

# Utjecaj značajki AC TIG zavarivanja na svojstva zavara čelika P91

---

Grgurić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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:235:562112>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Luka Grgurić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

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

Student:

Luka Grgurić

Zagreb, 2022

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

Zahvaljujem prof. dr. sc. Ivici Garašiću što je pristao biti moj mentor, što me podržavao te savjetovao tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su me podržavali i bodrili tijekom studiranja.

Luka Grgurić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA GRGURIĆ** Mat. br.: 0035206472

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj značajki AC TIG zavarivanja na svojstva zavara čelika P91**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of AC TIG welding parameters on P91 steel weld properties**

Opis zadatka:

Ne temelju literature detaljno obrazložiti problematiku zavarivanja čelika P91 koji se primjenjuje u izgradnji termoenergetskih postrojenja. Opisati utjecaj procesa zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline i navesti primjenjive tehnologije zavarivanja. Definirati parametre toplinske obrade kao i utjecaj toplinske obrade na zaostala naprezanja. Detaljno opisati TIG zavarivanje s naglaskom na zavarivanje izmjeničnom strujom te mogućnosti regulacije distribucije topline primjenom balansa i frekvencije.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno ispitati i kvantificirati utjecaj parametara frekvencije i balansa izmjenične struje pri AC TIG zavarivanju čelika P91. Na zavarenom uzorku je potrebno provesti razorna i nerazorna ispitivanja, analizu mikrostrukture te u konačnici odrediti značajnost pojedinog parametra na geometriju zavara i mikrostrukturu. Predložiti smjernice za daljnje istraživanje i procijeniti eventualnu mogućnost primjene na realnoj konstrukciji.

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

Zadatak zadan:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:  
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VII
POPIS KRATICA .....	IX
1. UVOD.....	1
2. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	2
2.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja.....	2
2.2. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja.....	4
2.3. Opis TIG postupka zavarivanja.....	6
2.4. Oprema za TIG postupak zavarivanja .....	8
2.4.1. Izvori struje .....	9
2.4.1.1 Vrste električne struje i polariteta.....	11
2.4.2. Pištolj za TIG zavarivanje.....	15
2.4.2.1 Netaljive volframove elektrode .....	17
2.4.2.2 Priprema volframove elektrode .....	19
2.4.3. Zaštitni plin .....	22
2.4.4. Dodatni materijal.....	26
3. P91 ČELICI.....	28
3.1. Svojstva materijala.....	29
3.2. Zavarljivost P91 čelika .....	30
3.2.1. Dodatni materijal.....	31
3.2.2. Predgrijavanje.....	32
3.2.3. Toplinska obrada nakon zavarivanja.....	32
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	33
4.1. Teza pokusa.....	33
4.2. Izvor struje za zavarivanje.....	34

4.3.	Dodatna oprema .....	36
4.4.	Osnovni materijal.....	38
4.5.	Parametri zavarivanja te izgled uzoraka .....	39
4.6.	Zaostala naprezanja.....	44
4.6.1.	Uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja.....	45
4.6.2.	Princip mjerenja zaostalih naprezanja.....	46
4.6.3.	Mjerenje i rezultati .....	49
4.6.3.1	Rezultati 1A-1F – Zona 1.....	53
4.6.3.2	Rezultati 1A – 1F Zona 2.....	57
4.6.3.3	Rezultati 1A – 1F Zona 3.....	57
4.6.3.4	Višestruka linearna regresija zona 1.....	59
4.6.3.5	Višestruka linearna regresija zona 2.....	62
4.6.3.6	Višestruka linearna regresija zona 3.....	62
4.6.3.7	Usporedba rezultata.....	64
4.7.	Makroizbrusci.....	65
4.8.	Tvrdoća.....	69
4.8.1.	Vickersova metoda.....	71
4.8.2.	Rezultati mjerenja.....	72
4.8.3.	Regresijska analiza.....	73
4.8.3.1	Zona 1, grupa 1.....	73
4.8.3.2	Zona 2, grupa 1.....	75
4.8.3.3	Ostale analize grupe 1.....	77
4.8.3.4	Zona 1, grupa 2.....	77
4.8.3.5	Zona 3, grupa 1.....	79
4.8.3.6	Ostale analize grupe 2.....	81
4.8.3.7	Usporedba rezultata.....	81
5.	ZAKLJUČAK .....	83
	LITERATURA.....	86
	PRILOG .....	89

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Prikaz procesa TIG zavarivanja [3].....	2
Slika 2. Ručno TIG zavarivanje [6] .....	3
Slika 3. Poluautomatizirano TIG zavarivanje [7].....	3
Slika 4. Robotizirano TIG zavarivanje [8] .....	4
Slika 5. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [10] .....	7
Slika 6. Prikaz električnog luka s pripadajućim područjima [11] .....	8
Slika 7. Oprema za TIG zavarivanje [11].....	8
Slika 8. Statička strujna karakteristika – strmopadajuća (CC) [12].....	10
Slika 9. Uspostavljanje luka uz visokofrekventni generator [14] .....	11
Slika 10. Karakteristika impulsnog TIG zavarivanja [15].....	13
Slika 11. AC TIG postupak – utjecaj frekvencije i balansa [2].....	14
Slika 12. Mogući izgledi valova [17].....	15
Slika 13. Razne vrste izvedbi TIG pištolja za zavarivanje [18] .....	16
Slika 14. Dijelovi pištolja za zavarivanje [19] .....	17
Slika 15. Pripreme volframove elektrode [24] .....	20
Slika 16. a) utjecaj parametara pripreme elektrode. b) Utjecaj vrha kuta elektrode [25].....	21
Slika 17. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina [2].....	24
Slika 18. Izgled zavara u ovisnosti o strukturi zaštitnog plina [27].....	24
Slika 19. Dodatni materijal za ručno TIG zavarivanje [30] .....	27
Slika 20. Izvor stuje za zavarivanje.....	35
Slika 21. Natpisna pločica uređaja za zavarivanje .....	36
Slika 22. Pištolj za zavarivanje montiran na uređaj za vođenje .....	37
Slika 23. Upravljačka jedinica uređaja za vođenje pištolja za zavarivanje.....	37
Slika 24. Uzorci za zavarivanje.....	38
Slika 25. Uređaj za poliranje .....	44



Slika 26. Uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja.....	46
Slika 27. Bragg – ov zakon [39].....	47
Slika 28. Ravninski model naprezanja [40].....	48
Slika 29. Debeye - Scherrerov prsten [41].....	49
Slika 30. Uzorak te zone mjerenja .....	50
Slika 31. Primjer dobivenog rezultata mjerenja zaostalih naprezanja .....	51
Slika 32. FWHM parametar [42].....	52
Slika 33. Pravac linearne regresije 1A-1F zona 1 .....	56
Slika 34. Pravac nelinearne regresije 1A-1F zona 1 .....	57
Slika 35. Pravac linearne regresije 1A-1F zona 3 .....	59
Slika 36. Pravci višestruke linearne regresije zona 1 .....	61
Slika 37. Pravci višestruke linearne regresije zona 3 .....	64
Slika 38. Primjer izmjera zavora .....	65
Slika 39. Zone mjerenja tvrdoće.....	69
Slika 40. Uređaj za mjerenje tvrdoće .....	70
Slika 41. Shematski prikaz vickersove metode [45] .....	71
Slika 42. Pravac linearne regresije .....	75
Slika 43. Pravac linearne regresije .....	77
Slika 44. Pravac linearne regresije .....	79
Slika 45. Pravac linearne regresije.....	81

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja [2] .....	5
Tablica 2. Karakteristike pojedine vrste struje i polariteta pri TIG zavarivanju su [2] .....	11
Tablica 3. Vrste i oznake volframovih elektroda [21] .....	18
Tablica 4. Preporučene jakosti struje prema normi ISO 6848 [26].....	21
Tablica 5. Karakteristike zavar uslijed korištenja različitih zaštitnih atmosfera [28].....	25
Tablica 6. Preporučeni zaštitni plinovi za određene materijal [29] .....	26
Tablica 7. Kemijski sastav P91 čelika [32] .....	29
Tablica 8. Mehanička svojstva materijala P91 [32].....	29
Tablica 9. Svojstva P91 čelika pri različitim temperaturama [32].....	29
Tablica 10. Svojstva izvora struje za zavarivanje [36] .....	34
Tablica 11. Konstantni paramteri zavarivanja.....	39
Tablica 12. Karakteristike procesa pri zavarivanju uzoraka.....	40
Tablica 13. Slike zavrenih uzoraka .....	41
Tablica 14. Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja.....	52
Tablica 15. Regresijski parametri 1A-1F zona 1.....	54
Tablica 16. Analiza varijance 1A-1F zona 1 .....	55
Tablica 17. Ishod regresijske analize 1A-1F zona 1 .....	55
Tablica 18. Odstupanja izmjerenih i procijenjenih podataka 1A-1F zona 1 .....	56
Tablica 19. Regresivna statistika 1A-1F zona 2.....	57
Tablica 20. Analiza varijance 1A-1F zona 3 .....	58
Tablica 21. Ishod regresijske analize 1A-1F zona 3 .....	58
Tablica 22. Odstupanja izmjerenih i procijenjenih podataka 1A-1F zona 3 .....	58
Tablica 23. Višestruka regresivna statistika zona 1 .....	59
Tablica 24. Analiza varijance zona 1 .....	60
Tablica 25. Ishod višestruke regresijske analize zona 1 .....	60

Tablica 26. Odstupanja izmjerenih i procijenjenih podataka zona 1 .....	60
Tablica 27. Višestruka regresivna statistika zona 3 .....	62
Tablica 28. Analiza varijance zona 3 .....	62
Tablica 29. Ishod višestruke regresijske analize zona 3 .....	63
Tablica 30. Odstupanja između procijenjenih i izmjerenih vrijednosti zona 3 .....	63
Tablica 31. Prikaz makroizbrusaka .....	66
Tablica 32. Vrijednosti HV za vickersovu metodu [46] .....	72
Tablica 33. Rezultati regresijske statistike .....	73
Tablica 34. Analiza varijance .....	74
Tablica 35. Ishod regresijske analize .....	74
Tablica 36. Procijenjene vrijednosti tvroća te odstupanja od izmjerenih vrijednosti .....	74
Tablica 37. Regresijska statistika .....	75
Tablica 38. Analiza varijance .....	76
Tablica 39. Ishod regresijske analize .....	76
Tablica 40. Procijenjene vrijednosti tvroća te odstupanja od izmjerenih vrijednosti .....	76
Tablica 41. Rezultati regresijske analize .....	77
Tablica 42. Analiza varijance .....	78
Tablica 43. Ishod regresijske analize .....	78
Tablica 44. Procijenjene vrijednosti tvroća te odstupanja od izmjerenih vrijednosti .....	78
Tablica 45. Rezultati regresijske analize .....	79
Tablica 46. Analiza varijance .....	80
Tablica 47. Ishod regresijske analize .....	80
Tablica 48. Procijenjene vrijednosti tvroća te odstupanja od izmjerenih vrijednosti .....	80

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Značenje</b>
Ar	%	Argon
He	%	Helij
t	°C	Stupanj celzijev
T	K	Kelvin
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje
W	%	Volfram
CeO <sub>2</sub>	%	Cerijev oksid
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	Lantanov oksid
ZrO <sub>2</sub>	%	Cirkonijev oksid
ThO <sub>2</sub>	%	Torijev oksid
H <sub>2</sub>	%	Vodik
N	%	Dušik
Cr	%	Krom
Mo	%	Molibden
Mn	%	Mangan
P	%	Fosfor
S	%	Sumpor
Si	%	Silicij
V	%	Vanadij
Ni	%	Niobij
Al	%	Aluminij
Nb	%	Niobij
Ti	%	Titan
F	°F	Fahrenheit
n	Cijeli broj	Redoslijed difrakcije
$\lambda$	m	metar

d	m	metar
$\theta$	°	stupanj
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Naprezanje

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Značenje</b>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
WIG	<i>Wolfram Inert Gas</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
HF	<i>High frequency</i>
CC	<i>Constant Current</i>
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative</i>
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i>
REL	<i>Ručno elektrolučno zavarivanje</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
EPP	<i>Elektrolučno zavarivanje pod praškom</i>
ZUT	<i>Zona utjecaja topline</i>
FF	<i>Ferite Factor</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
FWHM	<i>Full width at half maximum</i>
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
OM	<i>Osnovni materijal</i>

## 1. UVOD

Tehnologija zavarivanja je proces spajanja dva ili više istosrodnih ili raznorodnih materijala koji za cilj ima postizanje homogenog spoja između istih. Željeni rezultat može se postići na više načina, odnosno taljenjem ili pritiskom. Također, zavarivanje se može izvoditi s ili bez dodatnog materijala. Zavar, koji je rezultat zavarivanja, mora zadovoljavati određene uvjete eksploatacije, ovisno radnim uvjetima u kojima će biti podvrgnut. Nerijetko zavari su izloženi vrlo teškim eksploatacijskim uvjetima kao što su udarna opterećenja, dinamička opterećenja, agresivni mediji, visoke i niske temperature. Stoga je potrebno postići odgovarajuću kvalitetu zavarenog spoja, kako bi isti mogao adekvatno funkcionirati u određenim uvjetima, naravno uz što niže troškove izrade istog [1].

Postupci zavarivanja dijele se prema izvoru ili načinu prijenosa energije koja služi za dobivanje topline, koja je neophodna za dobivanje i oblikovanje zavarenog spoja. Izvori mogu biti raznovrsni, a razlikuju se prema svojoj snazi, količini topline, odnosno energije, koja dolazi u osnovni materijal, gustoći toplinskog toka te najvećoj radnoj temperaturi. Broj postupaka zavarivanja raste s napretkom tehnologije, no važno je naglasiti kako se danas najveći dio proizvodnje obavlja samo s nekoliko postupaka zavarivanja, a to su elektrootporno i elektrolučno zavarivanje. Elektrolučno zavarivanje podrazumijeva zavarivanje obloženom, taljivom ili netaljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi, ili bez iste, ovisno o postupku, te zavarivanje pod praškom. Kako se danas teži što većem stupnju automatizacije proizvodnje, tako su i zavarivački postupci danas sve češće automatizirani i robotizirani te uklopljeni u razne serijske proizvodnje. TIG (eng. *Tungsten Inert Gas*) postupak zavarivanja, koji je opisan u ovom radu, je postupak zavarivanja koji se izvodi netaljivom volframovom elektrodom s ili bez dodatnog materijala u inertnoj atmosferi zaštitnog plina. TIG postupak zavarivanja razvija se u avionskoj industriji, 30 – ih, 40 – ih godina prošlog stoljeća, zbog toga što se javlja potreba za zavarivanjem lakih materijala kao što su magnezij i aluminij, odnosno kao zamjena za dotadašnje plinsko zavarivanje. Komercijalna upotreba TIG zavarivanja počinje 50 – ih godina prošlog stoljeća. TIG zavarivanje značajno proširuje svoju primjenu, ovim postupkom moguće je zavarivati sve materijale, a najviše se koristi za zavarivanje aluminijskih i njegovih legura, titana, bakrovih legura, magnezijevih legura, nehrđajućih čelika itd [1].

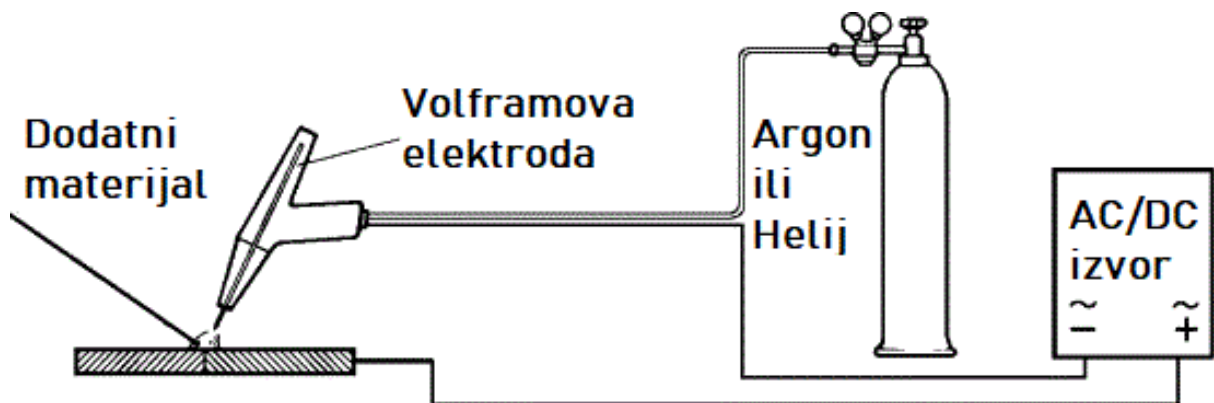
## 2. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

TIG postupak zavarivanje je elektrolučni postupak koji se izvodi netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He) ili često u smjesi navedenih plinova. Za razliku od ostalih postupaka zavarivanja ovaj postupak je relativno spor, zahtijeva visoku sposobnost zavarivača, no ovim postupkom moguće je izraditi zavare koji će zadovoljiti najstrože zahtjeve kvalitete, te eksploatacijske uvjete. Ovaj postupak se često naziva i WIG (de. *Wolfram Inert Gas*) ili GTAW (eng. *Gas Tungsten Arc Welding*) [2].

### 2.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja

Kao što je već navedeno, TIG postupak zavarivanja izvodi se netaljivom elektrodom u inertnoj atmosferi s ili bez dodatnog materijala. Električni luk uspostavlja se između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Zona utjecaja topline, talina osnovnog materijala te volframova elektroda nalaze se u konstantnoj zaštiti inertne atmosfere. Zaštitni plin se najčešće sastoji od argona, helija ili mješavine istih u određenom omjeru. Inertni plin se dovodi kroz plinsku sapnicu za vrhu pištolja za zavarivanje. Unutar pištolja također se nalazi i netaljiva volframova elektroda, sustav za dovod električne energije te rashladni sustav [2].

Na slici 1. prikazan je proces TIG zavarivanja. Zavarivanje se može odvijati s dodatnim materijalom, žicom ili šipkom, takav proces prema normi HRN EN ISO 4063 ima oznaku 141, dok zavarivanje bez dodatnog materijala ima oznaku 142 prema istoj normi HRN EN ISO 4063. Na slici su također prikazani i ostali dijelovi, kao što su izvor struje (AC ili DC), sustav hlađenja pištolja, vodiči, boca s inertnim plinom, radni komad te pištolj.



Slika 1. Prikaz procesa TIG zavarivanja [3]



Kod ručnog TIG postupka zavarivanja, zavarivač pomiče pištolj i sinkronizirano, u pravilnim vremenskim razmacima, dodaje dodatni materijal u prednji rub taline. Nadalje, bitno je reći kako se postupak izvodi lijevom tehnikom rada. Takav način zavarivanja prikazan je na slici 2. [4,5].



**Slika 2. Ručno TIG zavarivanje [6]**

Poluautomatizirano TIG zavarivanje, prikazano na slici 3., vrlo je slično ručnom postupku, a razlika je u tome što se dodatni materijal dovodi kroz dodavač žice koji se nalazi montiran na pištolju. Žica se može dobavljati u toplom i hladnom stanju. Pri dobavi žice u toplom stanju potrebno je imati drugi izvor električne energije koji preko sapnice unutar dodavača žice istu predgrijava na određenu temperaturu. [4, 5].



**Slika 3. Poluautomatizirano TIG zavarivanje [7]**

Potpuno automatizirani TIG postupak zavarivanja, prikazan na slici 4., najčešće se primjenjuje u serijskoj proizvodnji. U ovom slučaju se pištolj za zavarivanje montira na robotsku ruku koja se programira pomoću određenih CAD/CAM programa. Dobavljena žica također može biti u

toplom i hladnom stanju kako je navedeno i za poluatomatski TIG postupak. Putem računala možemo nagledati parametere zavarivanja, te iste mijenjati ukoliko je to potrebno [4, 5].



**Slika 4. Robotizirano TIG zavarivanje [8]**

## **2.2. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja**

Kao i svaki drugi postupak zavarivanja, tako i TIG postupak ima svoje prednosti i nedostatke. Prednosti ovog postupka zavarivanja svakako su visoka kvaliteta zavara, mogućnost zavarivanja bez dodatnog materijala, odvojeno dodavanje dodatnog materijala, stabilnost električnog luka, mogućnost pretaljivanja, jednostavno reparaturno zavarivanje te mogućnost izvrsne kontrole procesa. Pri TIG zavarivanju prskanje je minimizirano, odnosno možemo reći

da ga i nema, također prilikom zavarivanja nastaje vrlo malo dimnih plinova. Nadalje mogućnost zavarivanja svih materijala, te zavarivanje u svim položajima, iako je dosta otežano u prisilnim pozicijama. Također je potrebno reći kako je TIG postupak zavarivanja prvenstveno namijenjen za rad u kontroliranim uvjetima, odnosno u proizvodnom pogonu, na terenu je potrebno napraviti takvo okruženje da nema vanjskih utjecaja kao što su vjeta, kiša i ostalo [4, 5].

Kao glavni nedostatak ovog postupka je vrlo niska brzina zavarivanja, odnosno niska produktivnost, u odnosu na ostale postupcima zavarivanja, što znači da ovim postupkom imamo malo rastaljenog materijala u jedinici vremena. TIG postupak se u pravilu zbog navedenih nedostataka i same niske razine ekonomičnosti, ne koristi za zavarivanje materijala debljih od 6 mm. Materijali debljina između 1 i 6 mm se najčešće izvode ovim postupkom. Također ovaj postupak nije prikladan za rad na otvorenom zbog mogućnosti narušavanja inertne atmosfere, uslijed vanjskih utjecaja, koja je neophodna za integritet postupka. Nadalje ovaj postupak zahtjeva visoku obuku zavarivača, o komu uvelike ovisi kvaliteta spoja, te kvalitetnu pripremu spoja. Tablicom 1. prikazane su prednosti te nedostaci TIG postupka zavarivanja [4,5].

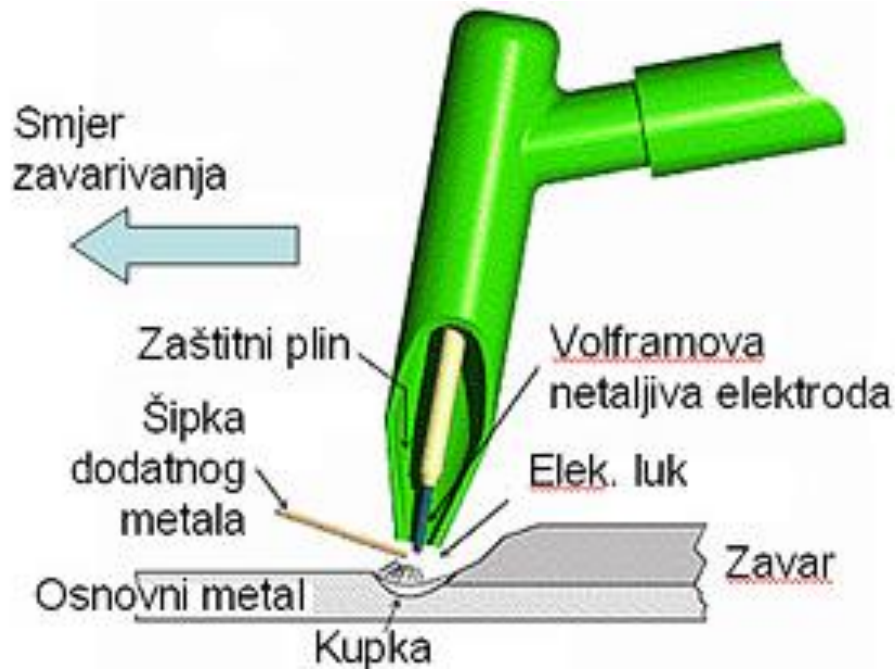
**Tablica 1. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja [2]**

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Odlična kvaliteta te izgled zavarenog spoja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potrebna visoka stručnost zavarivača</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mogućnost zavarivanja malih debljina materijala od 1 do 6 mm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neekonomičnost postupka pri zavarivanju materijala debljine iznad 6 mm.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mala brzina zavarivanja te mali depozit dodatnog materijala</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zavarivanje u svim položajima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka cijena opreme</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mala količina štetnih plinova</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potrebna visoka čistoća plinova</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koncentriran električni luk te manja zona utjecaja topline</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potrebna precizna priprema zavarenog spoja te visoka čvrstoća zavarivanih površina</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mogućnost automatizacije</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nepogodno za zavarivanje na otvorenom</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mogućnost izvođenja reparaturnih radova</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potreba za ventilacijskim sustavom</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zavarivanje širokog spektra materijala</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pojačana svjetlost te UV zračenje</li> </ul>

### 2.3. Opis TIG postupka zavarivanja

Postupak ručnog TIG zavarivanja najčešće započinje pritiskom prekidača na pištolju za zavarivanje, pištolj može raditi u dvotaktnom ili četverotaktnom načinu rada. Ponekad ovaj postupak može započeti i pritiskom na nožni prekidač koji može raditi istim principima kao i pištolj (dvotaktno i četverotaktno). Kada se prekidač pritisne prvo započinje protjecanje inertnog plina kroz sapnicu pištolja, istovremeno započinje i cirkulacija rashladnog sredstva unutar pištolja. Zaštitni plin je glavni nosioc ionizacije te nam je neophodan za uspostavljanje te održavanje stabilnosti električnog luka. Inertna atmosfera također štiti talinu metala zavara i zonu utjecaja topline od štetnih, vanjskih utjecaja. Pri uspostavljanju električnog luka zavarivač približava vrh volframove elektrode do radnog komada na udaljenost između 2 i 5 mm. U tom trenutku upravljačka jedinica uređaja za zavarivanje šalje visokofrekventnu struju u inertnu atmosferu plinova gdje se atmosfera ionizira te nastaje električni luk. Električni luk uspostavljen na takav način u struji zaštitnog plina doseže temperaturu u iznosu od 20 000 °C koja dalje tali osnovni materijal. Ovakav način uspostave luka omogućen je korištenje HF modula. Električni luk je također, osim korištenjem HF modula, moguće uspostaviti kratkim spojem, odnosno doticajem vrha wolframove elektrode s radnim komadom. U većini slučajeva električni luk se uspostavlja pomoću HF modula, jer se pri paljenju luka kratkim spojem u zavaru mogu pojaviti neželjeni uključci wolframa, uslijed taljenja vrha elektrode pri doticaju s radnim komadom, odnosno pri kratkom spoju. Nadalje se u talinu koja je nastala pod utjecaje električnog luka u inertnoj atmosferi, dodaje se dodatni materijal u obliku žice ili šipke. Dodatni materijal se dodaje u točno određenim vremenskim intervalima, isti se tali u prednjem rubu taline osnovnog materijala te se zajedno sa osnovnim materijalom tvori zavar. Brzina zavarivanja, ovisi o pripremi spoja, brzini dodavanja dodatnog materijala, brzini pomicanja pištolja te sposobnosti zavarivača. Ponovnim pritiskom na prekidač pištolja ili puštanjem istog (četverotaktni ili dvotaktni rad) prestaje zavarivanje, prekida se električni luk, a zaštitni plin istječe još nekoliko sekundi radi zaštite taline od naglog hlađenja te vrha elektrode [9].

Shematski prikaz TIG zavarivanja prikazan je na slici 5.

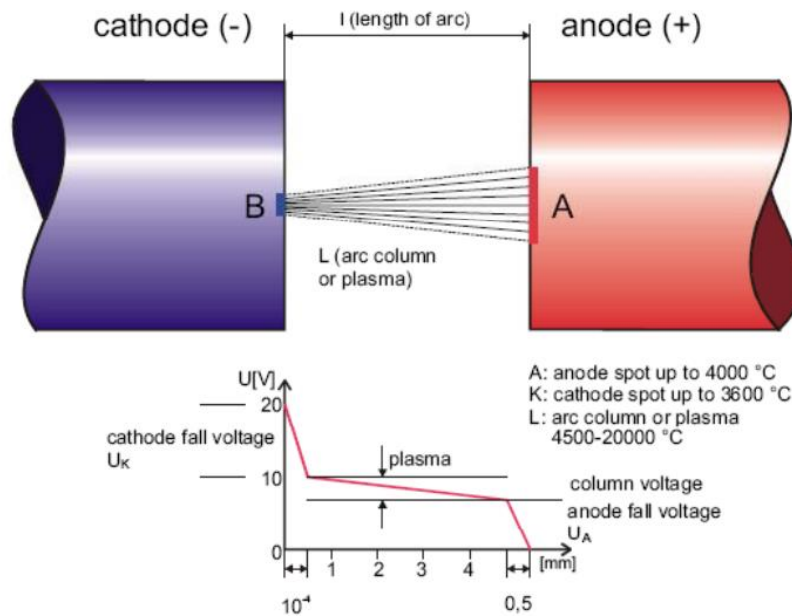


Slika 5. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [10]

Električni luk kod TIG zavarivanja sastoji je od 3 područja [9]:

- Anodno područje – nalazi se uz pozitivno nabijenu elektrodu, još se naziva i aktivna anodna mrlja. Veća je nego katodna mrlja. Sastoji se od oblaka elektrona koji udaranjem na anodu pri velikim brzinama oslobađaju svoju energiju. Pri takvoj akciji elektrona razvija se toplina, odnosno temperatura, na anodi otprilike 4000 K pri čemu dolazi do taljenja metala. Napon na anodi pada nešto manje nego na katodi
- Katodno područje – nalazi se uz negativno nabijenu elektrodu, naziva se još i katodna mrlja, te je manjeg promjera nego anodna mrlja. Sastoji se od oblaka iona koji su privučeni katodom te velikom brzinom udaraju na njenu površinu. Pri toj akciji iona postižu se vrlo visoke temperature, otprilike 3600 K. Pad napona na katodi je nešto veći nego na anodi.
- Stup električnog luka – označava najduže područje električnog luka te iznosi između 3 i 5 mm. Dužina ovog polja ovisi o naponu električnog luka, a ovo polje se nalazi između katodnog i anodnog područja električnog luka. Sastoji se od mješavine iona, neutralnih atoma, molekula te elektrona. Zbog utjecaja privlačnih sila anoda i katode, kroz područje stupa prolaze elektroni i ioni. Tako se održava električni luk. Također postoji pad napona kroz stup električnog luka, no on je manji od padova na anodi i katodi.

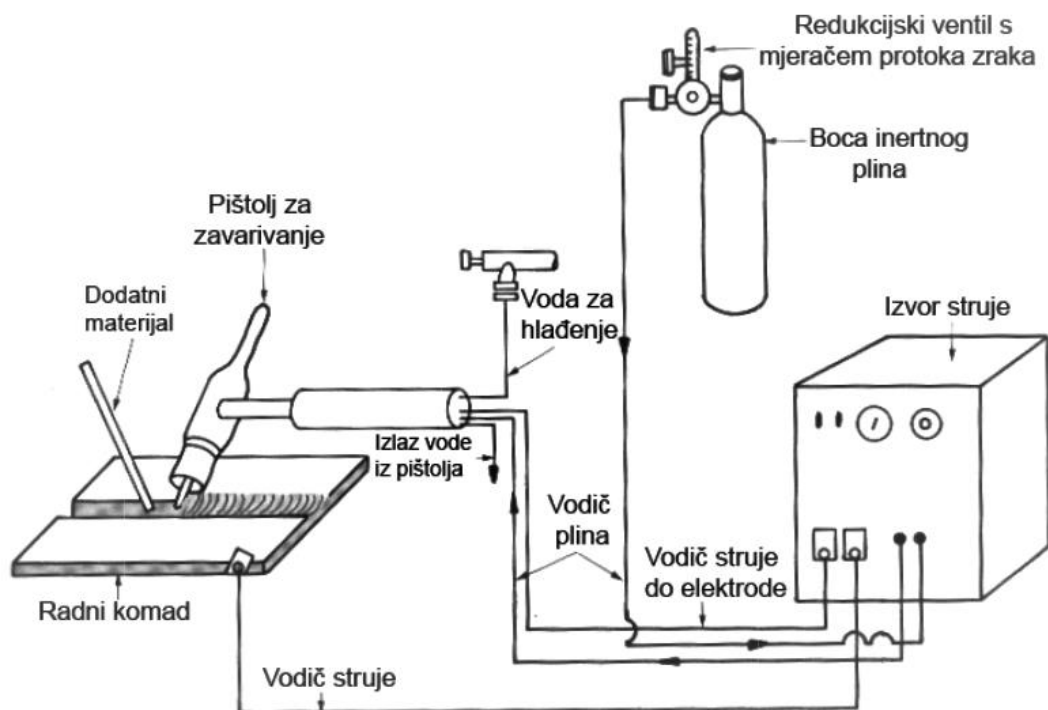
Na slici 6. prikazan je električni luk, s pripadajućim područjima koja su opisana iznad. Također je na slici vidljivo koliki su otprilike padovi napona unutar određenog područja.



Slika 6. Prikaz električnog luka s pripadajućim područjima [11]

## 2.4. Oprema za TIG postupak zavarivanja

Na slici 7. prikazana je osnovna oprema potrebna za ručni TIG postupak zavarivanja. Oprema se sastoji od izvora struje, koji je spojen na električnu mrežu, priključka mase, pištolja za zavarivanje, koji sadrži netaljivu volframovu elektrodu, te sustav zaštitnog plina i sustav za protok rashladnog sredstva. Također na slici vidimo bocu koja sadrži zaštitni plin s pripadajućim ventilima te mjeracima tlaka, protoka.



Slika 7. Oprema za TIG zavarivanje [11]

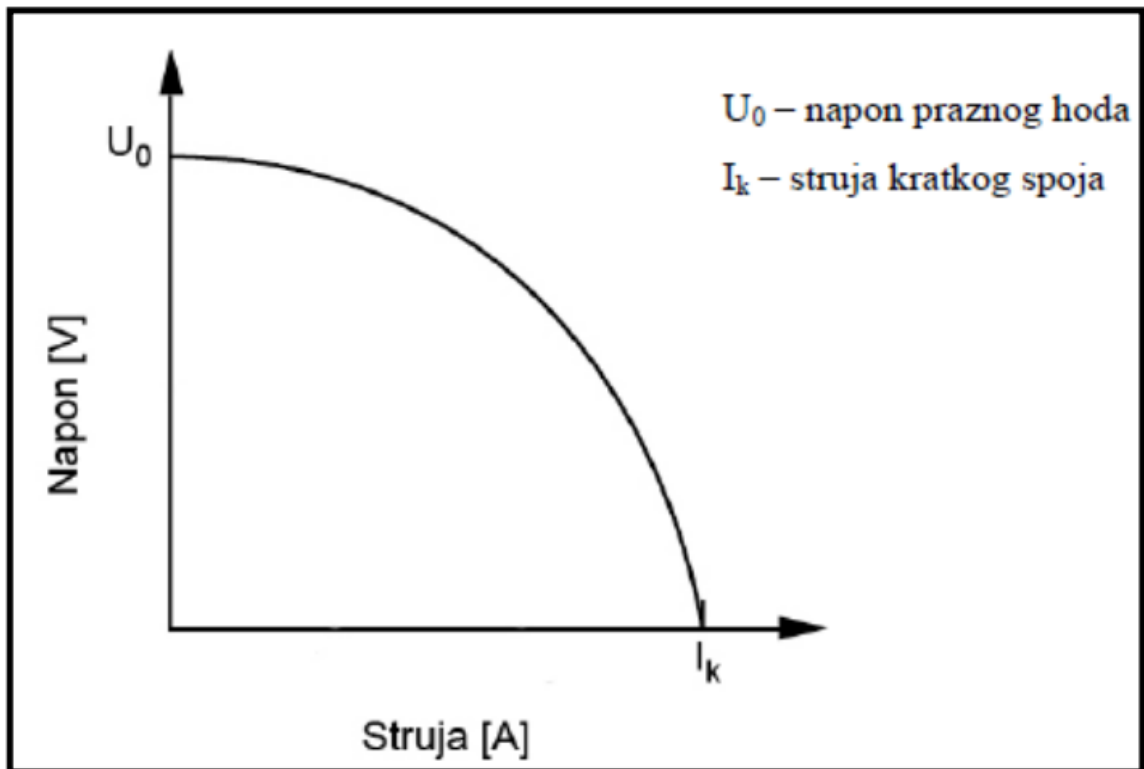
Na izvor struje se spaja pištolj za zavarivanje. Pištolj može biti spojen na + ili – pol istosmjernje struje ili na izmjeničnu struju. Pol na koji se spaja pištolj ovisi o materijalu koji se zavaruje, no najčešće se koristi istosmjerna struja na – polu. Kako bi se zatvorio strujni krug, drugi pol se pomoću kliješta (mase) spaja na radni komad. Visokofrekventni modul koji omogućava lakše uspostavljanje električnog luka paralelno je spojen između pištolja za zavarivanje i radnog komada. Također unutar atestirane čelične boce nalazi se inertni plin (Ar, He ili njihova smjesa). Na boci se nalazi ventil s mjernim instrumentima koji služe za reguliranje protoka plina, te regulator tlaka, koji nam može sugerirati koliko je plina preostalo unutar boce. Plin nam osigurava stabilnost električnog luka, utječe na izgled te kvalitetu zavarenog spoja. Nadalje rashladni sustav se sastoji od pumpe, hladnjaka te medija kojim služi za hlađenje sustava. Polikabelom se istovremeno dobavlja rashladno sredstvo, inertni plin te električna struja, stoga nam njegovo korištenje uvelike olakšava provođenje procesa te kontrolu istog [12].

#### **2.4.1. Izvori struje**

Izvori struje za TIG zavarivanje prema vrsti struje koju proizvode mogu biti izmjenični, istosmjerni ili kombinirani. Također prema načinu pretvorbe energije postoji druga podjela, a to je na transformatore, ispravljače, rotacijske pretvarače, invertere te agregate. Danas su TIG uređaji za zavarivanje najčešće građeni kombinirano, te se istovremeno koriste kao transformatori i ispravljači. Ispravljanje se najčešće koristi prebacivanjem sklopke na izvoru [12].

TIG izvori struje za zavarivanje koji služe za ručno TIG zavarivanje koriste strmopadajuću statičku karakteristiku (CC – *Constant Current*). Ovakva karakteristika nam omogućava ponašanje izvora takvo da se održava približno konstantna vrijednost struje tijekom procesa, a vrijednost napona je promjenjiva u ovisnosti o promjeni visine električnog luka. Također ovakvom karakteristikom nam i unos topline ostaje približno konstantan kroz cijeli proces zavarivanja. Promjenom visine luka također se automatski u skladu s potrebama dodatno ionizira inertna atmosfera između radnog komada i elektrode. Ova statička strujna karakteristika koristi se još i kod REL, plazma te EPP (dodatni materijal debljine iznad 3 mm – zbog tromosti procesa) postupaka zavarivanja [12].

Na slici 8. prikazana je strmopadajuća statička karakteristika aparata za TIG ručni postupak zavarivanja



Slika 8. Statička strujna karakteristika – strmopadajuća (CC) [12]

Uspostavljanje električnog luka kod TIG tehnologije zavarivanja najčešće se izvodi bez kontakta vrha elektrode i radnog komada, odnosno pomoću HF modula. HF modul radi na principu odašiljanja visokofrekventnih, visokonaponskih struja prema radnom komadu. Na principu „skin effecta“ dolazi do razvijanja topline visokih vrijednosti na površini radnog komada te se na taj način uspostavlja električni luk. Frekvencije visokonaponske, koju osigurava HF modul nalazi se u rasponu između 20 – 50 kHz. Nadalje, takva struja nije opasna za zavarivača, jer su jakosti struje veoma niske, te je ova činjenica dodatni plus ovakvog načina uspostave električnog luka [13].

Uspostavljanje električnog luka kratkim spojem, koje se koristi kod starijih strojeva koji nemaju HF modul, se sve više izbjegava zbog mogućnosti oštećenja vrha volframove elektrode, a samim oštećenjem vrha elektrode se dovodi u pitanje stabilnost vođenja električnog luka. Također, ovakav način uspostavljanja električnog luka „kresanjem“ može dovesti do nastanka volframovih uključaka u zavaru što je isto tako nepoželjna posljedica [13].

Na slici 9. prikazano je uspostavljanje električnog luka uz pomoć visokofrekventnog generatora.





Slika 9. Uspostavljanje luka uz visokofrekventni generator [14]

#### 2.4.1.1 Vrste električne struje i polariteta

Kod TIG postupku zavarivanja električna struja može biti istosmjerna, tako da je pištolj spojen na + ili – pol, ili izmjenična. Vrsta struje određuje kako će se raspodijeliti toplina, odnosno koliko topline će se rasporediti na netaljivu volframovu elektrodu, a koliko na radni komad [2].

Tablica 2. Karakteristike pojedine vrste struje i polariteta pri TIG zavarivanju su [2]

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet elektrode	Negativan	Pozitivan	
Tok elektrona i iona			
Čišćenje oksida	Ne	Da	Da- svakih pola ciklusa jedan puta
Raspodjela topline između elektrode i radnog komada	70 % na radnom komadu 30 % na kraju elektrode	30 % na radnom komadu 70 % na kraju elektrode	50 % na radnom komadu 50 % na kraju elektrode
Penetracija	Duboka; uska	Plitka; široka	Srednja
Kapacitet elektrode	Odličan npr. elektroda Ø 3,2 mm – 400 A	Mali npr. elektroda Ø 6,4 mm – 120 A	Dobar npr. elektroda Ø 3,2 mm – 255 A

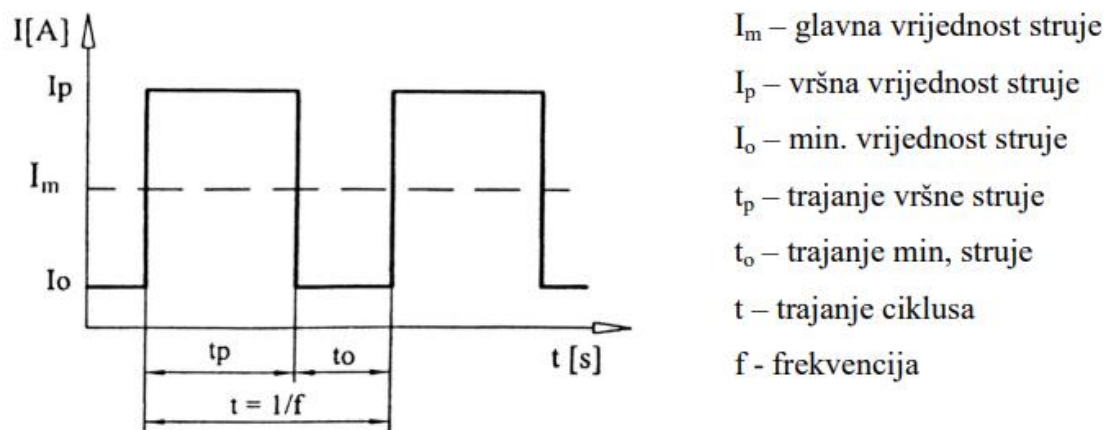
## 1. Istosmjerna struja

- elektroda spojena na negativan (-) pol (DCEN) – Ovakva kombinacija vrste struje i polariteta se najčešće koristi pri TIG postupku zavarivanja. Kod ovakve kombinacije elektroni kreću s negativne elektrode na pozitivno nabijeni radni komad, te ubrzavaju kroz električni luk. Pozitivni elektroni imaju suprotan smjer gibanja. U ovom slučaju kinetička energija elektrona je značajno veća od kinetičke energije pozitivno nabijenih iona, a to za posljedicu ima veće zagrijavanje osnovnog materijala u odnosu na vrh elektrode. Približni odnos zagrijavanja elektrode i radnog komada je 1/3 na elektrodi, a 2/3 na osnovnom materijalu. Zahvaljujući ovakvoj raspodjeli topline, ova kombinacija vrste struje i polariteta nam omogućava rad s elektrodama manjeg promjera, odnosno rad s većim strujama za iste promjere elektroda. Vrh elektrode također iz istih razloga može biti zašiljen, što nam omogućuje stabilnost unutar električnog luka. Ovakav način TIG zavarivanja nam omogućava dobru penetraciju, ali nema mogućnost čišćenja slojeva oksida s površine materijala [2].
- elektroda spojena na pozitivan (+) pol (DCEP) – U ovom slučaju smjer elektrona je suprotan, odnosno elektroni se kreću od radnog komada prema pozitivno nabijenoj elektrodi. Samim time je i raspodjela topline drugačija. U ovom slučaju 2/3 topline otpada na elektrodu dok 1/3 ostaje radnom komadu. Takvom raspodjelom topline dolazi do značajnog toplinskog opterećenja elektrode, samim time i do njenog ubrzanog trošenja. Ovakva kombinacija vrste struje i polariteta se koristi isključivo pri manjim strujama zavarivanja. Isto tako za ovaj slučaj koriste se elektrode većeg promjera za iste iznose jakosti struje kao kod DC (-). Penetracija je manja nego kada je elektroda spojena na negativan pol. Zaobljenost vrha elektrode može pridonijeti nestabilnosti električnog luka, no ovakva kombinacija vrste struje i polariteta nam omogućava čišćenje oksida s površine osnovnog materijala, što znači da se na ovaj način mogu zavarivati materijali poput aluminija te njegovih legura[2].

Kada govorimo o istosmjernim strujama pri TIG zavarivanju, svakako je bitno napomenuti impulsno TIG zavarivanje. Impulsno TIG zavarivanje je modificirana verzija zavarivanja kod koje se struja kreće između donje i gornje vrijednosti tijekom postupka zavarivanja. Najveća prednost i karakteristika ovog postupka je smanjeni unosi topline, a samim time manja

mogućnost deformacija, smanjeno toplinsko opterećenje i lakše vođenje luka. Impulsno TIG zavarivanje najčešće se izvodi na frekvencijama od 30 – 50 Hz [5].

Na slici 10 prikazana je karakteristika impulsnog TIG zavarivanja, odnosno ovisnost struje o vremenu.



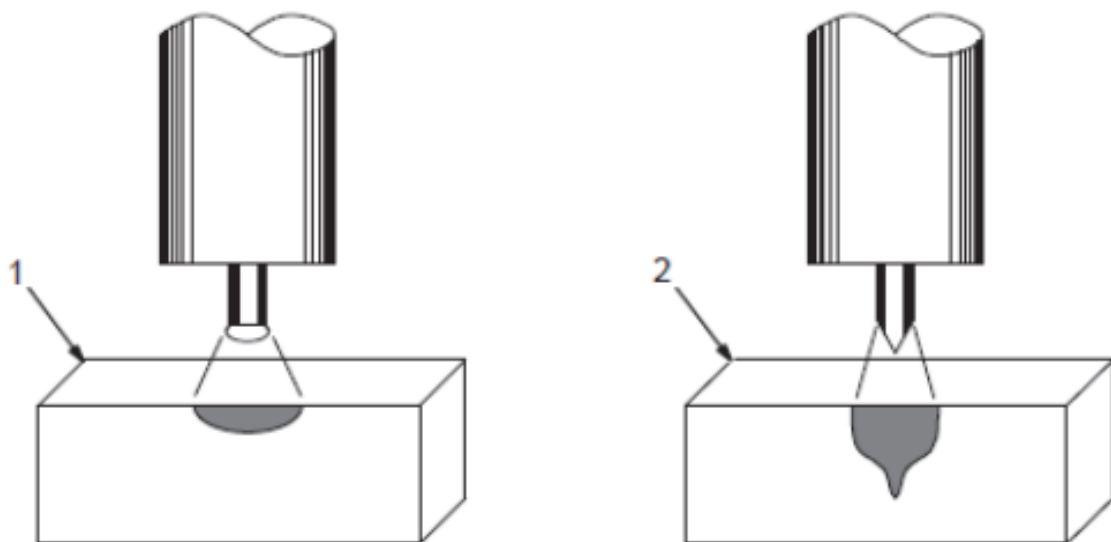
**Slika 10. Karakteristika impulsnog TIG zavarivanja [15]**

## 2. Izmjenična struja (AC)

Zahvaljujući promjeni smjera gibanja struje, odnosno polariteta elektrode, ovakav postupak TIG zavarivanja nam omogućava dobro čišćenje oksidnih slojeva dok je elektroda na pozitivnom (+) polu, ali također i dobru penetraciju dok se ista nalazi na negativnom (-) polu. Toplinsko opterećenje je otprilike podjednako na radnom komad i na volframovoj elektrodi, sve dok je balans izmjenične struje postavljen na 0, odnosno 50% na plus polu te 50% na minus polu. Kod izmjenične struje pri TIG zavarivanju dolazi do promjene smjera kretanja elektrona, broj takvih promjena u sekundi opisan je frekvencijom. Stalno mijenjanje smjera gibanja električne energije za posljedicu ima konstantno „paljenje“ i „gašenje“ električnog luka, što dovodi do nestabilnosti cijelog procesa zavarivanja. Negativan utjecaj „paljenja“ i „gašenja“ električnog luka može se minimizirati ugradnjom dodatnog uređaja na izvoru struje koji bi proizvodio visokonaponsku te visokofrekventnu struju u trenutku „paljenja“ električnog luka. Pri AC TIG zavarivanju na geometriju zavarenog spoja može se utjecati promjenom frekvencije te balansa izmjenične struje. Promjenama balansa i frekvencije također se može utjecati na čišćenje oksida i toplinska opterećenja radnog komada i elektrode. Balans nam određuje koliko je vremena elektroda na pozitivno, a koliko negativno nabijena. Povećanjem vremena u kojem je elektroda negativno nabijena za posljedicu ima veću penetraciju te manje toplinsko opterećenje

elektrode, dok se istovremeno povećava unos topline te smanjuje vrijeme čišćenja oksida. Frekvencija nam određuje koliko će se puta promijeniti smjer struje u jedinici vremena (sekundi). Povećanjem broja ciklusa u sekundi povećava se i penetracija [2].

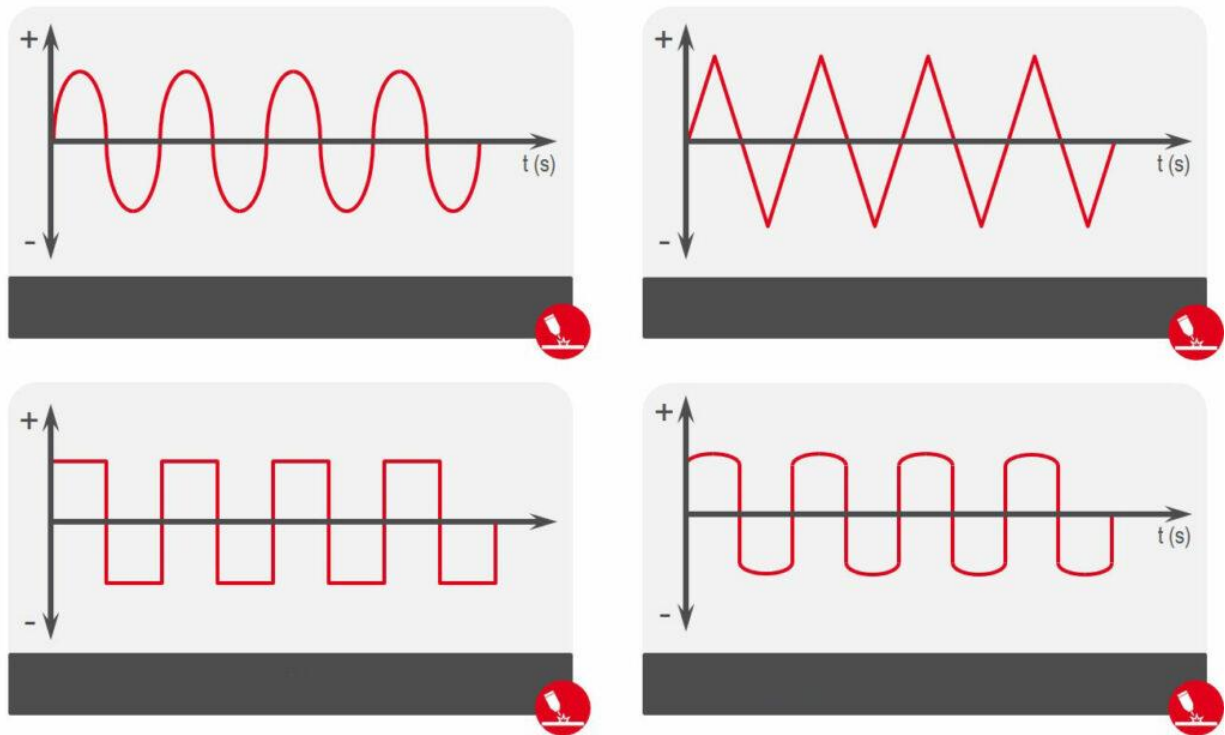
Na slici 11 prikazane su neke od mogućnosti kombinacije frekvencije te balansa pri zavarivanju AC TIG postupkom zavarivanja. Na slici su naznačena 2 primjera na kojima se može objasniti u kojem slučaju će zavar izgledati na jedan a kada na drugi način. Zavar koji vidimo na komadu 1 bit će u slučaju kada je elektroda više vremena pozitivno nabijena, isto tako, tada imamo veće čišćenje oksida na radnom komadu. Lijevi primjer na slici 11 odgovara slučaju kada je frekvencija manja te balans namješten tako da je elektroda više vremena pozitivno nabijena, što uzrokuje manje protaljšivanje i manji unos topline. Desni primjer na slici 11 odgovara slučajevima kada je frekvencija većeg iznosa, tada je i vreća penetracija, isto tako kada je balans namješten tako da je elektroda više vremena negativno nabijena [2].



**Slika 11. AC TIG postupak – utjecaj frekvencije i balansa [2]**

Kod AC TIG postupka zavarivanja imamo i mogućnost promjene parametra izgleda krivulja izmjenične struje, odnosno „valova“ (eng. *Wave form*). Valovi su prikazani na slici 8, a na istoj vidimo kako valovi mogu izgledati, sinusoidalno, trokutasto, pravokutno, te modificirano pravokutno. Iz slike možemo zaključiti kako je najveća iskoristivost stroja pri korištenju pravokutnog vala, jer imamo najveće zadržavanje vala na maksimalnom iznosu struje, dok je najmanja pri trokutastom izgledu vala, gdje je to zadržavanje najkraće. Također je važno naglasiti kako pravokutna krivulja izmjenične struje u stvarnosti nije baš pravokutna već su

rubovi ipak malo zaobljeni te je pravac promjene smjera ipak pod kutem, što za posljedicu ima manju iskoristivost procesa. Na apscisi se nalazi vrijeme, dok se na ordinati nalazi iznos jakosti struje [16].



Slika 12. Mogući izgledi valova [17]

#### 2.4.2. Pištolj za TIG zavarivanje

TIG pištolji za zavarivanje mogu se podijeliti na dvije osnovne skupine prema načinu hlađenja, tako se dijele na vodom te zrakom hlađene pištolje. Također bismo ih mogli podijeliti prema tome za kakav način rada su namijenjeni, odnosno na pištolje za ručni i one za automatizirani rad. Pištolji hlađeni zrakom su namijenjeni za kraće intervale zavarivanja te za niže iznose struje zavarivanja, odnosno za iznose do 150, 200 A. Pištolji koji imaju hlađenje vodom namijenjeni su za jakosti struje do 600 A, te za duža vremenska opterećenja (viši iznosi intermitencije) [13].

Kao rashladna tekućina u pištoljima za TIG zavarivanje najčešće se koristi voda ili antifriz. Takvi pištolji su teži te zbog svoje mase su zahtjevniji za rukovanje i rad. Cijena pištolja koji se hladi tekućinom je veća nego kod onog koji se hladi zrakom zbog kompleksnosti konstrukcije te izrade, ali i potrebe za korištenjem kvalitetnijih materijala. Postoje razni oblici i dimenzije TIG pištolja za zavarivanje, a njih odabiremo prema uvjetima u kojima se posao izvodi [12].

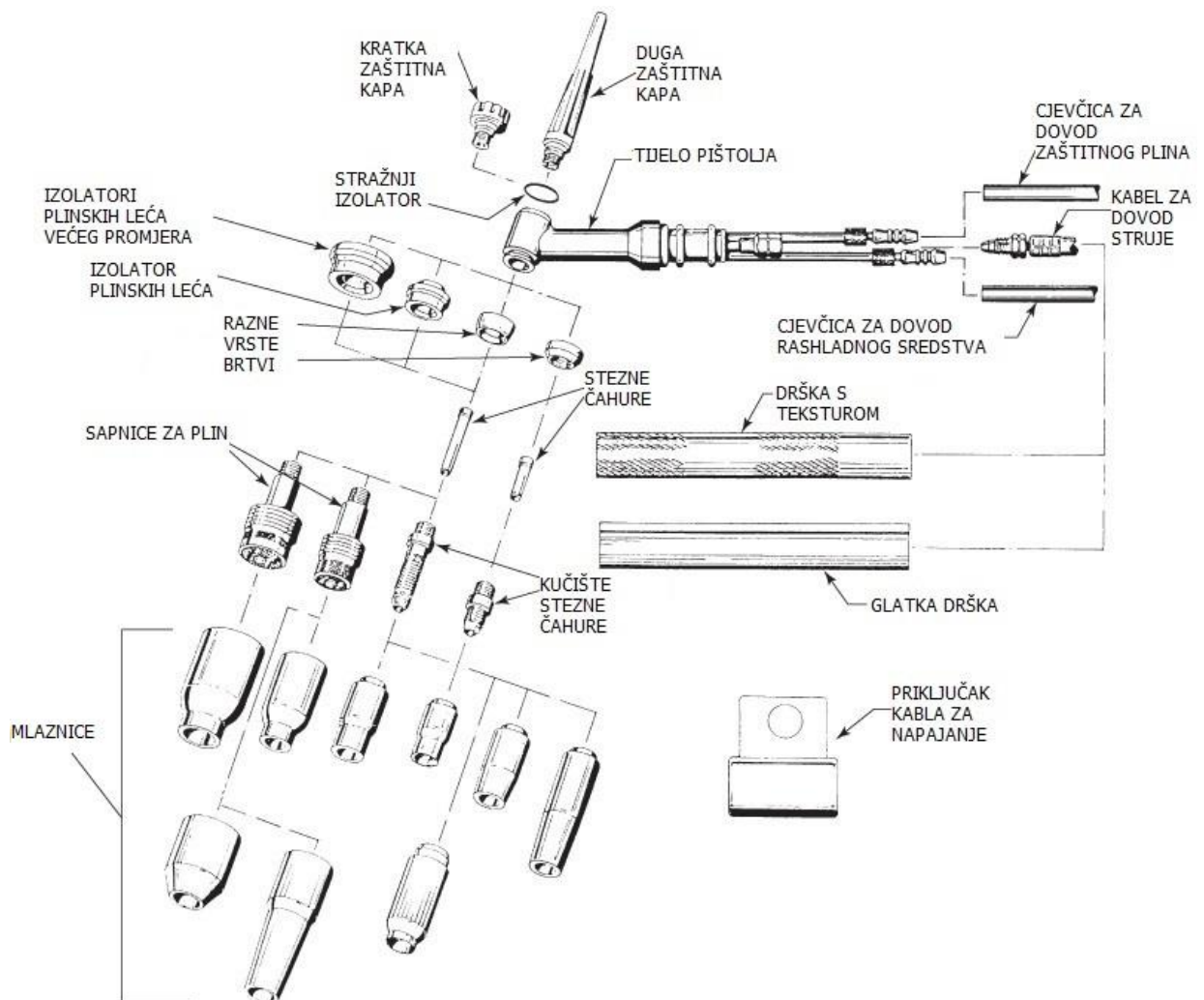
Na slici 13. prikazane su razne izvedbe TIG pištolja za zavarivanje.



**Slika 13. Razne vrste izvedbi TIG pištolja za zavarivanje [18]**

Slika 14 prikazuje rastavljeni pištolj za TIG zavarivanje s pripadajućim dijelovima, prikazani su neke od mogućih varijanti pojedinih dijelova, koji se mogu kombinirati ovisno o uvjetima rada. Iz slike vidimo da se pištolj sastoji od tijela kroz koje prolaze cjevčice za dovod zaštitnog plina, rashladnog sredstva te vodič za dovod struje. Na početak tijela se spaja polikabel kojim se dopremaju navedena dobra. Nadalje na tijelo pištolja se montira drška, odnosno okvir koji može biti teksturiran (hrapav) ili gladak. Na glavu pištolja s jedne strane se stavlja zaštitna kapa koja je izolirana pomoću stražnjeg izolatora. S druge strane glave pištolja se montira izolator plinske leće, brtva, stezne čahure sa svojim kućištem, sapnice za plin te na kraju se stavljaju

mlaznice. Kroz sve navedene dijelovi koji su montran na vrh tijela pištolja prolazi volframova elektroda.



Slika 14. Dijelovi pištolja za zavarivanje [19]

#### 2.4.2.1 Netaljive volframove elektrode

Netaljiva volframova elektroda služi za uspostavu luka između pištolja i osnovnog materijala, odnosno kao provodnik električne struje. Kao što već navedeno, elektroda je izrađena od volframa. Volfram je sjajnobijeli metal velike gustoće i ima talište na temperaturi od 3422 °C, a to je najveće talište od svih kovina. Uspostavom električnog luka koji tali osnovni i dodatni materijal ne dolazi do taljenja elektrode zahvaljujući odličnim fizikalnim svojstvima volframa te hlađenja koje se događa na vrhu elektrode termoelektronskim emisijama koje nastaju zagrijavanjem elektrode električnim otporima [20].

Volframove elektrode izrađuju se u standardiziranim promjerima: 0.5, 1.0, 1.6, 2, 2.4, 3.2, 4.0, 6.4 i 8.0 mm, te standardiziranim dužinama: 50, 75, 150, 175 i 200 prema normi HRN EN ISO 6848 [20]

Elektrode mogu biti izrađene od čistog volframa ili volframa s legirnim elementima. U tablici 3 prikazane su vrste volframovih elektroda, ovisno o svom sastavu svaka elektroda označava se drugom bojom te ima određena svojstva, odnosno primjenjuje se za određene eksploatacijske uvjete.

**Tablica 3. Vrste i oznake volframovih elektroda [21]**

Oznaka (ISO)	Tip oksida	Dodatak oksida (%)	Boja
W	-	-	Zelena
WC20	1,8 – 2,2	CeO <sub>2</sub>	Siva
WL10	0,9 – 1,2	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Crna
WL15	1,4 – 1,6	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zlatna
WL20	1,9 – 2,1	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Plava
WZ3	0,15 – 0,50	ZrO <sub>2</sub>	Smeđa
WZ8	0,7 – 0,9	ZrO <sub>2</sub>	Bijela
WT4	0,35 – 0,55	ThO <sub>2</sub>	Svijetlo plava
WT10	0,8 – 1,2	ThO <sub>2</sub>	Žuta
WT20	1,7 – 2,2	ThO <sub>2</sub>	Crvena
WT30	2,8 – 3,2	ThO <sub>2</sub>	Ljubičasta
WT40	3,8 – 4,2	ThO <sub>2</sub>	Narančasta

Legiranje volframa s određenim oksidima izvodi se radi dobivanja boljih performansi elektrode u određenim situacijama. Utjecaji pojedinih legirnih elemenata su [22]:

- Čisti volfram (W) – elektroda se sastoji od čistog volframa (99.5 %). Ovakve elektrode imaju najveće trošenje, te su jeftinije od ostalih. Elektrode od čistog volframa se najčešće koriste za zavarivanje aluminija, odnosno zavarivanje izmjeničnim strujama te im je stoga vrh zaobljen kako ne bi došlo do prebrzog trošenja elektrode te volframovih uključaka u zavaru.



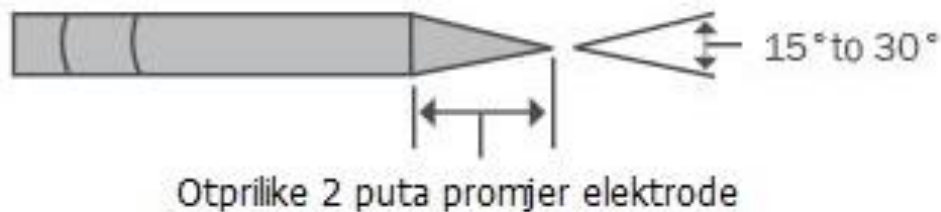
- Volfram legiran torijem oksidom ( $W + ThO_2$ ) – danas najčešće korištene elektrode zbog svoje dugotrajnosti te jednostavnosti uporabe. Torij povećava emisiju elektrona, što omogućava lakše uspostavljanje luka, te rad sa strujama većeg iznosa. Tijekom rada ova elektroda nalazi se daleko ispod svog tališta, što rezultira veoma slabim trošenjem te eliminira mogućnost nestabilnosti električnog luka. U usporedbi s ostalim elektrodama torirane elektrode otpuštaju manje volframa u materijal zavara. Ova elektroda najčešće se koristi za zavarivanje izmjeničnim strujama (zaobljen vrh elektrode) no može se koristiti i za zavarivanje istosmjernim strujama bilo na pozitivnom ili negativnom polu. Torij kao kemijski element je radioaktivan te za rukovanje ovom elektrodom potrebno je pridržavanje pravila i uputa proizvođača elektrode.
- Volfram legiran cerijevim oksidom ( $W + CeO_2$ ) – ove elektrode se najbolje ponašaju pri zavarivanju na niskim iznosima istosmjerne struje, no mogu se koristiti i pri zavarivanju izmjeničnom strujom. Kao prednost im se ističe izvrsno paljenje luka pri malim strujama, te se zbog toga najviše koriste pri orbitalnom zavarivanju cijevi, radu na tankim limovima te pri radu s malim i delikatnim dijelovima. Nisu preporučljive za rad pri višim iznosima struje.
- Volfram legiran lantanovim oksidom ( $W + La_2O_3$ ) – karakteristike ove elektrode su izuzetno dobro uspostavljanje električnog luka, dobra stabilnost luka, odlična svojstva ponovnog paljenja, nisko trošenje. Vodljivost im je slična kao kod elektroda legiranih s torijem. Lantanove elektrode dobro rade i na istosmjernoj (DC (-)) i na izmjeničnoj struji. Moguće je pokretanje i održavanje električnog luka pri nižim naponima.
- Volfram legiran cirkonijevim oksidom ( $W + ZrO_2$ ) – Cirkonijeva elektroda proizvodi izuzetno stabilan električni luk te je izuzetno otporna na otpuštanje volframa. Ova elektroda idealna je za zavarivanja izmjeničnom strujom, dok zavarivanje istosmjernim strujama ne dolazi u obzir.

#### 2.4.2.2 Priprema volframove elektrode

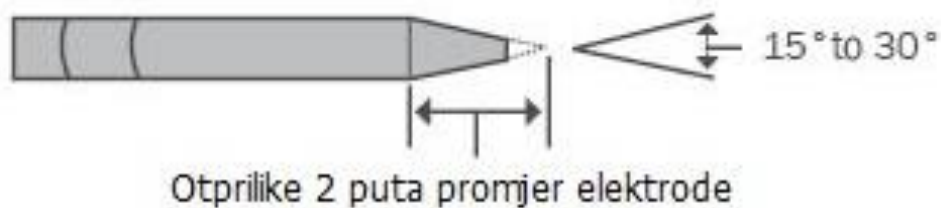
Osim izbora vrste netaljive volframove elektrode te njenog promjer, također je bitno ispravno izvršiti pripremu geometrije vrha elektrode. Geometrija vrha elektrode može utjecati na geometriju te stabilnost vođenja električnog luka. Vrh elektrode može biti šiljast ili zaobljen [23].

Na slici 15. prikazane su pripreme elektrode u ovisnosti o struji kojom se provodi zavarivanje. Na slici vidimo da pri zavarivanju istosmjernom strujom vrh elektrode je više šiljast, iako sam vrh bi trebalo malo zaravnati, dok kod izmjenične struje vrh je više zaobljen.

### Priprema elektrode za zavarivanje istosmjernom strujom



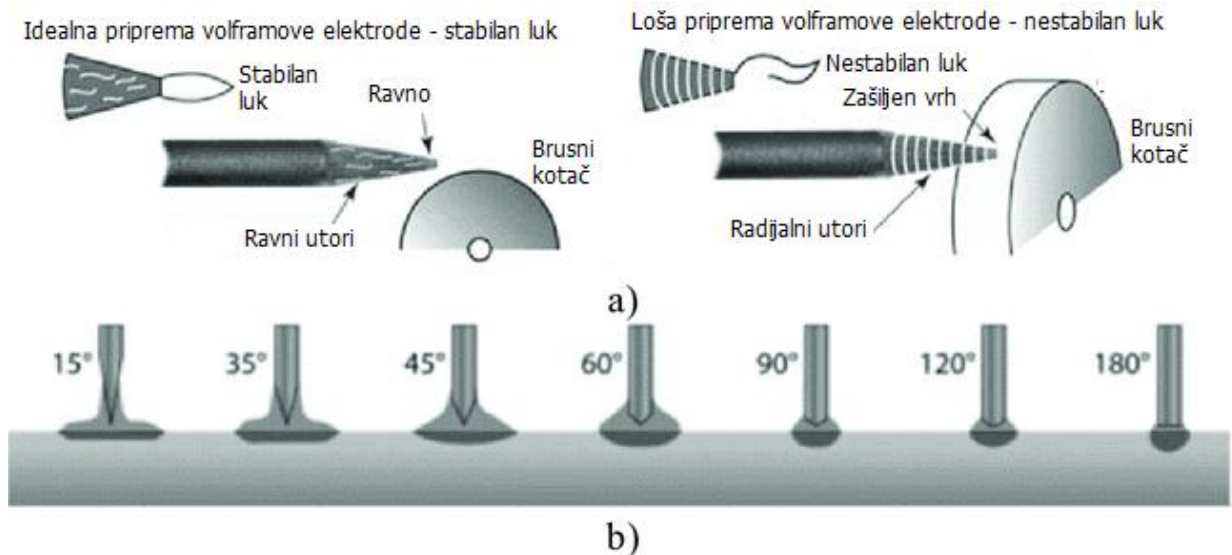
### Priprema elektrode za zavarivanje izmjeničnom strujom



**Slika 15. Pripreme volframove elektrode [24]**

Slika 16 prikazuje nam:

- Utjecaj parametara oblikovanja i obrade volframove elektrode na stabilnost električnog luka. Iz slike vidimo kako bi se elektroda treba brusiti tako da na svom konusnom dijelu ima ravne utore, a ne aksijalne. Također vidimo kako bi vrh elektrode trebao biti ipak malo zaobljen, odnosno imati određeni radius, a ne šiljast, kako bismo imali stabilan električni luk.
- Na ovom dijelu slike prikazan je utjecaj kuta vrha elektrode na geometrije zavara te električnog luka. Vidimo kako s povećavanjem kuta šiljenja elektrode imamo širi električni luk, ali isto tako imamo i veću penetraciju zavara.



Slika 16. a) utjecaj parametara pripreme elektrode. b) Utjecaj vrha kuta elektrode [25].

Prilikom zavarivanja tankih materijala malim iznosima struja preporučuje se elektrodu zašiljiti na nekakvih 30°. Šiljasti vrh omogućava fokusiraniji luk te sprječava izobličavanje tankih materijala. Upotreba zašiljene ne preporučuje se pri jačim strujama jer bi pri većim toplinskim opterećenjima zašiljenog vrha moglo doći do volframovih uključaka u metalu zavara. S porastom jakosti struje, raste i kut šiljenja elektrode, dok se za puno veće iznose struje preporučuje ravan odnosno blago zaobljeni vrh elektrode. Za izmjeničnu struju te DC (+) pol struje na elektrodi preporučuje zaobljeni vrh volframove igle [23].

U tablici 4 prikazane su preporučene vrijednosti jakosti struje u ovisnosti o vrsti struje, promjerima elektrode te vrsti elektrode.

Tablica 4. Preporučene jakosti struje prema normi ISO 6848 [26]

Promjer elektrode [mm]	Istosmjerna struje DC			Izmjenična struja AC		
	Elektroda na (-) polu	Elektroda na (+) polu		Balans luka 50% elektroda (-) 50% elektroda (+)		Balans luka 30% elektroda (+) 70% elektroda (-)
Sastav elektrode	W + oksidi	W + oksidi	Čisti W	Čisti W	W + oksidi	W + oksidi
1,0	10 – 75 A	-	-	25 – 60 A	25 – 75 A	25 – 80 A
1,6	45 – 150 A	10 – 20 A	10 – 20 A	50 – 100 A	40 – 110 A	40 – 125 A

2,0	60 -200 A	15 – 25 A	15 – 25 A	60 – 130 A	60 – 130 A	60 – 150 A
2,4	75 – 220 A	15 – 30 A	15 – 30 A	70 – 130 A	65 – 150 A	60 – 175 A
3,2	85 – 330 A	20 – 35 A	20 – 35 A	90 – 150 A	75 – 170 A	75 – 250 A
4,0	100 – 400 A	35 – 50 A	35 – 50 A	95 – 170 A	85 – 210 A	85 – 310 A
4,8	120 – 480 A	50 – 70 A	50 -70 A	100 – 240 A	90 – 300 A	95 – 340 A

### 2.4.3. Zaštitni plin

Osnovna uloga zaštitnog plina pri zavarivanju je stvaranje zaštitne atmosfere koju je moguće što bolje ionizirati, omogućavanje adekvatne zaštite vrha elektrode, taline te cijelog postupka od moguće kontaminacije drugim plinovima koji se nalaze u okolini. Već samo male količine plinova iz okoline mogu uzrokovati greške unutar metala zavara. Nadalje zaštitni plin može utjecati na samu geometriju, te izgled zavara, nadalje kada se govori o TIG postupku zavarivanja kao zaštitni plinovi najčešće se koriste argon i helij ili njihove mješavine u određenom omjeru. Također je bitno navesti da se pri zavarivanju cijevi često koristi i zaštita korijena, odnosno upuhivanje zaštitnog plina u cijevi kako bi se smanjila mogućnost grešaka pri zavarivanju korijena između cijevi. [2,4,9].

Danas se čisti argon najčešće koristi kao zaštitni plin, dok je u prošlosti helij bio dominantniji u primjeni. Argon i helij su inertni plinovi te u njihovoj atmosferi ne dolazi do kemijskih reakcija između radnog komada i zaštitnog plina. Osim navedene primarne uloge zaštitnog plina on također utječe na kvalitetu, stabilnost, te uspostavu i održavanje električnog luka, geometriju zavara, izgled zavara, te na plinove i pare koji se oslobađaju procesom zavarivanja. Za zaštitu korijena se najčešće koristi takozvani „formir“ plin, koji se sastoji od dušika te vodika u određenom omjeru, također se za zaštitu korijenskog prolaza može koristiti i čisti argon te čisti dušik [2,4,9].

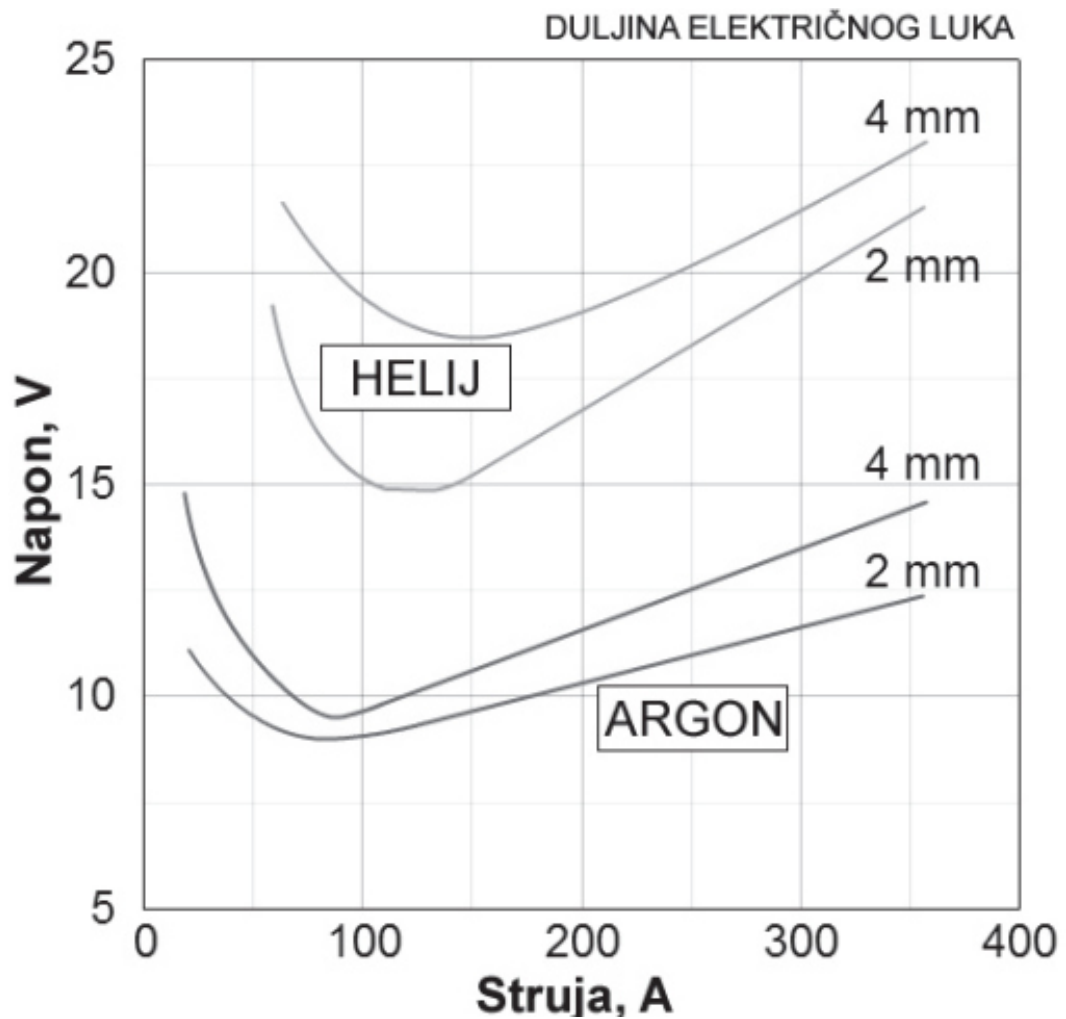
Neke od značajki navedenih zaštitnih plinova su [2,9]:

- Argon (Ar) – najjeftiniji plin koji se koristi kod TIG postupka zavarivanja, ima nizak ionizacijski potencijal (energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina te njegovo pretvaranje u ion) 15,7 eV, što olakšava uspostavu i stabilnost električnog

luka. Nadalje argon je 1,4 puta teži u odnosu na zrak, što znači da svojim izlaskom iz sapnice potiskuje zrak s površine osnovnog materijala te dobro štiti rastaljeni materijal zavora, samim time nam je potreban i manji protok prilikom zavarivanja. U odnosu na helij, argon ima manju toplinsku vodljivost, što rezultira kompaktnijim električnim lukom a samim time i manjom penetracijom te manjim protaljivanjem. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95%, dok u iznimnim situacijama taj iznos može doći do 99,97%.

- Helij (He) – ima nešto veći ionizacijski potencijal (24,5 eV) nego argon, čime je otežano uspostavljanje električnog luka. Helij ima 10 puta manju masu no argon, što rezultira protocima plina koji su i do 3 puta veći nego kada je u pitanju argon. Dobro svojstvo helija je zasigurno odlična toplinska vodljivost, što dovodi do šireg električnog luka. Zbog šireg električnog luka toplina se brže prenosi na radni komad, daje veću penetraciju te veće protaljivanje a samim time i veći unos topline (napon je značajno veći nego kod argona pri istim strujama). Minimalna čistoća za ovaj zaštitni plin iznosi 99,99%.
- Zaštita korijena – Kao što je već navedeno, za zaštitu korijena se može koristiti čisti argon, čisti dušik, ili mješavina dušika i vodika, odnosno formir plin. Zaštita korijena je naročito važna pri sučeonom zavarivanju cijevi. Kod mješavine vodika i dušika, vodika u mješavini najviše može biti 15% kako ne bi došlo do povećanja udjela vodika u zavaru.

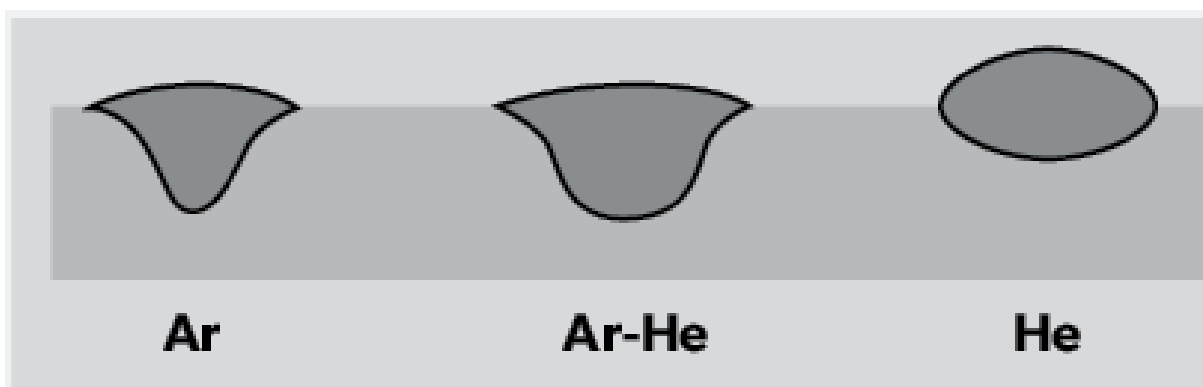
Na slici 17. prikazana je karakteristika ovisnosti duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina. Na slici se vidi fenomen rasta napona pri niskim strujama zavarivanja. Kod argona do tog povećanja dolazi pri strujama nižim od 50 A, dok se kod helija isti fenomen događa pri radu sa strujama između 50 i 100 A.



Slika 17. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina [2]

Osim čistog argona ili čistog helija, često se koriste i njihove mješavine u raznim omjerima. Miješanjem argona i helija dobiva se mješavina plinova koja posjeduje povoljna svojstva argona i helija [2].

Na slici 18 prikazani su izgledi zavora u ovisnosti o inertoj atmosferi koja se upotrebljavala



Slika 18. Izgled zavora u ovisnosti o strukturi zaštitnog plina [27]

Tablica 5 prikazuje karakteristike zavarivanja uslijed primjene različitih zaštitnih plinova.

**Tablica 5. Karakteristike zavar uslijed korištenja različitih zaštitnih atmosfera [28]**

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	Smanjena	Veća nego kod 100% Ar	Veća
Penetracija	Smanjena	Veća nego kod 100% Ar	Povećana
Čišćenje oksida	Dobro	Sličnije kao kod 100% Ar	Loše
Uspostava luka	Laka	Bolje nego kod 100% He	Otežana
Stabilnost luka	Dobra	Bolje nego kod 100% He	Niža pri manjim strujama
Oblik luka	Uži, koncentriran	Uži nego kod 100% He	Širi
Napon luka	Manji	Srednji	Veći
Protok	Manji	Veći nego kod 100% Ar	Povećan
Cijena	Niža	Veća nego 100% Ar	Veća nego 100% Ar

Osim spomenutih plinova i njihovih mješavina postoje mogućnosti dodavanja drugih plinova u manjim postocima, takvi plinovi su najčešće vodik i dušik, a nadalje su navedena njihova svojstva [28]:

- Vodik – ima dobru toplinsku vodljivost te za isti iznos struje zavarivanja povećava penetraciju te energiju električnog luka koja se prenosi do radnog komada. Također vodik održava površine zavara čistima te sprječava nastanak oksida na površini. Dodavanjem vodika u smjesu s argonom za posljedicu ima sužavanje električnog luka čime električni luka ima veću energiju te se tako mogu postići veće brzine zavarivanja. Vodik se najčešće dodaje u smjesu s argonom u iznosi od 2 do 5%, iako je moguće dodavati vodik u iznosima od 1 do 8%. Nedostatak dodavanja vodika u smjesu zaštitnog plina je mogućnost pojave vodikom uzrokovanih pukotina te poroznosti kod zavarivanja aluminija. Vodik se također može koristiti i kao zaštitni plin za korijen zavara. Pri zaštiti korijena se najčešće koristi u mješavini s dušikom, pri čemu vodika ima najviše do 15%
- Dušik – inertan je na sobnoj temperaturi a aktivan pri povišenim temperaturama. Može se koristiti kao zaštitni plin u zavarivanju, ili kao plin za zaštitu korijena. Pri zavarivanju se najčešće koristi kao mješavina s argonom, gdje dušika bude do 3%. Kao plin za zaštitu korijena se može koristiti ili čisti, ili u kombinaciji s vodikom, pri

čemu vodika ima najviše do 15%. Najčešće se koristi kod materijala koji imaju visku toplinsku vodljivost kao što su aluminij i bakar. Mješavine dušika mogu se koristiti i za zavarivanje niklovih legura, austenitnih te duplex čelika.

U tablici 6 prikazano je koji su zaštitni plinovi preporučeni pri zavarivanju određenih materijala

**Tablica 6. Preporučeni zaštitni plinovi za određene materijal [29]**

Plin / Materijal za zavarivanje	Nelegirani i niskolegirani čelici	Nehrđajući čelici	Niklove legure	Bakrene legure	Aluminijske legure
Ar	X	X	X	X	X
Ar/H <sub>2</sub>		X	X		
Ar/He			X	X	X
He				X	X

#### 2.4.4. Dodatni materijal

TIG postupak zavarivanja moguće je izvesti s ili bez dodatnog materijala. Zavarivanje bez upotrebe dodatnog materijala najčešće se izvodi do debljima 3 mm i takav postupak možemo nazvati pretaljivanje i označavamo ga brojem 142 prema normi HRN EN ISO 4063. Kada nastaje potreba za dodatnim materijalom isti možemo dodavati na dva načina: ručno ili automatizirano [2].

Kada se govori o ručnom TIG postupku zavarivanja dodatni materijal se dodaje u obliku šipki raznih promjera i duljine oko 915 mm. S povećanjem dužine dodatnog materijala dolazi do otežanog rukovanja istim. Automatizirano dodavanje žice omogućava nam da dodatni materijal dobavljamo mehanizirano bilo u hladnom (*engl. cold wire*) ili u toplom, predgrijanom, stanju (*engl. hot wire*). Predgijavanje žice pri dobavi omogućava se instalacijom drugog izvora električne energije kojim se, preko sapnice kroz koju se dobavlja žica, dovodi struja te se žica elektrootporno zagrijava na temperaturu 200 – 300°C. Time se povećava brzina zavarivanja te količina zavara, odnosno potrošenog dodatnog materijala u jedinici vremena. Osnovna prednost automatiziranog dodavanja je veća produktivnost, TIG postupka zavarivanja [2].

Dodatni materijal u pravilu ima jednak kemijski sastav kao i osnovni materijal, osim kada postoje posebni zahtjevi na određena svojstva zavara. Nadalje u dodatnom materijalu imamo i



određene kemijske elemente koji su zaduženi za poboljšavanje električnih svojstava, a to su natrij i kalij. Takav dodatni materijal često se legira s elementima koji imaju svojstva dezoksidacije, te rafinacije, kako bi se zavar dodatno osigurao te bolje reagirao na toplinske postupke. Dezoksidacija označava uklanjanje oksida iz zavara, a to se postiže dodavanjem silicija, aluminijskog, mangana te ponekad titana. Rafinacija označava uklanjanje sumpora i fosfora iz zavara, a to se postiže legiranjem dodatnog materijala s kalcijem te manganom. Zavareni spoj mora zadovoljiti eksploatacijske uvjete koji se zahtjevaju, stoga je vrlo bitno da izbor dodatnog materijala bude ispravan te da s tim istim materijalom pravilno rukuje. [4,5].

Na slici 19 prikazan je dodatni materijal, šipke, koji se koristi za ručno TIG zavarivanje,



**Slika 19. Dodatni materijal za ručno TIG zavarivanje [30]**

### 3. P91 ČELICI

P91 čelici su vrsta čelika legirana s kromom (Cr) te molibdenom (Mo), a nerijetko se još kao dodaci u manjim omjerima dodaju vanadij (V), niobij (Nb) i dušik (N). Glavna prednost ovakvog materijala definitivno su njegova izvrsna čvrstoća te mogućnost rada na visokim temperaturama do 600°C. Ovakvi materijali imaju feritno – martenzitnu mikrostrukturu. Zahvaljujući takvoj mikrostrukturi ova skupina čelika ima niži koeficijent toplinskog istežanja te veći koeficijent toplinske provodnosti nego austenitni čelici. Nadalje još je bitno naglasiti kako imaju veću otpornost na puzanje materijala nego austenitni čelici [31].

Ovaj materijal nastaje normalizacijom na 1050 °C, zatim hlađenjem na zraku do temperature 200 °C, zatim se kali zagrijavanjem na 760 °C. Ovakav proces izrade materijala osigurava ovom čeliku izdržljivost te otpornost na puzanje, što su i njegove najveće prednosti [31].

Oznaka P91 označava metalni materijal koji je legiran s 9 % kroma te 1 % molibdena. Krom poboljšava mehanička svojstva rada pri visokim temperaturama, sprječava oksidaciju materijala te poboljšava korozivnu postojanost materijala. Molibden povećava rastezljivost materijala, otpornost na trošenje, te otpornost na puzanje pri visokim temperaturama. Dodavanje malih količina nikla (Ni) i mangana (Mn) povećava tvrdoću materijala [31].

Kao najveća slabost P91 čelika izdvaja se promjena mikrostrukture uslijed prekomjernog zagrijavanja, posebice pri zavarivanju. Takve varijacije mikrostrukture mogu uvelike oslabiti materijal, odnosno smanjiti njegovi otpornost na puzanje, zbog toga se preporučuje hladna strojna obrada, te obavezno toplinska obrada poslije zavarivanja, radi eliminacije sitnozrnate mikrostrukture u području ZUT-a, koja smanjuje otpornost materijala na puzanje, odnosno na dugotrajno statičko opterećenje pri povišenim temperaturama [31].

### 3.1. Svojstva materijala

Kemijski sastav materijala prikazan je tablicom 7. Tablica 8 prikazuje mehanička svojstva, dok su tablicom 9 prikazana svojstva materijala pri određenoj temperaturi.

**Tablica 7. Kemijski sastav P91 čelika [32]**

Kemijski element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ostali
Udio %	0,08 – 0,12	0,30 – 0,60	≤ 0,020	≤ 0,010	0,20 – 0,50	8,00 – 9,50	0,85 – 1,05	-
Kemijski element	V	N	Ni	Al	Hb	Ti	Zr	-
Udio %	0,18 – 0,25	0,030 – 0,070	≤ 0,040	≤ 0,020	0,06 – 0,10	≤ 0,01	≤ 0,01	-

**Tablica 8. Mehanička svojstva materijala P91 [32]**

Norma	Razred	Granica razvlačenja min [MPa]	Vlačna čvrstoća min [MPa]	Istezljivost [%]	Tvrdoća max [HB]
ASTM A335	P91	min 415	min 585	min 20	250

**Tablica 9. Svojstva P91 čelika pri različitim temperaturama [32]**

Temperatura	Modul elastičnosti	Toplinska vodljivost	Linearno širenje	Specifična toplina	Gustoća
°C	GPa	W/mK	10 <sup>-6</sup> / °C	J/kgK	kg/m <sup>3</sup>
20	218	26	0	440	7770
50	216	26	10,6	460	
100	213	27	10,9	480	
150	210	27	11,1	490	
200	207	28	11,3	510	
250	203	28	11,5	530	
300	199	28	11,7	550	
350	195	29	11,8	570	
400	190	29	12,1	630	

450	186	29	12,1	630	
500	181	30	12,3	660	
550	175	30	12,4	710	
600	168	30	12,6	770	
650	162	30	12,7	860	

P91 čelici ispunjavaju uvjete kada se radi o izradi cijevi, ventila, prirubnica i još mnogo drugih komada, no ovaj materijal se najčešće eksploatira pri visokim temperaturama, do 600°C, te na tim temperaturama može izdržati opterećenja u iznosu od 30 MPa. S obzirom na navedena svojstva ovaj materijal se najčešće koristi u procesnoj industriji, pogotovo kada je potrebno izdržavanje vrlo visokih naprezanja pri visokim temperaturama [33].

Uobičajene primjene P91 čelika su [33]:

- Energetska postrojenja
- Oprema za proizvodnju plina
- Naftna industrija
- Petrokemijska industrija
- Izmjenjivači topline
- Kotlogradnja

### 3.2. Zavarljivost P91 čelika

P91 čelici imaju jako dobru zavarljivost, no pri zavarivanju navedenog materijala potrebno je obratiti pozornost na nekoliko esencijalnih problema. Budući da ovaj materijal pripada visokolegiranim čelicima, te ima veliku tvrdoću, podložan pukotinama uslijed hlađenja nakon zavarivanja, jer može doći do segregacija nečistoća na granice zrna materijala, što predstavlja opasnost za nastanak loma. Također može doći i do hladnih pukotina uslijed brzog hlađenja te formiranja krihkih faza. Kako bi se izbjegli navedeni problemi nužno je odabrati adekvatan dodatni materijal, potrebno je predgrijavanje prije zavarivanja, te toplinska obrada neposredno nakon zavarivanja [34,35].

Ovaj materijal moguće je zavarivati REL, TIG, EPP te MIG postupcima zavarivanja, također se mogu koristiti modificirane verzije navedenih postupaka kojima je smanjen unos topline, te se proces obavlja brže. Zavarivanje laserom te elektronskim snopom imaju puno brže stope zagrijavanja te hlađenja u usporedbi s elektro-lučnim postupcima, zone utjecaja topline su uže,

te je samim time i utjecaj topline na radni komad minimiziran, time možemo izbjeći sitnozrnatu mikrostrukturu u području ZUT-a, koja narušava svojstva otpornosti na puzanje. Nadalje pri zavarivanju treba pripaziti na poroznost koja nastaje zbog viših udjela dušika. Prilagodбом parametara zavarivanja moguće je smanjiti ili ukloniti istu [34,35].

### 3.2.1. Dodatni materijal

Veliku ulogu na kvalitetu zavara ima dodatni materijal. U nekim slučajevima mudro je odabrati materijal koji je što sličnijeg sastava kao i osnovni materijal, no u ovom slučaju kada se govori o P91 čelicima, ključno je prilagoditi sadržaj niobija i dušika kako bi se dobila odgovarajuća žilavost zavara, promjena mikrostrukture, tvrdoća, vlačna čvrstoća pri sobnoj temperaturi te duktilnost kada je materijal opterećen na povišenim temperaturama, odnosno na puzanje [34,35].

Kako bi se odabrao dovoljno dobar dodatni materijal, potrebno je napraviti kvalitetnu kemijsku analizu metala zavara, te u skladu s tim odabrati dodatni materijal. Nadalje, minimalni iznos ugljika u dodatnom materijalu iznosi 0,09 %, niobija 0,03 % te dušika u iznosu od 0,02 %. Takvi uvjeti su postavljeni kako bi se osigurala odgovarajuća otpornost na puzanje u metalu zavara, odnosno izbjelga sitnozrnata mikrostruktura u području ZUT-a. Nešto niže razine niobija mogu biti prihvaćene ako se radi sa žicom punjenom metalom koja sadrži titan u svom kemijskom sastavu. Titan je efektivna zamjena za niobij, ali njegov udio ne bi trebao prelaziti 0,010 % jer se titan također može legirati s dušikom te tako smanjiti učinak dušika, koji pridonosi otpornosti na puzanje. Mangan i nikal pomažu pri snižavanju temperature mikrostrukturnih promjena, no njihov zajednički udio ne smije biti veći od 1,5 % jer bi se tako temperatura na kojoj se događaju transformacije spustila ispod 788 °C (1450 °F) a to bi rezultiralo smanjenjem raspona u kom bi se mogla izvoditi toplinska obrada nakon zavarivanja [34,35].

Kod P91 čelika s feritno – martenzitnom mikrostrukturom, koji su podvrgnuti višim temperaturama te bržem hlađenju može doći do nastajanja  $\delta$  – ferita u ZUT – u te metalu zavara. Takav ferit može imati štetne pojave na materijal, a to je smanjenje otpornosti na puzanje, te smanjivanje žilavosti. Stoga je potrebno odabrati dodatni materijal koji smanjuje mogućnost nastanka  $\delta$  – ferita. Izraz kojim se mjeri udio ferita u materijalu zove se feritni faktor (FF) [34,35]:

$$FF = \%Cr + 6\%Si + 8\%Ti + 4\%Mo + 2\%Al + 4\%Nb - 2\%Mn - 4\%Ni - 40\%(C + N)$$

S porastom FF raste i sadržaj  $\delta$  – ferita. Feritni faktor bi se trebao držati ispod vrijednosti 8. Također udio  $\delta$  – ferita ovisi o uvjetima zavarivanja, predgrijavanju te unosu topline.

### **3.2.2. Predgrijavanje**

Predgrijavanje i međuprolazna temperatura vrlo su važni za integritet postupka zavarivanja. Temperatura predgrijavanja bi trebala biti u rasponu od 204 – 288 °C (400 – 550 °F). Nakon što je postupak zavarivanja gotov, spoj treba pustiti da se polako ohladi minimalno do 93 °C (200 °F), kako bi bili sigurni da je sav austenit nakon zavarivanja postao martenzit. Također je bitno naglasiti kako unos topline trebao biti između 1,2 – 1,8 kJ/mm [34,35].

### **3.2.3. Toplinska obrada nakon zavarivanja**

Toplinska obrada nakon zavarivanja neophodna je za P91 čelike bez obzira na vrstu spoja koji se zavaruje. Nakon zavarivanja materijal se drži 2 sata na temperaturi u rasponu od 745 – 774 °C (1375 – 1425 °F). Naknadna toplinska obrada neophodna je kako ne bi došlo do pukotina unutar metala zavara, kako bi se dobila tražena mehanička svojstva te kako bi se osigurao integritet zavara te same konstrukcije [34,35].

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalnim dijelom rada prikazan je utjecaj parametara AC TIG postupka zavarivanja na svojstva metala zavara, odnosno utjecaj različitih kombinacija balansa električne struje i frekvencije na svojstva metala zavara i ZUT. Uzorci su zavareni uređajem „MasterTig 235ACDC GM“ proizvođača „Kemppi“. Postupak zavarivanja izvođen je bez dodatnog materijala, odnosno osnovni materijal je pretaljivan kako bi se dobili rezultati u svrhu procjene povoljnih kombinacija parametara frekvencije i balansa struje

### 4.1. Teza pokusa

Cjelokupnim eksperimentalnim dijelom rada prikazana je poveznica između zaostalih napreznja, što strukturnih, što toplinskih, te primjene izmjenične struje, uz različite kombinacije balansa i frekvencije. Primjenom izmjenične struje pri TIG postupku zavarivanja smanjen je unos topline unutar osnovnog materijala, a samim time su smanjena toplinska napreznja koja neizbježno nastaju u materijalu. Nadalje, unos topline mora biti dovoljno visok kako ne bi došlo do zakaljenja strukture metala zavara, što moguće dovodi do hladnih pukotina unutar metala zavara te napetosne korozije. Nadalje promjenom frekvencije nastoji se mehanički popuštati materijal, odnosno smanjivati zaostala napreznja materijala. Takva teorije bazira se na vibracijskom popuštanju zaostalih napreznja, koja se u praksi izvodi nakon što je materijal zavaren te ohlađen.

Teorija vibracijskog popuštanja temelji se na ideji da se materijal popušta frekvencijom koja će smirivati njegovu vlastitu frekvenciju, odnosno imati takav iznos koji bi smanjivao iznos amplitude frekvencije materijala.

Vlastita frekvencija materijala je vrlo kompleksan podatak za izračunati, jer zahtijeva mnogo ulaznih podataka kao što su:

- Modul elastičnosti
- Oblik uzorka
- Dimenzije uzorka
- Mikrostruktura materijala
- Gustoća materijala

Te još nekim svojstvima materijala. Međutim već prema ovim do sada nabrojanim svojstvima materijala postoji dosta promjena pri promjeni temperature. Modul elastičnosti, mikrostruktura te gustoća materijala se mijenjaju kod većine materijala pri zagrijavanju koje je neizbježno

posljedica zavarivanja, pri čemu se postavlja pitanje kako odrediti frekvenciju kojom bi se pri zavarivanju materijal mogao mehanički popuštati. Pri sobnoj temperaturi moguće je odrediti vlastitu frekvenciju materijal no samo pomoću određenih alata (osciloskopa) ili pomoću kompleksnih matematičkih modela.

Prema svemu navedenom, postavlja se pitanje koje su to vrijednosti frekvencija pri zavarivanju koje bi mogle mehanički popuštati materijal kroz sam proces zavarivanja, što bi smanjilo troškove, te ponekad i kompleksnost izvođenja toplinske obrade koja je nužna za P91 čelike nakon zavarivanja, a možda i na troškove predgrijavanja materijala.

#### 4.2. Izvor struje za zavarivanje

Kao što je već navedeno, eksperiment je proveden na uređaju proizvođača „Kemppi“, te naziva „MasterTIG 235ACDC GM“. Izvor električne energije služi za izvođenje TIG postupka zavarivanja, a također je moguće još izvoditi i REL postupak zavarivanja, zbog CC strujne karakteristike aparata. U tablici 8. navedene su tehničke karakteristike aparata. Sve karakteristike su prilično razumljive, osim raspona balansa koji se tumači na takav način da 1% iznosi 0.5% vremena više provedenog na određenom strujnom polu, pa bi tako balans koji iznosi +20% označavao da 10% više vremena, prilikom zavarivanja, elektroda bude pozitivno nabijena, odnosno ukupno gledajući 60% vremena je pozitivno nabijena a 40% vremena je negativno nabijena. Analogna logika se može primijeniti pri namještanju balansa u negativnom smjeru.

**Tablica 10. Svojstva izvora struje za zavarivanje [36]**

Serijski broj proizvoda	MT235ACDCGM
Priključni napon	50/60 Hz 110/220..240 V ±10%
Osigurač	16 A
Operativne temperature	-20 - +40 °C
Dimenzije (dužina*širina*visina)	544 x 205 x 443 mm
Težina	19,1 kg
Razina zaštite	IP23S
Standardi	IEC 60974-1,-3,-10 IEC 61000-3-12 GB 15579.1
EMC klasa	A
Maksimalna jakost struje pri 40 °C (240 V) 40% Intermitencija pri TIG zavarivanju	230 A / 19,2 V



Maksimalna jakost struje pri 40 °C (240 V) 60% Intermitencija pri TIG zavarivanju	200 A / 18 V
Maksimalna jakost struje pri 40 °C (240 V) 100% Intermitencija pri TIG zavarivanju	170 A / 16,8 V
Interval jakosti struja za TIG zavarivanje pri naponu izvora 240 V	10 A / 1 V – 230 A / 31 V
Raspon frekvencija	30 – 250 Hz
Raspon balansa izmjenične struje	Od -99,5% do (+)20%

Na slici 20. prikazan je izvor za zavarivanje, a na slici 21 vidimo pripadajuću tvorničku naljepnicu na kojoj su navedene karakteristike uređaja.



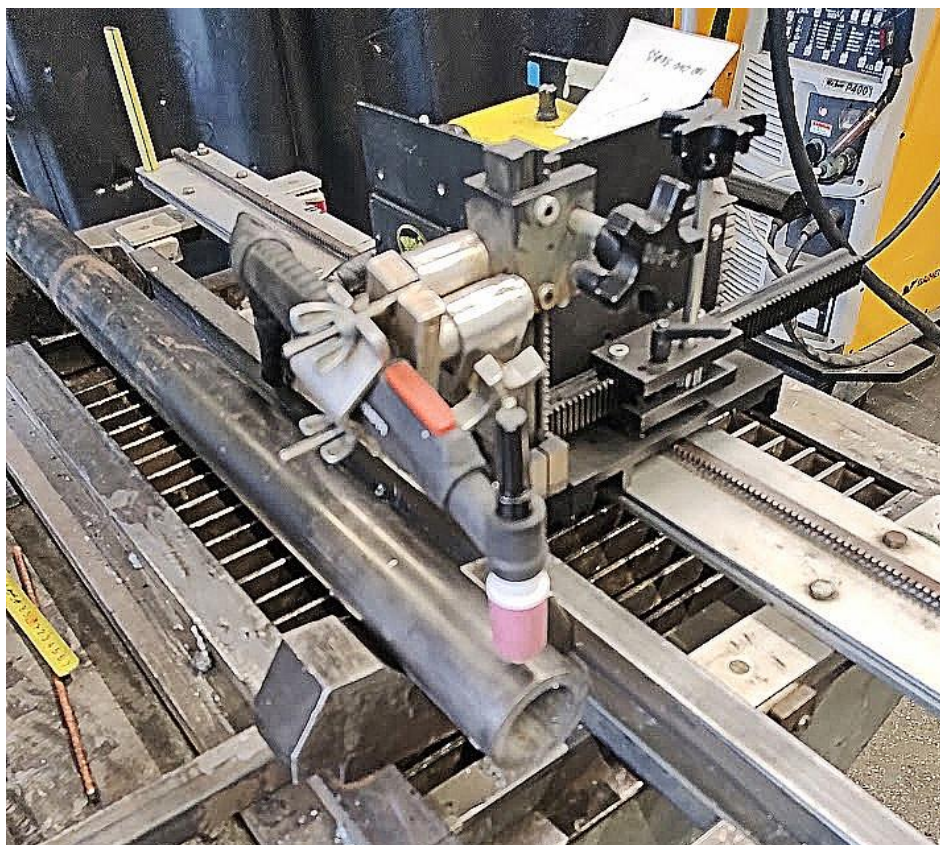
Slika 20. Izvor struje za zavarivanje



Slika 21. Natpisna pločica uređaja za zavarivanje

#### 4.3. Dodatna oprema

Postupak pretaljiivanja izveden je automatizirano. Pištolj za zavarivanje vođen je uz pomoć uređaja za pravocrtno vođenje proizvođača „Bugo“, model „MDS – 1002“, prikazan je na slici 22. s montiranim pištoljem za zavarivanje gore navedenog uređaja za zavarivanje. Uređaj je upravljan upravljačkom jedinicom koja je prikazana na slici 23, te se kretanje odvija po vodilicama koje su vidljive na desnoj strani slike. Prije nego se krenulo u rad, bilo je potrebno preračunati brzinu zavarivanja te brzinu koja je prikazana na prozorčiću koji se vidi na upravljačkoj jedinici na slici 23. Prema mjerenjima brzina 4.0 odgovarala je brzini zavarivanja od 9 cm/min kojom je izveden eksperiment. Na slici 23 je prikazana brzina 3.6 koja je služila kao referentna za orijentaciju te mjerenja, kako bi se došlo do željene brzine zavarivanja. Također je na slici 22 vidljiva i cijev na kojoj je izvršen eksperimentalni dio rada.



Slika 22. Pištolj za zavarivanje montiran na uređaj za vođenje



Slika 23. Upravljačka jedinica uređaja za vođenje pištolja za zavarivanje

Od dodatnih alata, te opreme su također još korištene stege, te pozicioneri kako bi se osigurao konstantan položaj uzorka, alati za brušenje te poliranje, kojima je pripremljena površina za zavarivanje te kojima su uzorci pripremani za provedena ispitivanja, također korišteni su alati za rezanje i razna mjerenja.

#### 4.4. Osnovni materijal

Eksperiment je proveden na cijevima izrađenim od P91 čelika, spomenutom u ranijem dijelu rada. Cijevi su promjera 60,33 mm, a debljine stijenke 8,74 mm. Oznaka navedenog materijala je prema američkoj normi ASME u sekciji 5B označava kao SA355, dok se prema tehničkom izvještaju „CEN ISO TR 20173“ označava kao X10CrMoVNB9-1. Ovaj materijal spada u grupu 6.4, tehničkom izvještaju ISO TR 15608, kojim se određene vrste čelika raspoređuju u grupe prema određenim značajkama. Navedena grupa označava čelike s udjelom kroma između 7 i 12,5%, udjelom molibdena između 0,7 i 1,2%, te udjelom vanadija manjim ili jednakim 0,35%. Grupa 6 općenito označava krom molibden čelika koju su visokolegirani vanadijem [37,38].

Cijevi su zakaljene te naknadno normalizirane.

Uzorci, odnosno priprema istih je prikazana na slici 24.



Slika 24. Uzorci za zavarivanje

#### 4.5. Parametri zavarivanja te izgled uzoraka

Ideja zavarivanja P91 čelika TIG postupkom izmjeničnom strujom temeljila se na tome da se uz smanjenje unosa topline promjenama frekvencije mehanički, vibracijama pokuša popustiti materijal, a u isto vrijeme uz podešavanje balansa uspije dobiti dovoljan unos topline kako ne bi došlo do naljepljivanja, te narušavanja stabilnosti procesa.

Stoga su se uzorci zavarivali uz promjene balansa i primarno frekvencije. U tablici 11 navedeni su parametri zavarivanja, koji su bili identični za sve uzorke, dok su u tablici 12 navedeni parametri koji su se mijenjali kod svakog pojedinog „navara“. Parametri struje i napona koji su u tablici 12 su se bilježili pri zavarivanju i odnose se na trenutke pri procesu zavarivanja kada je električni luk bio stabilan. Ukupno je zavareno 12 uzoraka, te jedan dodatni uzorak koji je zavarivan istosmjernom strujom, s elektrodom na minus polu, kako se uobičajeno zavaruje ovaj materijal.

Prije samog zavarivanja izvršena je priprema cijevi, odnosno brušenje površine zbog skidanja nečistoća i produkata korozije, nakon toga je proveden postupak zavarivanja odnosno pretaljivanja. Nakon što su se cijevi ohladile, izrezani su uzorci za ispitivanja. Rezanje je izvedeno tračnom pilom, a ispitivanja te priprema uzoraka za isto je opisana u idućim poglavljima.

**Tablica 11. Konstantni paramteri zavarivanja**

Uspostava električnog luka	VF modul
Jakost struje	120 A
Brzina zavarivanja	9 cm/min
Polaritet struje	AC – izmjenična struja
Vrsta zaštitnog plina	100% Argon – 5.0 razina čistoće
Protok zaštitnog plina	9 L/min
Položaj zavarivanja	PA
Udaljenost volframove elektrode od radnog komada	4 mm
Promjer elektrode	3,2
Oznaka elektrode	Čisti volfram, zelena
Nagib elektrode	90°
Način hlađenja pištolja	Vodeno
Valni oblik balansa	Pravokutni
Protok plina prije i poslije zavarivanja	2 s

Način zavarivanja	Jednoprolazno bez dodatnog materijala
Dužina zavara	≈100 mm
Predgrijavanje	Bez predgrijavanja, početak zavarivanja pri temperaturi cijevi ≤50°C

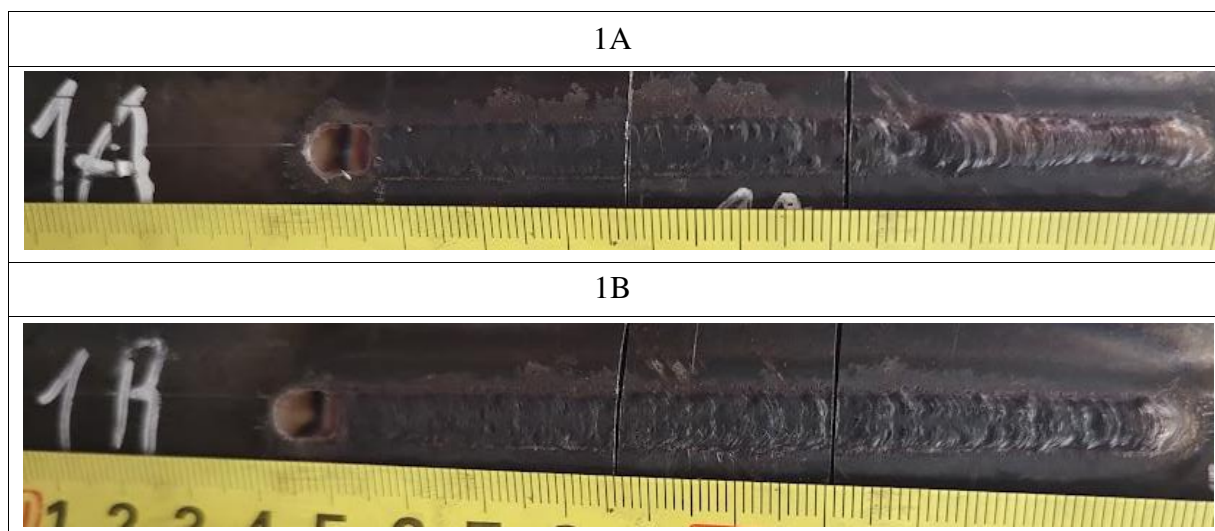
**Tablica 12. Karakteristike procesa pri zavarivanju uzoraka**

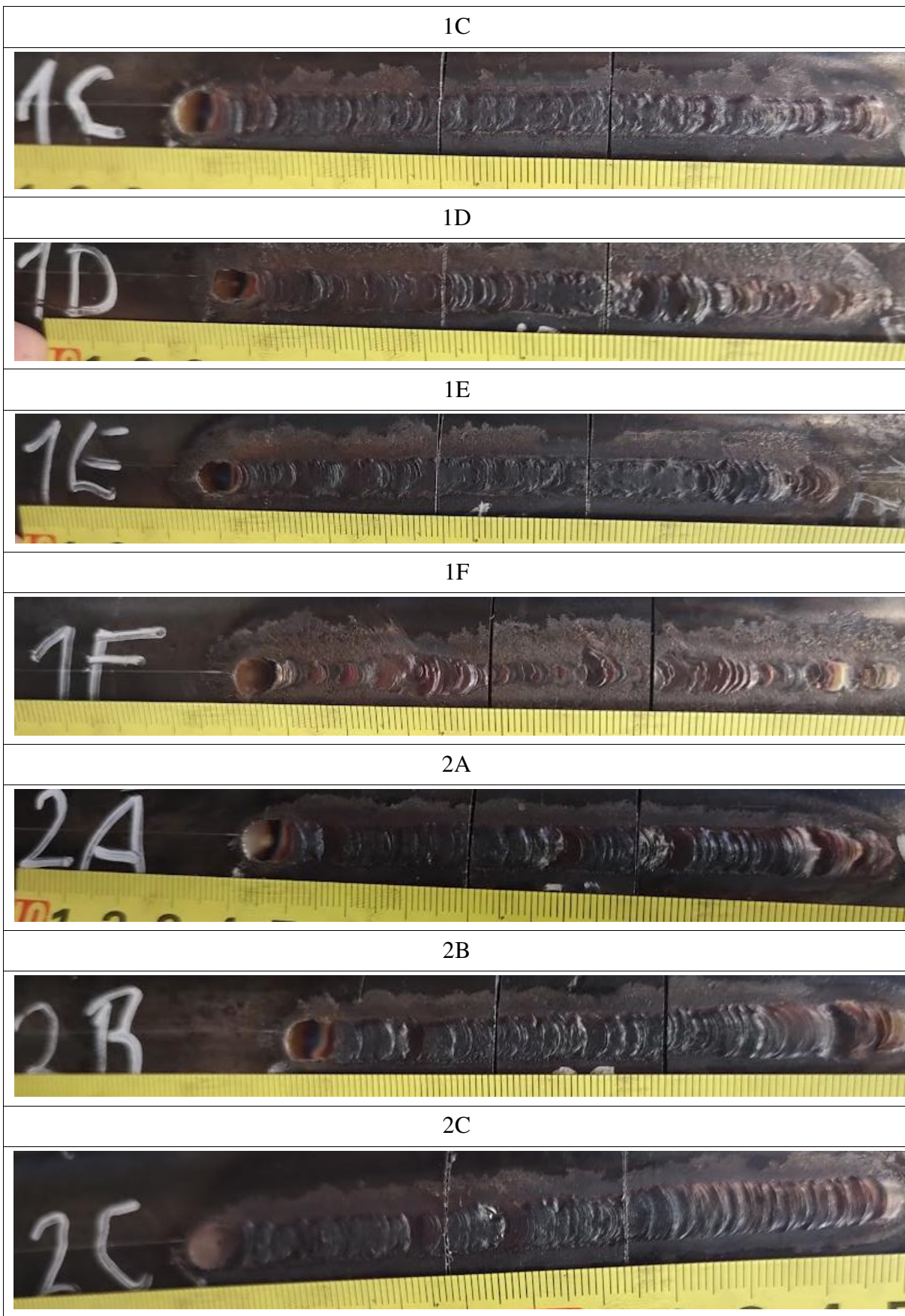
Uzorak	Balans	Frekvencija	Jakost struje	Napon	Komentar
1A	-20	50	120	14,3	Proces zavarivanja navedenim parametrima stabilan nakon 4 cm, prije toga nekoliko skokova napona te blagih padova struje, $I \approx 119$ , $U \approx 15,7$
1B	-20	60	120	14,5	Proces stabilan, bez promjena napona i struje tijekom zavarivanja
1C	-20	70	120	14,8	Proces stabilan, bez promjena napona i struje tijekom zavarivanja
1D	-20	150	120	15,2	Proces većinom stabilan uz nekoliko skokova napona i padova struje, pad struje na vrijednost $\approx 118$ A: vrijednosti napona idu na iznose između 20, 30 V.
1E	-20	200	120	15,6	Proces većinom stabilan, nekoliko skokova napona na vrijednosti $\approx 20$ V, te padova struje na vrijednost $\approx 119$ A
1F	-20	250	120	16,7	Proces nestabilan, konstantne promjene napona i struje.
2A	0	50	120	14,7	Proces zavarivanja stabilan uz povremene oscilacije napona i struje zavarivanja
2B	0	60	120	14,8	Proces vrlo nestabilan, vrlo često osciliranje iznosa napona i struje, ali u vrlo malim iznosima
2C	0	70	120	15	Proces u početku stabilan, kasnije oscilacije vrijednosti struje za 1 – 2 A te napona na

					vrijednosti 30 – 40 V
2D	0	150	120	15,4	Proces vrlo mali postotak vremena stabilan, skokovi napona na iznose 30 – 40 V, padovi struje u iznosu do vrijednosti 116 A.
2E	0	200	120	16,4	Proces stabilan, ali na neadekvatnom iznosu napona koji većinu vremena iznosi $\approx 30$ V, manji padovi iznosa struje
2F	0	250	120	16,9	Potpuno nestabilno, iznosi napona do 50 V, najčešće 40, veći padovi iznosa struje.
R	-	-	120 DC (-)	14,3	Referentni zavar, vrlo stabilan luk kroz cijeli proces zavarivanja, nema padova struje niti skokova napona.

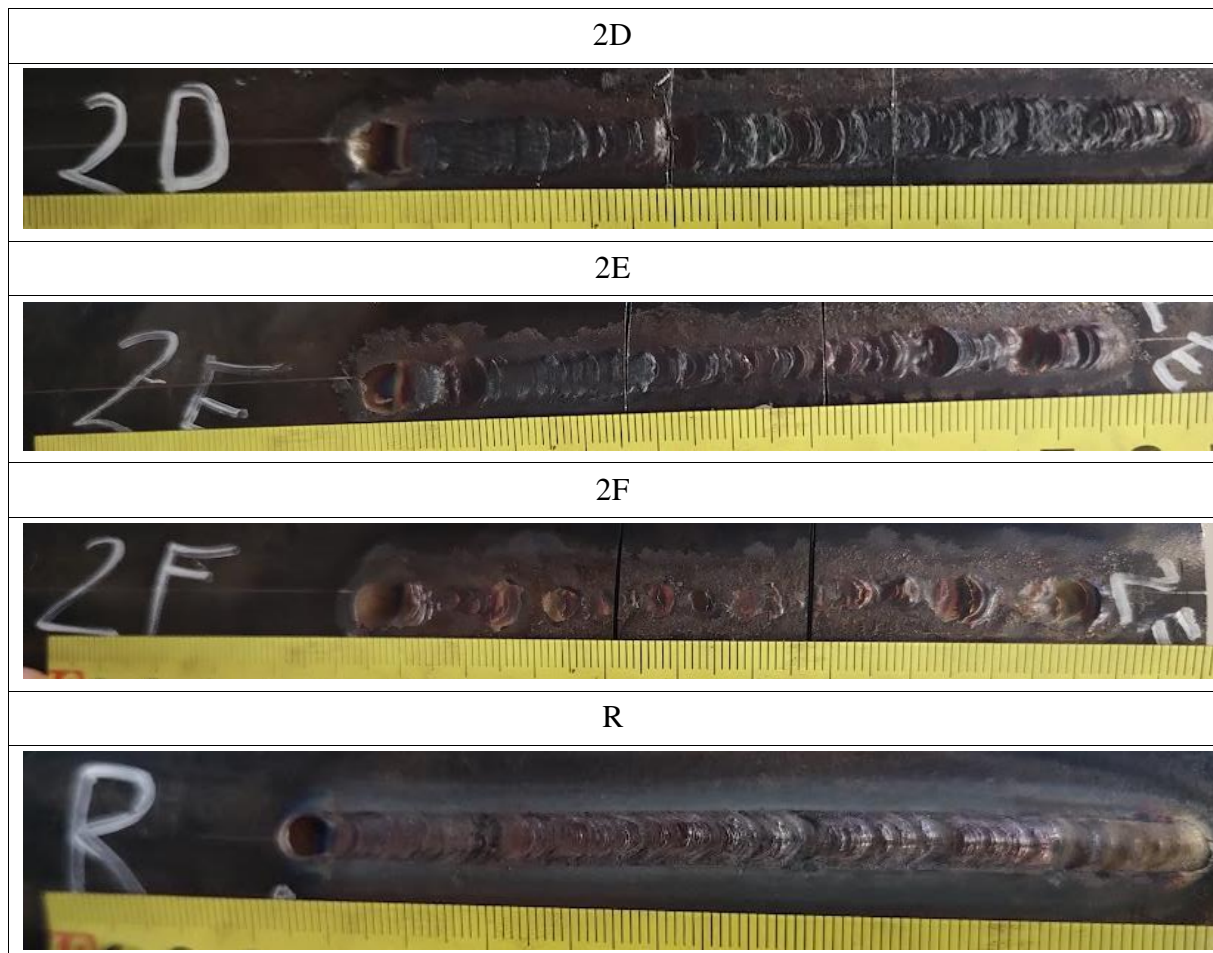
U tablici 13 prikazane su slike zavarenih uzoraka, s parametrima zavarivanja koji su navedeni u tablici 12. Na slikama se vidi izgled zavara, također je prikazano na kojoj su udaljenosti od rubova zavara izrezani makroizbrusci na kojima su se provodila daljnja ispitivanja tvrdoće, te razine zaostalih naprezanja. Također u nastavku su prikazane i slike makroizbrusaka.

**Tablica 13. Slike zavarenih uzoraka**









Prema slikama u tablici 13, te komentarima iz tablica 12, zaključeno je sljedeće. Referentni uzorak ima daleko najbolji izgled zavora, koji je kontinuiran, bez geometrijskih nepravilnosti, te bez promjena parametara tijekom zavarivanja. Zavori grupe 1 su vizualno bolje nego zavori grupe 2, razlog tomu je balans, koji je kod prve grupe zavora bio takav da je elektroda 10% više vremena na minus polu nego na plus polu.

Zavori 1B i 1C vizualno izgledaju najbolje kada se izuzme referentni zavar, kako je navedeno, pri zavarivanju tih zavora ili nije bilo nestabilnosti tijekom procesa, ili ih je bilo vrlo malo. Nestabilnosti se evidentiraju u vidu skokova napona i struje na aparatu za zavarivanje, a njihov odraz vidimo na geometrijskim nepravilnostima.

Zavori 1F i 2F vizualno izgledaju najlošije, geometrijske nepravilnosti vidljive su golim okom, pri zavarivanju ovih uzorka konstantno su bili prisutni skokovi napona i struje, odnosno proces je 90% vremena bio nestabilan. Također ovakav rezultat zavarivanja mogao bi se pripisati i vrlo visokoj vrijednosti frekvenciji, u iznosu od 250 Hz. Navedena vrijednost frekvencije je krajnja vrijednost koju aparat za zavarivanje može postići, te je pitanje intermitencije aparata pri radu na ovoj vrijednosti frekvencije.

Ostale zavari podijeljeni su u dvije skupine s obzirom na vizualnu ocjenu, odnosno na geometrijske nepravilnosti, koje su posljedica nestabilnosti procesa zavarivanja. S obzirom na navedeno u grupu 1 spadaju zavari: 1A, 1E, 2C, 2B i 2D, dok su ostali zavari spadaju u grupu 2, a to su: 1D, 2E i 2A. Grupa 1 je vizualno puno bolja, geometrija zavara je zadovoljavajuća, odnosno nema značajnih geometrijskih nehomogenosti.

#### 4.6. Zaostala naprezanja

Nakon zavarivanja, izrezivanja te ručnog brušenja uzoraka, isti su podvrgnuti procesu poliranja, kako bi na uzorcima mogla biti izmjerena zaostala naprezanja.

Proces poliranja izveden je na uređaju koji se naziva „Mintech 233“, tvrtke „Presi“. Uređaj je prikazan na slici 25.



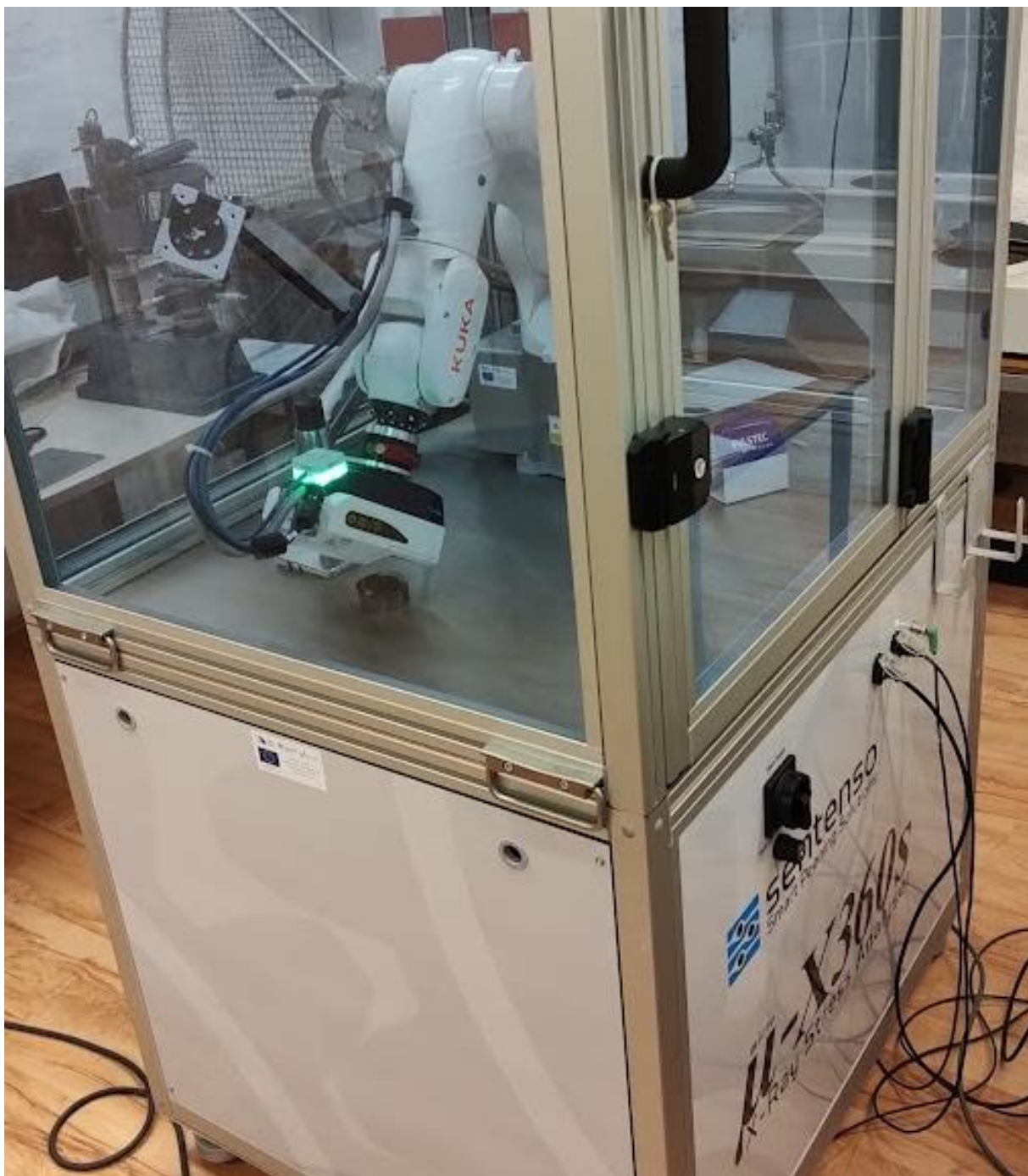
Slika 25. Uređaj za poliranje

Poliranje je izvedeno brzinom 300 okretaja u minuti, uz konstantan dotok vode. Granulacije filmova kojima je poliran uzorak su sljedeće: 320, 600, 1200, 2400, 4000. Nakon poliranja površina uzoraka dovedena je do zrcalnog sjaja.

Nakon poliranja, uzorci su podvrgnuti ispitivanju zaostalih naprezanja unutar materijala nakon procesa zavarivanja. Također, bitno je naglasiti kako su i procesima rezanja te poliranja unošena određena zaostala naprezanja, odnosno moguće je da je došlo i do popuštanja istih, no to nije moguće kvantificirati, te je pretpostavljeno da su takva naprezanja vrlo malih iznosa te ih stoga možemo zanemariti.

#### **4.6.1. Uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja**

Uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja prikazan je na slici 26, a naziva se „ $\mu$ -X360s“, tvrtke „Sentenso“. Na slici se vidi da je senzor za mjerenje montiran na robotsku ruku proizvođača „Kuka“, koja služi za gibanje dijela uređaja kojim se izvršava mjerenje, odnosno dovođenje mjernog uređaja u željenu poziciju. Iz slike se također vidi da je uređaj mobilan, zahvaljujući pokretnoj konstrukciji. Uređaj se može koristiti i na terenu zahvaljujući mobilnosti.

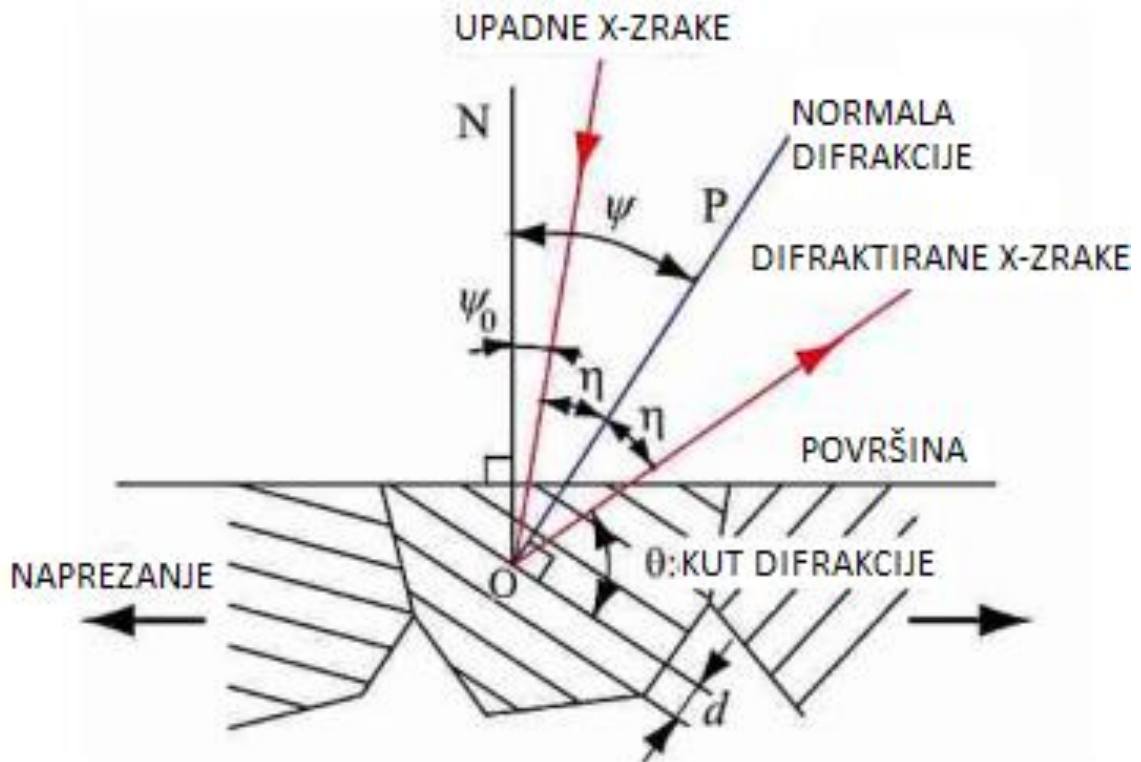


Slika 26. Uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja

#### 4.6.2. Princip mjerenja zaostalih naprezanja

Uređaj za mjerenje zaostalih naprezanja radi na principu rendgenske difrakcijske metode. Takvo mjerenje spada u nerazorne metode mjerenja, što znači da se do rezultata, odnosno vrijednosti zaostalih naprezanja, dolazi pomoću određivanja određenog svojstva povezanog sa zaostalim naprezanjima.

Rendgenskom difrakcijskom metodom određuje se elastična deformacija koja nastaje kao rezultat promjene razmaka između ravnina unutar kristalne rešetke. Ako dođe do promjene razmaka između kristalnih ravnina, dolazi do promjene difrakcijskog kuta, uzevši u obzir uvjet da je valna duljina rendgenski zraka konstantna. Ovakva pojava opisana je Bragg – ovim zakonom te je prikazana na slici 27. [39]



Slika 27. Bragg – ov zakon [39]

Bragg – ov zakon iskazan sljedećim izrazom [39]:

$$n \lambda = 2 d \sin (\theta)$$

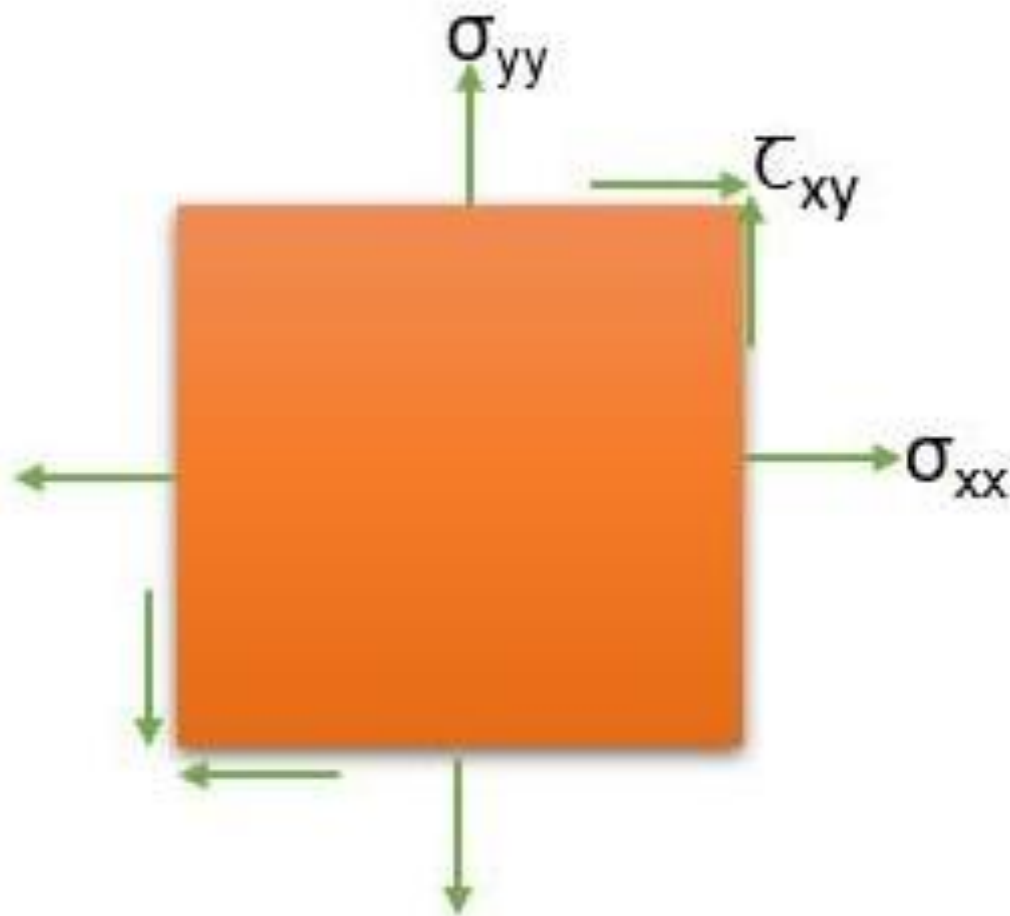
Pri čemu je [39]:

- $n$  – redoslijed difrakcije
- $\lambda$  – dužina vala rendgenske zrake
- $d$  – razmak ravnina kristalnih rešetki
- $\theta$  – kut difrakcije

Mjerenje zaostalih napreznja rendgenskom metodom moguće je kod svih materijala koji imaju uređenu sitnozrnatu mikrostrukturu, te zadovoljavajući difrakcijski maksimum. Također, kako bi se mjerenje moglo kvalitetno provesti, materijal mora imati sposobnost propuštanja rendgenskih zraka pri bilo kojoj orijentaciji uzorka [39].

Nadalje, difrakcijskom metodom dobiva se iznos srednje vrijednosti zaostalih naprezanja na mjernom volumenu uzorka. Mjerni volumen uzorka se sastoji od površine uzorka, mjesto gdje dolazi do udara zraka, te dubine penetracije zraka. Kod čelika, raznima prodiranja iznosi približno 0,005 mm. Zbog tako malog iznosa prodiranja unutar čelika ovom metodom, određuje se ravninski model naprezanja, odnosno zanemaruju se naprezanja u jednom smjeru troosnog koordinatnog sustava [39].

Ravninski model naprezanja prikazan je na slici 28, pri čemu je  $\sigma_{yy}$  označava naprezanja u smjeru osi y, a može se još označavati kao  $\sigma_y$ , te leži na y osi koordinatnog sustava, analogno vrijedi i za  $\sigma_{xx}$  te os x. Naprezanja u smjeru osi z jednaka su 0, odnosno  $\sigma_z = 0$

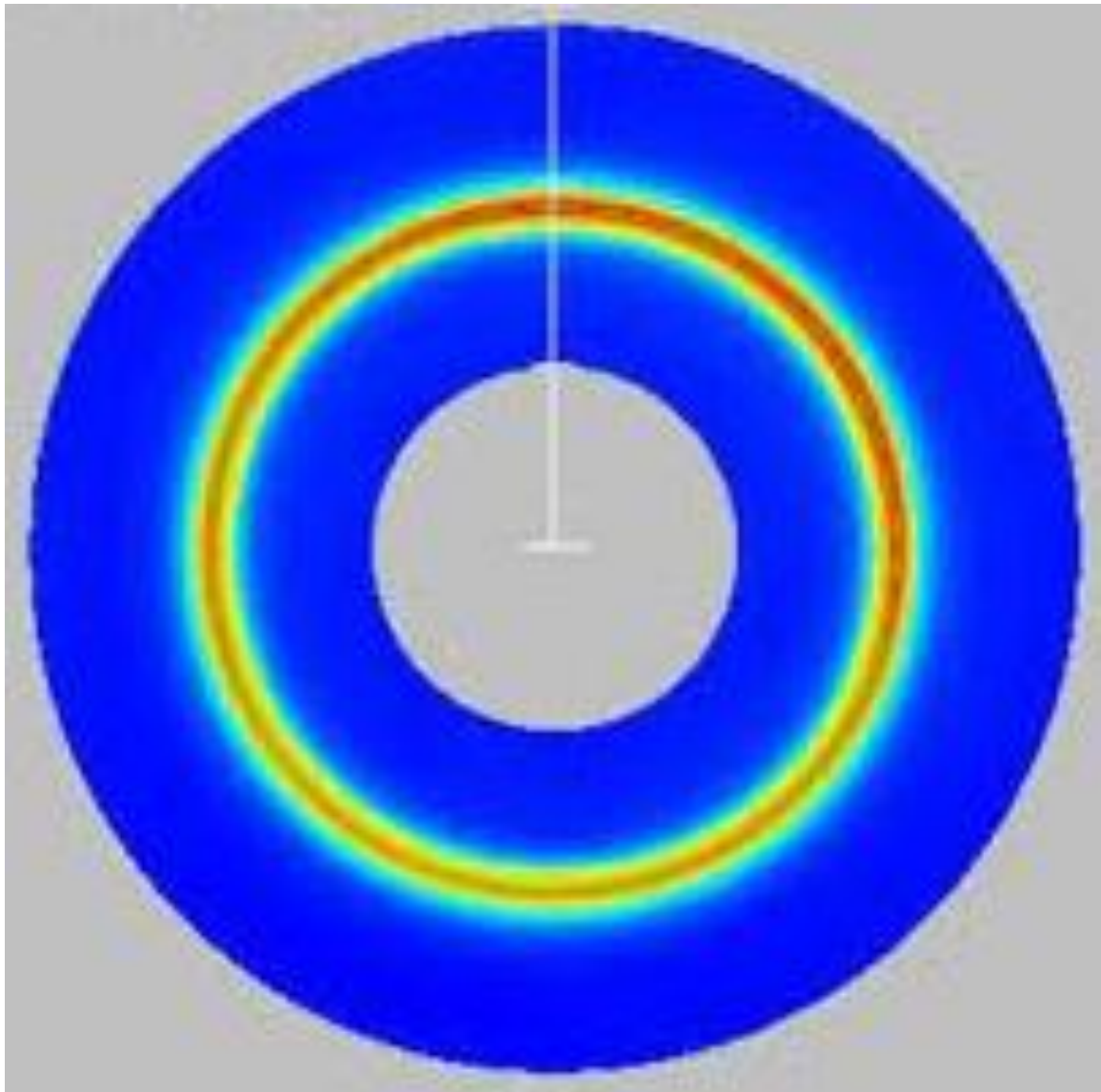


Slika 28. Ravninski model naprezanja [40]

Uređaj koji je upotrebljen za mjerenje zaostalih naprezanja radi na principu „cos  $\alpha$ “ metode. Ova metoda radi na principu jednokratnog izlaganja uzorka rendgenskim zrakama, pomoću dvodimenzionalnog detektora, čime se kao rezultat dobivaju Debeye – Scherrerov – i prstenovi.

Ovakvim načinom snimanja, odnosno mjerenja zaostalih naprezanja, posmična i normalna naprezanja dobivaju se istovremeno [39].

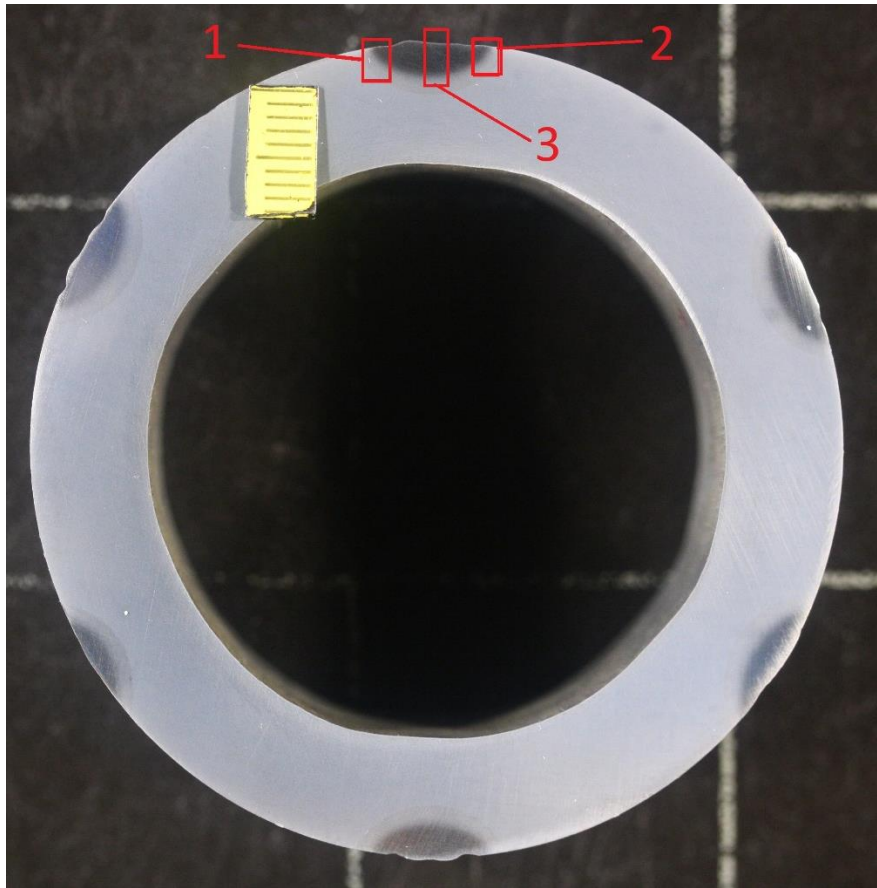
Na slici 29 prikazan je jedan reprezentativni primjer Debeye – Scherrerov – og prstena.



Slika 29. Debeye - Scherrerov prsten [41]

#### 4.6.3. Mjerenje i rezultati

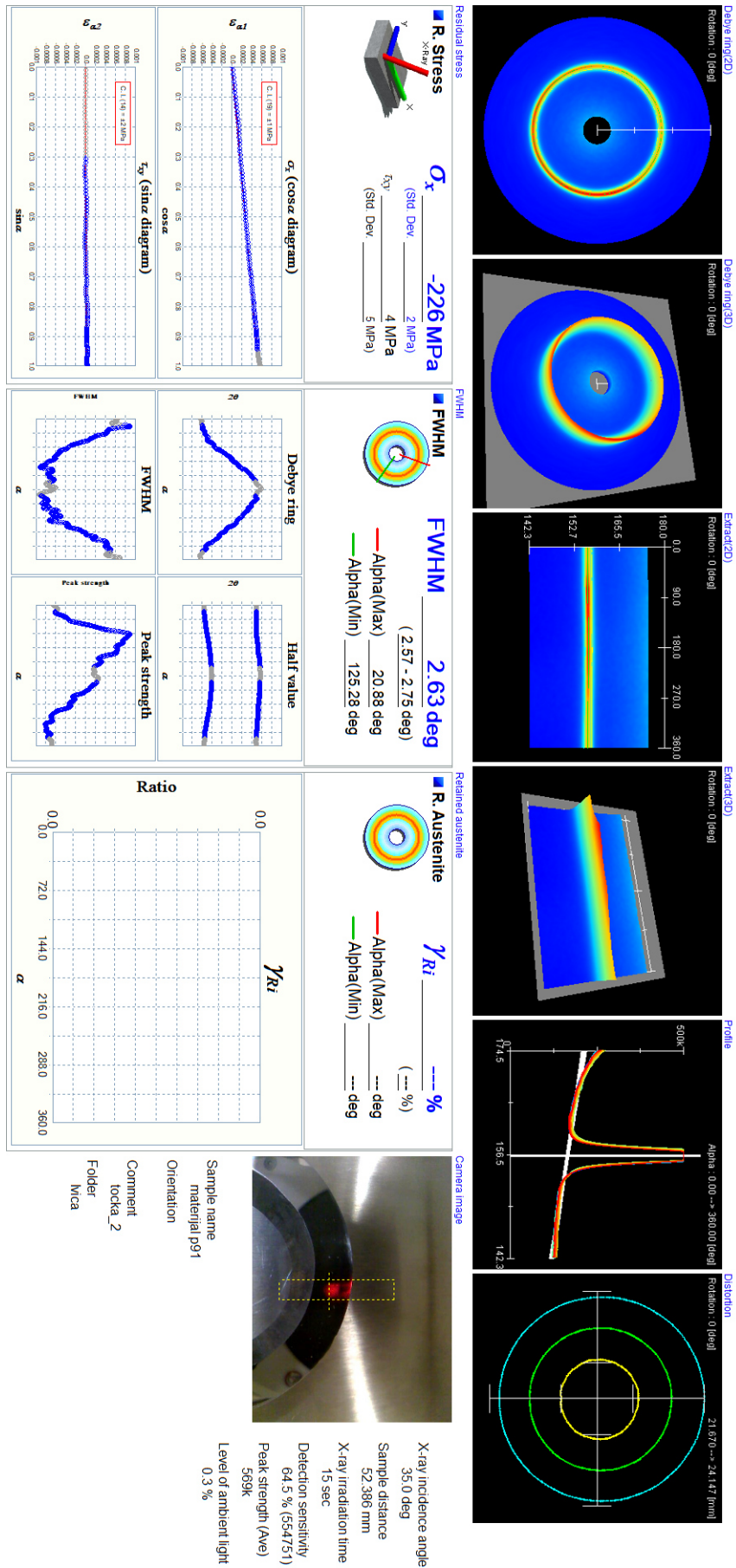
Zaostala naprezanja mjerena su pomoću uređaja na slici 26. Uzorci na kojima su izmjerena zaostala naprezanja, prethodno su izrezani, ručno brušeni, te dodatno polirani. Na slici 30 je prikazan izgled jednog reprezentativnog uzorka na kojemu je provedeno mjerenje. Također su na slici 30 prikazane i zone mjerenja zaostalih naprezanja, zone ima 3 po svakom navaru. Zone 1 i 2 obuhvaćaju rubove navara te ZUT, dok zona 3 obuhvaća sam metal zavara po poprečnom presjeku.



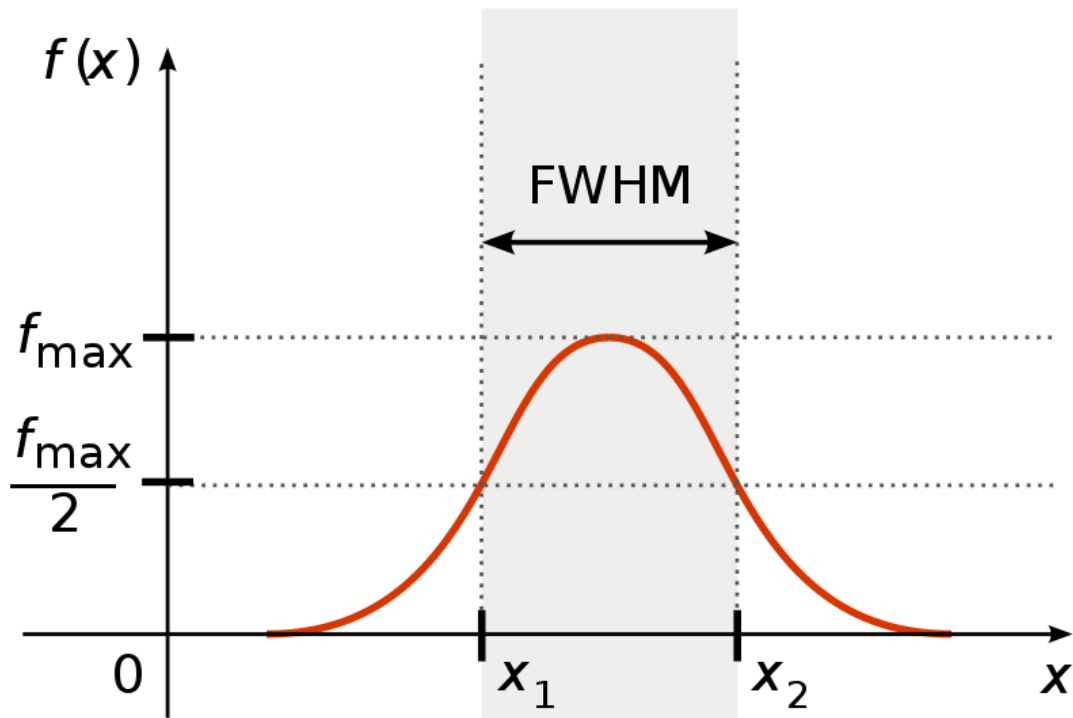
**Slika 30. Uzorak te zone mjerenja**

Na slici 31, prikazano je način prikaza rezultata mjerenja. U gornjem lijevom dijelu slike prikazan je Debeye – Scherrerov prsten u 2D i 3D prikazu, dok je ispod njega naveden iznos srednjeg zaostalog naprezanja unutar određene zone snimanja. Zona snimanja vidljiva je na slici kamere u srednjem desnom, odnosno donjem dijelu slike gdje su naznačeni podaci o snimanju uzorka. Također je ispod Debeye – Scherrerov – og prstena navedena i standardna devijacija. Ispod navedenih naprezanja nalaze se  $\cos\alpha$  i  $\sin\alpha$  dijagrami. Infomacije o izmjerenim kutevima dane su nam u kartici „FWHM“ *engl. Full width at half maximum*, što označava razliku između dvije vrijednosti nezavisne varijable, za koje vrijedi da je zavisna varijabla na pola svoje vrijednosti, navedeni parametar prikazan je na slici 32.. Iduća kartica predstavlja zaostali austenit u materijalu.





Slika 31. Primjer dobivenog rezultata mjerenja zaostalih naprezanja



Slika 32. FWHM parametar [42]

Nadalje, u tablici 14 prikazani su rezultati mjerenja svakog pojedinog uzorka za svaku pripadajuću zonu, te uz parametre navarivanja koji su navedeni u tablicama 11 i 12.

Tablica 14. Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja

Uzorak	Zona 1 [MPa]	Zona 2 [MPa]	Zona 3 [MPa]
1A	-285	-282	-282
1B	-244	-252	-288
1C	-235	-265	-290
1D	-263	-272	-385
1E	-237	-230	-295
1F	-231	-239	-315
UKUPNO	-1495	-1540	-1855
SREDNJA VRIJEDNOST	-249,167	-256,667	-309,167
2A	-263	-269	-341
2B	-255	-276	-363
2C	-263	-242	-291

2D	-241	-266	-400
2E	-230	-220	-396
2F	-270	-268	-321
UKUPNO	-1522	-1541	-2112
SREDNJA VRIJEDNOST	-253,667	-256,833	-352
R	-285	-282	-282
OM „1“		-226	
OM „2“		-211	
OM „R“		-233	

Nadalje, izmjereni i zapisani podaci mjerenja podvrgnuti su regresivnoj analizi, koja služi za utvrđivanje veze između dvije ili više varijabli. Zavisnu varijablu u ovakvoj analizi želimo moći predvidjeti ili bolje razumjeti, dok su nezavisne varijable one koje bi mogle utjecati na zavisnu varijablu [43].

Regresijskom analizom objašnjena je ovisnost, odnosno veza između zavisne i nezavisnih varijabli, odnosno utjecaj promjene nezavisnih varijabli na zavisnu varijablu. Također, ovakav model analize pomaže nam odrediti koja od nezavisnih varijabli ima utjecaj na zavisnu varijablu i u kom opsegu [43].

Model regresijske analize temeljen je na zbroju kvadrata. Zbroj kvadrata je matematički način pronalaženja disperzije podatak, odnosno točaka. Cilj ovakvog modela je dobivanje najmanjeg mogućeg zbroja kvadrata te ucrtati određenu krivulju koja najbolje aproksimira dobiven podatke [43].

U statistici se razlikuju dvije vrste linearne regresije, jednostavna i višestruka. Jednostavna linearna regresija modelira odnos između zavisne i jedne nezavisne varijable, uz korištenje linearne funkcije. U slučaju da se koristi dvije ili više nezavisnih varijabli za predviđanje zavisne varijable, to je primjer višestruke linearne regresije. Također regresije ne mora biti linearna, već može biti opisana i nelinearno [43].

#### 4.6.3.1 Rezultati 1A-1F – Zona 1

U ovom slučaju izvedena je jednostavna regresijska analiza podataka. Prva regresijska analiza podataka provedena je na rezultatima zaostalih naprezanja kada je balans zavarivanja na aparatu

namješten na vrijednost -20, a frekvencija se mijenjala prema tablici 12. Nezavisna varijabla u ovom slučaju je frekvencija, dok je zavisna varijabla iznos zaostalih naprezanja.

Kao rezultat regresijske analize u programu „Microsoft Excel“, dobivene su 4 tablice koje su redom navedene i objašnjene.

**Tablica 15. Regresijski parametri 1A-1F zona 1**

<i>Regresivna Statistika</i>	
Višestruko R	0,233692
R - Kvadrat	0,054612
Prilagođeni R kvadrat	-0,26052
Standardna pogreška	14,20151
Broj uzoraka	5

U tablici 15 navedeni su osnovni parametri regresivne statistike. Višestruko R je korelacijski parametar kojim je ocjenjena jakost linearne veze između varijabli. Njegova vrijednost može biti između 1 i -1. Vrijednost 1 označava jaku pozitivnu linearnu vezu između varijabli, a vrijednost -1 jaku negativnu linearnu vezu između varijabli. Vrijednošću 0 prikazana je nepovezanost između varijabli. Rezultat multipliciranog R parametra za zavare od 1A – 1F iznosi 0,233692, čime je označena vrlo slaba veza između parametra frekvencije i zaostalih naprezanja pri konstantnim parametrima zavarivanja navedenih u tablici 11, te vrijednosti balansa -20. R – kvadratom označen je koeficijent determinacije, kojim se je prikazano koliko točaka pada na liniju regresije.

Vrijednost  $R^2$  izračunat je iz ukupnog zbroja kvadrata, odnosno to je zbroj kvadrata odstupanja izvornih podataka od srednje vrijednosti. U ovom slučaju taj podatak iznosi 0,054612, čime je prikazano da 5,4612% vrijednosti odgovara modelu regresijske analize, odnosno 5,4612% zavisnih varijabli zaostalih naprezanja objašnjeno nezavisnom varijablom frekvencije.

Parametar „prilagođeni  $R^2$ “ bi bio korišten u slučaju da u modelu imamo više od jednog nezavisnog parametra, odnosno to je  $R^2$  koji je korišten kod višestruke linearne regresije.

Standardna devijacija je pokazatelj preciznosti regresijske analize, što je iznos standardne pogreške manji, model se smatra točnijim. Ovim podatkom prikazana je prosječna udaljenost dobivenog podatka od regresijske linije, odnosno rasipanje vrijednosti. U ovom slučaju je taj broj dosta visok, te prema tablici 15 iznosi 14,2.

Nadalje u tablici 16 prikazana je analiza varijance „ANOVA“

**Tablica 16. Analiza varijance 1A-1F zona 1**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Važnost F</i>
Regresijski	1	34,95171	34,95171	0,1733	0,705185
Rezidualni	3	605,0483	201,6828		
Ukupno	4	640			

U osnovi, u tablici 16, analiza varijance dijeli zbroj kvadrata na pojedinačne komponente koje nam da ju informacije o razinama varijabilnosti unutar regresijskog modela. Analiza varijance se vrlo rijetko koristi za analizu jednostavne regresijske metode u „Excel – u“. Međutim, svakako je bitno pogledati vrijednost parametra „*F*“ čija vrijednost govori o pouzdanosti modela. Ako je vrijednost parametra „*F*“ manja od 0,05, odnosno 5%, model je uredi, no ako je veća, poželjno je promijeniti nezavisnu varijablu.

Vrijednost parametra „*F*“ u tablici 16 jednaka je 0,1733, odnosno iznosi 17,33% što je daleko veće od željenih 5%, te nam sugerira promjenu nezavisne varijable.

Tablica 17, naziva „Ishod regresijske analize“ nam služi za dobivanje koeficijenata pomoću kojih možemo izraditi jednadžbu linearne regresije:

$$y = ax + b \quad (1.1)$$

**Tablica 17. Ishod regresijske analize 1A-1F zona 1**

	<i>Koeficijent</i>	<i>Standarda devijacija</i>	<i>t-oznaka</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>Ispod 95%</i>	<i>Iznad 95%</i>	<i>Ispod 95,0%</i>	<i>Iznad 95,0%</i>
<i>Konstanta b</i>	-247,261	14,14336	-17,4825	0,000408	-292,271	-202,25	-292,271	-202,25
50,0000	0,036033	0,086556	0,416294	0,705185	-0,23943	0,311492	-0,23943	0,311492

Prema tablici 17 jednadžba pravca bi izgledala ovako:

$$y = 0,036x + 50 \quad (1.2)$$

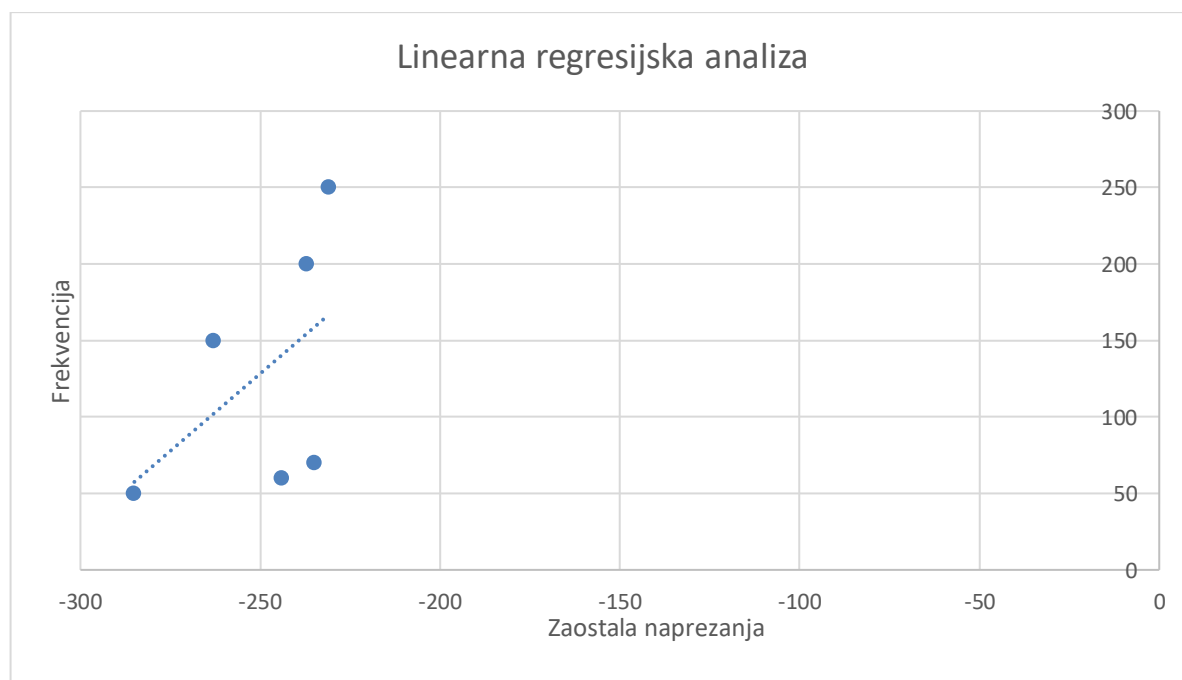
U tablici 18. vidimo odnose procijenjenih i dobivenih vrijednosti zaostalih naprežanja. Također su vidljiva i odstupanja od izmjerenih vrijednosti.

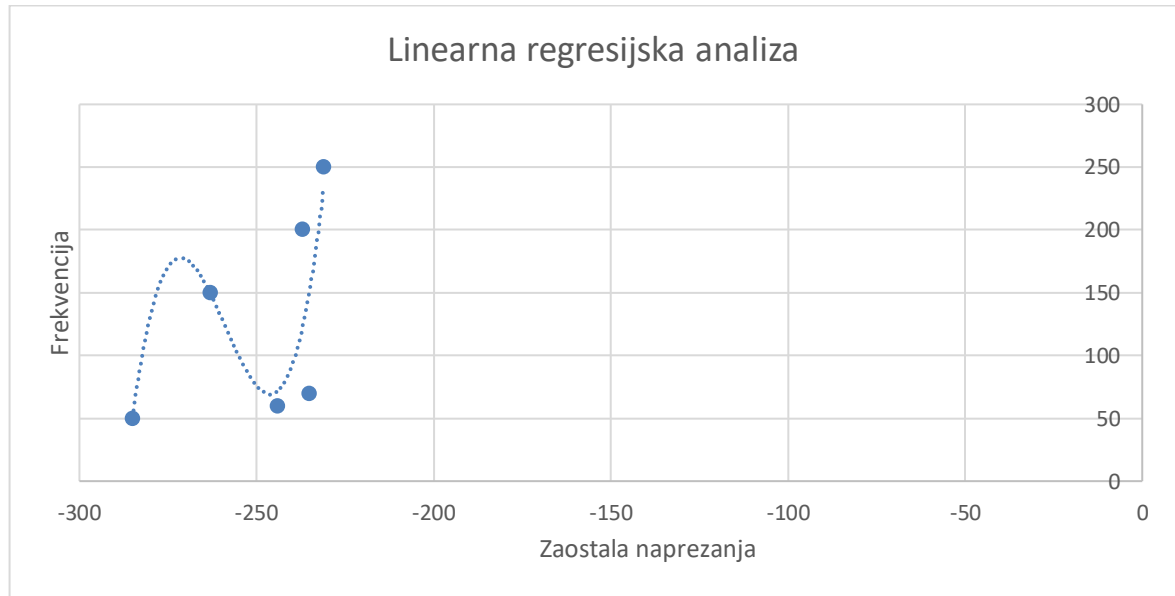
**Tablica 18. Odstupanja izmjerenih i procijenjenih podataka 1A-1F zona 1**

OSTALE VRIJEDNOSTI		
Uzorak	Predviđena vrijednost zaostalih naprezanja	Odstupanje
1	-245,099	1,098811
2	-244,738	9,738484
3	-241,856	-21,1441
4	-240,054	3,054235
5	-238,253	7,2526

Nadalje, na slici 33, prikazan je linearni pravac kojim se pokušalo aproksimirati rezultate ispitivanja zaostalih naprezanja, no kako se vidi na dijagramu, odstupanja su vrlo visoka te bi se ovdje trebala primijeniti nelinearna regresijska metoda.

Kako vidimo prema linearnoj regresijskoj analizi, nezavisni parametar frekvencije nema snažnog utjecaja na zaostala naprezanja u zoni 1, nadalje je izvedena ista analiza za zone 2 i 3, a nakon toga i ukupna regresijska analiza gdje su svi uzorci uzeti u obzir, odnosno gdje je i vrijednost balansa uzeta u obzir. Nadalje slikom 34 prikazan je nelinearna krivulja kojom bi se dalo opisati ovakve rezultate, no pitanje je kako bi se takav rezultat mogao primijeniti za daljnja ispitivanja. Također je pitanje točnosti zone mjerenja, uslijed samog postavljanja kamere za mjerenje, osjetljivost mjernog uređaja itd.

**Slika 33. Pravac linearne regresije 1A-1F zona 1**



**Slika 34. Pravac nelinearne regresije 1A-1F zona 1**

#### 4.6.3.2 Rezultati 1A – 1F Zona 2

Prema tablici 14 vidimo kako su rezultati dobiveni pri mjerenju zone 1 i zone 2 vrlo slični te stoga je interno provedena regresijska analiza.

Vrijednosti koje su dobivene su vrlo slične onima navedenim i podnaslovu „4.6.3.1“. Vrijednosti sugeriraju kako zaostala naprezanja kao nezavisna varijabla ne ovise značajno o frekvenciji te kako izrađeni model nije dovoljno dobar za opisivanje zaostalih naprezanja.

#### 4.6.3.3 Rezultati 1A – 1F Zona 3

Rezultati za zonu 3 prikazani su tablicama 19, 20, 21, 22, dok je na slici 35 prikazan pravac linearne regresije.

**Tablica 19. Regresivna statistika 1A-1F zona 2**

<i>Regresivna Statistika</i>	
višestruko R	0,255698
R - Kvadrat	0,065381
Prilagođeni R kvadrat	-0,24616
Standardna pogreška	45,5273
Broj uzoraka	5

Prema podacima u tablici 19 prikazana je vrlo slaba ovisnost zaostalih naprezanja o frekvenciji, jer je vrijednost multipliciranog R puno manji od 1, odnosno bliži 0 nego 1. Također R – kvadratom izražen je vrlo mali postotak slučajeva kada parametar frekvencije opisuje zaostala naprezanja, te je takvih slučajeva svega 6,5%. Standardna devijacija iznosi 45,53 Mpa.

**Tablica 20. Analiza varijance 1A-1F zona 3**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Važnost F</i>
Regresijski	1	434,9957	434,9957	0,209866	0,678019
Rezidualni	3	6218,204	2072,735		
Ukupno	4	6653,2			

Tablicom 20 prikazana je analiza varijance, gdje vidimo kako je parametar „*F*“ značajno veći od preporučene vrijednosti 0,05.

**Tablica 21. Ishod regresijske analize 1A-1F zona 3**

	<i>Koeficijent</i>	<i>Standarda devijacija</i>	<i>t-oznaka</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>Ispod 95%</i>	<i>Iznad 95%</i>	<i>Ispod 95,0%</i>	<i>Iznad 95,0%</i>
<i>Konstanta b</i>	-296,041	45,3409	-6,5292	0,0073	-440,336	-151,746	-440,336	-151,746
50,0000	-0,12712	0,27748	-0,4581	0,67802	-1,0102	0,75595	-1,0102	0,75595

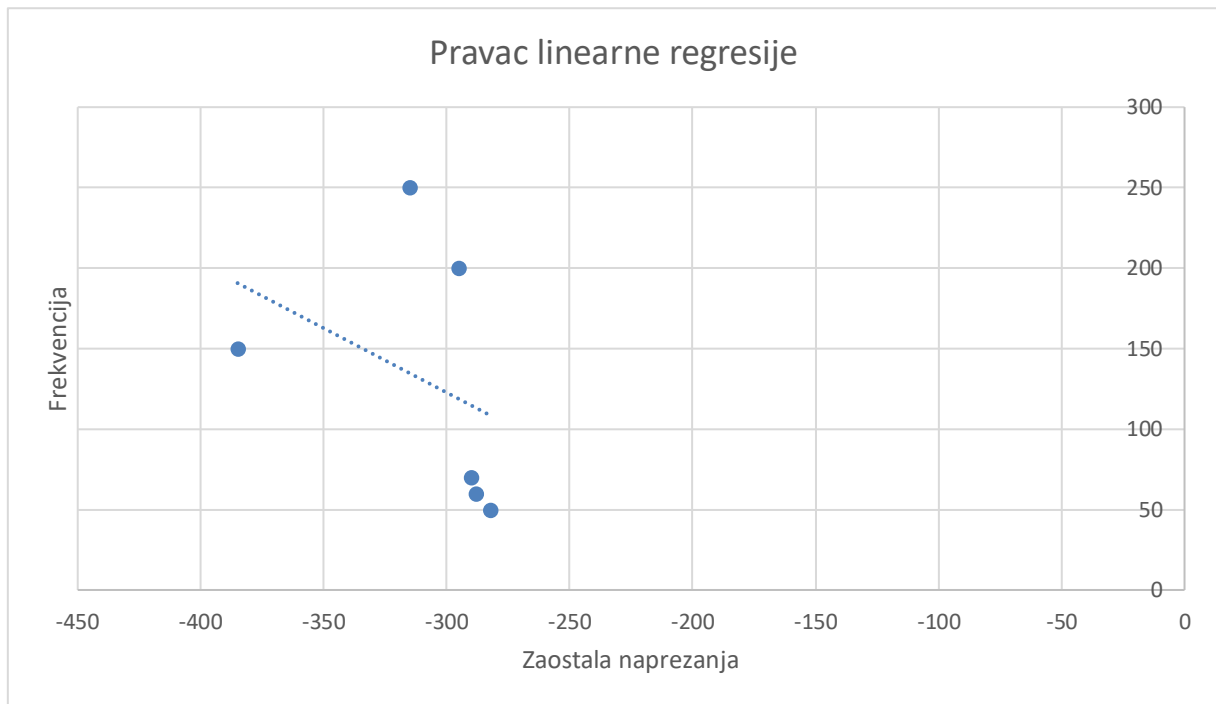
Jednadžbu pravca moguće je ispisati iz tablice 21. Jednadžba pravca glasi:

$$y = -0,12712x + 50 \quad (1.3)$$

**Tablica 22. Odstupanja izmjerenih i procijenjenih podataka 1A-1F zona 3**

OSTALE VRIJEDNOSTI		
<i>Uzorak</i>	<i>Predviđena vrijednost zaostalih naprezanja</i>	<i>Odstupanje</i>
1	-303,668	15,6679
2	-304,939	14,93908
3	-315,108	-69,8915
4	-321,464	26,46434
5	-327,82	12,82021





**Slika 35. Pravac linearne regresije 1A-1F zona 3**

Prema gore navedenim tablicama, te prema slici gdje se nalazi pravac linearne regresije, vidimo kako i dalje zaostala naprezanja vrlo malo ovise o frekvenciji, te nam to sugerira da niti jedna od 3 zone zavara koje gdje su izmjerena zaostala naprezanja ne ovise o frekvenciji, stoga regresijska analiza za drugu skupinu zavara nije provedena.

#### 4.6.3.4 Višestruka linearna regresija zona 1

U ovom slučaju linearna regresija bit će provedena uzimajući frekvenciju i balans kao nezavisne varijable, a zaostala naprezanja kao zavisne, isto tako ispitivanje će biti provedeno za sve tri zone gdje su izmjerena zaostala naprezanja.

**Tablica 23. Višestruka regresivna statistika zona 1**

<i>Regresivna Statistika</i>	
višestruko R	0,459284
R - Kvadrat	0,210942
Prilagođeni R kvadrat	0,013677
Standardna pogreška	14,64515
Broj uzoraka	11

U tablici 24. vidimo kako je parametra multipliciranog R blizu 0,5, što znači da postoji značajno jača korelacija između zavisne i nezavisnih varijabli kada je u obzir uzet i balans struje a ne samo frekvencija.

Vrijednost R – kvadrat je otprilike 21% što je puno veće nego kada se u obzir uzimala samo frekvencija kao nezavisna varijabla.

**Tablica 24. Analiza varijance zona 1**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Važnost F</i>
Regresijski	2	458,7024	229,3512	1,069334	0,387647
Rezidualni	8	1715,843	214,4804		
Ukupno	10	2174,545			

U tablici 24 vidimo kako je parametar „*F*“, značajno veći od 0,05, što nam sugerira da model nije ispravan. Prema tablici 25 moguće je zapisati dvije jednadžbe pravca od kojih je jedna:

$$y = 0,03771x + 50 \quad (1.4)$$

Druga jednadžba pravca glasi:

$$y = -0,55316x - 20 \quad (1.5)$$

**Tablica 25. Ishod višestruke regresijske analize zona 1**

	<i>Koeficijent</i>	<i>Standarda devijacija</i>	<i>t-oznaka</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>Ispod 95%</i>	<i>Iznad 95%</i>	<i>Ispod 95,0%</i>	<i>Iznad 95,0%</i>
<i>Konstanta</i>	-258,569	9,72965	-26,5754	4,32E-09	-281,006	-236,133	-281,006	-236,133
-20	-0,55316	0,445913	-1,24052	0,249929	-1,58144	0,475113	-1,58144	0,475113
50	0,03771	0,059045	0,63868	0,540878	-0,09845	0,17387	-0,09845	0,17387

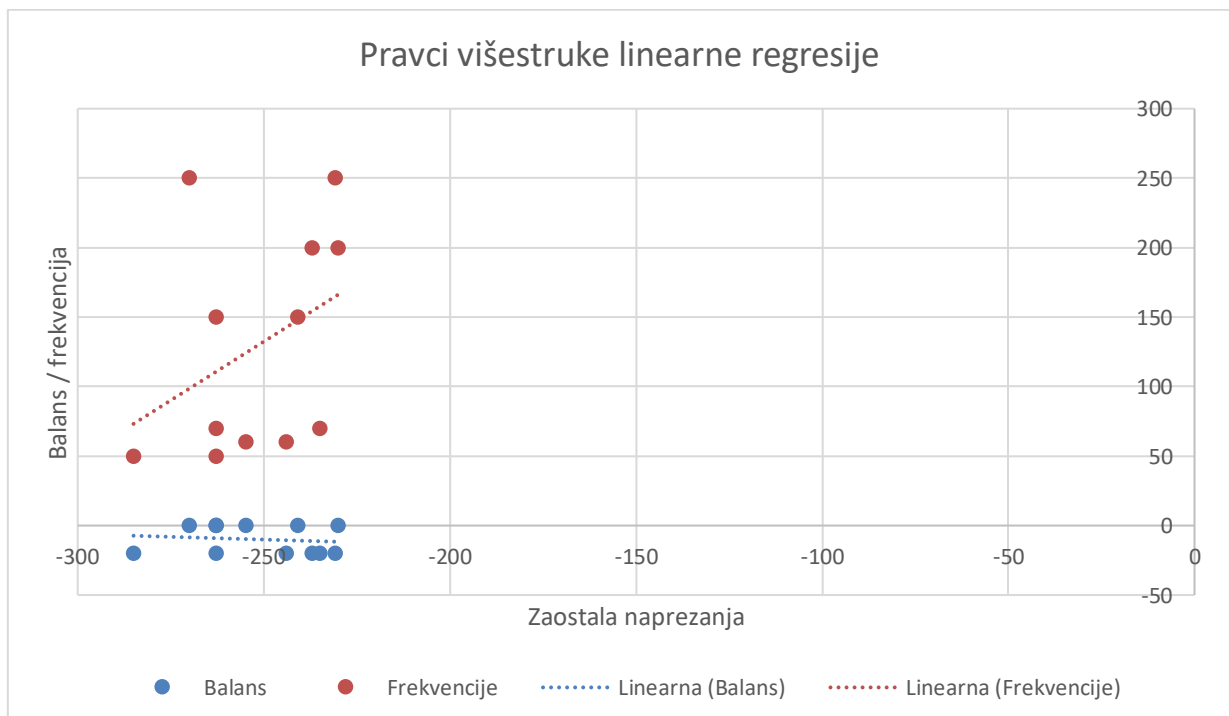
U tablici 26. prikazana su odstupanja od izmjerenih vrijednosti za pojedina mjerenja.

**Tablica 26. Odstupanja izmjerenih i procijenjenih podataka zona 1**

OSTALE VRIJEDNOSTI		
<i>Uzorak</i>	<i>Predviđena vrijednost zaostalih naprezanja</i>	<i>Odstupanje</i>
1	-245,243	1,243173
2	-244,866	9,86606
3	-241,849	-21,1508
4	-239,964	2,963589

5	-238,078	7,078023
6	-256,684	-6,31643
7	-256,306	1,306459
8	-255,929	-7,07065
9	-252,912	11,91244
10	-251,027	21,02687
11	-249,141	-20,8587

Prema navedenim rezultatima vidimo kako kombinacija frekvencije i balansa bolje opisuje zavisnu varijablu zaostalih napreznaja nego sama frekvencija kao nezavisna varijabla, no i dalje su rezultati nezadovoljavajući. Na slici 36 prikazani su regresijski pravci.



**Slika 36. Pravci višestruke linearne regresije zona 1**

Na slici 36 prikazana su 2 pravca linearne regresije. Plavi za balans te crveni za frekvenciju kao nezavisnu varijablu. Vidimo kako crveni pravac vrlo loše aproksimira rezultate zaostalih napreznaja, kao što je navedeno i objašnjeno u radu. Plavi pravac, gdje je balans struje nezavisna varijabla. Vrlo dobro aproksimira vrijednosti zaostalih napreznaja, no promjene balansa je vrlo mala, te je teško tu varijablu uzeti samu kao bitnu nezavisnu varijablu.

#### 4.6.3.5 Višestruka linearna regresija zona 2

Prema tablici 14 vidimo kako su rezultati dobiveni pri mjerenju zone 1 i zone 2 vrlo slični te stoga je interno provedena regresijska analiza.

Vrijednosti koje su dobivene su vrlo slične onima navedenim i podnaslovu „4.6.3.4“. Vrijednosti sugeriraju kako zaostala naprezanja kao nezavisna varijabla ne ovise značajno o frekvenciji te kako izrađeni model nije dovoljno dobar za opisivanje zaostalih naprezanja.

#### 4.6.3.6 Višestruka linearna regresija zona 3

Rezultati za zonu 3 višestruke linearne regresije prikazani su tablicama 27, 28, 29, 30 .

**Tablica 27. Višestruka regresivna statistika zona 3**

<i>Regresivna Statistika</i>	
višestruko R	0,496121
R - Kvadrat	0,246136
Prilagođeni R kvadrat	0,05767
Standardna pogreška	50,50834
Broj uzoraka	11

U tablici 27 vidimo kako su rezultati dobiveni višestrukom regresijskom analizom zone 3, vrlo slični podacima koji su dobiveni istom analizom zone 1, koji su navedeni u tablici 23. Stoga isti komentari vrijede i za ovaj slučaj višestruke linearne regresije, odnosno model s dvije nezavisne varijable nešto bolje opisuje zavisnu varijablu zaostalih naprezanja, no ne dovoljno dobro da bismo na temelju modela mogli procijeniti vrijednosti za nekakvu drugačiju kombinaciju nezavisnih varijabli.

Tablicom 28 prikazana je analiza varijance za navedeni slučaj, gdje možemo vidjeti kako je parametar „*F*“ značajno veći od 0.05, odnosno 5%, što nam govori kako model nije dobar te da bi trebalo promijeniti nezavisne varijable.

**Tablica 28. Analiza varijance zona 3**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Važnost F</i>
Regresijski	2	6663,446	3331,723	1,305999	0,322977
Rezidualni	8	20408,74	2551,092		
Ukupno	10	27072,18			

Prema tablici moguće je ispisati jednadžbe pravca koje su prikazane na slici 37, a glase:

$$y = -2,16173x - 20 \quad (1.6)$$

U slučaju kada se balans uzima kao nezavisna varijabla, a kada je u pitanju frekvencija, jednadžba pravca glasi:

$$y = 0,13118x + 50 \quad (1.7)$$

**Tablica 29. Ishod višestruke regresijske analize zona 3**

	Koeficijent	Standarda devijacija	t-oznaka	P-vrijednost	Ispod 95%	Iznad 95%	Ispod 95,0%	Iznad 95,0%
Konstanta	-341,386	33,55571	-10,174	7,46E-06	-418,766	-264,007	-418,766	-264,007
-20	-2,16173	1,537869	-1,4057	0,197451	-5,70806	1,384607	-5,70806	1,384607
50	0,13118	0,203636	0,6442	0,537491	-0,33841	0,600763	-0,33841	0,600763

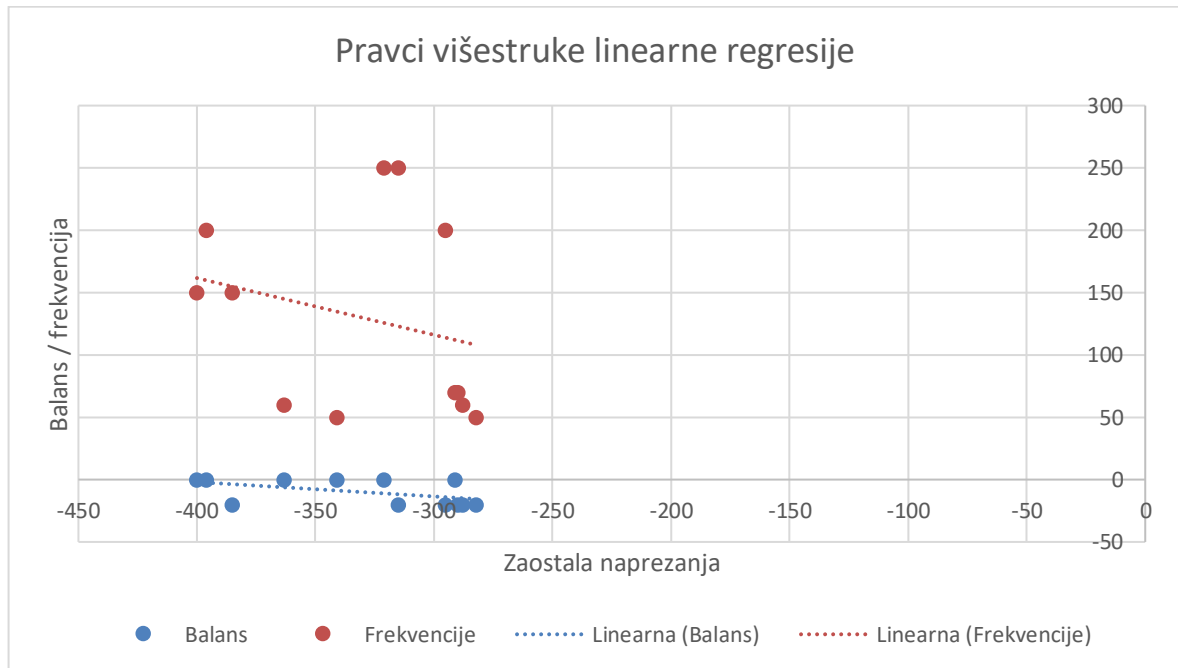
U tablici 30. prikazane su odstupanja predviđenih vrijednosti i vrijednosti koje su izmjerene.

**Tablica 30. Odstupanja između procijenjenih i izmjerenih vrijednosti zona 3**

OSTALE VRIJEDNOSTI		
Uzorak	Predviđena vrijednost zaostalih naprežanja	Odstupanje
1	-290,281	2,281209
2	-288,969	-1,03056
3	-278,475	6,475293
4	-271,916	41,91645
5	-265,358	-49,6424
6	-334,827	-6,17252
7	-333,516	-29,4843
8	-332,204	41,20394
9	-321,71	-78,2902
10	-315,151	85,15095
11	-308,592	-12,4079

Jednadžbe pravca koje su dobivene iz tablice 29. prikazane su na slici 37. Plavi pravac prikazuje linearnu regresiju u kojoj je balans nezavisna varijabla, dok crveni za pravac prikazuje linearnu regresiju kada je frekvencija nezavisan parametar. Vidimo kako crveni pravac vrlo loše aproksimira rezultate zaostalih naprežanja, kao što je do sad već nekoliko puta navedeno. Plavi pravac, gdje je balans struje nezavisna varijabla. Vrlo dobro aproksimira vrijednosti zaostalih

naprezanja, no promjene balansa gotovo da ni nema, te je teško tu varijablu uzeti samu kao bitnu nezavisnu varijablu.



**Slika 37. Pravci višestruke linearne regresije zona 3**

#### 4.6.3.7 Usporedba rezultata

U tablici 14. prikazne su također srednje vrijednosti naprezanja unutar pojedine grupe, odnosno usporedba vrijednosti kada bismo promatrali samo promjenu balansa. Grupa jedan u zoni 1 ima manje prosječno zaostalo naprezanja nego grupa 2, ali za vrlo mali iznos. Nadalje u zoni 2 jedna i druga grupa imaju vrlo slične vrijednosti zaostalih naprezanja, dok u zoni 3, grupa 2 ima značajnije veću prosječnu vrijednost zaostalih naprezanja.

Uspoređujući grupe 1 i 2 s referentnim uzorkom, dolazi se do zaključka kako su unutar referentnog uzorka zaostala naprezanja dosta slična, neovisno o zoni mjerenja. Grupa 1 prosječno ima manja zaostala naprezanja u zonama 1 i 2 nego referentni uzorak, dok u zoni 3 ima nešto veći iznos.

Nadalje, grupa 2, isto tako u zonama 1 i 2 ima nešto manji iznos zaostalih naprezanja, dok u zoni 3 ima značajno veću vrijednost zaostalih naprezanja nego referentni uzorak.

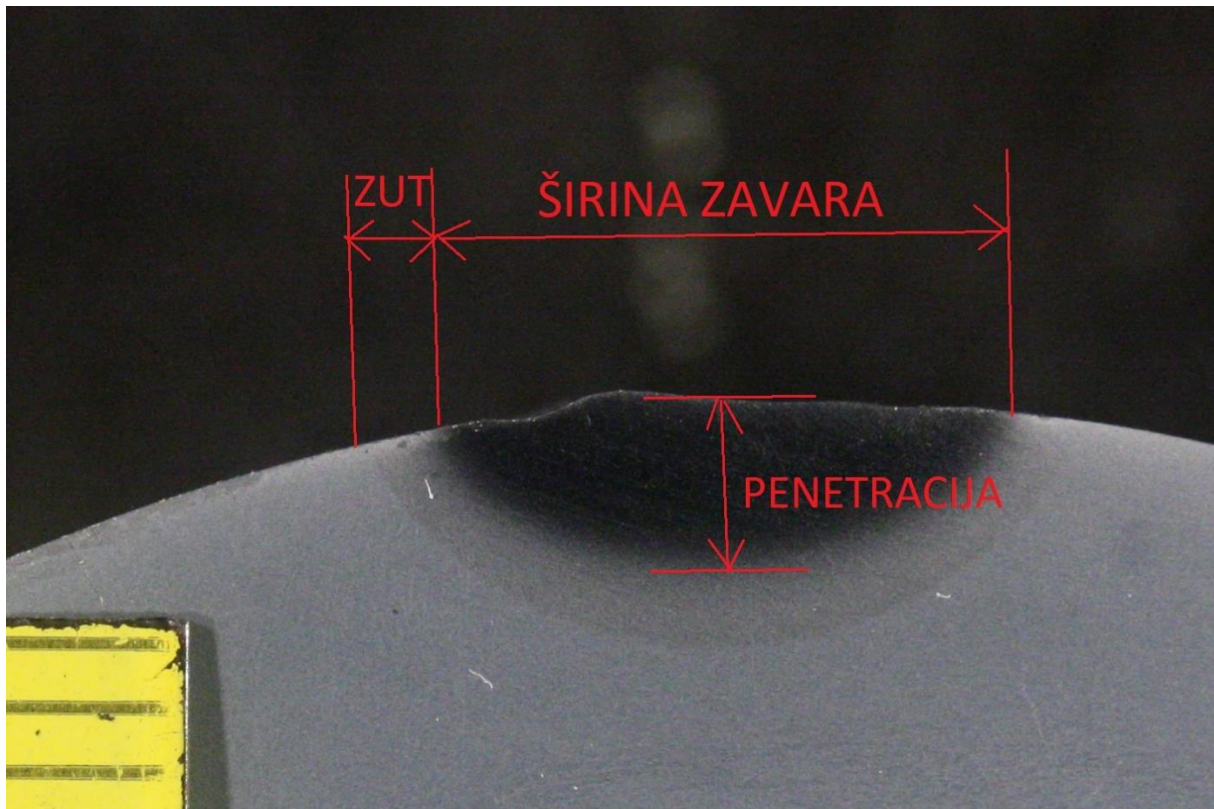
Kao zaključak se navodi da su se uslijed zavarivanja različitim frekvencijama te balansima električne struje, u metal zavara, zonu 3, dodatno unijela zaostala naprezanja.

Kod mjerenja zaostalih napreznaja, bitno je naglasiti kako u svakom slučaju treba uzeti mjernu nesigurnost koja je prisutna zbog različitih uzroka, od pozicioniranja uzorka, pozicioniranja zone mjerenja, čistoće površine, moguće refleksije mjernog uređaja i tako dalje. Te zbog toga rezultate mjerenja treba uzimati s određenom dozom nesigurnosti.

#### 4.7. Makroizbrusci



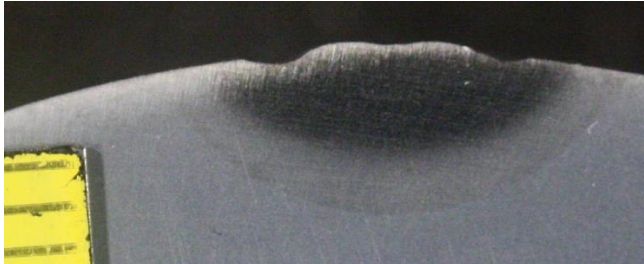



Nakon mjerenja zaostalih napreznaja, te regresijske analize dobivenih rezultata, uzorci su nakon poliranja dodatno izloženi elektrokemijskom nagrizaju u 10% - tnoj oksalnoj kiselini 50 sekundi pri jakosti struje 8 ampera, te naponu iznosa 8 V.

Makroizbrusci su prikazani tablicom 31, gdje su prikazane slike makroizbrusaka, navedene su dimenzije zavora. Mjerenje zavora izvršeno je prema slici 38. Uzorci su zavareni prema parametrima iz tablice 12.

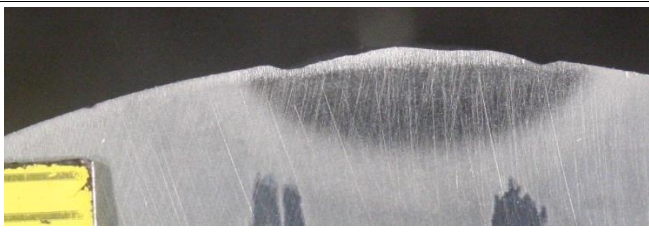


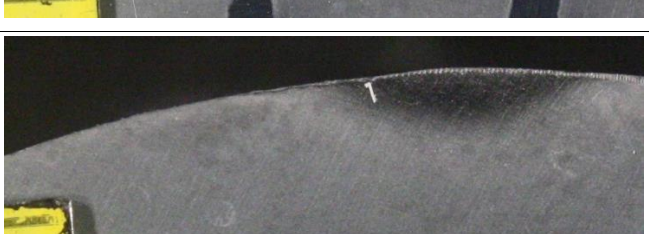
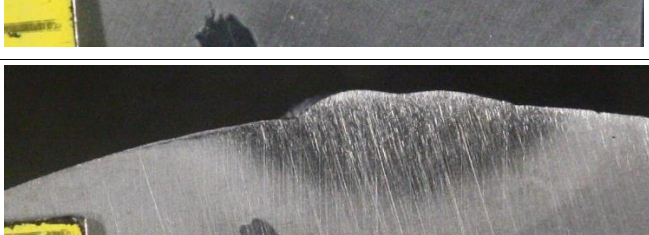
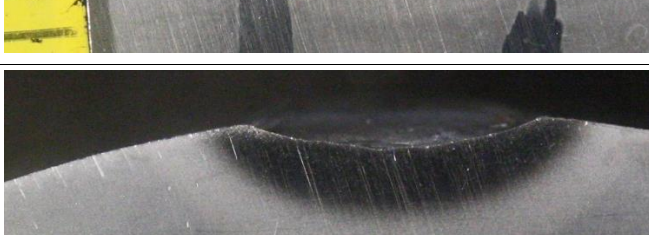
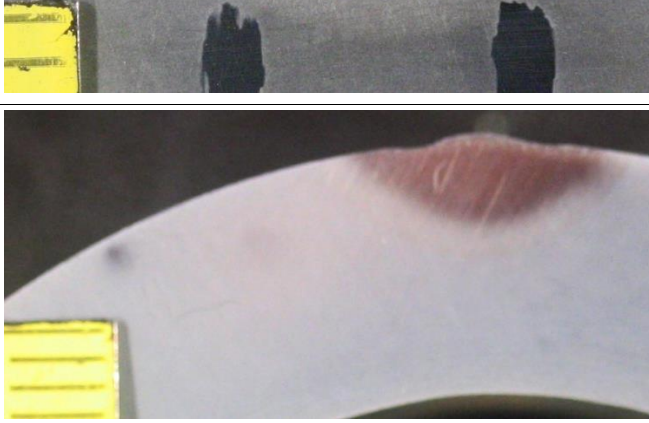


Slika 38. Primjer izmjera zavora

Tablica 31. Prikaz makroizbrusaka

Naziv Uzorka	Slika	Komentar
1A		Širina zavora je $\approx 8,75$ mm, Širina ZUT-a $\approx 1,50$ mm. Penetracija je $\approx 2,75$ mm.
1B		Širina zavora je $\approx 9,00$ mm Širina ZUT-a je $\approx 1,25$ mm. Penetracija je $\approx 2,75$ mm
1C		Širina zavora je $\approx 8,50$ mm, Širina ZUT-a $\approx 1,50$ mm. Penetracija je $\approx 2,50$ mm.
1D		Širina zavora je $\approx 10,50$ mm, Širina ZUT-a $\approx 1,25$ mm. Penetracija je $\approx 3,75$ mm.
1E		Širina zavora je $\approx 8,50$ mm, Širina ZUT-a $\approx 1,50$ mm. Penetracija je $\approx 2,50$ mm.
1F		Širina zavora je $\approx 8,75$ mm, Širina ZUT-a $\approx 2,00$ mm. Penetracija je $\approx 2,50$ mm.



2A		<p>Širina zavora je <math>\approx 8,50</math> mm,          Širina ZUT-a <math>\approx 1,50</math> mm.          Penetracija je <math>\approx 2,75</math> mm.</p>
2B		<p>Širina zavora je <math>\approx 8,75</math> mm,          Širina ZUT-a <math>\approx 1,50</math> mm.          Penetracija je <math>\approx 2,50</math> mm.</p>
2C		<p>Širina zavora je <math>\approx 9,50</math> mm,          Širina ZUT-a <math>\approx 1,50</math> mm.          Penetracija je <math>\approx 3,00</math> mm.</p>
2D		<p>Širina zavora je <math>\approx 6,25</math> mm,          Širina ZUT-a <math>\approx 1,75</math> mm.          Penetracija je <math>\approx 1,00</math> mm.</p>
2E		<p>Širina zavora je <math>\approx 8,00</math> mm,          Širina ZUT-a <math>\approx 1,50</math> mm.          Penetracija je <math>\approx 2,25</math> mm.</p>
2F		<p>Širina zavora je <math>\approx 9,25</math> mm,          Širina ZUT-a <math>\approx 1,75</math> mm.          Penetracija je <math>\approx 2,25</math> mm.</p>
R		<p>Širina zavora je <math>\approx 8,50</math> mm,          Širina ZUT-a <math>\approx 1,50</math> mm.          Penetracija je <math>\approx 2,75</math> mm.</p>

Prema tablici 31 zavari su podijeljeni u 2 grupe, grupa 1 i grupa 2 s obzirom na balans struje prema tablici 12. Za svaku grupu izračunate su srednje vrijednosti parametara koji su izmjereni.

Za grupu 1 su izračunati sljedeći iznosi:

- Srednja vrijednost širine zavara = 9,00 mm
- Srednja vrijednost širine zone utjecaja topline = 1,50 mm
- Srednja vrijednost penetracije = 2,83 mm.

Za grupu 2 vrijede sljedeće vrijednosti:

- Srednja vrijednost širine zavara = 8,375 mm
- Srednja vrijednost zone utjecaja topline = 1,583 m
- Srednja vrijednost penetracije = 2,292 mm

S povećanjem balansa u negativnom smjeru očekivan je porast iznosa penetracije, što je i dobiveno prema izmjerenim rezultatima. Penetracije kod uzoraka grupe 1 veća je za 19,011 %, izračunato prema sljedećoj formuli:  $\left(1 - \frac{2,292}{2,83}\right) \times 100\% = 19,011\%$ . Ovakav podatak nam sugerira da se penetracija značajno povećala s promjenom balansa struje.

Nadalje s porastom balansa u pozitivnom smjeru, očekivan je i porast plosnatosti zavara, odnosno porast širine zavara te ZUT-a. Prema izmjerenim rezultatima, širina zavara u prosjeku je nešto manja kod grupe 2 nego kod grupe jedan. Razlika je  $\approx 7\%$  izračunato prema gore navedenoj jednadžbi. Također prema rezultatima vidimo kako je ZUT nešto širi kod grupe 2 u odnosu na grupu 1, u iznosu od 5,24 %, koji je isto tako dobiven iz gore navedene formule.

Zavar 2D prema slikama izgleda najlošije. Penetracija je vrlo malog iznosa, a zavar plosnat, samim time ne bi zadovolji određene zahtjeve na kvalitetu. Uzrok ovakvog makroizbruska je nestabilnost koja se javila pri zavarivanju određenih uzoraka.

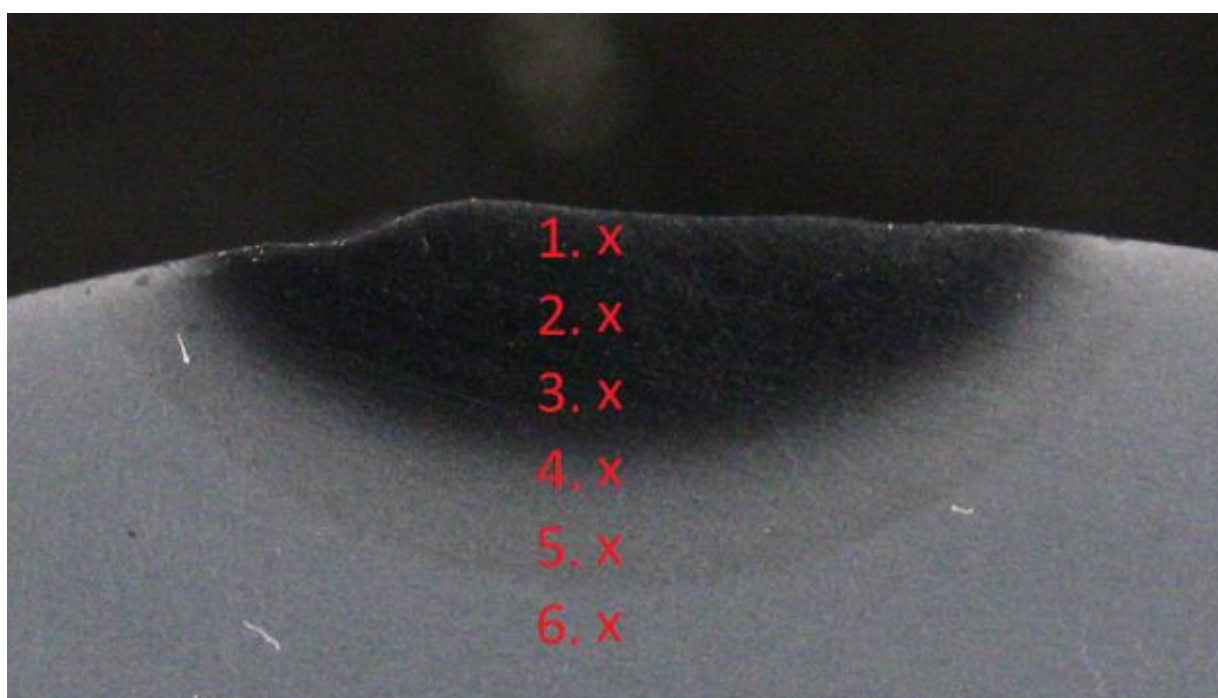
Najširi zavar s najdubljom penetracijom je zavar 1D. Ostali zavari su uglavnom slični bez većih razlika u izmjerama. Bitno je naglasiti kako se zbog nestabilnosti procesa ne može tvrditi da bi ovakav izgled makroizbrusaka bio identičan, da je uzorak izvađen iz nekog drugog mjesta na osnovnom materijalu.

Referentni uzorak ima vrlo povoljan omjer širine zavara u odnosu na penetraciju. Takav omjer još imaju i sljedeći zavari: 1A, 1D, 2C i 2D. Omjer širine zavara u odnosu na penetraciju ocijenjen je vizualno, gdje je izgled referentnog zavara svojevrsni etalon.

#### 4.8. Tvrdća

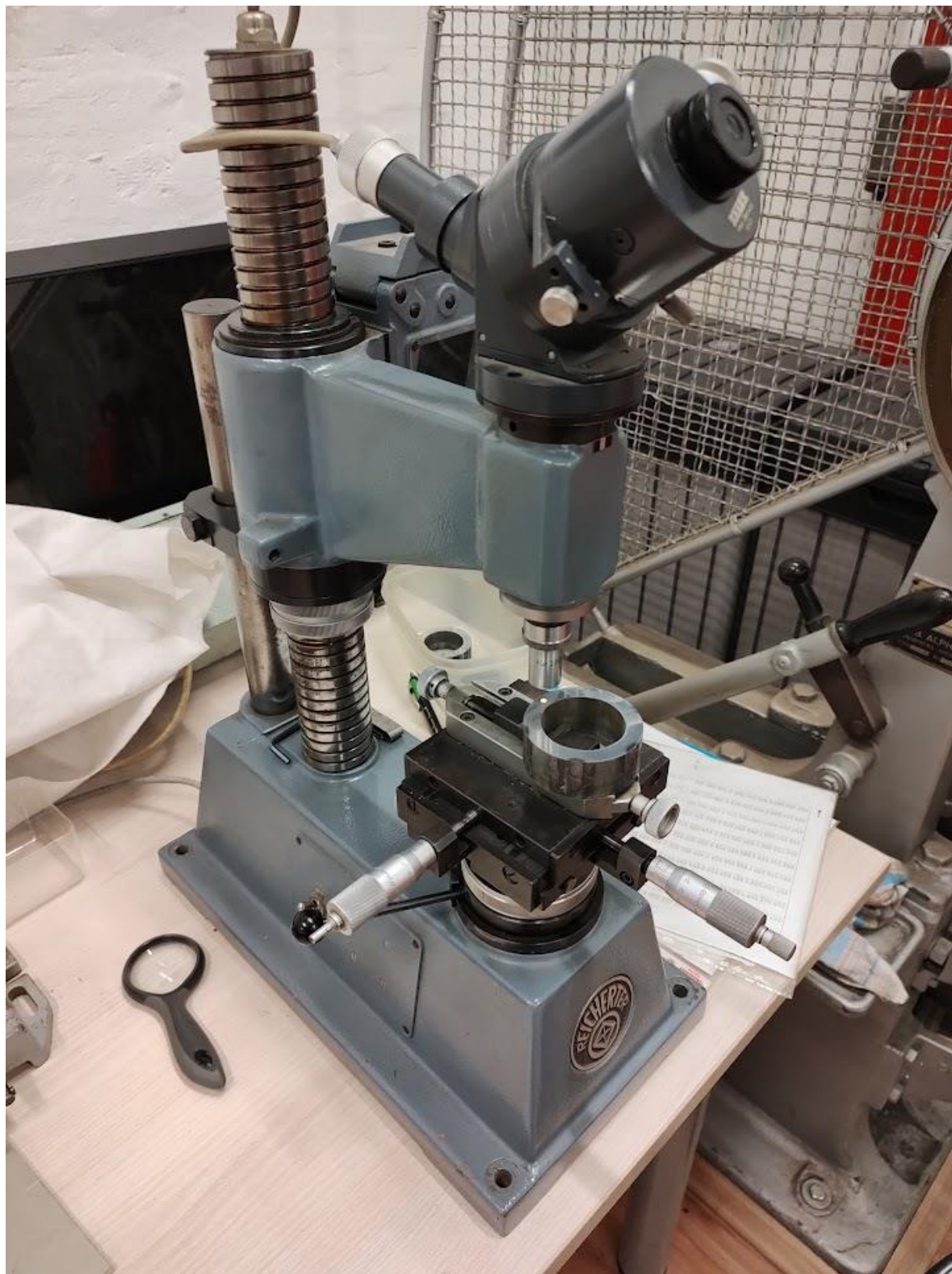
Nakon slikanja makroizbrusaka uzoraka, slijedi ispitivanje tvrdoća svakog pojedinog makroizbruska. Tvrdoće su izmjerene vickersovom metodom, dok je sila pritiska kategorizirana kao HV10.

Na svakom uzorku provedeno je 6 mjerenja tvrdoće, a područja u kojima se mjerila tvrdoća prikazana su na slici 39. Na slici su prikazane zone mjerenja te je prikazano kako su ista numerirana. Mjerenja su podijeljena tako da su 3 mjerena u zoni metala zavara, dvije vrijednosti u području ZUT – a, dok je posljednje mjerenje izvršeno na kraju zone ZUT – a te početku zone osnovnog materijala.



Slika 39. Zone mjerenja tvrdoće

Na slici 40 prikazan je uređaj kojim su se mjerile tvrdoće na uzorcima.



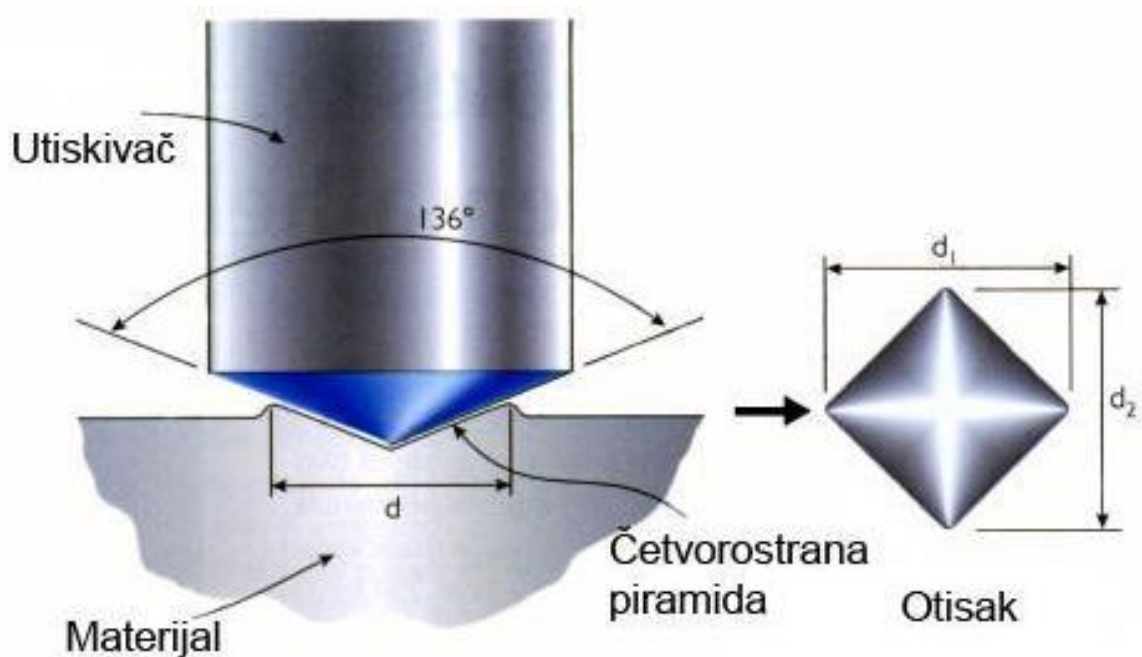
Slika 40. Uređaj za mjerenje tvrdoće

#### 4.8.1. Vickersova metoda

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju nekog stranog tijela u površinu materijala. Postoji više metoda mjerenja tvrdoće, kao što su: Brinellova, Rockwellova i Vickersova. Sve 3 navedene metode spadaju u statičke metode određivanja tvrdoće [44].

Vickersova metoda izvodi se tako da se četverostrana jednakostranična dijamantna piramida s vršnim kutom u iznosu od  $136^\circ$  utiskuje u materijal. Ovom metodom moguće je mjeriti vrlo tvrde materijale zato što je za materijal četverostrane piramide izabran dijamant. Vrijednosti se određuju prema mjerenju dijagonala otiska piramide u materijalu [44].

Shematski prikaz izvođenja metode ispitivanja prikazan je slikom 41.



Sile kojima se četverostrana piramida utiskuje u osnovni materijal podijeljene su u nekoliko razreda koji su navedeni u tablici 32.

Tablica 32. Vrijednosti HV za vickersovu metodu [46]

Konvencionalna tvrdoća <sup>1)</sup>		Semi-mikrotvrdoća		Mikrotvrdoća <sup>2)</sup>	
Oznaka	Ispitna sila F [N]	Oznaka	Ispitna sila F [N]	Oznaka	Ispitna sila F [N]
<b>HV 5</b>	49,03	<b>HV 0,2</b>	1,961	<b>HV 0,01</b>	0,09807
<b>HV 10</b>	98,07	<b>HV 0,3</b>	2,942	<b>HV 0,015</b>	0,1471
<b>HV 20</b>	196,1	<b>HV 0,5</b>	4,903	<b>HV 0,02</b>	0,1961
<b>HV 30</b>	294,2	<b>HV 1</b>	9,807	<b>HV 0,025</b>	0,2452
<b>HV 50</b>	490,3	<b>HV 2</b>	19,61	<b>HV 0,05</b>	0,4903
<b>HV 100</b>	980,7	<b>HV 3</b>	29,42	<b>HV 0,1</b>	0,9807

<sup>1)</sup> Ispitne sile >980,7 [N] smiju se primjenjivati  
<sup>2)</sup> Ispitne sile za mikrotvrdoću su preporučljive

#### 4.8.2. Rezultati mjerenja

Tablicom 33. prikazani su rezultati mjerenja za pojedini ispitni uzorak, te za svaku pojedinu zonu mjerenja.

Uzorak	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
1 A	437	566	425	429	390	221
1 B	446	413	429	413	394	209
1 C	514	437	413	421	376	209
1 D	473	442	425	446	417	317
1 E	493	429	409	405	380	294
1 F	536	433	417	387	209	209
UKUPNO	2899	2720	2518	2501	2166	1459
SREDNJA VRIJEDNOST	483,167	453,333	419,667	416,833	361	243,167
2 A	554	390	413	417	417	373
2 B	503	401	405	387	351	206
2 C	503	446	429	413	375	264
2 D	579	425	409	370	260	205
2 E	478	417	413	413	363	281
2 F	560	450	390	302	205	207
UKUPNO	3177	2529	2459	2302	1971	1536
SREDNJA VRIJEDNOST	529,5	421,5	409,8333	383,6667	328,5	256
R	473	390	442	429	409	209

Nakon što su rezultati izmjereni, dobiveni podaci su obrađeni pomoću regresijske metode u programu „Microsoft Excel“.

#### 4.8.3. Regresijska analiza

Regresijska analiza provedena je na sličan način kao i kod zaostalih naprezanja. Frekvencija je uzeta kao nezavisna regresijska varijabla, dok je vrijednost tvrdoće zavisna varijabla. U ovom slučaju izrađena je samo jednostavna regresijska analiza, jer nema značajne promjene balansa.

Zavari su podijeljeni u dvije grupe, prema iznosu balansa, grupa je ima balans u iznosu od -20, što znači da je elektroda 10% više vremena negativno nabijena, a to su uzorci od 1A do 1F. Druga grupa ima svojstvo balansa 50:50, odnosno elektroda je pola vremena pozitivno, a pola negativno nabijena. Ovdje spadaju zavari od 2A do 2F. finalno su uspoređene obje grupe međusobno te s referentnim zavarom.

Prva je obrađena zona 1 unutar grupe 1. Rezultati dobiveni regresijskom analizom prikazani su u sljedećim tablicama.

##### 4.8.3.1 Zona 1, grupa 1

**Tablica 33. Rezultati regresijske statistike**

<i>Regresivna Statistika</i>	
višestruko R	0,595549204
R - Kvadrat	0,354678854
Prilagođeni R kvadrat	0,139571805
Standardna pogreška	32,45646682
Broj uzoraka	5

U tablici 33 prikazani su dobiveni rezultati regresijske statistike. Rezultati su puno bolji nego što je to slučaj bio dok su se na isti način obrađivali rezultati zaostalih naprezanja. Prema prvom parametru iz tablice vidimo da je korelacija između nezavisne i zavisne varijable 0,59 što znači da postoji određena veza između frekvencije i tvrdoća u zoni 1. R – kvadratom je iskazano da 35,468 % rezultata pada na regresijsku krivulju. U tablici je još navedena i standardna devijacija te parametar prilagođenog R kvadrata koji se koristi za višestruku regresijsku analizu.

Nadalje u tablici 34 prikazana je analiza varijance, gdje je najbitnije vrijednost, vrijednost parametra „ $F^*$ “. Željena vrijednost tog parametra je 0,05, međutim u tablici 34, vrijednost istoimenog parametra je 1,6488, što sugerira izbor drugog nezavisnog parametra.

**Tablica 34. Analiza varijance**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Važnost F</i>
Regresijski	1	1736,933284	1736,9333	1,648848	0,28929995
Rezidualni	3	3160,26672	1053,4222		
Ukupno	4	4897,2			

**Tablica 35. Ishod regresijske analize**

	<i>Koeficijent</i>	<i>Standarda devijacija</i>	<i>t-oznaka</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>Ispod 95%</i>	<i>Iznad 95%</i>	<i>Ispod 95,0%</i>	<i>Iznad 95,0%</i>
<i>Konstanta</i>	455,3143	32,3236	14,086	0,0008	352,446	558,182	352,4462	558,1823
50	0,2540	0,1978	1,2841	0,2893	-0,3755	0,8836	-0,3755	0,8835

Tablicom 35 prikazana je jednadžba pravca jednostruke regresijske analize, koja glasi:

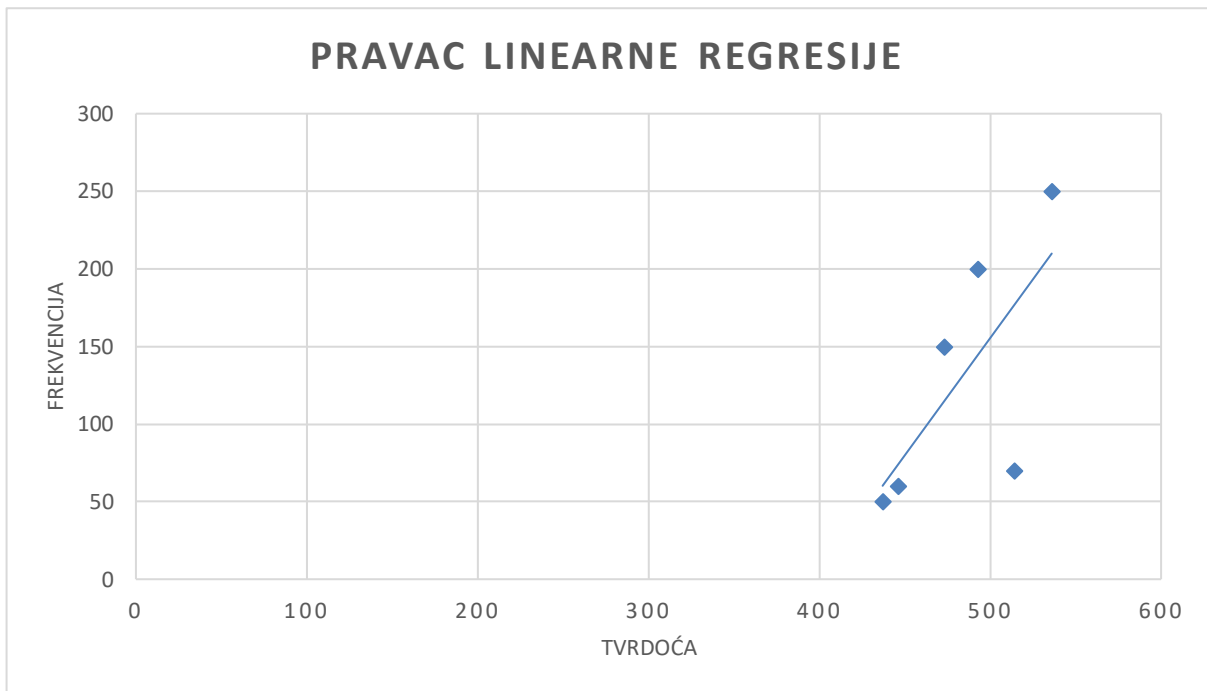
$$y = 0,254x + 50 \quad (1.8)$$

Nadalje ta ista jednadžba prikazana je slikom 42, te na njoj vidimo kako linearni pravac aproksimira vrijednosti tvrdoća za određene frekvencije u zoni 1 grupe 1.. U tablici 36 prikazane su vrijednosti procijenjenih iznosa tvrdoća, te je navedeno odstupanje između procijenjenih te izmjerenih tvrdoća.

**Tablica 36. Procijenjene vrijednosti tvrdoća te odstupanja od izmjerenih vrijednosti**

OSTALE VRIJEDNOSTI		
<i>Uzorak</i>	<i>Predviđena vrijednost zaostalih naprežanja</i>	<i>Odstupanje</i>
1	470,555	-24,555
2	473,095	40,905
3	493,416	-20,416
4	506,117	-13,117
5	518,817	17,183





**Slika 42. Pravac linearne regresije**

#### 4.8.3.2 Zona 2, grupa 1

Slijede rezultati zona 1, unutar iste grupe uzoraka. Tablicom 37. prikazani su rezultati regresijske statistike.

Paramterima u tablici 37 prikazano je kako je korelacije unutar druge zone između frekvencije i tvrdoće manje nego što je to bilo u zoni 1. U ovom slučaju korelacija je jednaka 0,340734, dok je u prošlom slučaju bila približno 0,6. Također je prikazano kako u samo 11% slučajeva vrijednosti padaju na regresijski pravac.

**Tablica 37. Regresijska statistika**

<i>Regresivna Statistika</i>	
višestruko R	0,3407339
R - Kvadrat	0,116099591
Prilagođeni R kvadrat	-0,178533879
Standardna pogreška	12,00070165
Broj uzoraka	5

Tablicom 38 prikazana je analiza varijance.

**Tablica 38. Analiza varijance**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Važnost F</i>
Regresijski	1	56,74948	56,74948	0,39405	0,57471
Rezidualni	3	432,05052	144,01684		
Ukupno	4	488,80000			

Iz tablice 39 ispisana je jednadžba pravca, koja glasi:

$$y = 0,046x + 50 \quad (1.9)$$

**Tablica 39. Ishod regresijske analize**

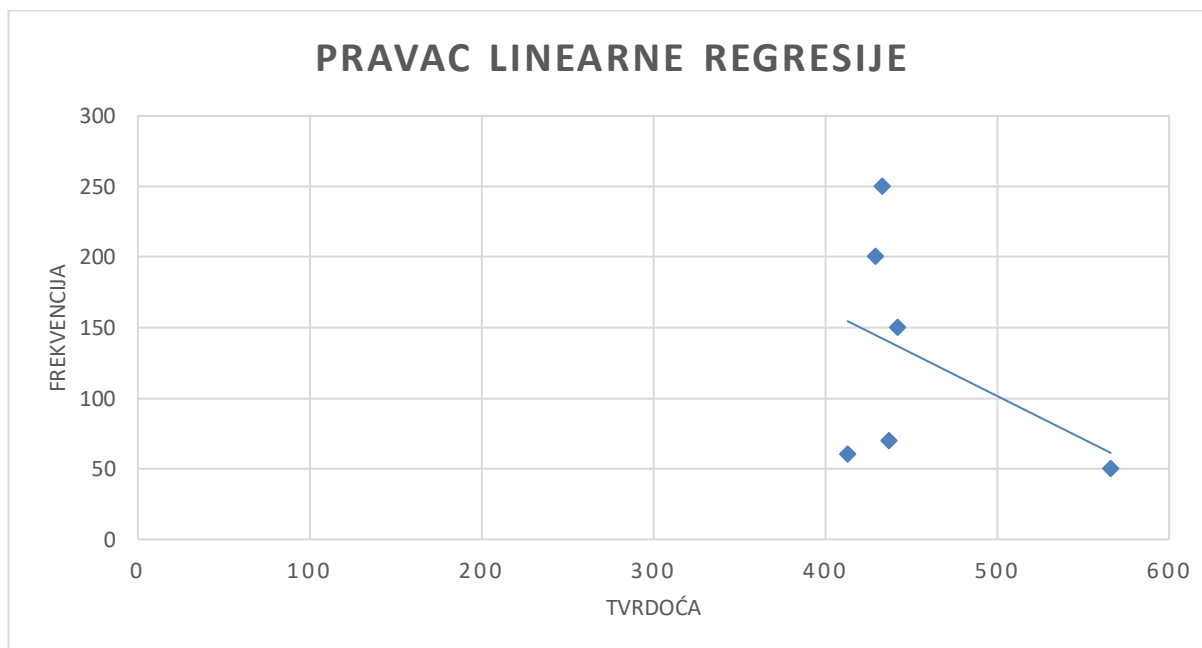
	<i>Koeficijent</i>	<i>Standarda devijacija</i>	<i>t-oznaka</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>Ispod 95%</i>	<i>Iznad 95%</i>	<i>Ispod 95,0%</i>	<i>Iznad 95,0%</i>
<i>Konstanta</i>	424,097	11,952	35,485	0,000	386,061	462,132	386,061	462,132
50	0,046	0,073	0,628	0,575	-0,187	0,279	-0,187	0,279

U tablici 40 prikazane su vrijednosti procijenjenih vrijednosti te odstupanje od izmjerene vrijednosti.

**Tablica 40. Procijenjene vrijednosti tvroća te odstupanja od izmjerenih vrijednosti**

OSTALE VRIJEDNOSTI		
<i>Uzorak</i>	<i>Predviđena vrijednost zaostalih naprezanja</i>	<i>Odstupanje</i>
1	426,851	-13,851
2	427,311	9,689
3	430,984	11,016
4	433,279	-4,279
5	435,575	-2,575

Jednadžba pravca iz tablice 39 prikazana je slikom 43.



Slika 43. Pravac linearne regresije

#### 4.8.3.3 Ostale analize grupe 1

Ostale regresijske analize za grupu 1 izrađene su te su rezultati vrlo slični kao za zone mjerenja 1 i 2, te stoga nisu uvrštene u ovaj rad. Komentari koji vrijede za zone 1 i 2 isto tako vrijede i za ostale zone, te stoga nije potrebno prikazivati tablice. Vrijednosti koje su dobivene odstupaju približno 20%, što znači da nikakvo novo te bitno saznanje nije otkriveno, već svi rezultati sugeriraju isti zaključak za grupu 1. Zaključak bi bio kako frekvencija u grupi 1 ne opisuje dovoljno dobro vrijednosti tvrdoća te da ovaj model regresijske analize nije preporučljivo koristiti za predviđanja vrijednosti tvrdoća.

#### 4.8.3.4 Zona 1, grupa 2

U tablici 41, prikazane su vrijednosti regresivne statistike za zonu 1 ispitnih uzoraka grupe 2. Također i u ovom primjeru prikazana su svojstva koja sugeriraju kako ni u grupi 2 nema bitnih korelacijskih odnosa između frekvencije i vrijednosti tvrdoće. Isto je prikazano i tablicom 42 u kojoj je provedena analiza varijance.

Tablica 41. Rezultati regresijske analize

<i>Regresivna Statistika</i>	
višestruko R	0,347847
R - Kvadrat	0,120997

Prilagođeni R kvadrat	-0,172
Standardna pogreška	46,30277
Broj uzoraka	5

**Tablica 42. Analiza varijance**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Važnost F</i>
Regresijski	1	885,3612	885,3612	0,412959	0,566209
Rezidualni	3	6431,839	2143,946		
Ukupno	4	7317,2			

Iz tablice 43 iščitana je jednadžba regresijskog pravca, koja glasi:

$$y = 0,1814x + 50 \quad (2.0)$$

Jednadžba regresijskog pravca prikazana je na slici 43.

**Tablica 43. Ishod regresijske analize**

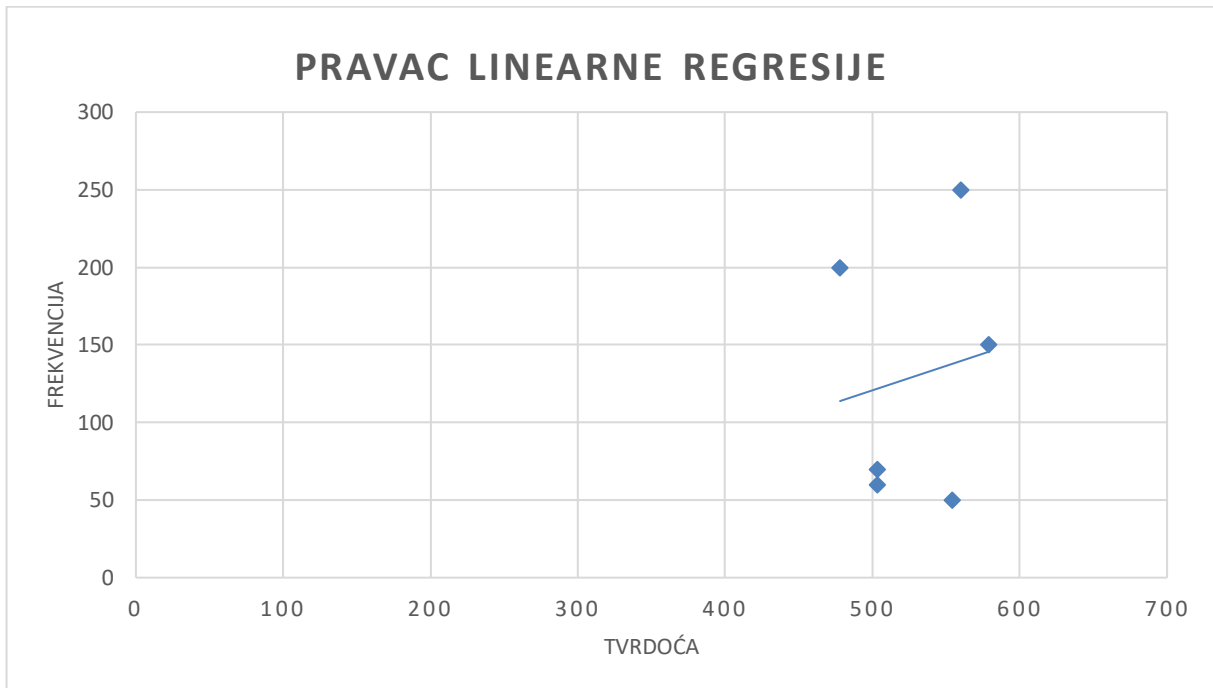
	<i>Koeficijent</i>	<i>Standardna devijacija</i>	<i>t-oznaka</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>Ispod 95%</i>	<i>Iznad 95%</i>	<i>Ispod 95,0%</i>	<i>Iznad 95,0%</i>
<i>Konstanta</i>	498,1226	46,113	10,802	0,0017	351,37	644,875	351,37	644,875
50	0,1814	0,2822	0,6426	0,5662	-0,7168	1,0795	-0,7168	1,0795

U tablici 44 prikazane su procjenjene vrijednosti tvrdoća te odstupanja procijenjenjih od izmjerenih vrijednosti.

**Tablica 44. Procijenjene vrijednosti tvrdoća te odstupanja od izmjerenih vrijednosti**

OSTALE VRIJEDNOSTI		
<i>Uzorak</i>	<i>Predviđena vrijednost zaostalih naprezanja</i>	<i>Odstupanje</i>
1	509,004	-6,004
2	510,817	-7,817
3	525,325	53,675
4	534,393	-56,393
5	543,461	16,539

Na slici 44, vidimo da pravac linearne regresije vrlo loše aproksimira dobivene vrijednosti tvrdoće.



**Slika 44. Pravac linearne regresije**

#### 4.8.3.5 Zona 3, gupa 1

U idućem koraku provedena je linearna regresijska analiza mjerne zone 3 za grupu 1. U tablici 45 navedeni su parametri regresijske statistike.

U tablici vidimo kako je u ovoj zoni parametar multipliciranog R nešto veći od 0,6 što znači da postoji određena korelacija između vrijednosti frekvencija i rezultata tvrdoća u zoni 3, no taj parametar je još uvijek vrlo male vrijednosti da bi se ovakav regresijski model mogao koristiti za predviđanja vrijednosti tvrdoća s promjenom frekvencije, a to dokazuje i parametar  $R^2$  kojim je prikazano da  $\approx 40\%$  vrijednosti pada na regresijski pravac.

**Tablica 45. Rezultati regresijske analize**

<i>Regresivna Statistika</i>	
višestruko R	0,635531
R - Kvadrat	0,4039
Prilagođeni R kvadrat	0,205199
Standardna pogreška	12,55107
Broj uzoraka	5

Tablicom 46, prikazana je analiza varijance, iz tablice je zaključeno kako je parametar „ $F$ “ značajno veće vrijednosti od one koja je preporučena a to je 0,05

**Tablica 46. Analiza varijance**

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Važnost F</i>
Regresijski	1	320,2116	320,2116	2,032709	0,249187
Rezidualni	3	472,5884	157,5295		
Ukupno	4	792,8			

Iz tablice 47 ispisana je jednačba pravca za dane vrijednosti frekvencija te tvrdoća. Jednačba glasi:

$$y = -0,109x + 50 \quad (2.1)$$

**Tablica 47. Ishod regresijske analize**

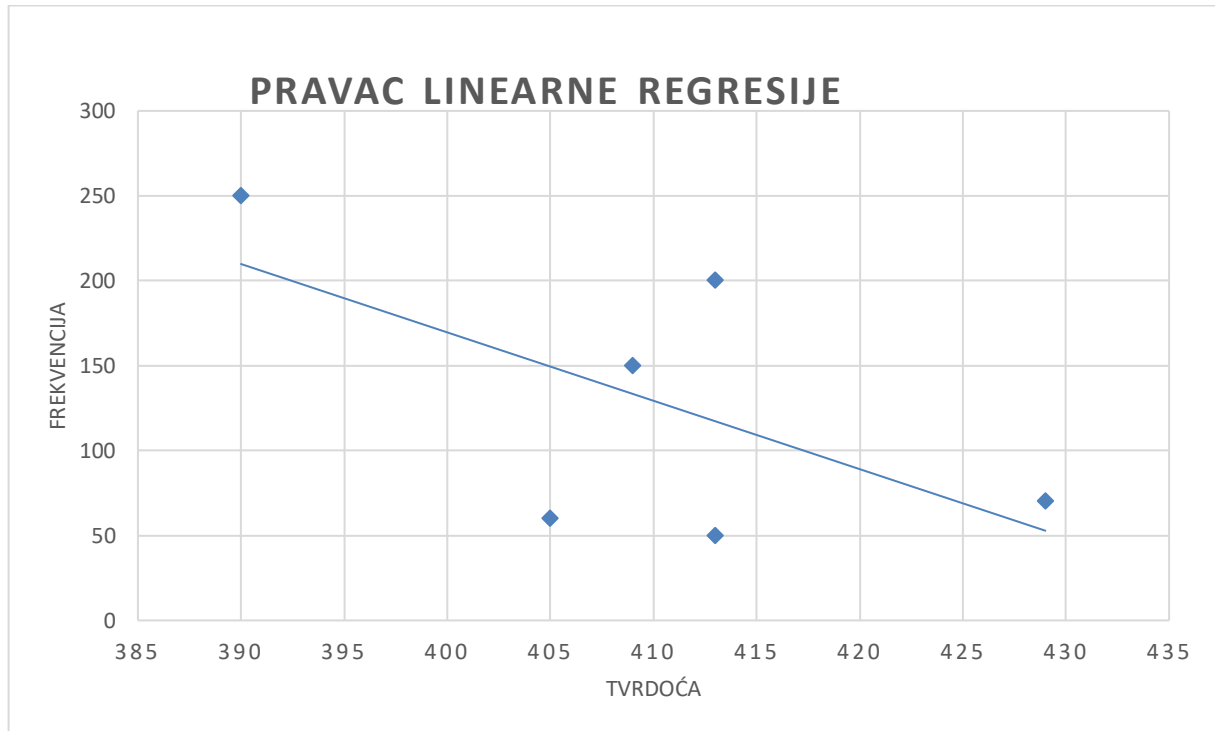
	<i>Koeficijent</i>	<i>Standardna devijacija</i>	<i>t-oznaka</i>	<i>P-vrijednost</i>	<i>Ispod 95%</i>	<i>Iznad 95%</i>	<i>Ispod 95,0%</i>	<i>Iznad 95,0%</i>
<i>Konstanta</i>	425,123	12,500	34,011	0,000	385,344	464,903	385,344	464,903
50	-0,109	0,076	-1,426	0,249	-0,353	0,134	-0,353	0,134

U tablici 48, navedene su procijenjene vrijednosti tvrdoća, te odstupanja od realnih, izmjerenih vrijednosti

**Tablica 48. Procijenjene vrijednosti tvrdoća te odstupanja od izmjerenih vrijednosti**

OSTALE VRIJEDNOSTI		
<i>Uzorak</i>	<i>Predviđena vrijednost zaostalih naprezanja</i>	<i>Odstupanje</i>
1	418,579	-13,579
2	417,489	11,511
3	408,764	0,236
4	403,311	9,689
5	397,857	-7,857

Na slici 45 prikazan je pravac linearne regresije za mjernu zonu 3, grupe ispitnih uzoraka 2.



Slika 45. Pravac linearne regresije

#### 4.8.3.6 Ostale analize grupe 2

Ostale regresijske analize za grupu 1 izrađene su te su rezultati vrlo slični kao za zone mjerenja 1 i 3. Rezultati dobiveni za zonu 4 su vrlo slični rezultatima zone 3, dok su ostali rezultati vrlo slično zoni 1. Rezultati nisu prikazani u radi zbog toga jer se pomoću njih ne može doći ni do kakvog bitnog zaključka koji već nije rečen, a to je da se frekvencijom kao nezavisnom varijablom tvrdoće opisuju nešto bolje no zaostala naprezanja, no i dalje nedovoljno dobro da bi se ovakvi modeli mogli koristiti za procjene bilo kakvih vrijednosti tvrdoća uz promjene frekvencije.

#### 4.8.3.7 Usporedba rezultata

Regresijskom analizom utvrđeno je kako je veza između frekvencije i tvrdoća slaba, odnosno da se s promjenom frekvencije u zadanom rasponu ne može procijeniti vrijednost tvrdoće.

U tablici 33. prikazane su vrijednosti koje su dobivene mjerenjem tvrdoća. Neke od navedenih vrijednosti značajno odskakuju od prosjeka, odnosno očekivanih vrijednosti, a to može biti posljedica slučajnih pogrešaka prilikom mjerenja, odnosno moglo se dogoditi da je vrhom

četverostrane prizme pogođena određena tvrda i krhka faza, koja ima značajno veću tvrdoću nego što bi ju trebao imati materijal.

Preko sume tvrdoća u određenoj zoni mjerenja vidimo kako tvrdoća opada s udaljavanjem od vrha metala zavara, odnosno može se vidjeti pad vrijednosti tvrdoća od zone 1, koja ima najveće gustoće, prosječno, do zone 6 gdje su tvrdoće najmanje, kao što je i očekivan ishod mjerenja.

Nadalje vidimo kako grupa 2 ima veće vrijednosti tvrdoće u zoni 1 te u zoni 6, dok grupa 1 ima veće vrijednosti tvrdoća u ostalim zonama. Vrijednosti nisu značajno veće u zonama 2, 3 i 4 već nekakvih  $\approx 10\%$ . Unutar zone 5 vrijednosti grupe 1 su značajno veće u prosjeku, te tada govorimo o otprilike 30% većim vrijednostima tvrdoća.

Vrijednosti tvrdoća za referentni uzorak su također navedeni u tablici 33. Zone 1, 2 i 6 su one u kojima su vrijednosti tvrdoća referentnog uzorka manje nego kod grupe 1 i 2, dok su u ostalim zonama vrijednosti tvrdoća veće.

Prema normi „HRN EN ISO 15614-1“ vrijednosti tvrdoća za materijale grupe 6 bi trebala biti manje od 380 vickersa, za silu mjerenja HV10. Navedena vrijednost prema normi vrijedi za iznose tvrdoća nakon toplinske obrade. Niti jedan od uzoraka nije podvrgnut toplinskoj obradi.

Niti jedan od uzoraka koji je zavarivan nema vrijedost ispod one propisane normom u svim zonama ispitivanja.



## 5. ZAKLJUČAK

TIG postupak zavarivanja je široko primjenjiv, ručni, postupak zavarivanja kod kojeg je elektroda netaljiva, te je izrađena od volframa, a dodatni se dodaje ručno u obliku šipke u talinu. Postupak također može biti mehaniziran i robotiziran, no kod ručnog postupka zavarivač ima velik utjecaj na kvalitetu spoja. Najveća prednost TIG postupka je odvojeno dodavanje dodatnog materijala, te mogućnost rada bez dodatnog materijala. Postupak prema normi „HRN EN ISO – 4063“ ima oznaku 141, u korištenje dodatnog materijala, te 142 kada govorimo o TIG postupku bez korištenja dodatnog materijala. Postupak ima vrlo malu proizvodnost te se rijetko primjenjuje za veće debljine od 6 mm. Moguće je zavarivati sve materijale, u svim položajima, izmjenično, istosmjernom ili pulsnom strujom. Izvori struje za TIG zavarivanje imaju CC strujnu karakteristiku.

P91 je čelik koji se označava kao „X10CrMoVNb9-1“ prema tehničkom izvještaju „CEN ISO TR 20173“, a prema drugom tehničkom izvještaju „ISO/TR 15608“, spada u grupu materijala 6.4 prema svom kemijskom sastavu. Radi se o čeliku koji ima feritno – martenzitnu mikrostrukturu što za posljedicu ima da je vrlo tvrd i krhak i uslijed zavarivanja može doći do zakaljenja strukture te do hladnih pukotina pri hlađenju, kako bi se to izbjeglo, P91 čelik je obavezno nakon zavarivanja podvrgnut toplinskoj obradi u svrhu prevencije mogućih pukotina.

U eksperimentalnom dijelu rada, TIG postupkom zavarivanja su izvedeni navari na cijevima promjera 60,33 mm, te debljine stijenke 8,74 mm. Na osnovnom materijali izvedeno je pretaljanje TIG postupkom bez dodatnog materijala, izmjeničnom strujom, uz promjene balansa i frekvencije. Promjenom balansa pokušano je smanjivanje unosa topline, uz istovremeno zadovoljavajuću protaljivost, te bez naljepljivanja, dok se promjenom frekvencije nastojalo vibrirati materijal, te tako smanjiti zaostala naprezanja te tvrdoće.

Na osnovnom materijali napravljeno je 13 uzoraka, od koji je jedan referentni, koji je izveden istosmjernom strujom s negativno nabijenom elektrodom. Uzorci su podijeljeni u dvije grupe prema razlici balansa. Balans za grupu 1 je bio -20, što označava 10% više vremena negativno nabijenu elektrodu, dok je kod grupe 2 balans bio 50:50. Frekvencije su postavljene na 6 različitih vrijednosti, redom: 50, 60, 70, 150, 200, 250 Hz. Nakon što su uzorci pretaljeni, izrezani su prsteni sa sredine uzoraka, širine 25 mm. Prstenovi su ručno brušeni, polirani, nakon poliranja su izmjerena zaostala naprezanja. Nakon zaostalih naprezanja, prsteni su elektrokemijski nagrizeni u oksalnoj kiselini, te su uslikani makroizbrusci, te su na kraju izmjerene vrijednosti tvrdoće.

Zaostala naprezanja su zabilježena te su na rezultatima za pojedine zone i grupe provedene linearne regresijske analize. Vrijednosti zaostalih naprezanja koje su prikazane kao zavisna varijabla nisu značajno ovisile o frekvenciji koja je bila nezavisna varijabla. Regresijska analiza pokazala je kako nije moguće dobro predvidjeti vrijednosti zaostalih naprezanja uz promjenu frekvencije u zadanom rasponu frekvencija. Ovakav rezultat moguće je opravdati nesigurnostima te mogućim greškama prilikom mjerenja. Zone mjerenja definirane, no pozicioniranje mjernog uređaja u određene zone je izvođen ručno, što sugerira mogućnost pogreške prilikom pozicioniranja. Također je potrebno u obzir uzeti mogućnost refleksije te hrapavosti i čistoće površine.

Nakon obrade rezultata zaostalih naprezanja, uspoređene slike makroizbrusaka, koje su prethodno elektrokemijski nagrizene u oksalnoj kiselini. Na slikama makroizbrusaka uspoređene su vrijednosti protaljivanja, širine zavara, te širine ZUT – a, te na njima nije bilo značajnih razlika, ili se one nisu mogle uzeti kao relevantne jer su se pri zavarivanju pojedinih uzoraka javljale nestabilnosti u procesu koje su uzrokovale geometrijske nepravilnosti.

Posljednje ispitivanje koje je provedeno je mjerenje tvrdoće. Na rezultatima mjerenja je također provedena regresijska analiza. Regresijskom analizom utvrđena je nešto veća povezanost vrijednosti frekvencije i vrijednosti tvrdoća, međutim ta povezanost je ocijenjena kao nedovoljna da bi se adekvatno moglo predviđati vrijednosti tvrdoće s promjenom značajke frekvencije. Nadalje prema normi „HRN EN ISO 15614-1“ vrijednost tvrdoća nakon toplinske obrade za grupu materijala 6 bi trebala biti ispod 350 vickersa, za mjernu silu HV10 koja je i primijenjena tijekom mjerenja. Izmjerene vrijednosti tvrdoća su više u pojedinim zonama mjerenja kod svih zavara te je iz toga zaključeno da bi se parametri zavarivanja trebali dodatno mijenjati kako bi se postigla zadovoljavajuća tvrdoća.

Vlastitu frekvenciju materijala na temelju koje se provodi vibracijsko popuštanje temelji se na vlastitoj frekvenciji materijala koja ovisi o mnogo parametara koji se mijenjaju s promjenom temperature koja je prisutna u zavarivanju. Vibriranje je moguće uspješno provesti s određenim frekvencijama nakon zavarivanja dok je radni komad hladan. Međutim, kada se komad zagrijava, uslijed zavarivanja, vlastita frekvencija se mijenja, te ju je jako teško, do nemoguće, mjeriti. Također u obzir treba uzeti i točnosti mjerenja kod ovakvih vrlo delikatnih promjena parametara te obilježja materijala koji se zavaruje.

Budući da je određivanje vlastite frekvencije pri promjeni temperature vrlo kompleksno, zbog same promjene određenih svojstava u materijalu, te kada se još u obzir uzme da u zavarivanju postoje određena toplinska polja, a samim time i više različitih vlastitih frekvencija u ovisnosti

o udaljenosti od središta zavarivanja, ovakvo ispitivanje zahtijeva puno detaljniji i opsežniji pristup.

Kada bi se uspjelo pronaći vrijednost frekvencije pri kojoj bi se P91 čelik istovremeno mogao zavarivati izmjeničnom strujom s povoljnim balansom, kojim ne bi došlo do naljepljivanja, ovakav način zavarivanja bi omogućio velike uštede te olakšavanje izvedbe zavarenih spojeva zahtijevane kvalitete i svojstava. Također bi se adekvatnom vrijednošću balansa smanjio i unos topline, čime bi se dodatno smanjila i zaostala naprezanja

## LITERATURA

- [1] Samardžić, I.: Proizvodne tehnologije - Nastavni materijali, Visoka tehnička škola u Bjelovaru, 2014.
- [2] <https://hrcak.srce.hr/file/194405>
- [3] <https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780857095107500069-f06-01-9780857095107.gif>
- [4] Weman, K.: Welding processes handbook, 2nd Edition, Woodhead Publishing Ltd, 2012
- [5] Lucas, W.: TIG and Plasma Welding Process Techniques, Recommended Practices and Applications-Woodhead Publishing, 1990.
- [6] <https://d347awuzx0kdse.cloudfront.net/weldclassaws/content-image/TIG%20Welding%20Process.jpg>
- [7] [https://www.1stopweldingshop.com/imagecache/ee599158-2a01-4768-906b-a8f10106c023/Masterweld-AWT300-Autofeed-TIG-Torch\\_1000x514.jpg](https://www.1stopweldingshop.com/imagecache/ee599158-2a01-4768-906b-a8f10106c023/Masterweld-AWT300-Autofeed-TIG-Torch_1000x514.jpg)
- [8] <https://cdn.thefabricator.com/a/robotic-gtaw-or-gmaw-no-longer-a-clear-cut-choice-gtaw-technology-advancements.jpg>
- [9] Živčić, M.: Tig zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, broj 1., 1985.
- [10] <https://www.zavarivanje.info/Repository/Images/SmallImages/literatura-zavarivanje-gallery09.jpg>
- [11] <https://tsi.webador.com/tois-2-1-2-tig-postupak>
- [12] <https://docplayer.net/93894998-Prirucnik-iz-kolegija-strojevi-i-oprema-za-zavarivanje.html>
- [13] <https://hrcak.srce.hr/file/207543>
- [14] <https://f.eu1.jwwb.nl/public/j/g/k/temp-iabtoyqffmcftyayjogp/oue0zn/TIG-strujazavarivanja-1.png>
- [15] <https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A5718/datastream/PDF/view>
- [16] <https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A6051/datastream/PDF/view>
- [17] [https://blog.perfectwelding.fronius.com/wp-content/uploads/2021/08/AC\\_Kurvenformen\\_EN-1024x617.jpg](https://blog.perfectwelding.fronius.com/wp-content/uploads/2021/08/AC_Kurvenformen_EN-1024x617.jpg)
- [18] <https://3.imimg.com/data3/DX/WF/MY-3619251/gtaw-tig-torch-air-cooled-500x500.jpg>
- [19] <http://www.halversoncts.com/75-gtaw-torches.html>
- [20] Cary, H. B. ; Helzer, S.C.: Modern welding technology. Upper Saddle River, New Jersey, 2005.
- [21] [https://www.ewm-group.com/images/Fachwissen/wig/farbe\\_wolframelektroden.jpg](https://www.ewm-group.com/images/Fachwissen/wig/farbe_wolframelektroden.jpg)

- [22] <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/arcwelding/guidelines-for-tungsten-electrodes>
- [23] [https://www.gcegroupp.com/files/technical-datasheets/INDUSTRIAL/accessories/Preparing\\_the\\_Electrode\\_Tip\\_EN.pdf](https://www.gcegroupp.com/files/technical-datasheets/INDUSTRIAL/accessories/Preparing_the_Electrode_Tip_EN.pdf)
- [24] [https://www.welding.com.au/assets/docs/Image-Library/Filler\\_Metals/TIG\\_Tungsten\\_Preparation.jpg](https://www.welding.com.au/assets/docs/Image-Library/Filler_Metals/TIG_Tungsten_Preparation.jpg)
- [25] [https://www.researchgate.net/figure/presents-the-appropriate-processing-mode-of-the-tungsten-electrode-and-the-effect-of-the\\_fig2\\_327730740](https://www.researchgate.net/figure/presents-the-appropriate-processing-mode-of-the-tungsten-electrode-and-the-effect-of-the_fig2_327730740)
- [26] [https://www.gcegroupp.com/files/technical-datasheets/INDUSTRIAL/accessories/Preparing\\_the\\_Electrode\\_Tip\\_EN.pdf](https://www.gcegroupp.com/files/technical-datasheets/INDUSTRIAL/accessories/Preparing_the_Electrode_Tip_EN.pdf)
- [27] <https://www.assda.asn.au/blog/311-shielding-gases-for-welding-and-their-effects-on-stainless-steel-properties>
- [28] ASM International Handbook Committee: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials park, 1993.
- [29] <https://repozitorij.unizg.hr/islandora/object/fsb:2855/datastream/PDF/download>
- [30] <https://www.uniquewelding.com/image/TIG-Welding-Wire.jpg>
- [31] <https://www.protem-gmbh.de/upload/elfinder/Publications-presse/imt.pdf>
- [32] <http://www.metalspiping.com/t91-p91-steel.html>
- [33] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/grade-91-steel>
- [34] Study of Modified 9Cr-1Mo Welds, Xiaotian Li, M. T. Cabrillat, Y. Lejeail, Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, China CEA Cadarache, DEN/DER/SESI, France
- [35] The T91/P91 Book, Vallourec & Mannesmann Tubes, 1999
- [36] [https://www.kemppi.com/en-US/offering/family/mastertig/?utm\\_term=mastertig%20235&utm\\_campaign=PPC:+EU+AU+NZ+%7C+Website,+Brands+%7C+Search&utm\\_source=adwords&utm\\_medium=pc&hsa\\_acc=5588499507&hsa\\_cam=16888958131&hsa\\_grp=130728257890&hsa\\_ad=592953393017&hsa\\_src=g&hsa\\_tgt=kwd-1189633156303&hsa\\_kw=mastertig%20235&hsa\\_mt=p&hsa\\_net=adwords&hsa\\_ver=3&gclid=CjwKCAjwTlaVBhBkEiwAsr7-c2Cc3u86OSCX2-zivvi8NSEq2Xz7A5o36G6YKh9ArvsFYu5mc8bLzxoC5pEQAvD\\_BwE](https://www.kemppi.com/en-US/offering/family/mastertig/?utm_term=mastertig%20235&utm_campaign=PPC:+EU+AU+NZ+%7C+Website,+Brands+%7C+Search&utm_source=adwords&utm_medium=pc&hsa_acc=5588499507&hsa_cam=16888958131&hsa_grp=130728257890&hsa_ad=592953393017&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-1189633156303&hsa_kw=mastertig%20235&hsa_mt=p&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=CjwKCAjwTlaVBhBkEiwAsr7-c2Cc3u86OSCX2-zivvi8NSEq2Xz7A5o36G6YKh9ArvsFYu5mc8bLzxoC5pEQAvD_BwE)
- [37] <https://www.usmetals.com/alloy-pipe-seamless-p91.html>
- [38] [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjBmv\\_zh6v4AhWCDewKHUUGAw8QFnoECAMQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.nic](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjBmv_zh6v4AhWCDewKHUUGAw8QFnoECAMQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.nic)

- [kelalloys.com.br%2FMetrode%2520CD%25202011%2FA-17%2520%2520p91%2520%2520rev%252015.pdf&usg=AOvVaw3OBm4uKJ0gJRK7cKjo2H8l](http://kelalloys.com.br%2FMetrode%2520CD%25202011%2FA-17%2520%2520p91%2520%2520rev%252015.pdf&usg=AOvVaw3OBm4uKJ0gJRK7cKjo2H8l)
- [39] The  $\cos\alpha$  method for X-ray residual stress measurement using two-dimensional detector, Keisuke Tanaka, Nagoya Industrial Science Research Institute 1-13, Yotsuya-dori, Chikusa-ku, Nagoya 464-0819, Japan.
- [40] <https://learnmetallurgy.com/study/mechanical/topic/tensor.php>
- [41] [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRFWyx1CisvthhGnDy4B4\\_IUhInSNG\\_yOso-XzoQE0NKMMpqChG0XIGDu6ZMJrrpavsd&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRFWyx1CisvthhGnDy4B4_IUhInSNG_yOso-XzoQE0NKMMpqChG0XIGDu6ZMJrrpavsd&usqp=CAU)
- [42] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cb/FWHM.svg/800px-FWHM.svg.png>
- [43] <https://www.ablebits.com/office-addins-blog/linear-regression-analysis-excel/>
- [44] [https://www.researchgate.net/profile/George-Quinn/publication/229752025\\_Fracture\\_Toughness\\_of\\_Ceramics\\_by\\_the\\_Vickers\\_Indentation\\_Crack\\_Length\\_Method\\_A\\_Critical\\_Review/links/5a7b6148aca27233575b11f3/Fracture-Toughness-of-Ceramics-by-the-Vickers-Indentation-Crack-Length-Method-A-Critical-Review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/George-Quinn/publication/229752025_Fracture_Toughness_of_Ceramics_by_the_Vickers_Indentation_Crack_Length_Method_A_Critical_Review/links/5a7b6148aca27233575b11f3/Fracture-Toughness-of-Ceramics-by-the-Vickers-Indentation-Crack-Length-Method-A-Critical-Review.pdf)
- [45] <https://docplayer.rs/docs-images/109/186468033/images/22-1.jpg>
- [46] Državni zavod za mjeriteljstvo: Metalni materijali, Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu, provjeravanje ispitnih uređaja, Narodne novine, Zagreb, 1999

## **PRILOG**

- I. CD-R disk