom [7]

Prilikom izrade ovog završnog rada korišteno je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom plinova te je fokus ovog rada samo na ovom postupku zavarivanja.

### 3.1. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom plinova

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom plinova ostvaruje se toplinom električnog luka koji nastaje između taljive elektrode (dodatni materijal) i radnog komada (osnovni materijal) koji se zavaruje. Prema vrsti zaštitnog plina koji se koristi tijekom zavarivanja razlikuju se dva postupka: pod zaštitom inertnih plinova (MIG, engl. Metal Inert Gas) i pod zaštitom aktivnih plinova (MAG, engl. Metal Active Gas). Inertni plinovi kod zavarivanja stvaraju inertnu atmosferu i ne reagiraju u doticaju s talinom zavara (tu spadaju argon i helij). Argon kao jeftinija verzija plemenitog plina pronalazi veliki udio korištenja u praksi, koristi se samostalno ili u mješavini, najčešće s dušikom ili vodikom. Kod aktivnih zaštitnih plinova dolazi do kemijskih procesa s talinom. Najčešće korišteni aktivni plin je  $\text{CO}_2$  ili mješavina plinova s većinskim udjelom  $\text{CO}_2$ . Što se pak tiče samog postupka zavarivanja i opreme za zavarivanje, kod MIG i MAG postupka oni su jednaki.

Zavarivanja MIG/MAG su poluautomatski ili automatski postupak. Dovođenje taljive elektrode (žice za zavarivanje) je konstantno, a vođenje i držanje gorionika za zavarivanje može biti ručno, pomoću dodatnih mehanizama ili robotizirano.



Slika 5. Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja [8]



Slika 5. prikazuje shemu MIG/MAG zavarivanja. Osnovni element kod MIG/MAG zavarivanja su upravljački ormar, žica za zavarivanje, zaštitni plin, pogonski sustav, sapnica za plin i kontaktna vodilica za žicu. Žica se dodaje konstantnom brzinom i istovremeno služi kao elektroda i dodatni materijal. Zaštitni plin prolazi kroz plinsku sapnicu na gorioniku te se upuhuje u atmosferu luka. On štiti zavar od negativnih utjecaja iz okoline te utječe na geometriju zavara, unesenu toplinu te penetraciju.

### **Parametri kod MIG/MAG zavarivanja:**

#### **- jakost struje:**

Jakost struje određuje se prema vrsti materijala, njegovoj debljini, položaju zavarivanja te debljini žice za zavarivanje. Jakost struje utječe na stabilnost električnog luka, unos topline, dubinu protaljivanja, brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Jača struja zahtijeva više dodatnog materijala, povećava dubinu protaljivanja te je kod nje brzina zavarivanja veća.

#### **- brzina zavarivanja:**

Brzina zavarivanja je brzina pomicanja električnog luka po liniji zavarivanja. Brzina zavarivanja odabire se s obzirom na položaj zavarivanja i jakosti struje zavarivanja. Parametar brzine usklađuje se s količinom taline. Prevelika brzina zavarivanja daje preveliko nadvišenje zavara i protaljivanje je manje, dok premala brzina zavarivanja daje širi var, veći unos topline i jače protaljivanje.

#### **- slobodni kraj žice:**

Slobodni kraj žice odnosi se na dužinu žice od kraja kontaktne vodilice do početka električnog luka. Parametar slobodnog kraja žice utječe na izgled zavara i potrebno ga je držati u određenim granicama. Kada je dužina slobodnog kraja prevelika, postoji višak dodatnog materijala, dolazi do većeg prskanja, manjeg protaljivanja i nadvišenja šava. Kod premalog slobodnog kraja žice pojačava se struja zavarivanja, te se jače onečišćuje sapnica gorionika.

#### **- napon:**

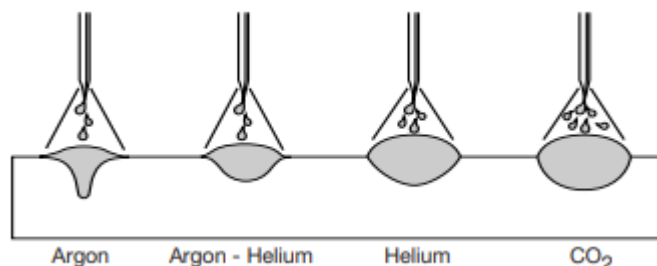
O naponu ovisi stabilnost luka, dubina protaljivanja, širina i nadvišenje zavora. Veći napon daje širi zavar uz manje protaljivanje, dok manji napon daje užu zavar s jačim protaljivanjem. Regulaciju napona i jakost struje uređaji za zavarivanje reguliraju sami pa se unosi samo jedan parametar, dok se drugi regulira automatski.

#### **- induktivitet:**

Induktivitet je parametar koji se koristi za fino podešavanje zavarivanja kako bi se postigao bolji prijenos metala u električnom luku. Induktivitet je brzina porasta jakosti struje zavarivanja u vremenskom periodu nakon uspostavljanja kratkog spoja. Povećanjem induktiviteta jakost struje sporije ostvaruje željenu veličinu, a frekvencija kratkih spojeva se smanjuje. Današnji uređaji za zavarivanje sami reguliraju induktivitet s obzirom na druge podešene parametre.

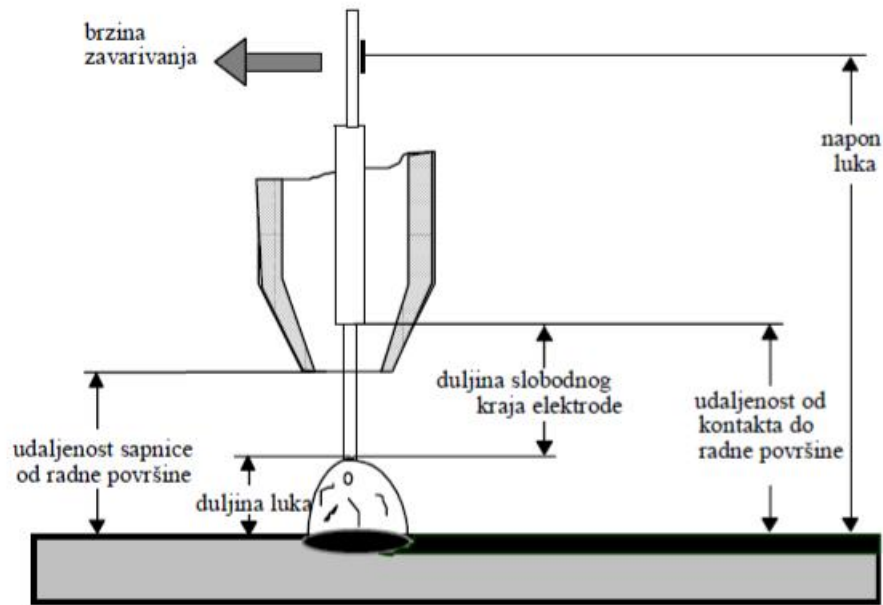
#### **- protok zaštitnog plina:**

Zaštitni plin ima ulogu zaštite zavora od negativnih utjecaja iz okoline te utječe na geometriju zavora, stabilnost električnog luka i dubinu protaljivanja. Podešava se ovisno o jakosti struje zavarivanja, uvjetima u kojima se vrši zavarivanje te o vrsti spoja. Osim odabira količine plina važno je odabrati i vrstu zaštitnog plina. Njihov odabir bitno utječe na izgled lica i korijena zavora, prikazano na slici 6.



Slika 6. Utjecaj vrste zaštitnog plina na zavar [9]

Na slici 7. prikazani su najvažniji parametri kod MIG/MAG postupka zavarivanja.



Slika 7. Parametri zavarivanja [10]

Zbog postizanja što boljih parametara zavarivanja, uređaji za MIG/MAG zavarivanje nemaju klasično podešavanje parametara (brzina žice, napon, jakost struje), već koriste sinergijsko upravljanje gdje se najčešće podešava samo brzina dobave žice, a ostali parametri zavarivanja podešavaju se automatski. Ostali parametri se podešavaju prema unesenim karakteristikama (vrsta i debljina materijala, debljina žice za zavarivanje, vrsta zašitnog plina i dr.). Takvi uređaji uvelike olakšavaju i ubrzavaju rad zavarivaču. Slika 8. prikazuje uređaj sa sinergijskim upravljanjem.



Slika 8. Sinergijski aparat za zavarivanje [11]

### 3.2. Prijenos metala električnim lukom pri MIG/MAG zavarivanju

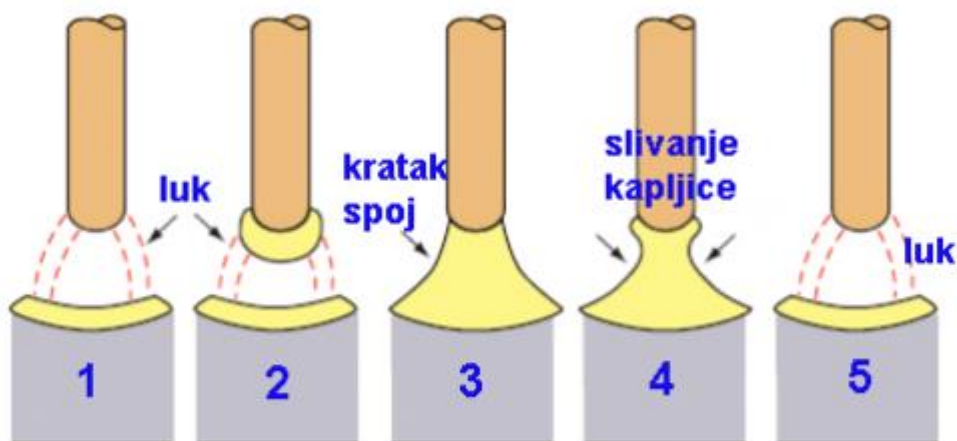
Prijenos metala u MIG/MAG zavarivanju moguće je ostvariti na četiri osnovna načina prijenosa metala: kratki luk, prijelazni luk, štrcajući luk te pulsirajući luk, prikazano u tabeli 1. Način na koji se ostvaruje prijenos metala ovisi o jakosti struje zavarivanja, naponu, vrsti zaštitnog plina, dodatnom materijalu i polaritetu elektrode.

Tabela 1. Vrste prijenosa metala električnog luka

Kratki luk	Prijelazni luk	Štrcajući luk	Pulsirajući luk
I=50-170 A	I=170-235 A	I=200-600 A	I=50-600 A
U=13-21 V	U=22-25 V	U=25-40 V	U=13-40 V

#### 3.2.1. Kratki luk

Prijenos metala kratkim lukom ostvaruje se konstantnim kratkim spojevima elektrode (žice) i osnovnog materijala. Pri dodiru žice s osnovnim materijalom dolazi do kratkog spoja, električni luk se prekida, a napon pada na nulu dok struja zavarivanja naglo poraste. U tom trenutku dolazi do otkidanja kapljice s vrha elektrode te se ponovo uspostavlja električni luk. Ciklus se ponavlja između sto i dvijesto pedeset puta u sekundi [10]. Slika 9 prikazuje faze kod zavarivanja kratkim lukom.



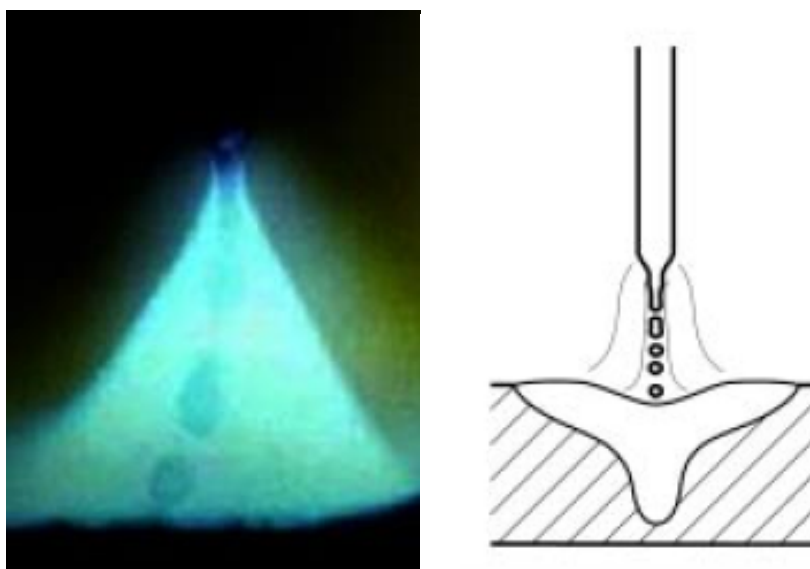
Slika 9. Shematski prikaz zavarivanja kratkim lukom [12]

Kod prijenosa metala kratkim lukom prisutan je mali unos topline pa je pogodan za zavarivanje tanjih materijala (do 5 mm) i zavarivanje korijena kod debljih materijala. Zavarivanje kratkim lukom najčešće se provodi u zaštitnoj atmosferi ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) ili mješavinama  $\text{CO}_2$ , argona (Ar) i kisika ( $\text{O}_2$ ).

Prednosti zavarivanja kratkim lukom su: jednostavno rukovanje, mogućnost zavarivanja u svim položajima, manje deformacije zavara zbog malog unosa topline, iskoristivost elektrode 93 % i više. Nedostaci zavarivanja kratkim lukom su: nedovoljno protaljivanje i pretjerano štrcanje, otežan rad na otvorenom zbog zaštite područja zavarivanja od gubitka zaštitnog plina i ograničenje primjene samo na tanje materijale [12].

### 3.2.2. Štrcajući luk

Prijenos metala štrcajućim lukom ostvaruje se uz veliki napon i jaku struju zavarivanja. Kod štrcajućeg luka prijenos metala s vrha elektrode ide slobodnim letom kroz atmosferu luka. Elektroda nema direktni kontakt s osnovnim materijalom jer se kapi taline aksijalno gibaju s elektrode, tj. žice zavarivanja, slika 10. Prijenos metala je vrlo stabilan, unos topline i dubina protaljivanja su veliki pa je pogodan za zavarivanje debljih materijala. Struje zavarivanja su od 200 do 600 A i napona od 25 do 40 V.



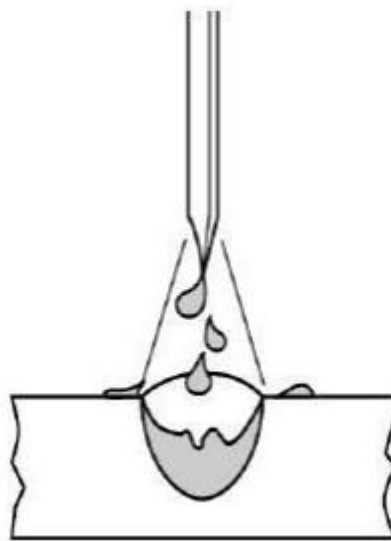
Slika 10. Štrcajući luk [9]

Za ostvarivanje štrcajućeg luka potrebno je osigurati plinsku mješavinu argona i kisika (1,5 % O<sub>2</sub>) ili mješavinu argona i ugljičnog dioksida s postotkom CO<sub>2</sub> manjim od 18 %.

Prednosti štrcajućeg luka su: manje prskanje, visoka iskoristivost elektrode (98 %), zavarljivost za široki spektar materijala i vrlo se lako automatizira. Nedostaci su: primjena samo na debljim materijalima, ograničeni položaj zavarivanja, zaštitni plinovi su skuplji (argon) [12].

### 3.2.3. Prijelazni luk

Kod prijenosa metala prijelaznim lukom metal se djelomično prijenosi kratkim spojevima, a djelomično štrcajućim lukom, prolazom kapi kroz električni luk, slika 11. Struje zavarivanja su od 170 do 235 A, napona od 22 do 25 V. Zbog nepravilnog odvajanja kapljica u luku dolazi do većeg štrcanja tijekom zavarivanja. Najčešće korištena zaštitna atmosfera plina je 100 % CO<sub>2</sub>, ili mješavinu argona (Ar) i CO<sub>2</sub>.



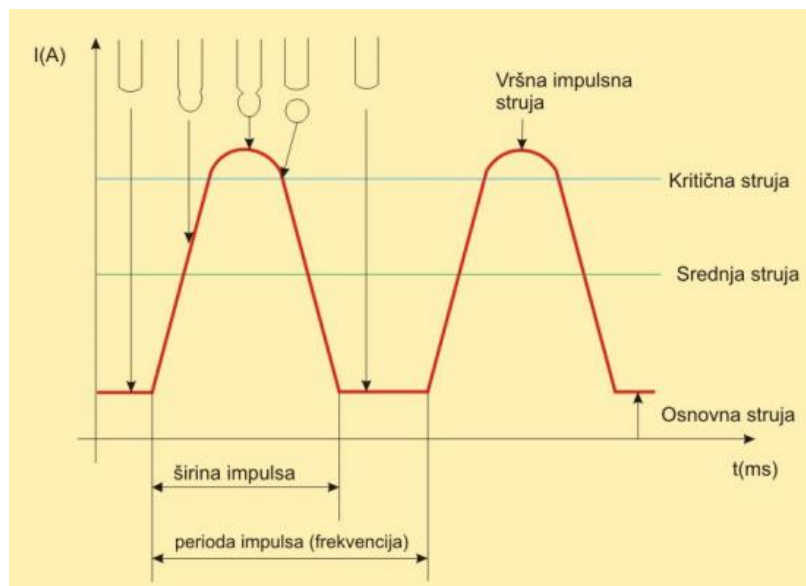
Slika 11. Prijelazni luk [9]

Prednosti ovog načina prijenosa metala su: jeftiniji zaštitni plin, velike brzine zavarivanja, jeftina oprema za zavarivanje i niska cijena dodatnog materijala.

Nedostaci prijelaznog luka su: značajno povećanje prskanja tijekom zavarivanja, mala iskorištenost elektrode (87 % - 93 %) i ograničenost na horizontalne položaje zavarivanja [12].

### 3.2.4. Pulsirajući luk

Prijenos metala impulsnim lukom vrlo je sličan prijenosa metala štrcajućem luku, uz veliku kontrolu procesa. Pojačava se vršna struja zavarivanja u trenutku odvajanja kapi taline od žice za zavarivanje. Zbog veće struje kap prije dolazi u talinu zavora nakon čega struja opada na vrijednost osnovne struje koja održava električni luk. Na taj se način osigurava stabilnost luka i smanjuje se unos topline u osnovni materijal. Proces se ponavlja u vremenskom razdoblju koji se regulira, a iznosi između 20 i 300 puta u sekundi. Kod pulsirajućeg luka žica za zavarivanje prenosi se bez kratkog spoja, a javlja se elektromagnetska sila i sila površinske napetosti. Slika 12 prikazuje električni impuls otkidanja kapljice.



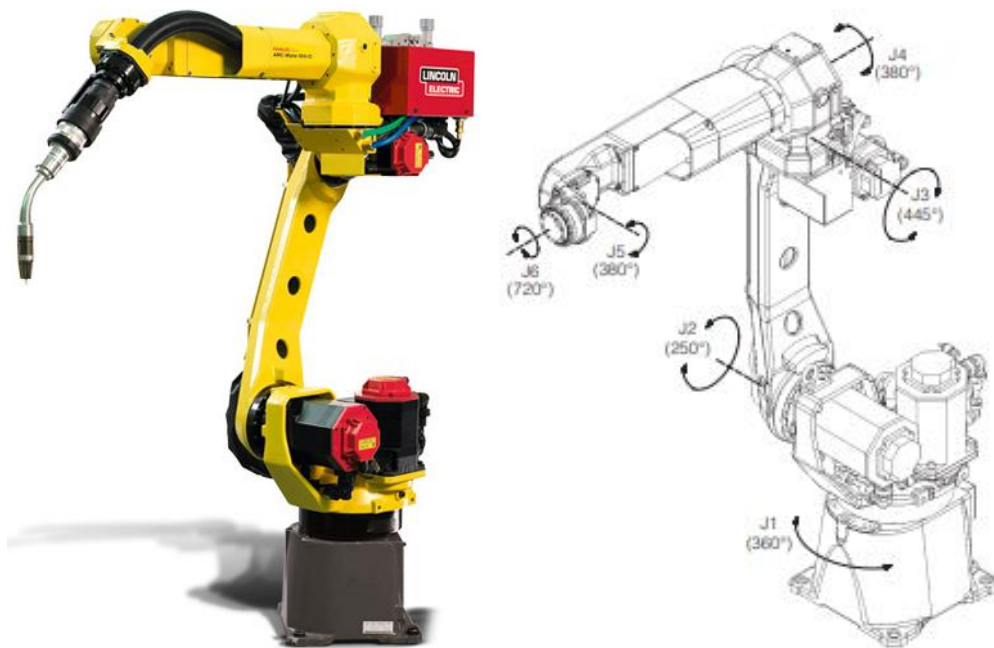
Slika 12. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [1]

Proces se sastoji od niza parametara koji utječu na način i stabilnost električnog luka (vršna impulsna struja, osnovna struja, širina impulsa, frekvencija, brzina žice). Zbog kompleksnosti postupka uređaji za impulsno zavarivanje koriste programske jedinice u kojem su pohranjene veze između parametara. Nakon odabira materijala, debljine žice i vrste zaštitnoga plina korisnik postavlja samo jedan parametar (obično brzinu žice), a uređaj sve ostalo. Glavne prednosti postupka su: smanjeno prskanje, stabilan luk i kod manjih struja, široki raspon debljina materijala i smanjeno unošenje topline u osnovni materijal. Nedostaci su: skupa oprema, skuplji zaštitni plin mješavine i složeniji uređaj za zavarivanje [12].

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO - ZAVARIVANJE UZORAKA

### 4.1. Oprema za zavarivanje

U ovom završnom radu zavarivanje ispitnih uzoraka izvršeno je pomoću robota za zavarivanje marke Fanuc, model Arc Mate 100iC /7L.



Slika 13. Robot za zavarivanje [13]

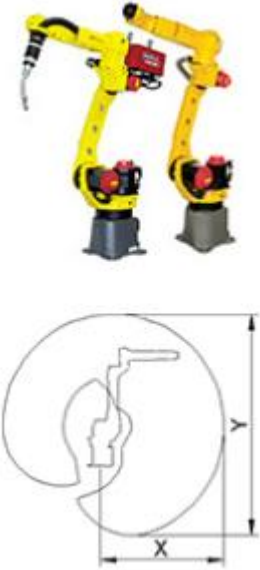
Robot, odnosno robotska ruka, stroj je za obavljanje pomoćnih operacija u proizvodnji. Sastoji se od krutih članaka koji su međusobno povezani pokretnim zglobovima. Kod robota s rotacijskim zglobovima može se uočiti naglašena sličnost s građom ljudske ruke – pojedini članci ovakvih robota odgovaraju ljudskim grudima, nadlaktici i podlaktici, a zglobovi ramenu, laktu i ručnom zglobu. Na kraju robotske ruke nalazi se završni mehanizam koji se još naziva alat.

Robot se može definirati kao programirani mehanički uređaj sa svrhom obavljanja nekih kretanja i funkcija koje obavlja čovjek, pri čemu se odlikuje određenom samostalnošću, tj. autonomnošću u radu.



Robot serije Arc Mate 100 iC je šest-osni robot, pokretan servo-električnim motorima koji mu omogućavaju veliku preciznost i brzinu kod zavarivanja ili rezanja. Baziran na jednostavnoj i pouzdanoj konstrukciji i sa jednostavnim kontrolerom i ArcTool programom za upravljanje i programiranje. Tehnički podaci robota prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Tehnički podaci robota serije Arc Mate 100iC/7L

	<b>FANUC Robot ARC Mate 100iC</b>	<b>/7L</b>
	Broj osi	6
	Težina	135 kg
	Raspon gibanja (X,Y)	1632 mm
		2930 mm
	Max. nosivost na zglobu	7 kg
Točnost ponavljanja	0,03 mm	

## 4.2. Programiranje robota

Postoje dvije metode programiranja robota:

- a) ON-LINE metoda programiranja
- b) OFF-LINE metoda programiranja

### a) ON-LINE metoda programiranja

U ovom pristupu programiranje se izvodi na radnoj poziciji robota te za vrijeme programiranja robot ne može obavljati proizvodnu funkciju. Koristi se metoda tzv. „teach-in“ metoda programiranja (učenje robota). Robot se pomoću kontrolera

„teach pendant-a” (slika 14) pomiče preko željenih točaka u prostoru. Uz koordinate navedenih točaka u memoriju se pohranjuju i željeni parametri gibanja (linear, jog, circle...), te parametri zavarivanja (početak zavarivanja, njihanje, jakost struje, praćenje, kraj zavarivanja...) Neizravno učenje je najčešći način programiranja tako da ga se uobičajeno naziva „teach in” metoda učenja.



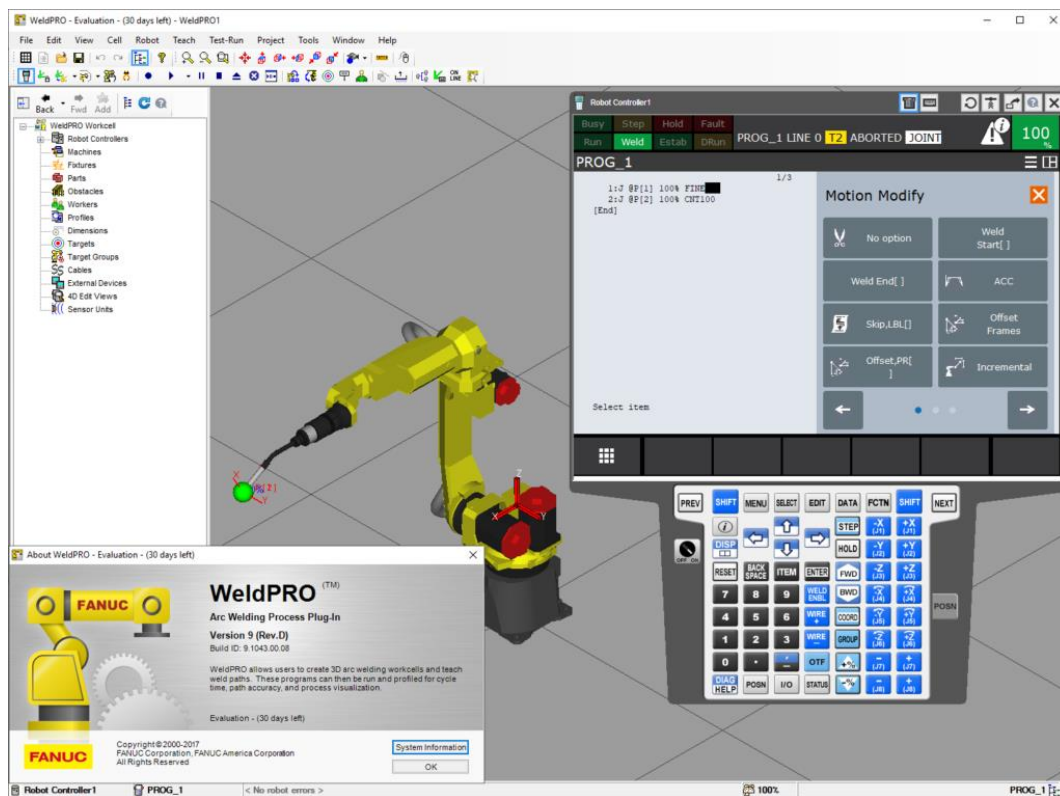
Slika 14. Kontroler za robot „teach pendant” [14]

#### b) OFF-LINE metoda programiranja

Kod ovog pristupa programiranje se izvodi pomoću specijaliziranog *softwera* na računalu s 3D simulacijom robotske stanice, radnog komada, robota i njihovog gibanja (slika 14).

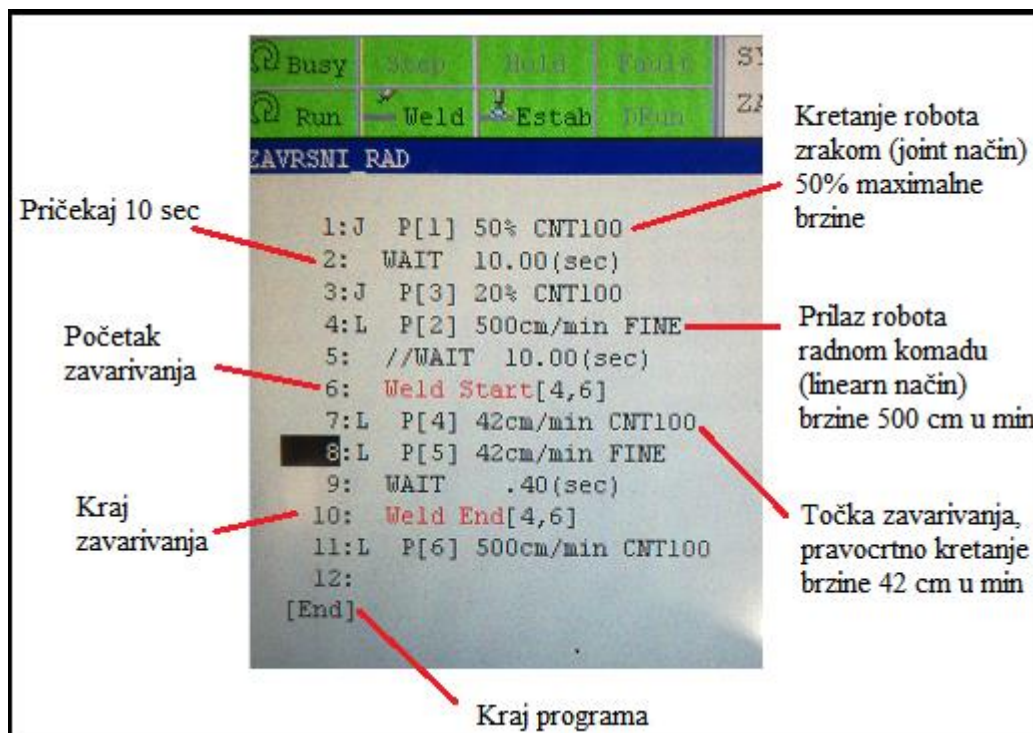
Faze OFF-LINE programiranja:

- 3D konstruiranje i kalibriranje robotske stanice (radi se samo jednom)
- 3D konstruiranje radnog komada
- Programiranje robota (prema radnom komadu-nacrtu)



Slika 145. WeldPRO program za OFF-line programiranje [15]

U ovom završnom radu program za izradu eksperimentalnog zadatka pisan je ON-LINE metodom, a sastojao se od 11 redaka/naredbi. Prva točka je u pravilu nulta točka robota, zatim slijede točke prilaznje robota radnom komadu, tri točke zavarivanja te naredba za početak i kraj zavarivanja. Četvrta točka koja je prilaz robota radnom komadu ujedno je i prva točka zavarivanja. Jakost struje odabire se iz registra za zavarivanje te se ta vrijednost može mijenjati prema potrebi. Na slici 16 prikazan je korišteni program za zavarivanje.



Slika 15. Izgled programa za zavarivanje

Kod naredbe Weld Start te Weld End, koje predstavljaju početak i kraj zavarivanja, u zagradi se nalaze oznake 4 i 6, prikazano na slici 17. Broj 4 predstavlja postupak zavarivanja, a 6 je broj redaka iz kojeg se uzimaju vrijednosti. U slučaju eksperimentalnog zadatka prikazanog u ovom završnom radu korišten je MIG/MAG Pulsni postupak, a odabrana brzina dodavanja žice je 900 cm u min.

Schedule	§	cm/min	Speed	Time
Schedule 1	-2.0	580.0	20.0	0.00
Schedule 2	20.0	200.0	20.0	0.00
Schedule 3	20.0	200.0	20.0	0.00
Schedule 4	0.0	0.0	100.0	0.00
Schedule 5	-6.0	650.0	35.0	0.00
Schedule 6	-7.0	900.0	42.0	0.00
Schedule 7	-4.0	450.0	28.0	0.00
Schedule 8	0.0	0.0	100.0	0.00
Schedule 9	-3.0	490.0	0.0	0.00
Wirestick	20.0	0.0		0.10
OnTheFly	0.1	5.0	1.0	
Wire feed	450.0 cm/min(		0.0,1800.0)	

Slika 16. Registar zavarivanja

### 4.3. Aparat za zavarivanje

Robot Fanuc Arc Mate 100iC /7L opremljen je Kemppi sustavom za zavarivanje. KempArc Pulse 350 aparat za zavarivanje dizajniran je za profesionalnu upotrebu, prikazan na slici 19. Prikladan je za automatizirano ili robotizirano klasično MIG/MAG, sinergijsko MIG/MAG i pulsno MIG/MAG zavarivanje.

U opremu za zavarivanje spada aparat za zavarivanje, dodavač žice (slika 18), hladnjak za hlađenje te gorionik za zavarivanje (slika 20).



Slika 17. Dodavač žice [11]



Slika 18. Aparat za robotsko zavarivanje [11]

Koncept KempArc Pulse uređaja za zavarivanje omogućuje biranje programske opreme s obzirom na potrebu kupca. Sami programi se kasnije mogu i nadograditi. Neki od posebnih procesa za zavarivanje su: zavarivanje korijena, zavarivanje tankih materijala, automatska regulacija snage zavarivanja, automatska regulacija visine luka itd.



Slika 19. Robot za zavarivanje [13]

#### **4.3.1. Postavke aparata za zavarivanje**

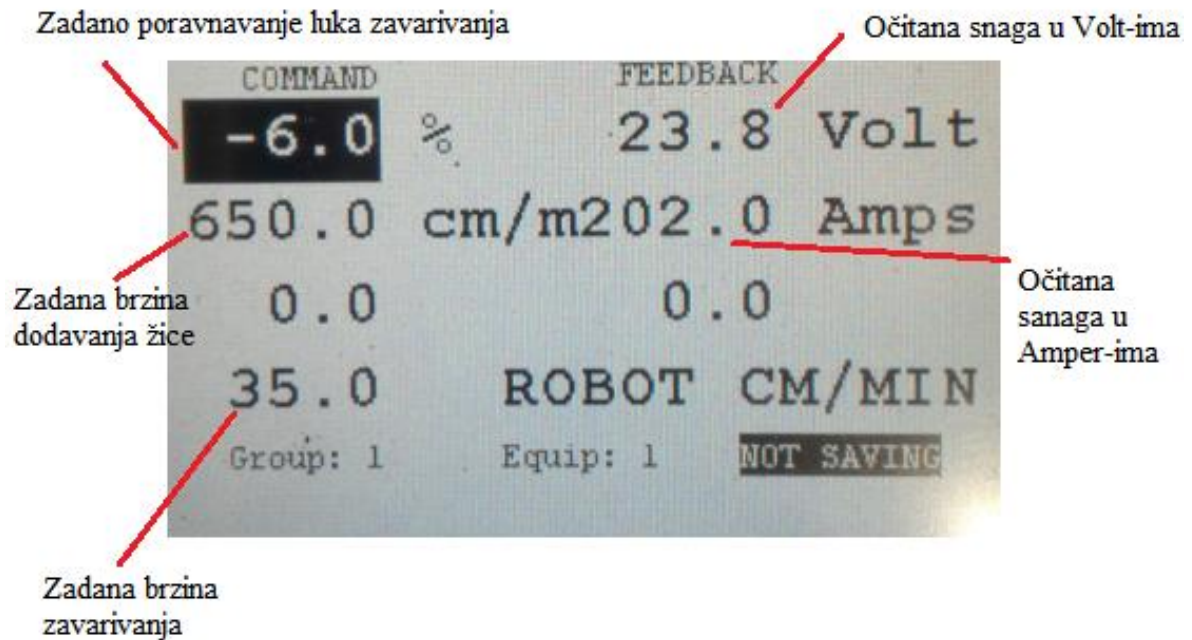
Aparat za zavarivanje i robot međusobno su povezani. Na aparatu za zavarivanje bira se vrsta procesa (pulsno, sinergijsko, klasično MIG/MAG), vrsta materijala, debljina žice i vrsta plina. Tijekom rada preko robota se spaja na aparat za zavarivanja, a postavke se mogu mijenjati po potrebi. U ovom završnom radu korišteno je pulsno MIG/MAG zavarivanje, a u tabeli 3 prikazane su postavke aparata za zavarivanje korištene prilikom postupka.

Tabela 3. Postavke aparata za zavarivanje [16]

Naredba	Raspon vrijednosti za podešavanje luka zavarivanja	Opis naredbe
WFSpeed	07 - 25 m/min	Brzina dodavanje žice
WFS-Max		Postavi maksimalnu brzinu dodavanja žice
WFS-Min		Postavi minimalnu brzinu dodavanja žice
FineTuning	-9 - +9	Poravnavanje visine luka u postavljenim granicama
FineTuning Max	0 - +9	Postavi maksimalnu visinu luka
FineTuning Min	-9 - 0	Postavi minimalnu visinu luka
Dynamics	-9 - +9	Kontrolira ponašanje luka tijekom zavarivanja. Luk je mekši ako je zadana vrijednost manja, a tvrdi ako je vrijednost veća
Pulse Current	-10 % - +15 %	Smanjuje pulsnu krivulju za max 10 % ili ju povećava za max 15 %

Obzirom da je riječ o sinergijskom aparatu za zavarivanje na osnovu jednog automatski su određeni ostali parametri zavarivanja. Na aparatu se postavlja vrsta materijala, debljina dodatnog materijala te plin, a kasnije se kod promjene snage zavarivanja samo mijenja brzina dodavanja žice. Za veću snagu zavarivanja postavlja se veća brzina dodavanja žice. Na slici 21. prikazan je omjer između snage

u Amper-ima i brzine dodavanja žice. Prema slici 21 vidljivo je da brzini dodavanja žice od 650 cm/min odgovara jačina zavarivanja od 202 A i 23,8 V. Zadana brzina zavarivanja je 35 cm/min te je korišteno poravnavanje luka od – 6 % .



Slika 20. Prikaz omjera između snage zavarivanja i brzine dodavanja žice

#### 4.4. Dodatni materijal

Dodatni materijal korišten u ovom radu prikazan je u Tabeli 4. VAC 60 je pobakrena žica za MIG/MAG zavarivanje proizvođača „Sij elektrode“ debljine 1.2 mm. Koristi se za zavarivanje nelegiranih i nisko legiranih konstrukcijskih čelika.

Tabela 4. Karakteristike dodatnog materijala za zavarivanje

sij elektrode		VAC 60	G 3Si1							
SLJ ELEKTRODE JESENICE d.o.o. C. železarnjev 8 SI-4270 JESENICE www.elektrode.si CE 0036 06 Ref VAC60_2013-06 EN 13479:2004 Za uporabo v kovinskih konstrukcijah ali sovprežnih konstrukcijah iz jekla in betona For use in metallic structures or in composite metal and concrete structures		Žica za varjenje nelegiranih in malo legiranih konstrukcijskih jekel po postopku MAG Welding wire for welding in gas shielding atmospheres. Suitable for welding unalloyed and low alloyed construction steels KLASIFIKACIJA / CLASSIFICATION EN ISO 14341-A G 42 5 M2/M3/C1 3Si1 DIN 8559 SG-2 W Nr. 1 5125 ASME/AWS SFA A5.18 ER 70 S-6 PRIZNANJA / APPROVALS TÜV(04412) DB(42 156 01/01) CR.ABS.BV.GL.LR.DNV.SZ	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ø mm</th> <th>CHG</th> <th>NETO KG</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,20</td> <td>78-3627</td> <td>250,0</td> </tr> </tbody> </table>	Ø mm	CHG	NETO KG	1,20	78-3627	250,0	
Ø mm	CHG	NETO KG								
1,20	78-3627	250,0								
			POBAKRENA / COPPERED							
			SOD ROBOTPAK							
			91212176 3 838579 012820 CONTROL No: 8273							



Dodatni materijal za MIG/MAG zavarivanje označava se prema normi HRN EN ISO 14341:2012 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Žičane elektrode i depoziti za elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina za nelegirane i sitnozrnate čelike -- Razredba (ISO 14341:2010; EN ISO 14341:2011).

Prema tablici 2.3. oznaka korištenog dodatnog materijala je **G 3Si1**. Prvi član označava vrstu postupka. Oznaka **G** označava da se radi o elektrolučnom zavarivanju u zaštitnoj atmosferi plina. Drugi član **3 Si1** nam označava kemijski sastav žice. Kemijski sastav dodatnog materijala prikazan je u tabeli 5.

Tabela 5. Kemijski sastav dodatnog materijala [17]

Oznaka	Kemijski sastav %											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti+Zr
G0	bilo koji drugi sastav											
G2Si	0,06-0,14	0,5-0,8	0,9-1,3	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,03	0,35	0,02	0,15
G3Si1	0,06-0,14	0,7-1	1,3-1,6	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,03	0,35	0,02	0,15
G3Si2	0,06-0,14	1-1,3	1,3-1,6	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,03	0,35	0,02	0,15
G4Si1	0,06-0,14	0,8-1,2	1,6-1,9	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,03	0,35	0,02	0,15
G2Ti	0,04-0,14	0,4-0,8	0,9-1,4	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,03	0,35	0,05-0,2	0,05-0,25
G2Al	0,08-0,14	0,3-0,5	0,9-1,3	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,03	0,35	0,35-0,75	0,15
G3Ni1	0,06-0,14	0,5-0,9	1-1,6	0,02	0,02	0,8-1,5	0,15	0,15	0,03	0,35	0,02	0,15
G2Ni2	0,06-0,14	0,4-0,8	0,8-1,4	0,02	0,02	2,1-2,7	0,15	0,15	0,03	0,35	0,02	0,15
G2Mo	0,08-0,12	0,3-0,7	0,9-1,3	0,02	0,02	0,15	0,15	0,4-0,6	0,03	0,35	0,02	0,15
G4Mo	0,06-0,14	0,5-0,8	1,7-2,1	0,025	0,025	0,15	0,15	0,4-0,6	0,03	0,35	0,02	0,15

#### 4.5. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u ovom radu korišten je čelik oznake S235JRG2. Oznaka čelika označava da se radi o konstrukcijskom čeliku minimalne granice razvlačenja od 235 MPa i udarnog rada loma od 27 J. U tabeli 6 prikazano je objašnjene oznake osnovnog materijala.

Tabela 6. Oznaka čelika  
S235JRG2

S	235	JR	G2
Konstruktivski čelik	Min. granica razvlačenja (Re), MPa za područje najmanjih debljina	Udarni rad loma 27 J na 20°C	Druge značajke

U tabeli 7 prikazan je kemijski sastav čelika S235JRG2 korištenog u ovom radu. Iz kemijskog sastava vidljivo je da se radi o niskougličnom čeliku s udjelom ugljika ispod 0.2 %. Niskouglični čelici imaju feritno perlitnu mikrostrukturu i uglavnom se primjenjuju za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje nema opasnosti od krhkog loma.

Tabela 7. Karakteristike čelika [18]

Chemical composition % of steel S235JRG2 (1.0038): EN 10250-2-2000									
For forgings with an equivalent diameter or thickness > 100 mm the carbon content shall be agreed between purchaser and supplier.									
C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	Al	-
max 0.2	max 0.55	max 1.4	max 0.3	max 0.045	max 0.045	max 0.3	max 0.08	min 0.02	Cr+Mo+Ni < 0.48
Mechanical properties of steel S235JRG2 (1.0038)									
Nominal thickness (mm):		to 100	100 - 250	250 - 500					
Rm - Tensile strength (MPa) (+N)		340	340	340					
Nominal thickness(mm):		to 100	100 - 250	250 - 500					
Re - Upper yield strength (MPa) (+N)		215	175	165					
Nominal thickness (mm):		to 100	100 - 250	250 - 500					
A - Min. elongation at fracture (%) longitud., (+N)		24	23	23					
A - Min. elongation at fracture (%) transverse, (+N)					17				

## 4.6. Zavarivanje uzoraka




Cilj ovog eksperimenta je testiranje programiranih parametara koji se koriste u proizvodnji zavarivanja kotlova za centralno grijanje. Testirani su najčešće korišteni parametri zavarivanja na način da su se promjenom jakosti struje i brzine zavarivanja htjeli dobiti vizualno isti zavari. Testiranjem dobivenih uzoraka cilj je bio uočiti razlike te mogućnost poboljšanja serijske proizvodnje kotlova.

Prvi korak provedenog eksperimenta bio je programiranje robota i zavarivanje ispitnih uzoraka (slika 22) na način da se mijenjajući parametre zavarivanja (prilagođavajući brzinu zavarivanja i jakosti struje) dobije što sličnije lice zavara. Nakon prilagodbe i zavarivanja ispitnih uzoraka uslijedilo je zavarivanje triju konačnih uzoraka za ispitivanja. U tabeli 8 prikazana su sva tri uzorka s pripadajućim parametrima, a uzorak 1 dobiven je primjenom parametara koji se koriste u tekućoj proizvodnji. Iz tabele 8 vidljivo je da većoj struji zavarivanja odgovara i veća brzina zavarivanja.



Slika 21. Zavarivanje uzoraka

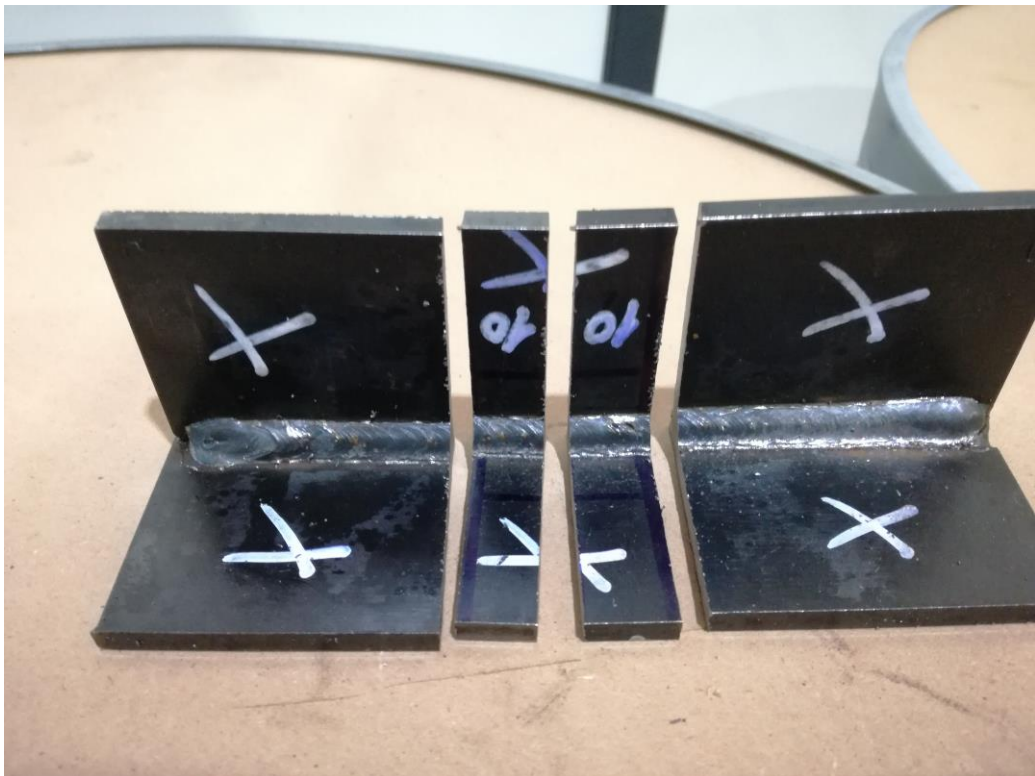
Tabela 8. Usporedba parametara zavarivanja ispitnih uzoraka

			
<b>Tehnički podaci</b>	<b>Uzorak 1</b>	<b>Uzorak 2</b>	<b>Uzorak 3</b>
Priključni napon	380 V / 50Hz	380 V / 50Hz	380 V / 50Hz
Brzina zavarivanja (cm/min)	<b>35</b>	<b>42</b>	<b>28</b>
Brzina dodavanja žice (cm/min)	<b>650</b>	<b>900</b>	<b>450</b>
Jakost struje, Amper (A)	<b>202</b>	<b>268</b>	<b>161</b>
Napon, V	<b>23.8</b>	<b>25.1</b>	<b>21.8</b>
Kut, °	45°	45°	45°
Debljina radnog komada, mm	5	5	5
Vrsta spoja	Kutni spoj	Kutni spoj	Kutni spoj
Broj prolaza	1	1	1
Zaštitni plin	18 % CO <sub>2</sub> – 82 % Ar	18 % CO <sub>2</sub> – 82 % Ar	18 % CO <sub>2</sub> – 82 % Ar

Nakon zavarivanja slijedilo je rezanje uzoraka za laboratorijsko ispitivanje (slika 23). Rezanje je izvršeno na tračnoj pili s hlađenjem zbog očuvanja mikrostrukture zavarenih uzoraka. Svaki uzorak rezan je po sredini, uzeta su po dva uzorka širine 10 mm te je odrezan višak materijala veći od 10 mm od zavora. Cilj ovakvog postupka bio je dobivanje uzoraka standardiziranih dimenzija za metalografsku pripremu i analizu uzoraka (slika 24).



Slika 22. Rezanje zavarenih uzoraka



Slika 23. Izrezani uzorci

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO – ISPITIVANJE UZORAKA

### 5.1. Priprema uzoraka za ispitivanja

Ispitivanje mikrostrukture provedeno je u Laboratoriju za metalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Uzorci koji su izrezani na tračnoj pili (slika 24) postavljeni u stroj za oblaganje uzoraka radi zaštite samih uzoraka te olakšanog rukovanja prilikom ispitivanja. Postupak oblaganja izveden je na pneumatskoj preši Pneumet Press (slika 25).



Slika 24. *Buehler Pneumet press*

Izrezani uzorci postavljeni su u kalup ispunjenim polimernim prahom koji se zatim zatvara. Uzorci su pripremljeni pod djelovanjem pritiska tlaka od 2 bara i zagrijavanja na 140 °C (slika 26).

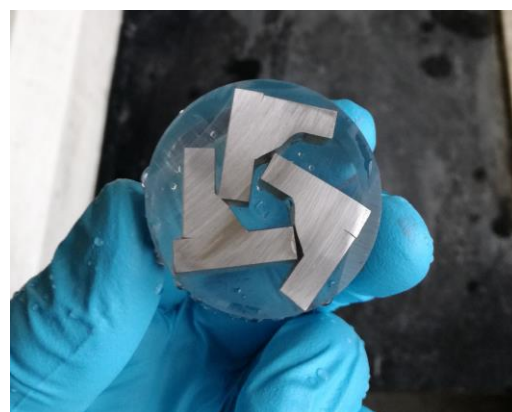


Slika 25. Polimerni kalup

Nakon hlađenja obloženih uzoraka prelazi se na pripremu površine uzoraka s ciljem ispitivanja mikrostrukture. Prva faza obuhvaća brušenje uzoraka koje je provedeno na laboratorijskoj brusilici Phoenix Alpha (slika 27), s brusnim papirima granulacija P120, P320, P500, P1000, P2400 i P4000. Brušenje se provodi od grubljeg prema finijem. Brzina okretanja bila je 300 okr/min, hlađenje vodeno, a sila pritiska bila je ruka. Prilikom brušenja potrebno je primijeniti optimalnu silu kako bi uzorak na brusni papir nalijegao ravnomjerno i okomito. Rezultat brušenja prikazan je na slici 28.



Slika 26. Buehler Phoenix Alpha



Slika 27. Uzorci nakon brušenja

Sljedeća faza pripreme uzoraka je poliranje površine. Poliranje je provedeno na laboratorijskom uređaju za poliranje „Struers“ DAP-V, prikazanom na slici 29. Brzina za poliranje smanjena je na 150 okr/min, sila pritiska bila je 35 N, a za hlađenje je korištena mješavina etilnog alkohola i vode. Poliranje se sastojalo od tri faze: prva faza je dijamantna pasta granulacije 3  $\mu\text{m}$ , a polira se na tkanini za poliranje oznake MD-DAC; u drugoj fazi tkanina za poliranje je ista, a pasta za poliranje je granulacije 1  $\mu\text{m}$ ; u trećoj se fazi koristi tekućina za poliranje granulacije 0.03  $\mu\text{m}$  na tkanini oznake MD-CHEM. Vrijeme poliranja za svaku fazu je tri minute. Na Slici 30 prikazani su uzorci nakon poliranja.



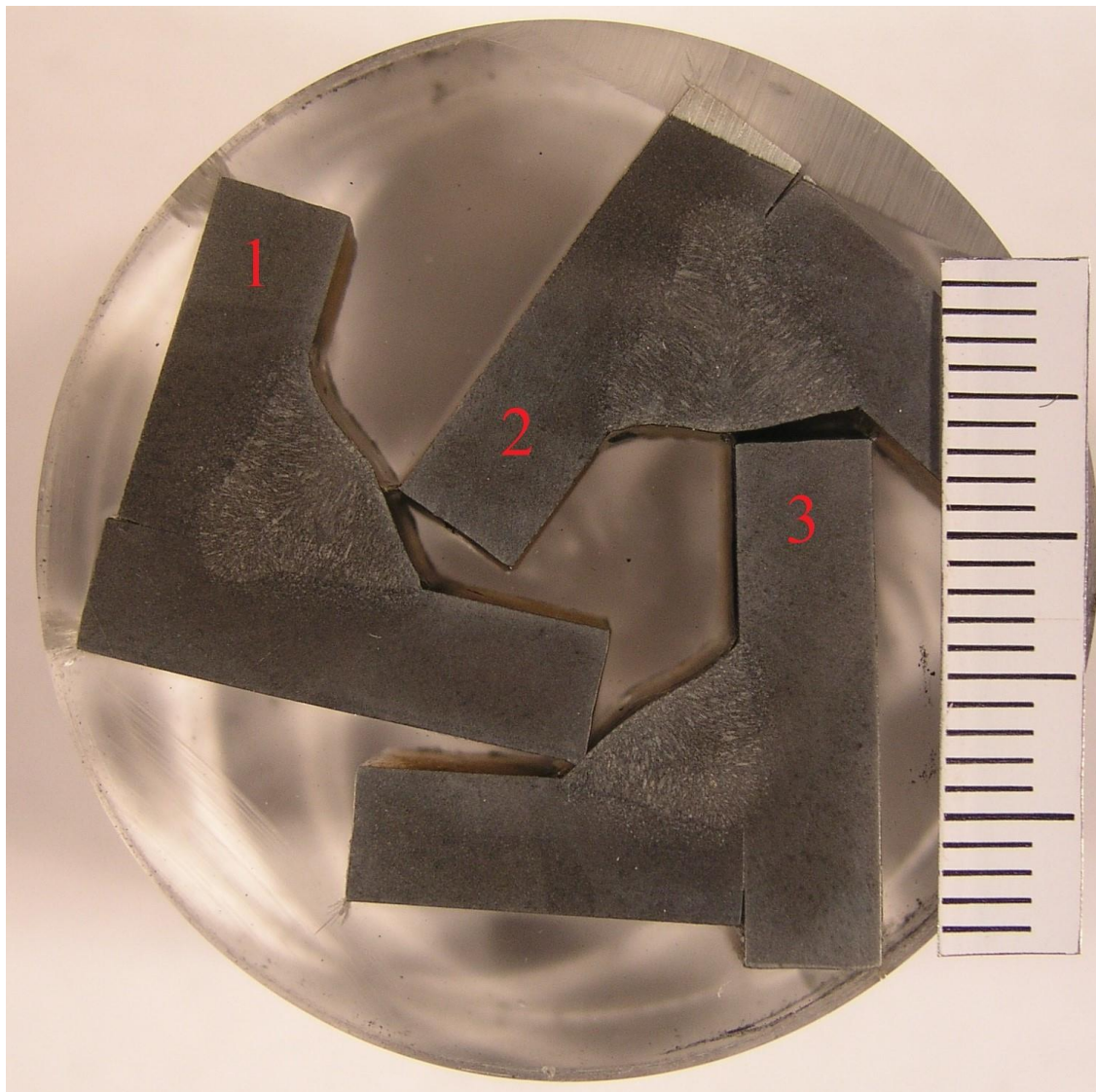
Slika 28. Struers DAP-V



Slika 29. Uzorci nakon poliranja



Uzorci se nakon poliranja čiste etilnim alkoholom kako bi se površina očistila od masnoća. Za razvijanje mikrostrukture korištena je 3% otopina Nitala (3 %  $\text{HNO}_3$  u etilnom alkoholu). Za zaustavljanje reakcije korištena je voda te je površina još jednom počišćena etilnim alkoholom. Na Slici 31 prikazan je konačni izgled uzoraka na kojima su jasno vidljivi zavar i korijen zavara te je moguće započeti s ispitivanjem mikrostrukture i mikrotvrdoće.



Slika 30. Makroanaliza uzoraka

## 5.2. Ispitivanje mikrostrukture

Analiza mikrostrukture napravljena je na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51 (slika 32). Kod svjetlosnog mikroskopa snop svjetlosti osvjetljava promatrani uzorak te prolazi kroz optički sustav koji se sastoji od niza leća koji omogućava stvaranje povećane slike uzorka. Za ovo je ispitivanje korišteno povećanje materijala od 50X, 100X i 200X.



Slika 31. Svjetlosni mikroskop

Slike mikrostrukture korijena zavara i ZUT-a prikazane su u tabeli 9 i 10, te na slikama od 33 do 38.

Tabela 9. Mikrostruktura korijena zavara i ZUT-a pri povećanju 50X

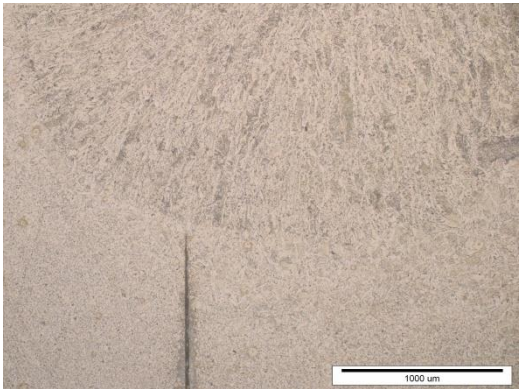
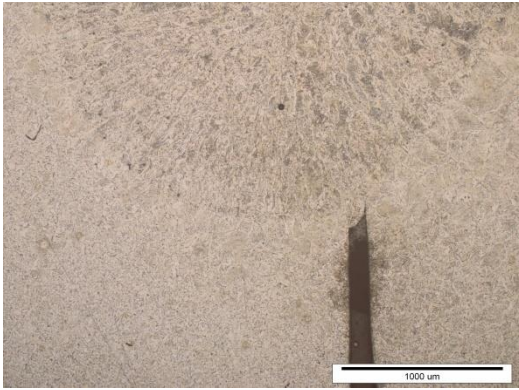
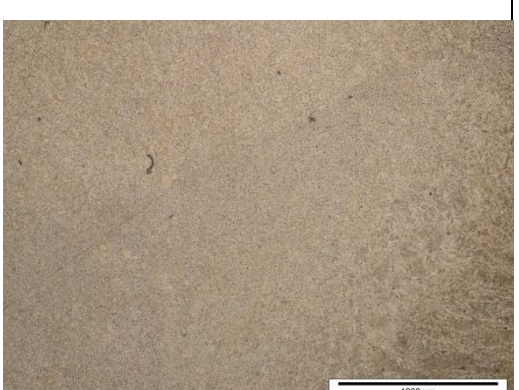
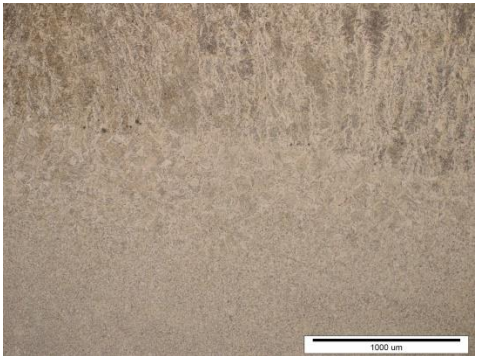
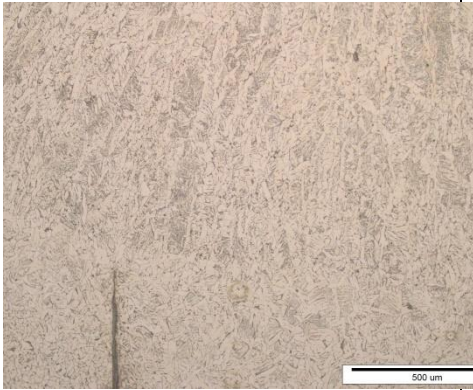
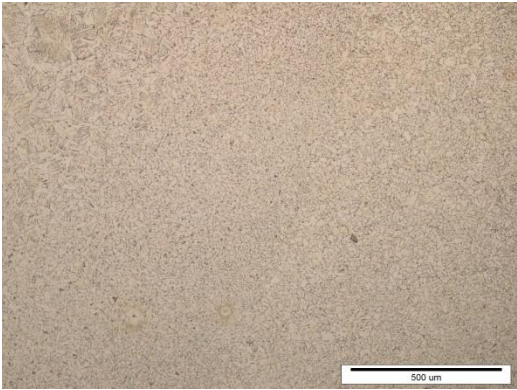
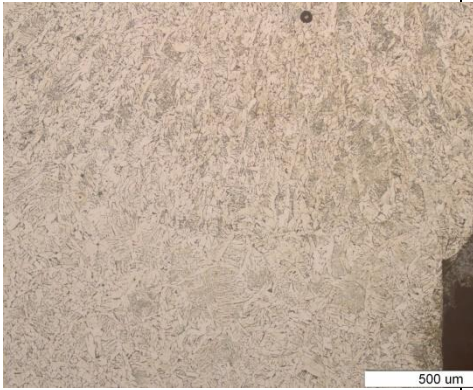
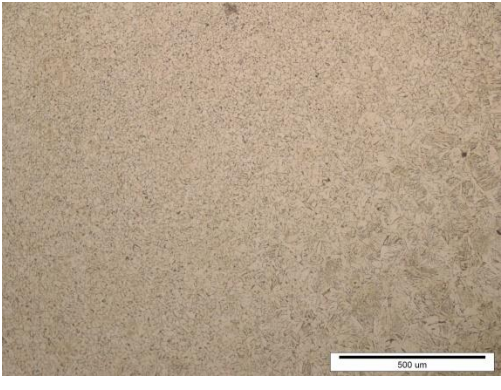
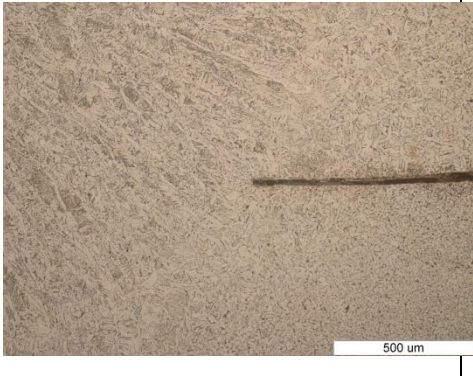

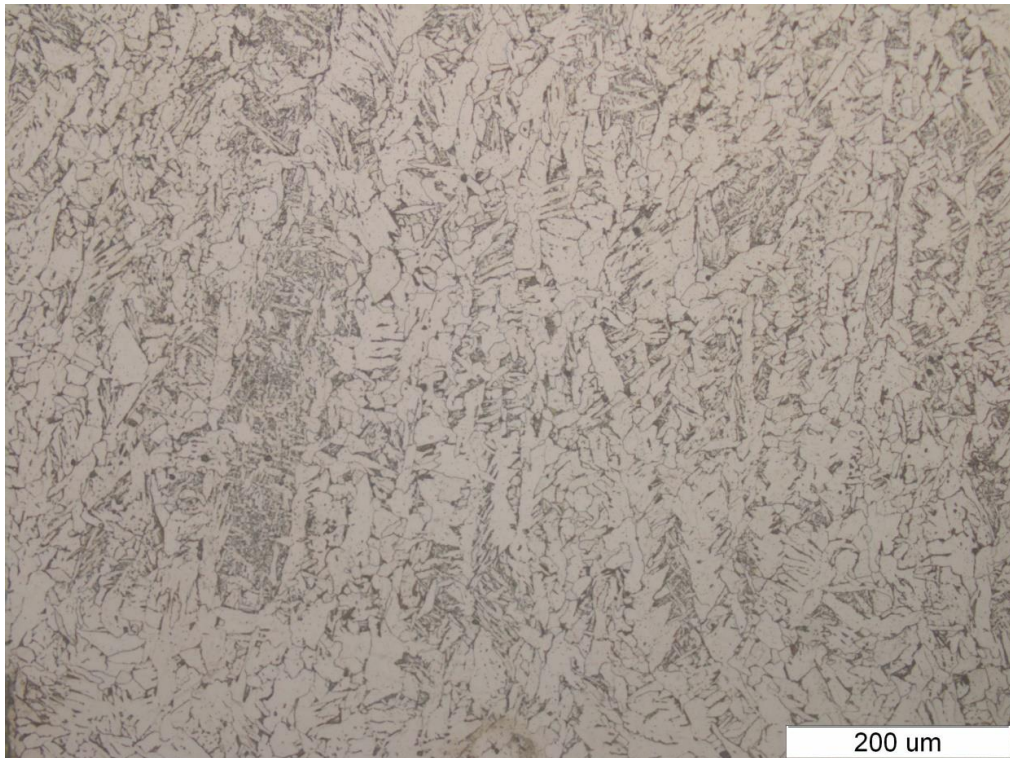
	KORIJEN 50X	ZUT 50X
<p>UZORAK 1 (202 A; 23,8 V)</p>		
<p>UZORAK 2 (268 A; 25,1 V)</p>		
<p>UZORAK 3 (161 A; 21,8 V)</p>		

Tabela 10. Mikrostruktura korijena zavara i ZUT-a pri povećanju 100X

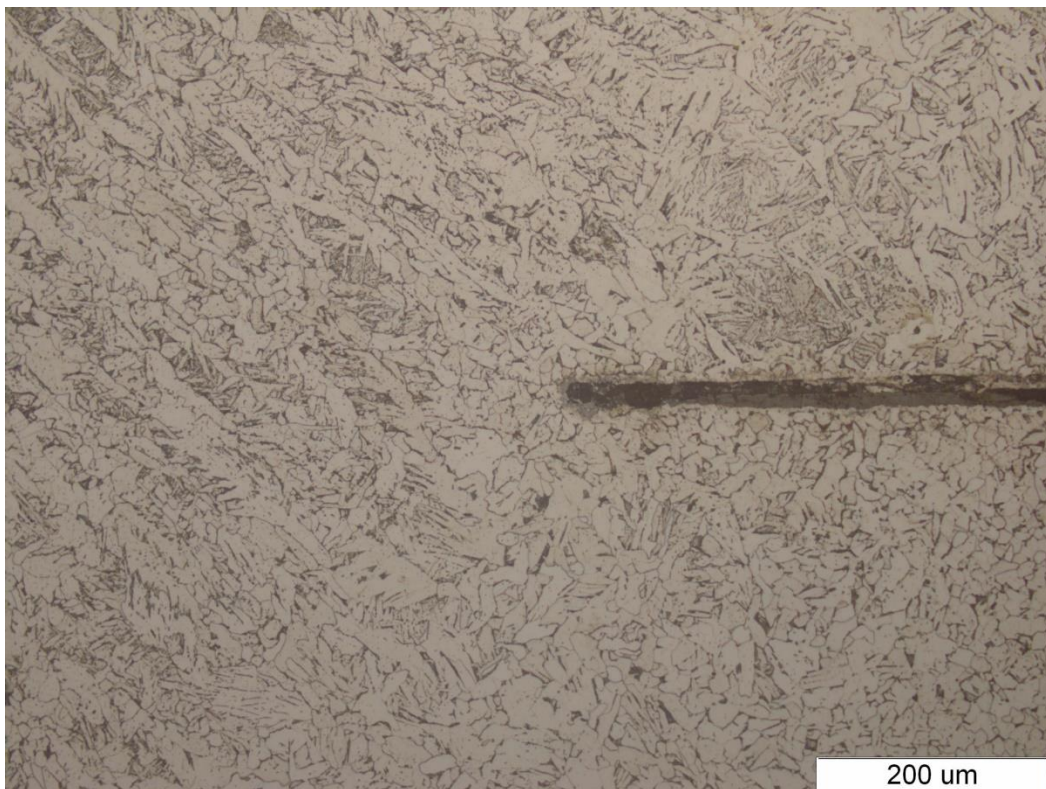
	KORIJEN 100X	ZUT 100X
<p>UZORAK 1 (202 A; 23,8 V)</p>		
<p>UZORAK 2 (268 A; 25,1 V)</p>		
<p>UZORAK 3 (161 A; 21,8 V)</p>		



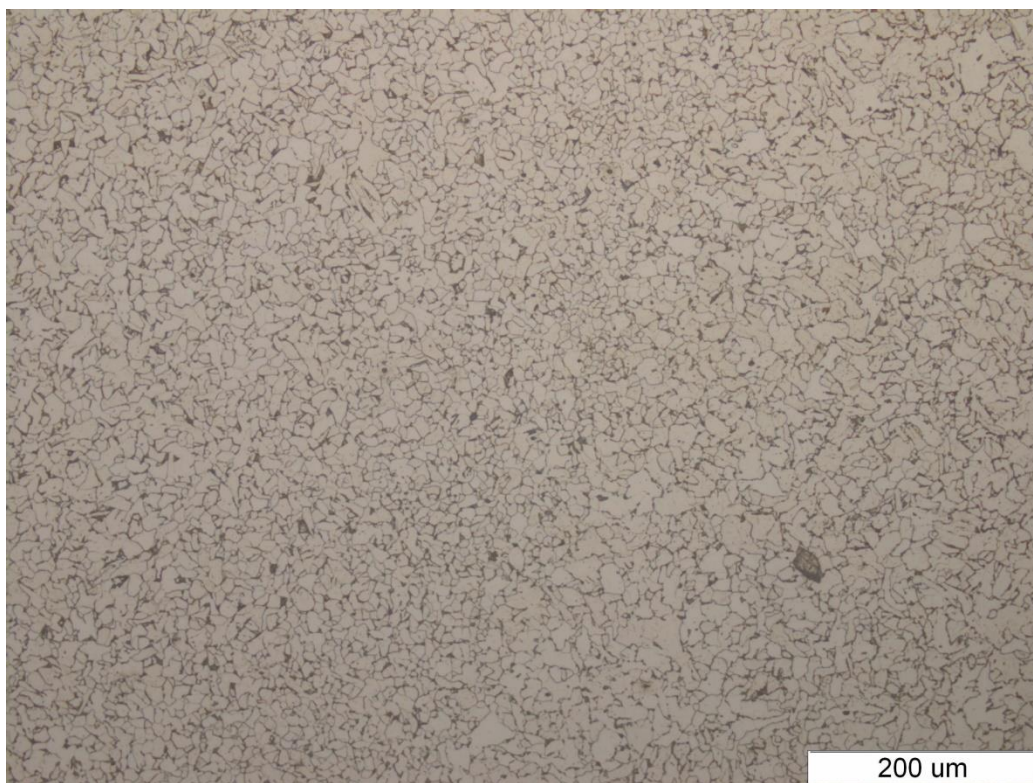
Slika 32. Mikrostruktura korijena zavora pri povećanju 200 x - Uzorak 1



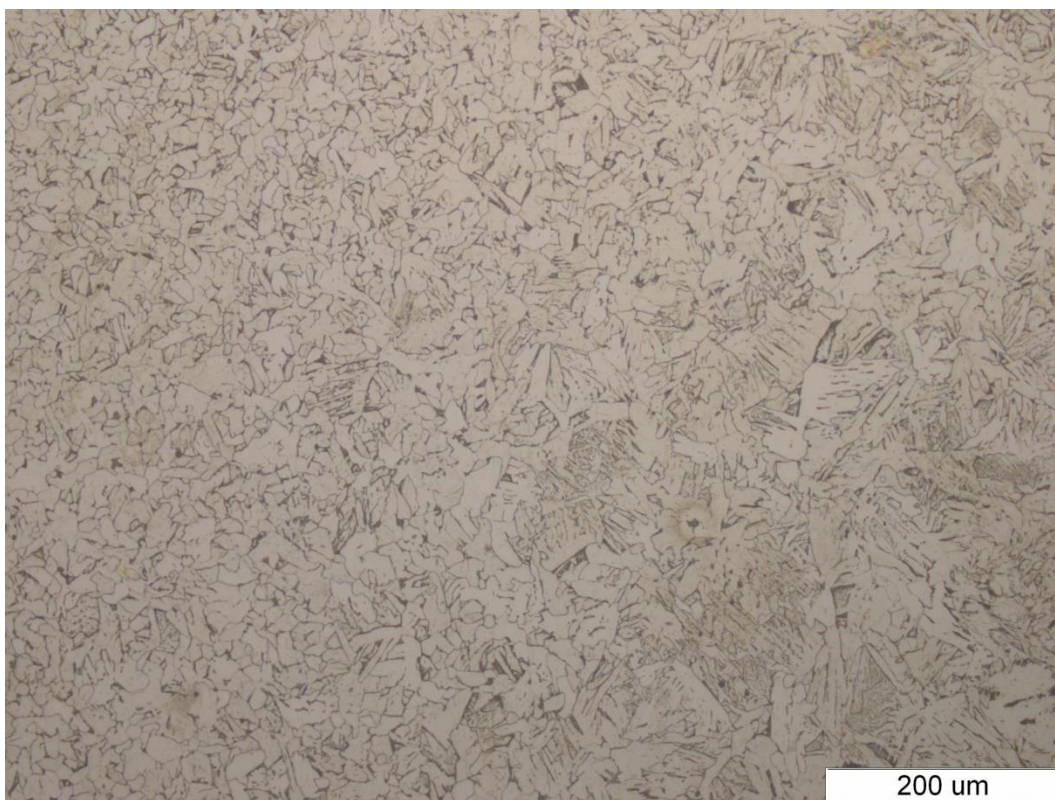
Slika 34 . Mikrostruktura korijena zavora pri povećanju 200 x - Uzorak 2



Slika 335. Mikrostruktura korijena zavora pri povećanju 200 x - Uzorak 3



Slika 34. Mikrostruktura zone utjecaja topline pri povećanju 200x - Uzorak 1



Slika 35. Mikrostruktura zone utjecaja topline pri povećanju 200x - Uzorak 2



Slika 36. Mikrostruktura zona utjecaja topline pri povećanju 200x - Uzorak 3

### 5.3. Ispitivanje mikrotvrdoće

Mjerenje tvrdoće lica i korijena zavara na ispitnim uzorcima provedeno je Vickers metodom. Vickers metoda je standardna metoda za mjerenje tvrdoće metala. U površinu metala utiskuje se dijamantni indentor oblika pravilne četverostrane piramide s vršnim kutom između stranica od  $136^\circ$ . Dobiveni otisak je kvadratnog oblika, a pomoću izmjerenih duljina dijagonala izračunava se tvrdoća [17]. Slika 39 prikazuje korišteni mjerni uređaj.

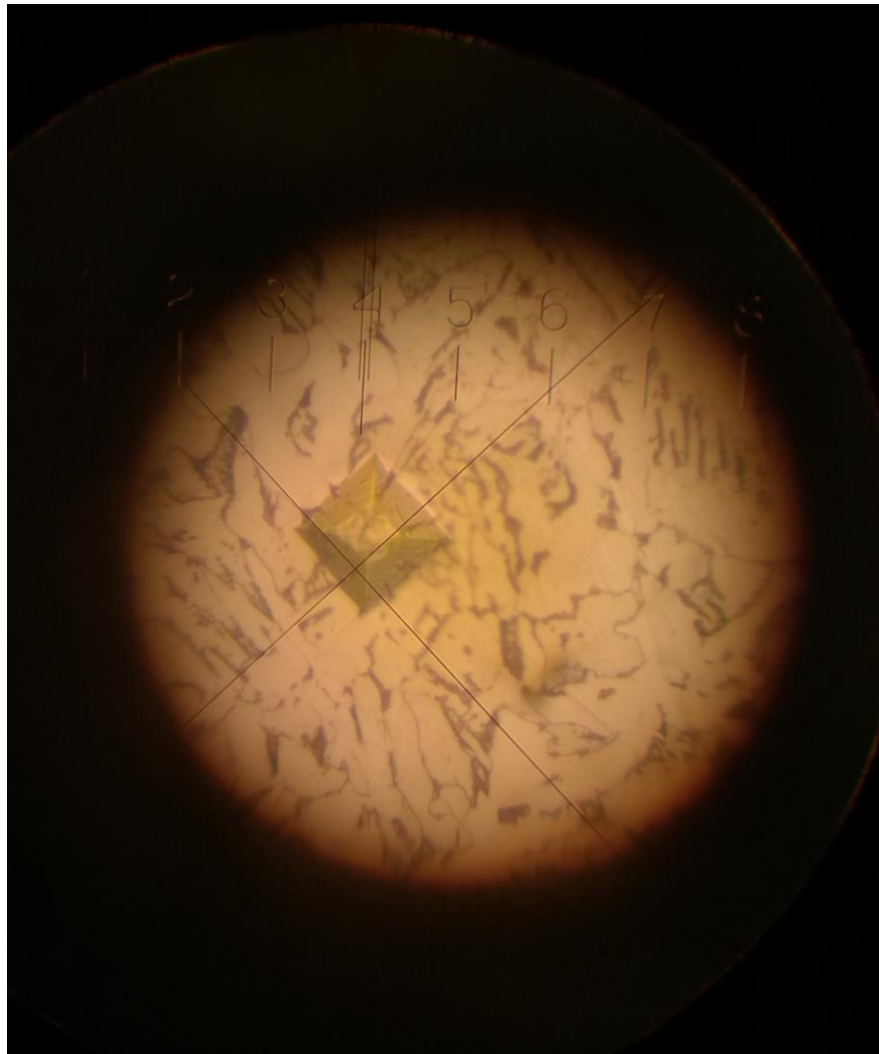


Slika 37. Mjerni uređaj za ispitivanje tvrdoće metodom Vickers



Tvrdoća je mjerena na licu i korijenu zavora kod svakog uzorka. Za svako ispitivanje postupak je ponovljen tri puta. Kao opterećenje korišten je uteg od 200 grama što odgovara ispitnoj sili od 1,961 N i metodi HV 0,2.

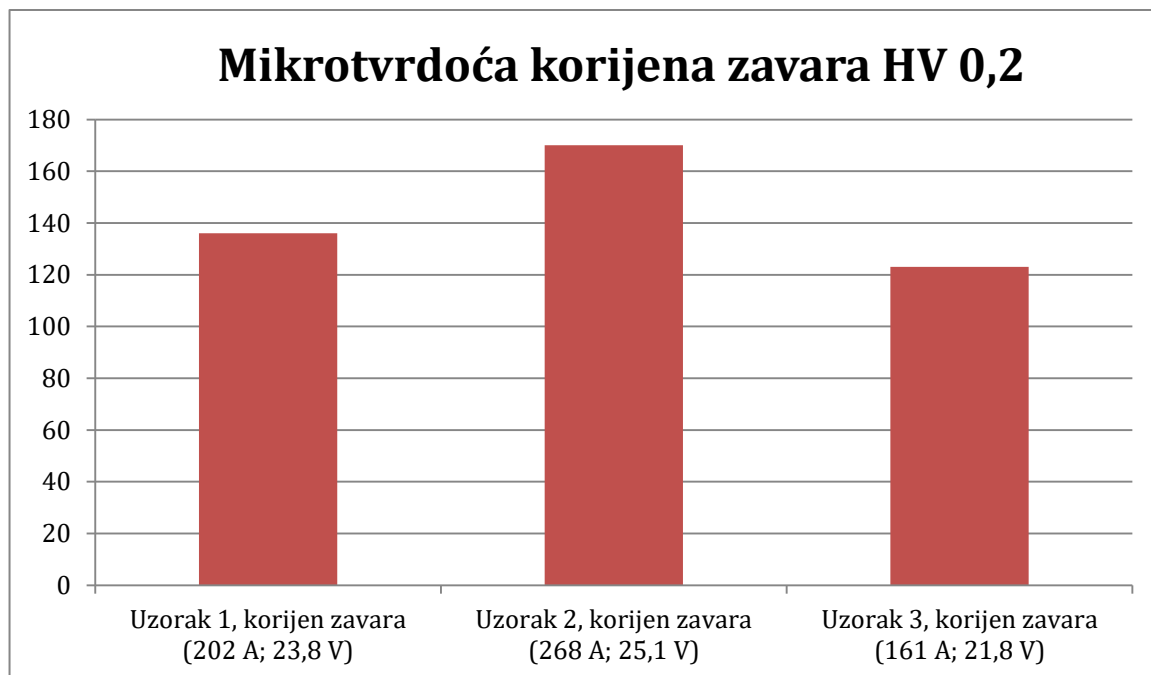
Vickersova tvrdoća je bezdimenzijska veličina, a uz iznos tvrdoće navodi se i primijenjena masa utega, u ovom slučaju HV 0,2. Vrijeme trajanja opterećenja je između 10 i 15 s. Slika 40 prikazuje dobiveni otisak i mjerilo za očitavanje rezultata ispitivanja. U tabeli 11 prikazani su rezultati ispitivanja dok su na slikama 41 i 42 grafički prikazni dobiveni rezultati.



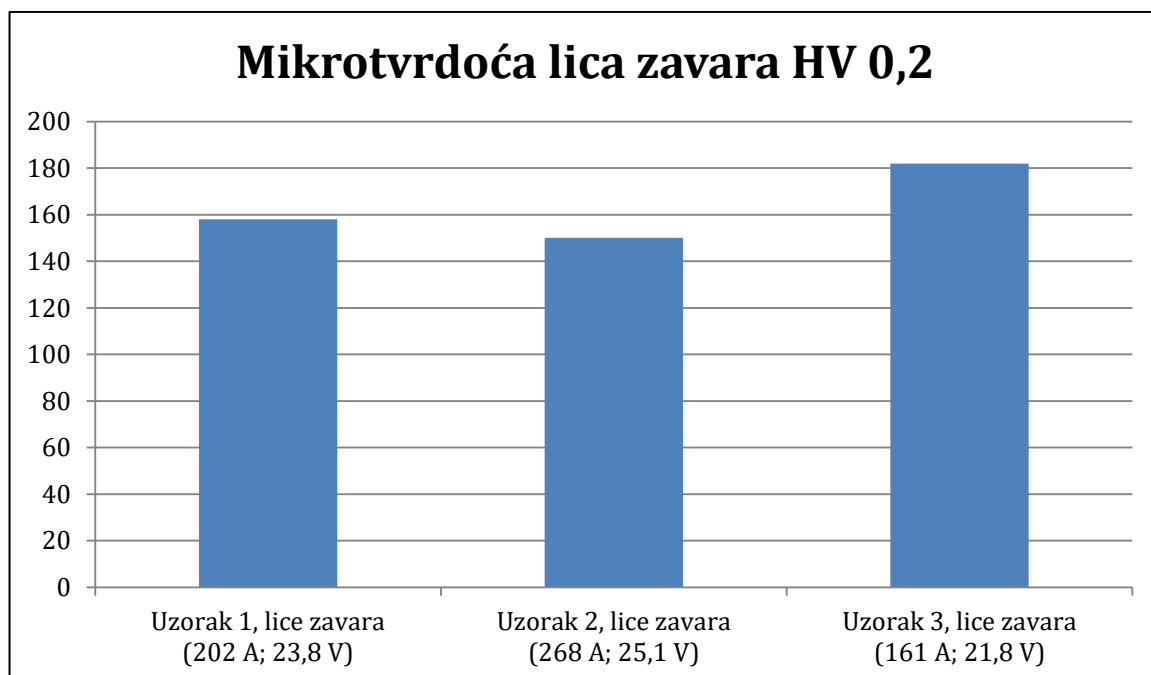
Slika 38. Očitavanje vrijednosti kod ispitivanja tvrdoće

Tabela 10. Mikrotvrdoća po Vickers-u

	OČITANA VRIJEDNOST (3 očitavanja), LIJEVI VRH $X_1(\mu\text{m})$	OČITANA VRIJEDNOST (3 očitavanja), DESNI VRH $X_2(\mu\text{m})$	DUŽINA DIJAGONALE $x_2-x_1(\mu\text{m})$	$HV_{0,2}=(X_2-X_1) \cdot 0,302$ (OČITANO IZ TABLICE)	SREDNJA VRIJEDNOST TVRDOĆE $HV_{0,2}$
UZORAK 1 KORIJEN (202 A; 23,8 V)	319 317 319	488 496 490	169 179 171	143 HV 0,2 127 HV 0,2 139 HV 0,2	136
UZORAK 1 LICE (202 A; 23,8 V)	324 320 320	482 484 479	158 164 159	163 HV 0,2 151 HV 0,2 161 HV 0,2	158
UZORAK 2 KORIJEN (268 A; 25,1 V)	325 314 321	473 475 477	148 161 156	186 HV 0,2 157 HV 0,2 167 HV 0,2	170
UZORAK 2 LICE (268 A; 25,1 V)	314 315 321	486 475 483	172 160 162	138 HV 0,2 159 HV 0,2 155 HV 0,2	150
UZORAK 3 KORIJEN (161 A; 21,8 V)	317 315 310	499 494 495	182 179 185	123 HV 0,2 127 HV 0,2 119 HV 0,2	123
UZORAK 3 LICE (161 A; 21,8 V)	325 326 322	476 475 471	151 149 149	178 HV 0,2 184 HV 0,2 184 HV 0,2	182



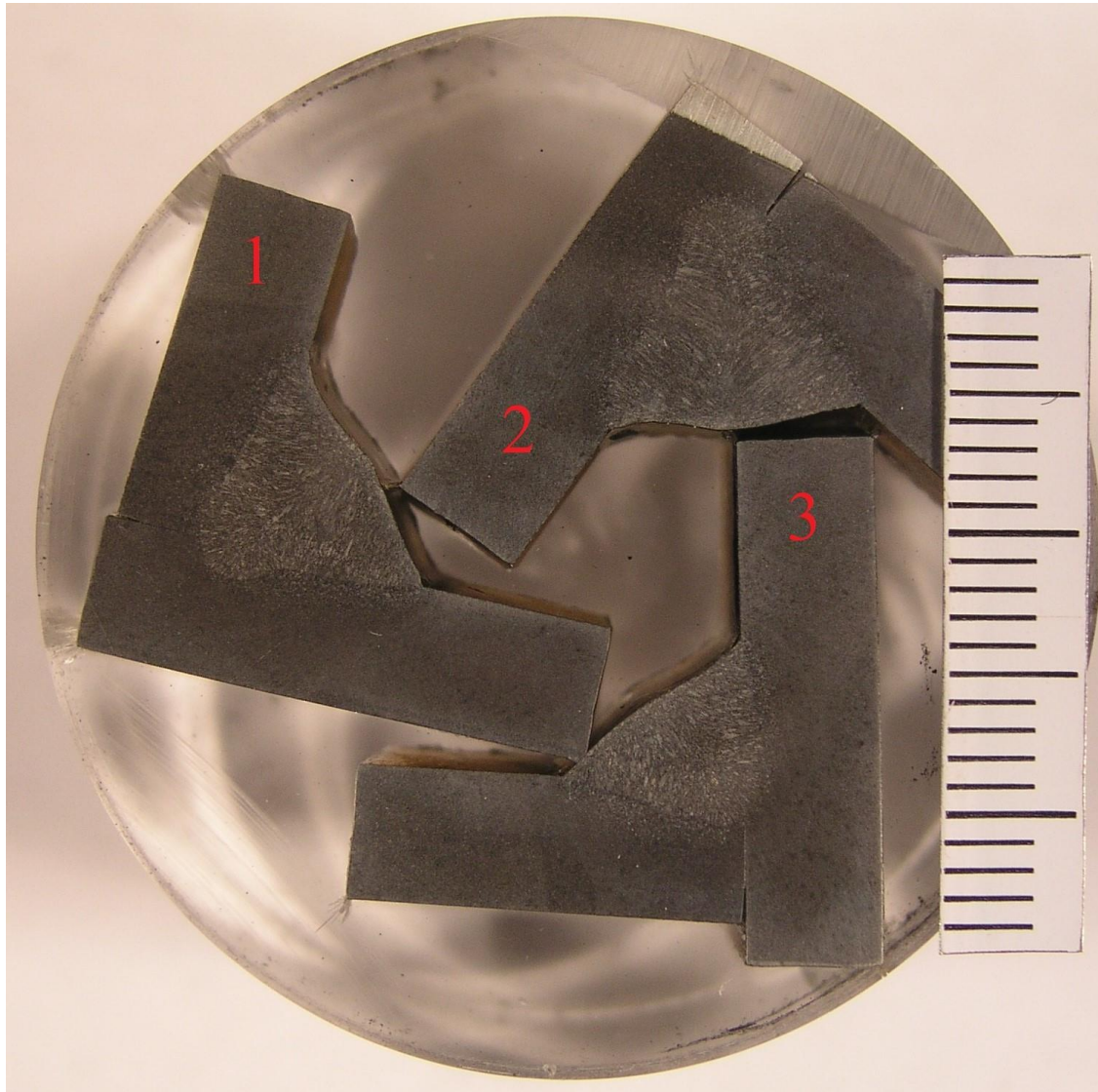
Slika 39. Rezultati ispitivanja korijena zavara



Slika 40. Rezultati ispitivanja lica zavara

## 6. ANALIZA REZULTATA

Makroanalizom uzoraka uočene su razlike u dubini prodiranja zavara koje su posljedica jače struje zavarivanja. Većoj struji zavarivanja odgovara i veći prodor zavara, prikazano na slici 31.



Slika 31. Makroanaliza uzoraka

Ispitivanjem mikrotvrdoće uočena su odstupanja u licu i korijenu zavara u odnosu na uzorak 1, ovisno o jakosti struje zavarivanja. Najveće odstupanje u izmjerenim vrijednostima uočava se u korijenu zavara uzorka 2, kod kojeg je struja zavarivanja najveća, te u licu zavara uzorka 3, kod kojeg je struja zavarivanja najmanja.

Analizom mikrostrukture vidljivo je da je osnovni materijal feritno-perlitne mikrostrukture. Čelik s grubim zrnom ima nižu čvrstoću, slabiju udarnu žilavost i veću sklonost krhkom lomu, pa je u većini slučajeva u toplinskoj obradi nepoželjan, tj. teži se sitnozrnatoj strukturi.

Mikrostruktura korijena zavara je proeutektoidni ferit, sekundarni widmanstätten ferit te perlit. Kod strukture uzorka 2 uočavamo veću prisutnost widmanstättenovog ferita zbog većeg unosa energije (topline) tijekom zavarivanja i bržeg hlađenja nakon zavarivanja.

Mikrostruktura zone utjecaja topline kod uzorka 1 je sitnozrnata kombinacija ferita i perlita. Kod uzorka 2 zrno ferita i perlita je grublje, opet zbog većeg unosa energije. Kod uzorka 3, zbog manjeg unosa energije te bržeg hlađenja materijala, po bivšim granicama zrna uočavamo proeutektoidne ferite, widmanstätten ferit sekundarni, perlit te mjestimično i bainitom. Proučavanjem mikrostrukture zone utjecaja topline vidljivo je da je u uzorku 3 (najmanja struja zavarivanja) jasnije vidljiva granica između mikrostrukture osnovnog i dodatnog materijala te je zona utjecaja topline manja. Na temelju toga može se zaključiti da je došlo do manjeg staljivanja osnovnog i dodatnog materijala.

## 7. ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu završnog rada, ispitivanjem triju različitih parametara zavarivanja i analizom mikrostrukture i mikrotvrdoće dobivenih uzoraka, cilj je bio testirati koji su parametri optimalni kod zavarivanja kotlova za centralno grijanje. Najveći zahtjev u proizvodnji kotlova je njihova nepropusnost (tlačno ispitivanje vodom pod pritiskom od 5 bar-a) i čvrstoća. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da kod manje struje zavarivanja dolazi do manjeg protaljivanja osnovnog i dodatnog materijala i time se ugrožava zahtjev za nepropusnost. Kod viših struja zavarivanja prisutno je bolje staljivanje materijala, ali postoji veći rizik od probijanja kod zavarivanja te povećanje zrna ferita i perlita koje utječe na nižu čvrstoću, slabiju udarnu žilavost i veću sklonost krhkom lomu. Na temelju dobivenih rezultata istraživanja zaključuje se kako je uzorak 1 najbolje rješenje za zahtjev naručitelja.

## 8. LITERATURA

- [1] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/2.%20RAD.pdf>
- [2] [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/zt\\_zu.html](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/zt_zu.html)
- [3] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/povije.html>
- [4] <https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/prit.pdf>
- [5] [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/izv\\_str.html](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/izv_str.html)
- [6] [https://www.wikiwand.com/hr/Elektrolu%C4%8Dno\\_zavarivanje](https://www.wikiwand.com/hr/Elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje)
- [7] Gojić, M., (2008) Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak : Metalurški fakultet.
- [8] Marijan Rudan, dipl. ing., Zavarivanje nehrđajućih čelika mig impulsnim postupkom (pdf prezentacija)
- [9] [https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGGMA WWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMA_WWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf)
- [10] [https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz\\_dipl3/3.1.pdf](https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz_dipl3/3.1.pdf)
- [11] <https://www.kemppi.com/en-US/>
- [12] [http://repozitorij.fsb.hr/5201/1/Jurica\\_Maja\\_2015\\_doktorski.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/5201/1/Jurica_Maja_2015_doktorski.pdf)
- [13] [https://www.fanuc.co.jp/en/product/robot/f\\_r\\_arc.html](https://www.fanuc.co.jp/en/product/robot/f_r_arc.html)
- [14] [https://www.pikpng.com/pngvi/ibwoTox\\_all-the-keys-you-need-to-use-to/](https://www.pikpng.com/pngvi/ibwoTox_all-the-keys-you-need-to-use-to/)
- [15] <https://roboticsbook.com/roboguide-v9-rev-d-download/>
- [16] <https://resources.userdoc.kemppi.com/manuals/kemparc-pulse-tcs-om-en.pdf>
- [17] [https://www.specialisedwelding.co.uk/data-sheets/Super 6 Data Sheets & MSDS/Welding-wire-BS.pdf](https://www.specialisedwelding.co.uk/data-sheets/Super_6_Data_Sheets_&_MSDS/Welding-wire-BS.pdf)
- [18] [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=4](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=4)
- [19] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1332225217-0-filetin\\_oznakefe\\_mater.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1332225217-0-filetin_oznakefe_mater.pdf)
- [20] <file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Specijalni%20celici-skripta.pdf>[https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI 1 skripta listopad 2013.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf)
- [21] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1576746964-0-postupcispajanja-materijala.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1576746964-0-postupcispajanja-materijala.pdf)
- [22] Ivan Samardžić, prof. dr. sc. Zavarivanje i zavarivanju srodne tehnike (pdf prezentacija)

ODJEL

STUDIJ

PRISTUPNIK

MATIČNI BROJ

DATUM

KOLEGIJ

NASLOV RADA

NASLOV RADA NA  
ENGL. JEZIKU

MENTOR

ZVANJE

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_
5. \_\_\_\_\_

VŽKC

MMI

BROJ

OPIS

ZADATAK URUČEN

POTPIS MENTORA

*Suzana Solić*



Sveučilište  
SjeverSVEUČILIŠTE  
SJEVERIZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MARIJAN KOMAR (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UTJECAJ PARAMETARA MIG ZAVARIVANJA NA STRUKTURNA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Marijan Komar  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, MARIJAN KOMAR (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom \_\_\_\_\_ (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

(UTJECAJ PARAMETARA MIG ZAVARIVANJA NA STRUKTURNA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Marijan Komar  
(vlastoručni potpis)