Modaliteti parametrizacije moderne opreme za TIG zavarivanje

Liber, Mario

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:136452

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mario Liber

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.
Dr. sc. Maja Jurica, mag. ing.

Student:

Mario Liber

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću, asistentici Maji Jurici, dr. sc. te djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Mario Liber

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 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARIO LIBER** Mat. br.: 0035197341

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modaliteti parametrizacije moderne opreme za TIG zavarivanje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modalities of parametrization at modern TIG welding equipment**

Opis zadatka:

Na temelju dostupne literature detaljno opisati modalitete TIG postupaka zavarivanja kao i značajke moderne opreme. Navesti specifičnosti i razne inačice postupka koje su razvijene kao odgovor na zahtjev industrije sa stanovišta precizne regulacije unesene topline i utjecaja na geometriju zavara te usporediti s konvencionalnim TIG zavarivanjem. Posebno analizirati parametrizaciju intenziteta i valnog oblika struje zavarivanja. Dati primjere primjene takvih modaliteta u zavarivačkoj proizvodnji.
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je na odgovarajućoj opremi za TIG zavarivanje osmisliti plan pokusa kojim je moguće dokazati komparativne prednosti modaliteta podešavanja struje te definirati glavne utjecajne parametre. Analizirati operativne značajke moderne opreme za TIG zavarivanje i svrsishodnost za praktičnu primjenu. Na temelju dobivenih podataka potrebno je ocijeniti utjecaj variranih parametara na geometriju zavarenog spoja i dati preporuke za različite kombinacije debljina i osnovnih materijala.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
30. travnja 2020.	2. srpnja 2020.	6. srpnja do 10. srpnja 2020.

Zadatak zadao:	Komentor:	Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Ivica Garašić	dr. sc. Maja Jurica	prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA..... V

POPIS KRATICA.....VI

SAŽETAK.....VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

2. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA 2

2.1. Osnove TIG zavarivanja 2

2.2. Princip rada TIG zavarivanja 5

2.3. Oprema za TIG zavarivanje 7

2.3.1. Izvori struje za TIG zavarivanje 8

2.3.1.1. Vrste električne struje za TIG zavarivanje..... 10

2.3.1.2. Uporaba visokonaponske i visokofrekventne izmjenične struje..... 13

2.3.1.3. Zavarivanje impulsnim strujama 14

2.3.2. Pištolj za zavarivanje..... 17

2.3.2.1. Sapnica pištolja za zaštitni plin..... 18

2.3.3. Volframova netaljiva elektroda 20

2.3.3.1. Priprema elektrode 22

2.3.4. Rashladni sustav i sustav za dovod zaštitnog plina 24

2.3.5. Zaštitni plin..... 25

2.3.5.1. Fizikalne karakteristike zaštitnog plina..... 25

2.3.5.2. Svojstva nekih zaštitnih plinova..... 26

2.3.5.3. Primjena zaštitnih plinova u ovisnosti o materijalu obratka 29

2.3.6. Dodatni materijali za zavarivanje..... 30

2.4. Varijante TIG postupaka zavarivanja.....32

2.4.1. FC – TIG i A – TIG..... 32

2.4.2. TIP – TIG zavarivanje..... 33

2.4.3. K – TIG zavarivanje..... 36

2.4.4. Orbitalno TIG zavarivanje..... 36

3. EKSPERIMENTALNI DIO 38
3.1. Oprema i izvor struje za zavarivanje..... 38
3.2. Osnovni materijal i njegova priprema..... 40
3.3. Izbor volframove elektrode i zaštitnog plina 42
3.4. Parametri navarivanja 43
3.5. Analiza i rezultati navarivanja 47
3.6. Izrada i priprema makrouzoraka 52
3.7. Analiza geometrijskih značajki makrouzoraka 55
3.8. Utjecaj parametara navarivanja na geometrijske značajke makrouzoraka 62
3.9. Rezultati makroanalize..... 66
4. ZAKLJUČAK..... 68
LITERATURA..... 69

POPIS SLIKA

Slika 1. Pojednostavljeni shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [2] 2
Slika 2. Načini izvođenja TIG postupka zavarivanja [4] 3
Slika 3. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [5] 5
Slika 4. Područja električnog luka kod TIG zavarivanja [5] 6
Slika 5. Oprema za ručno TIG zavarivanje [6] 7
Slika 6. Uspostavljanje električnog luka uz pomoć VF generatora [9] 8
Slika 7. Strmopadajuća (CC) karakteristika izvora struje za ručno TIG zavarivanje [7] 9
Slika 8. Vrste valova izmjenične struje [11] 12
Slika 9. Usporedba utjecaja frekvencije na profil zavara [11] 13
Slika 10. Osnovne karakteristike različitih pravokutnih impulsnih oblika [11] 15
Slika 11. Presjek pištolja za ručno TIG zavarivanje [14] 17
Slika 12. Najčešće korištene izvedbe sapnica [16] 18
Slika 13. Ovisnost protoka zaštitnog plina o obliku sapnice [17] 19
Slika 14. Zaobljeni i zašiljeni vrh volframove elektrode [22] 22
Slika 15. Ispravno i neispravno brušenje volframove elektrode [24] 23
Slika 16. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina [10] 28
Slika 17. Dodatni materijal za ručno i automatizirano TIG zavarivanje [28] 31
Slika 18. Usporedba penetracije između TIG, FC–TIG i A–TIG s punom žicom [29] 33
Slika 19. Shematski prikaz gibanja dodavača žice kod TIP TIG zavarivanja [31] 34
Slika 20. Usporedba TIP–TIG postupka s vrućom i hladnom žicom [31] 35
Slika 21. K – TIG zavarivanje [37] 36
Slika 22. Orbitalno – TIG zavarivanje cijevi [35] 37
Slika 23. Uređaj za TIG zavarivanje – „Tetrix 230 Comfort 2.0 puls“ [32] 38
Slika 24. Radna jedinica za automatizaciju procesa TIG zavarivanja – „Bug-o Systems“ .. 39
Slika 25. Ispitivanje kemijskog sastava ploče AISI 304 (Olympus XRF) 41
Slika 26. Izrezane ispitne pločice od osnovnog materijala 41
Slika 27. Zaštitni plin – Argon 4.8 42
Slika 28. Serija uzoraka A – rezultati navarivanja 48
Slika 29. Serija uzoraka B – rezultati navarivanja 49
Slika 30. Serija uzoraka C – rezultati navarivanja 50

Slika 31. Serija uzoraka D – rezultati navarivanja 51
Slika 32. Tračna pila i postupak izrade makrouzoraka..... 52
Slika 33. Uređaj za grubo brušenje „Struers LaboPol6“ 53
Slika 34. Uređaj za fino poliranje „Phoenix Alpha Grinder“ 53
Slika 35. Izgled makrouzoraka 53
Slika 36. Elektrokemijsko nagrizanje makrouzoraka 54
Slika 37. Snimanje makrouzoraka i obrada snimki 55
Slika 38. Makrouzorci serije A – utjecaj frekvencije 56
Slika 39. Makrouzorci serije B – utjecaj balansa 57
Slika 40. Makrouzorci serije C – utjecaj vršne struje..... 58
Slika 41. Makrouzorci serije D – utjecaj osnovne struje..... 59
Slika 42. Usporedba geometrijskih značajki navara svih makrouzoraka 60
Slika 43. Utjecaj različitih parametara navarivanja na širinu navara 62
Slika 44. Utjecaj različitih parametara navarivanja na penetraciju navara 63
Slika 45. Utjecaj različitih parametara navarivanja na širinu zone utjecaja topline..... 64
Slika 46. Utjecaj različitih parametara navarivanja na unos topline 65

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja [2] 4
Tablica 2. Karakteristike vrste i polariteta struje kod TIG zavarivanja [10]..... 10
Tablica 3. Označavanje volframovih elektroda [1]..... 20
Tablica 4. Koeficijenti opterećenja različitih vrsta volframovih elektroda [21]..... 23
Tablica 5. Karakteristike zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [10] 28
Tablica 6. Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje „Tetrix 230 puls“ [32]..... 40
Tablica 7. Rezultati XRF analize – kemijski sastav ploče AISI 304 41
Tablica 8. Parametri navarivanja prve serije uzoraka A – utjecaj frekvencije..... 43
Tablica 9. Parametri navarivanja druge serije uzoraka B – utjecaj balansa..... 44
Tablica 10. Parametri navarivanja treće serije uzoraka C – utjecaj vršne struje..... 45
Tablica 11. Parametri navarivanja četvrte serije uzoraka D – utjecaj osnovne struje..... 46
Tablica 12. Prikaz postavljenih i realnih vrijednosti parametri navarivanja..... 45
Tablica 13. Prikaz izračunatih vrijednosti parametara navarivanja 47
Tablica 14. Izmjerene dimenzije navara makrouzoraka..... 61

POPIS KRATICA

A–TIG	TIG postupak zavarivanja s aktivacijskim premazom
AC	Izmjenična struja (engl. Alternating Current)
Ar	Argon
CAD	Oblikovanje s pomoću računala (engl. Computer Aided Design)
CAM	Proizvodnja s pomoću računala (engl. Computer Aided Manufacturing)
CC	Strmopadajuća (statička) karakteristika izvora struje (engl. Constant Current)
Cr	Krom
CV	Ravna karakteristika izvora struje (engl. Constant Voltage)
DC	Istosmjerna struja (engl. Direct Current)
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška (engl. Submerged Arc Welding, SAW)
FC–TIG	TIG metoda zavarivanja koja koristi praškom punjene žice
FCAW	Ručno elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitom praška (engl. Flux Cored Arc Welding)
He	Helij
Hz	Herc – mjerna jedinica za frekvenciju
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina (engl. Metal Active Gas)
Ni	Nikal
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje (engl. Manual Metal Arc Welding, MMAW)
Th	Torij
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. Tungsten Inert Gas)
TIP–TIG	TIG postupak zavarivanja s hladnom i vrućom žicom
W	Volfram
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U teorijskom dijelu opisan je TIG postupak zavarivanja te potrebna oprema i parametri koji se koriste kod ove vrste zavarivanja. Detaljnije su objašnjene modificirane vrste TIG zavarivanja s naglaskom na impulsno i visokofrekventno TIG zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu rada osmišljen je pokus kojim su se dokazale prednosti modaliteta podešavanja struje. Navareno je dvanaest uzoraka različitim parametrima zavarivanja. Ispitani su utjecaji određenih parametara na stabilnost procesa, produktivnost i geometrijske značajke zavara. Na dobivenim uzorcima provedena je analiza profila: zona utjecaja topline, penetracija, širina i oblik, te su međusobno uspoređeni i prikazani grafički i tablično. Temeljem dobivenih rezultata eksperimentalnog rada donesen je zaključak o primjenjivosti TIG postupka zavarivanja i njegovih inačica.

Ključne riječi: Modaliteti TIG zavarivanja, TIG zavarivanje, TIG impulsno zavarivanje

SUMMARY

The theoretical part describes the TIG welding process and the necessary equipment and parameters used in this type of welding. Modified types of TIG welding are explained in more detail with emphasis on pulsed and high frequency TIG welding.

In the experimental part of the paper, an experiment was devised which proved the advantages of the current adjustment modality. Twelve samples were welded with different welding parameters. The influences of certain parameters on process stability, productivity and geometric characteristics of welds were examined. On the obtained samples, the analysis of the profile was performed: heat affected zone, penetration, width and shape, and they were compared and presented graphically and tabularly. Based on the obtained results of the experimental work, a conclusion was made on the applicability of the TIG welding process and its variants.

Key words: TIG welding modalities, TIG welding, TIG pulse welding

1. UVOD

Zavarivanje je tehnika spajanja dva ili više, istorodna ili raznorodna materijala tako da se dobije homogen zavareni spoj. Takav zavareni spoj može se postići taljenjem ili pritiskom uz korištenje dodatnog materijala. Od postupaka zavarivanja zahtijeva se da u eksploatacijskim uvjetima, kao što su visoke i niske temperature, agresivni okolni mediji, udarna i dinamička opterećenja, osiguraju dovoljnu kvalitetu spoja uz najniže moguće troškove [1].

Zavarivački se postupci dijele prema izvoru ili načinu prijenosa energije koja se pretvara u toplinu potrebnu za ostvarenje spoja. Izvori se razlikuju prema snazi, količini topline koja se unosi u osnovni materijal, najvećoj radnoj temperaturi i gustoći toplinskog toka. Iako broj različitih postupaka zavarivanja s napretkom tehnologije raste, najveći se dio proizvodnje zavarivanjem obavlja primjenom samo nekoliko postupaka. To su elektrootporno zavarivanje i elektrolučno zavarivanje (zavarivanje obloženom elektrodom, taljivom ili netaljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi i zavarivanje pod praškom). Većina tih postupaka zavarivanja danas je automatizirana i/ili robotizirana te svoju primjenu pronalaze u velikoserijskim proizvodnjama, primjerice u automobilskoj industriji. U ovom radu opisat će se zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u inertnoj atmosferi poznato pod nazivom TIG (engl. *Tungsten Inert Gas*). TIG zavarivanje razvilo se u avionskoj industriji iz potrebe za zavarivanjem lakih konstrukcija napravljenih od aluminija i magnezija. Prvo zavarivanje slično današnjem TIG postupku izveli su H.M. Hobart i P.K Devers 1930. godine u komori ispunjenoj inertnim plinom. Jedanaest godina kasnije V.H. Pavlecka i Russel Meredith dizajnirali su prvi TIG pištolj za zavarivanje, a 1942. godine u tvrtki Northrop Aircraft patentiran je tzv. Heliarc proces zavarivanja specijaliziran za zavarivanje magnezijevih legura pod zaštitnim plinom helija [1].

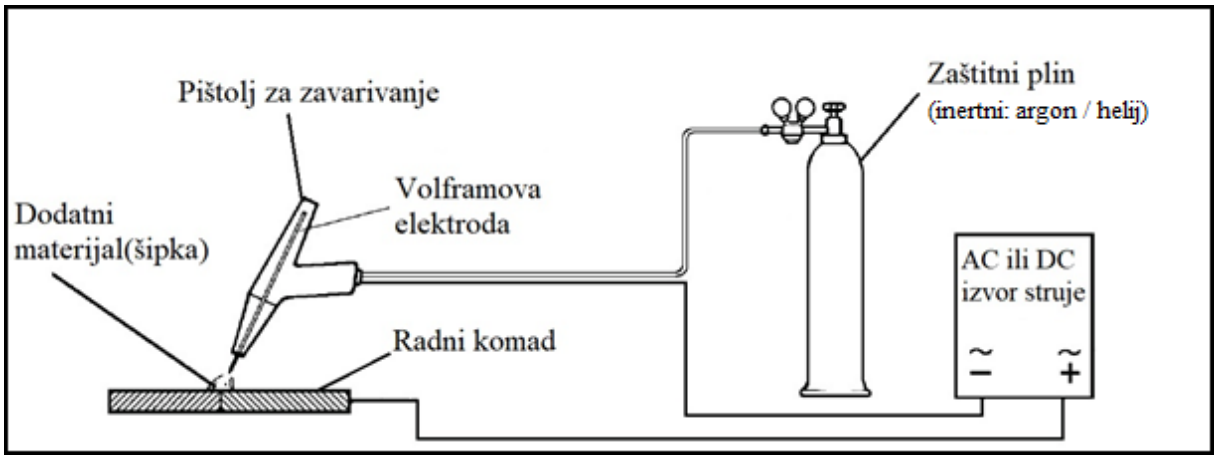
U početku se TIG postupak koristio samo za zavarivanje lakih metala, a danas je njegova uporaba raširenija te se ovaj postupak primjenjuje za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura, magnezijevih i bakrenih legura, nehrđajućih čelika, titana i mnogih drugih [1].

2. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

TIG zavarivanje, poznat i po nazivu GTAW (engl. *Gas Tungsten Arc Welding*), je elektrolučni postupak zavarivanja koji koristi netaljivu volframovu elektrodu pod zaštitom inertnog plina. Svojstvo ovog postupka je stabilan električni luk i visoko kvalitetan zavar. U usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja ovaj je postupak relativno spor, te zahtjeva izuzetne vještine zavarivača [1].

2.1. Osnove TIG zavarivanja

TIG postupak zavarivanja započinje uspostavom električnog luka između netaljive volframove elektrode i radnog komada. Cijeli proces zavarivanja, uključujući talinu metala zavara, električni luk i dodatni materijal je pod zaštitom inertnog plina (najčešće argon ili helij) koji se dovodi kroz plinsku sapnicu na vrhu pištolja za zavarivanje u kojem se nalazi netaljiva volframova elektroda. Pojednostavljeni prikaz TIG procesa zavarivanja prikazan je slikom 1. TIG zavarivanje može biti s punim dodatnim materijalom, tzv. šipkom (oznaka procesa 141 prema HRN EN ISO 4063) ili autogeno, bez dodatnog materijala (oznaka procesa 142 prema HRN EN ISO 4063). Zavaruje se obično ručno, a u procesima kao što je robotsko zavarivanje cijevi sve se češće koristi polu-automatizacija i potpuna automatizacija postupka [2].



Slika 1. Pojednostavljeni shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [2]

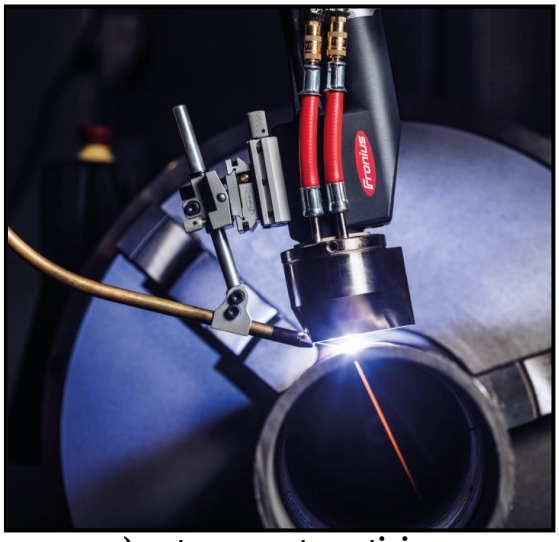
Kod ručnog postupka zavarivač pomiče pištolj i u prednji rub taline u pravilnim vremenskim razmacima dodaje dodatni materijal, slika 2.a. Polu-automatizirani postupak je vrlo sličan ručnom postupku, osim što se dodatni materijal dodaje iz dodavača žice uz pomoć elektromotora, slika 2b. Potpuno automatizirani TIG postupak se primjenjuje u serijskoj proizvodnji gdje se pištolj za zavarivanje stavlja na robotsku ruku koja je numerički programirana pomoću adekvatnog CAD/CAM sučelja, slika 2.c. Preko upravljačkog računala može se nadzirati proces i mijenjati ključne parametre zavarivanja kao što su: brzina dodavanja žice, jakost struje zavarivanja i sl. [2, 3].



a) ručno



b) polu-automatizirano



c) potpuno automatizirano

Slika 2. Načini izvođenja TIG postupka zavarivanja [4]

TIG postupak zavarivanja ima svoje prednosti i nedostatke. Prednosti TIG zavarivanja su visoka kvaliteta zavara koja se postiže stabilnim električnim lukom i odličnom kontrolom procesa, bez rasprskavanja, nastanka troske i dima. Pogodan je za reparaturna zavarivanja, daje mogućnost zavarivanja u svim položajima i prikladan je za većinu materijala.

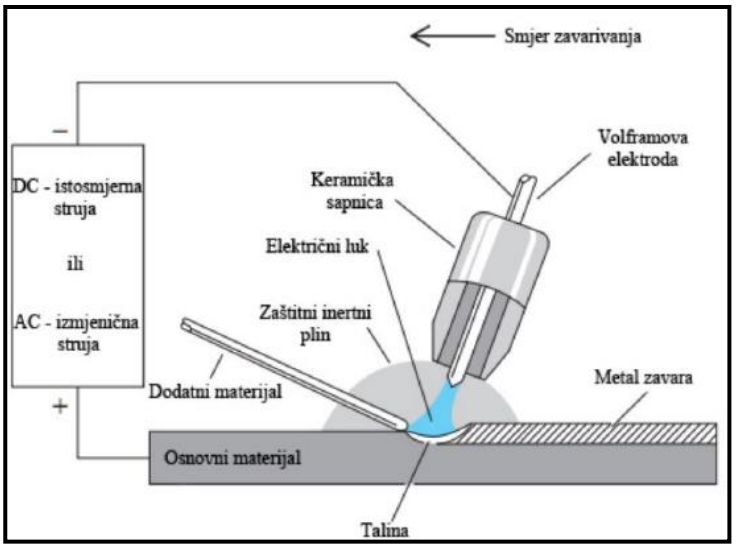
S druge strane, zbog male produktivnosti i količine nataljenog materijala u vremenu, TIG postupak nije ekonomičan za zavarivanje debljih materijala, pa se uglavnom primjenjuje za zavarivanje materijala od 1 do 6 mm. Postupak nije prikladan za rad na otvorenom zbog utjecaja vjetra koji raspršuje zaštitni plin. TIG postupak zavarivanja zahtijeva kvalitetniju pripremu spoja i obuku zavarivača. Prilikom nepravilne tehnike rada može doći do volframovih uključaka u metalu zavara koji će u konačnosti dovesti do smanjenja čvrstoće i žilavosti zavara. Pregled prednosti i nedostataka dan je tablicom 1. [2, 3].

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

Prednosti	Nedostaci
• koncentriranost električnog luka i smanjena zona utjecaja topline, • nema prskanja kapljica ni troske, • minimalna količina štetnih plinova, • zavarivanje raznorodnih materijala malih debljina (1 – 6 mm), • zavarivanje u svim zavarivačkim položajima, • mogućnost automatizacije • pogodno za izvođenje reparaturnih radova • odlična kvaliteta i izgled zavarenog spoja	• mala brzina zavarivanja i mali depozit dodatnog materijala, • neekonomičnost u zavarivanju debljih materijala (iznad 6 mm), • duga i skupa izobrazba zavarivača, • zahtjev za preciznom pripremom zavarenog spoja i visokom čistoćom površina, • visoka cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova, • otežanost ručnog TIG zavarivanja na otvorenim prostorima, • potreba za ventilacijskim sustavom

2.2. Princip rada TIG zavarivanja

Postupak ručnog TIG zavarivanja započinje pritiskanjem prekidača na pištolju za zavarivanje ili pritiskanjem nožnog prekidača. U trenutku pritiskanja prekidača započinje istjecanje zaštitnog plina kroz sapnicu i cirkulacija rashladnog sredstva. Zaštitni plin je glavni nosioc ionizacije kod uspostavljanja i održavanja električnog luka, te osim što štiti talinu metala zavara i zonu utjecaja topline od atmosferskih uvjeta održava stabilnost električnog luka. Kada zavarivač pritisne prekidač pištolja za zavarivanje i dovoljno primakne vrh volframove elektrode radnome komadu (2 do 5 mm), upravljačka elektronika šalje visokofrekventnu struju u inertnu smjesu plinova gdje se ionizira atmosfera te stvara električni luk. Tako uspostavljeni električni luk u struji zaštitnog plina doseže temperaturu od oko 20 000 °C kojom tali osnovni materijal. Električni se luk može uspostaviti na dva različita načina, s i bez dodira volframove elektrode s radnim komadom. U većini slučaja električni luk se uspostavlja bez dodirivanja radnog komada, dok se s dodirom volframove elektrode i radnog komada uspostavlja kod uređaja za zavarivanje istosmjernom strujom (engl. *DC – Direct Current*) koji u sebi nemaju ugrađen uređaj za visokofrekventne električne struje. U talinu koja je nastala djelovanjem električnog luka, u točno određenim vremenskim intervalima dodaje se dodatni materijal. Dodatni materijal se tali u prednjem rubu taline osnovnog metala i spaja u metal zavara s osnovnim materijalom, slika 3. Brzine dodavanja dodatnog materijala i pomicanja pištolja za zavarivanje ovise o kvaliteti pripreme samog spoja i o tehnici rada. Prestankom pritiska na prekidač pištolja prekida se električni luk, dok zaštitni plin ostaje istjecati iz sapnice još nekoliko sekundi kako bi štitio vrh elektrode i talinu od naglog hlađenja [3, 5].



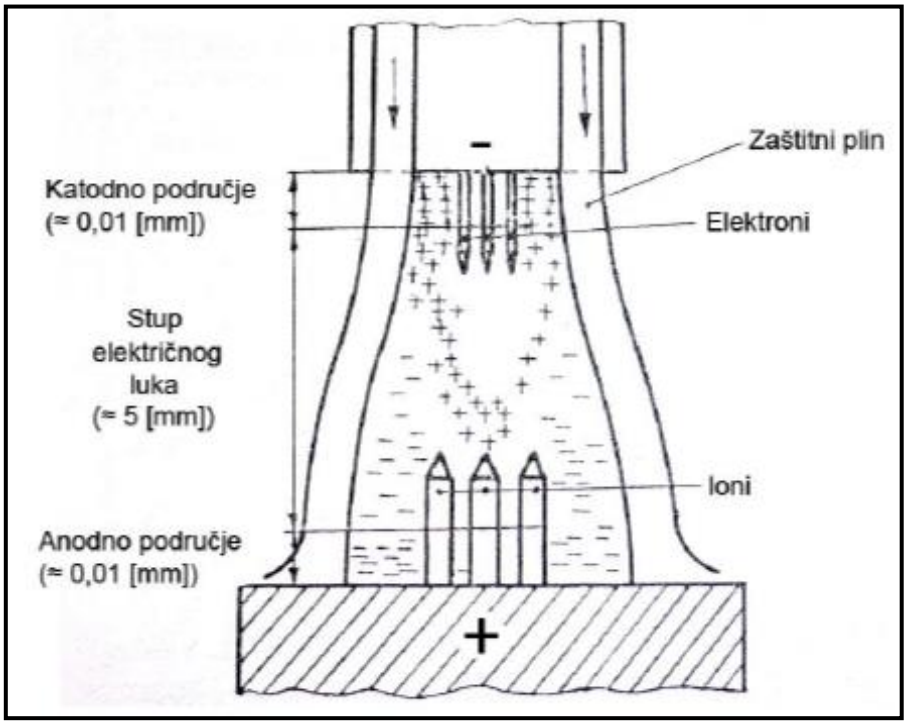
Slika 3. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [5]

Električni luk kod TIG zavarivanja sastoji se od tri područja: anodnog, katodnog te područja stupa električnog luka, slika 4. [5]:

1. Anodno područje električnog luka sastoji se od oblaka negativno nabijenih iona ili aniona koji velikom brzinom udaraju na površinu osnovnog metala (tj. anodu). Na anodi elektroni oslobađaju svoju energiju, pri čemu se razvija toplina od 1500 do 4500 °C s kojom tale osnovni metal. Temperatura električnog luka ovisi o parametrima zavarivanja, vrsti zaštitnog plina te vrsti metala koji se zavaruje.

2. Katodno područje električnog luka sastoji se od oblaka pozitivno nabijenih iona ili kationa koje privlači negativna elektroda (tj. katoda). I oni razvijaju toplinu ali znatno manju od aniona na anodi.

3. Stup električnog luka je najveće područje u električnom luku, a nalazi se između anodnog i katodnog područja. Dimenzije stupa kreću se oko 3 do 5 mm ovisno o naponu i promjeru volframove elektrode. Stup električnog luka sastoji se od mješavine elektrona, kationa, neutralnih atoma i molekula koji uslijed privlačnih sila katode i anode održavaju električni luk [5].

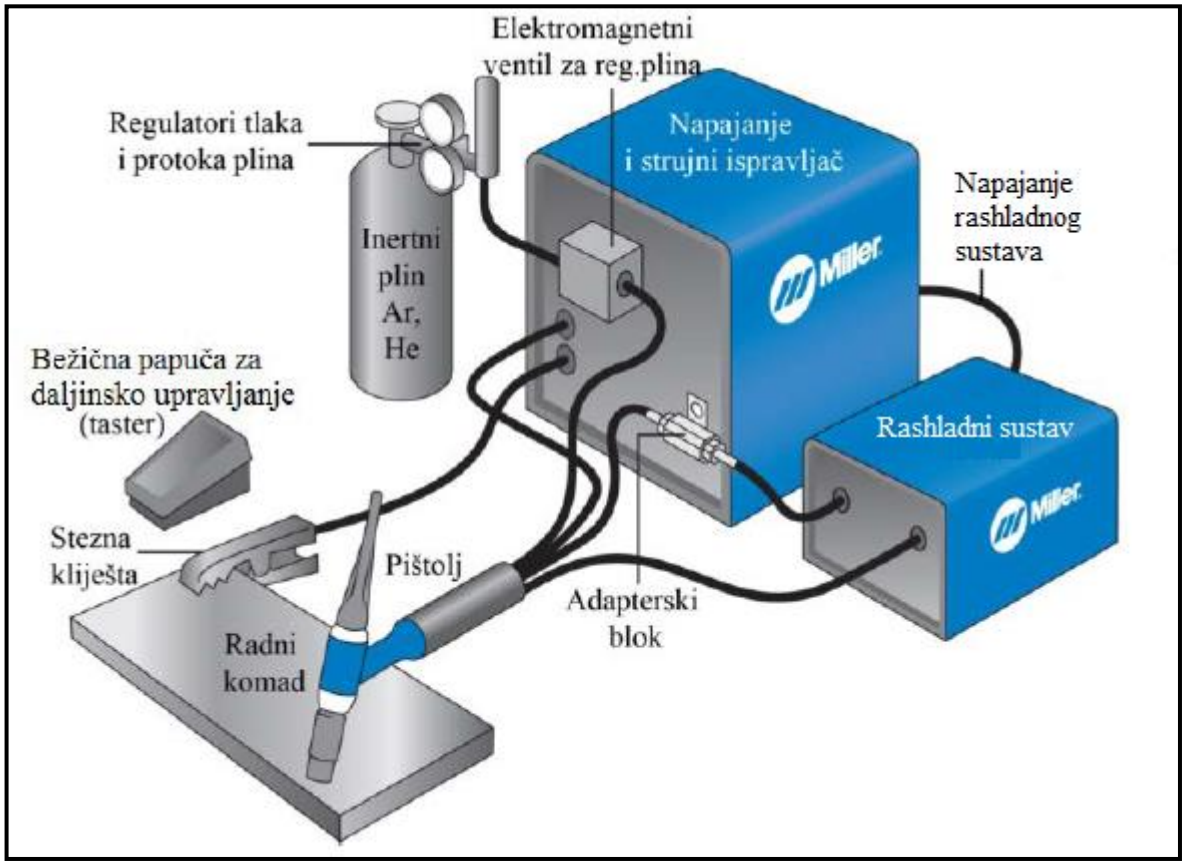


Slika 4. Područja električnog luka kod TIG zavarivanja [5]

2.3. Oprema za TIG zavarivanje

Slikom 5. je prikazana osnovna oprema za TIG postupak zavarivanja. Osnovna oprema se sastoji od izvora struje spojenog na električnu mrežu, pištolja za zavarivanje sa volframovom elektrodom, rashladnog sustava i sustava za dovod zaštitnog plina uz regulatore tlaka i protoka.

Pištolj za zavarivanje spojen je na jedan od polova priključaka izvora struje (DC+ / DC- / AC) ovisno o materijalu kojeg se zavaruje. Na drugi priključak, suprotnog pola, spaja se radni komad pomoću steznih kliješta kojima se zatvara strujni krug i omogućava zavarivanje. TIG uređaj mora imati i rashladni sustav koji tijekom zavarivanja i razvijanja visokih temperatura hladi izvor struje i pištolj za zavarivanje. Sustav za hlađenje sastoji se od pumpe, hladnjaka i samog sredstva hlađenja (najčešće voda ili antifriz) koji polikablom dolazi do pištolja za zavarivanje. Korištenje polikabla olakšava istovremeni dovod struje, sredstva za hlađenje i zaštitnog plina u pištolj za zavarivanje preko kojeg se provodi čitava kontrola procesa. Zaštitni plin nalazi se u atestiranoj čeličnoj boci, a na njezinom vrhu nalazi se reducir ventil s mjernim instrumentima, regulatorom tlaka i protoka plina [6, 7].



Slika 5. Oprema za ručno TIG zavarivanje [6]

2.3.1. Izvori struje za TIG zavarivanje

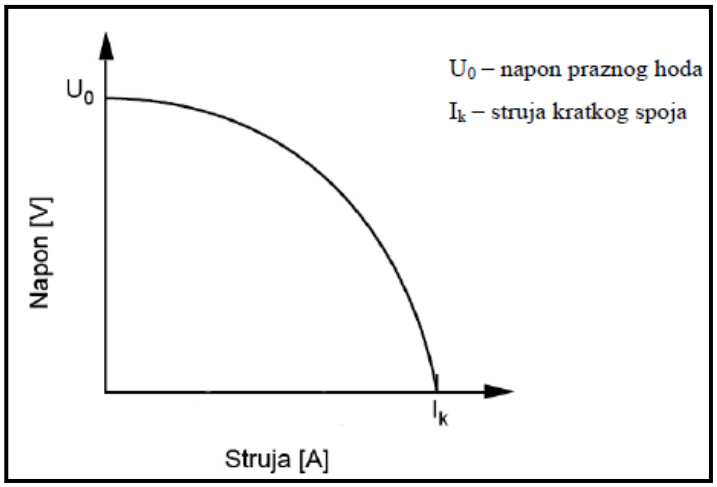
Prema načinu pretvorbe energije, izvori struje za TIG zavarivanje mogu biti transformatori, ispravljači, rotacijski pretvarači, inverteri i agregati, a izbor ovisi o vrsti materijala koji će se zavarivati. Današnji uređaji za TIG zavarivanje su građeni kombinirano te se istovremeno koriste i kao transformatori i kao ispravljači što se ostvaruje prebacivanjem sklopa na izvoru. Jakost izvora struje je elektronički kontrolirana, dok sam izvor struje tijekom zavarivanja stalno provjerava izlaznu vrijednost struje na električnom luku i uspoređuje ju sa zadanim parametrima koji su definirani samom tehnologijom zavarivanja tj. zadanim programom [8].

Električni luk se uspostavlja uz pomoć visokofrekventnog generatora bez dodira vrha elektrode s radnim komadom. Za takvo uspostavljanje električnog luka mora postojati vrlo visoki napon koji će omogućiti početnu ionizaciju. Generator se paralelno spaja u krug izmjenične ili istosmjerne struje zavarivanja iz kojih proizvodi visokonaponsku električnu struju koja zbog svoje visoke frekvencije (20 do 50 Hz) nije opasna po život zavarivača, slika 6. Uspostavljanje električnog luka dodirivanjem volframove elektrode s radnim komadom, tzv. “kresanje“ izbjegava se kod TIG zavarivanja zbog dva razloga. Prvi razlog je što kratki spoj oštećuje vrh elektrode i tako smanjuje stabilnost električnog luka, a drugi što dolazi do nastanka volframovih uključaka u metalu zavara i nepoželjnih mehaničkih svojstva spoja [7, 8].



Slika 6. Uspostavljanje električnog luka uz pomoć visokofrekventnog generatora [9]

Za potrebe ručnog TIG zavarivanja izvor struje mora imati strmopadajuću (statičku) karakteristiku (CC – *Constant Current*), slika 7. To znači da je ponašanje izvora struje konstruirano da održava vrijednosti jakosti struje približno jednakima (sukladno tome i unos topline) dok se vrijednosti napona struje mijenjaju s visinom električnog luka. Ova karakteristika jednakom brzinom stvara kapljice koje će na mjestu zavara postati depozit. CC karakteristika omogućuje automatsku nadoknadu promjene visine električnog luka tako da dodatno ionizira stup zraka između elektrode i radnog komada [7].



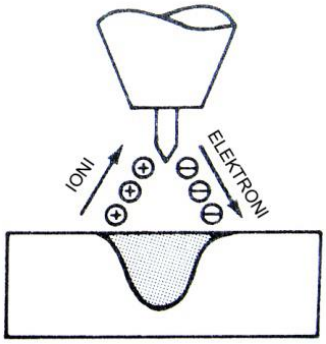
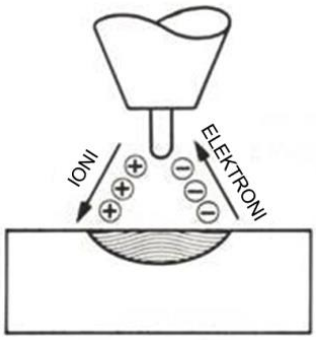
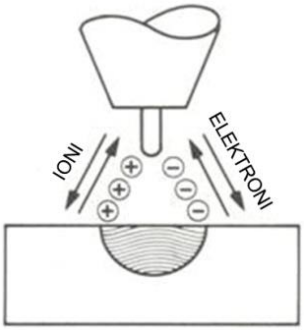
Slika 7. Strmopadajuća (CC) karakteristika izvora struje za ručno TIG zavarivanje [7]

Ponekad se zbog geometrije pripreme ili oblika zavara mijenja duljina električnog luka kod ručnog TIG zavarivanja. U takvim situacijama važna je uvježbanost i sposobnost zavarivača. Kako je intenzitet taljenja proporcionalan struji zavarivanja, a ne naponu, bitno je da ne dođe do velike promjene struje koja utječe na količinu generirane topline u električnom luku. Promjene u dinamici električnog luka dovele bi do proširivanja površine pokrivanja električnog luka i do razlijevanja taline po radnom komadu. Upravo zbog brze kompenzacije promjene visine električnog luka i minimalne promjene jakosti struje, strmopadajuće karakteristike pronalaze svoju primjenu u ručnim postupcima zavarivanja poput: TIG-a, REL-a, plazme i EPP-a (za promjer dodatnog materijala većeg od 3 mm) [7]. Kako bi se osigurala konstantna dužina luka kod automatiziranog TIG zavarivanja, te postupaka MIG/MAG, FCAW, EPP, koriste se izvori struje s ravnom karakteristikom (engl. *CV – Constant Voltage*). Glavna razlika u odnosu na strmopadajuću karakteristiku je način vođenja procesa, samoregulacija duljine električnog luka te načinu dodavanja žice, koji se razlikuje od postupka do postupka zavarivanja [7].

2.3.1.1. Vrste električne struje za TIG zavarivanje

Raspodjela topline u električnom luku ovisi o vrsti struje i polaritetu elektrode. Kod TIG postupka zavarivanja najčešće se koriste izmjenična struja (AC) i istosmjerna struja s negativnim polaritetom na elektrodi (DC –). Pregled vrsta struje, mogućih polariteta i njihovih karakteristika prikazan je tablicom 2.

Tablica 2. Karakteristike vrste i polariteta struje kod TIG zavarivanja [10]

Vrsta i polaritet struje	a) DC –	b) DC +	c) AC
Tok elektrona i iona (kationa)			
Čišćenje oksida	ne	da	da, svakih pola ciklusa
Raspodjela topline	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 i uska	plitka i široka	srednja
Kapacitet elektrode	odličan Ø 3,2 mm – 400 A	mali Ø 6,4 mm – 120 A	dobar Ø 3,2 mm – 255 A

a) Istosmjerna struja s negativnim polaritetom na elektrodi (DC –)

Istosmjerni izvori struje s negativnim polaritetom na volframovoj elektrodi koriste se kod TIG postupka zavarivanja čelika, nikla, titana i njihovih legura. Elektroni se gibaju s hladnije, negativno nabijene elektrode prema pozitivno nabijenom radnom komadu ionizirajući pritom zaštitni plin kojim se podiže temperatura radnog komada. Budući da, elektroni imaju veću ukupnu kinetičku energiju od iona, mjesto zavarivanja na radnom komadu se brže zagrijava nego vrh elektrode. Zbog navedenog, elektroda se na ovom polaritetu može jače opteretiti

nego na suprotnom. Negativni polaritet elektrode omogućuje da se za istu jakost struje zavarivanja može primijeniti oko tri puta manji promjer elektrode. Od ukupne količine oslobođene topline, 70 % završi na radnom komadu i koristi se za taljenje osnovnog i dodatnog materijala, dok preostalih 30 % uzrokuje zagrijavanje volframove elektrode. Primjenom negativnog DC polariteta na volframovoj elektrodi postiže se duboka i uska penetracija te stabilniji električni luk [7, 11].

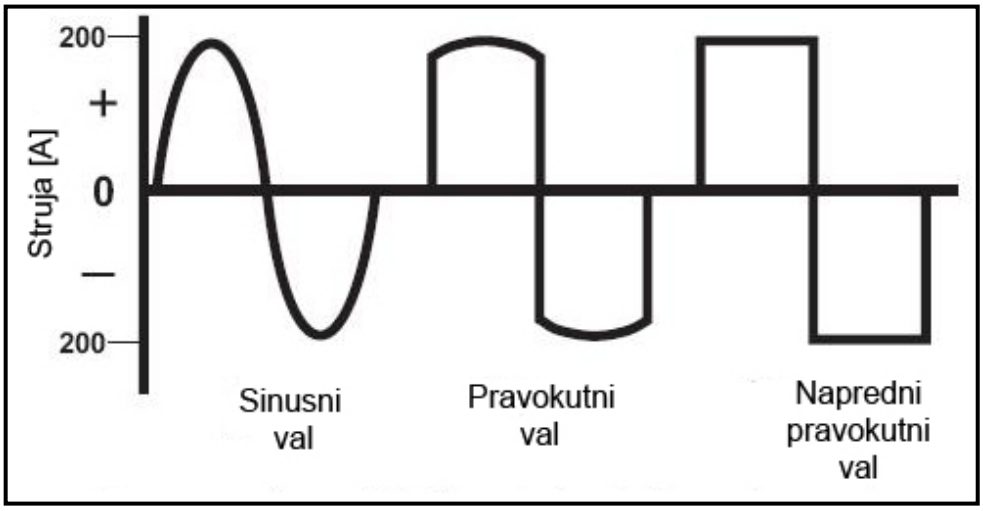
b) Istosmjerna struja s pozitivnim polaritetom na elektrodi (DC +)

Istosmjerni izvori s pozitivnim polaritetom na volframovoj elektrodi koriste se pri zavarivanju aluminija i ostalih lakih metala zbog mogućnosti čišćenja oksida s površine radnog komada. Zbog relativno plitke i široke penetracije pozitivan polaritet se nastoji izbjeći kod TIG zavarivanja. Razlog tomu leži u prevelikom zagrijavanju elektrode tijekom zavarivanja gdje elektroni teku prema vrhu pozitivne elektrode i jako je toplinski opterećuju (70 % topline se oslobađa na elektrodi, a samo 30 % na radnom komadu).

c) Izmjenična struja (AC)

Kod izmjenične struje tok elektrona mijenja svoj smjer, iz pozitivnog u negativni i obrnuto, u vremenu, onoliko puta kolika je strujna frekvencija. Izmjenična struja koristi za zavarivanje aluminija i magnezija umjesto istosmjerne struje s pozitivnim polaritetom. Cilj je postići što bržu promjenu struje, odnosno što duže zadržati struju na svojim vršnim vrijednostima kako bi se postigla što veća iskoristivost uređaja za zavarivanje.

Slika 8. prikazuje tri moguće vrste valova izmjenične struje. Po izgledu valova, može se zaključiti kako se najveća iskoristivost uređaja za zavarivanje postiže naprednim pravokutnim valovima (zbog najduljeg zadržavanja na maksimalnoj vrijednosti struje), dok je najniža iskoristivost uređaja pri korištenju sinusoidnih valova izmjenične struje [7, 11].



Slika 8. Vrste valova izmjenične struje [11]

U teoriji se primjenom izmjenične struje izmjenjuju dva poluciklusa, jednakih intenziteta i različitih predznaka. Pola radnog ciklusa traje proces čišćenja površine od oksida, a ostatak ciklusa se zagrijava radni komad. Pola topline koristi se za zagrijavanje radnog komada, a preostala toplina uzrokuje neželjeno zagrijavanje volframove elektrode [7, 11].

U praksi izgled valova i intenzitet ciklusa izgleda malo drugačije, što i dokazuju rezultati dobiveni osciloskopom. Pod povećalom osciloskopa koji prati kako se giba izmjenična struja može se uočiti da je pozitivan dio ciklusa izmjenične struje sinusoidnog vala na elektrodi puno manje veličine nego negativni dio ciklusa. Taj fenomen se naziva „ispravljanje luka“ i najčešće se pojavljuje prilikom zavarivanja aluminija i njegovih legura. Postoje dva razloga za koje se smatra da uzrokuju pojavu prethodno spomenutog fenomena [7, 11]:

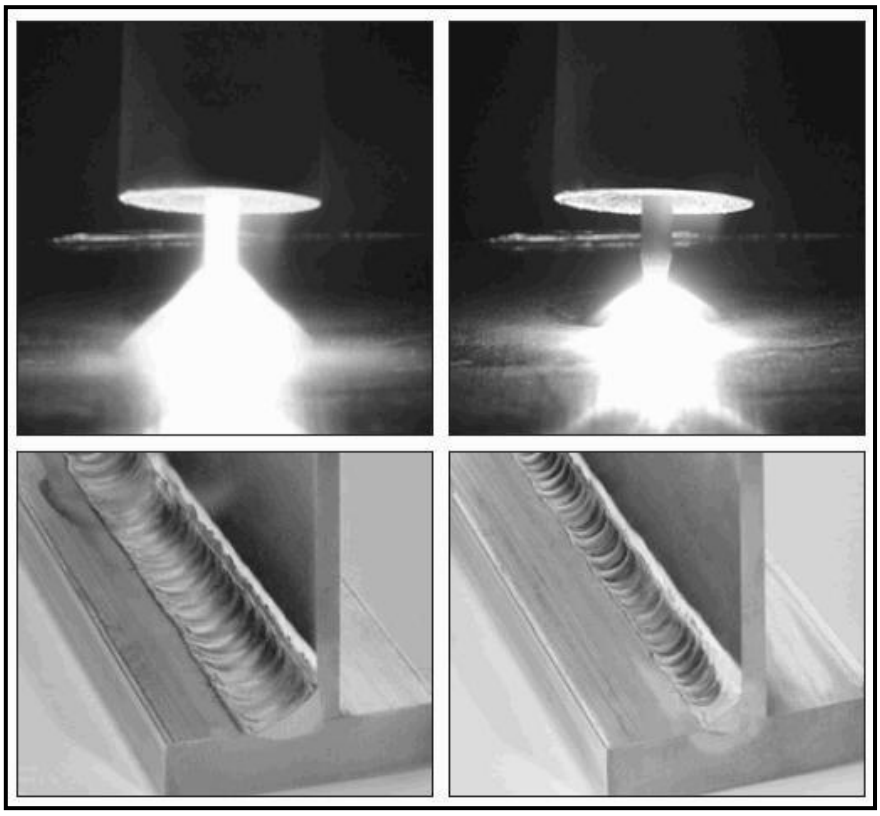
1. Oksidni sloj lakih metala, primjerice aluminija, djeluje kao „ispravljač“ koji otežava protjecanje elektrona s radnog komada na elektrodu, dok protok elektrona s elektrode prema radnom komadu nije otežan.

2. Rastaljeni vrući, čisti aluminij ne otpušta elektrone tako lako kao volfram. Rezultat toga je veći protok struje s vrućeg volframa na zavar, a manji protok sa zavara na elektrodu.

2.3.1.2. Uporaba visokonaponske i visokofrekventne izmjenične struje

Nedostatak električnog luka izmjenične struje je njegova nestabilnost i to što se kod mijenjanja pravca gibanja čestica gasi i pali. Kako bi se uklonio navedeni nedostatak, na izvor struje se dodaje uređaj koji proizvodi visokonaponsku i visokofrekventnu električnu struju. Ona poboljšava stabilnost električnog luka i pruža snažne izboje u svakom nultom periodu. Visoka frekvencija (do 1 MHz) služi za ponovnu uspostavu električnog luka i poboljšanje njegove usmjerenosti, dok električni luk vrši čišćenje oksida i protaljivanje [11].

Slikom 9. prikazan je utjecaj različitih frekvencija struje na profil zavara. Na nekim uređajima za zavarivanje može se podesiti vrijeme zadržavanja elektrode na pozitivnom, odnosno negativnom polu. Takvim upravljanjem omogućuje se: kontrola dubine penetracije, zagrijavanja elektrode i unosa topline. Kod TIG zavarivanja s izmjeničnom strujom na ovaj je način moguće zavarivati aluminij i aluminijeve legure jer se kontrolirano unosi toplina, čisti oksid s površine, a i elektroda nije previše toplinski opterećena [12].



a) frekvencija = 60 Hz **b) frekvencija = 180 Hz**

Slika 9. Usporedba utjecaja frekvencije na profil zavara [11]

2.3.1.3. Zavarivanje impulsnim strujama

Jedan od najvećih napredaka u TIG zavarivanju je otkriće impulsne struje. Otkriće impulsne struje nastalo je iz potrebe stabilnosti procesa zavarivanja i lakšeg ponovnog paljenja električnog luka. Stabilnim i mirnim električnim lukom olakšava se zavarivanje, smanjuju se pogreške i omogućuje šira uporaba TIG zavarivanja [13].

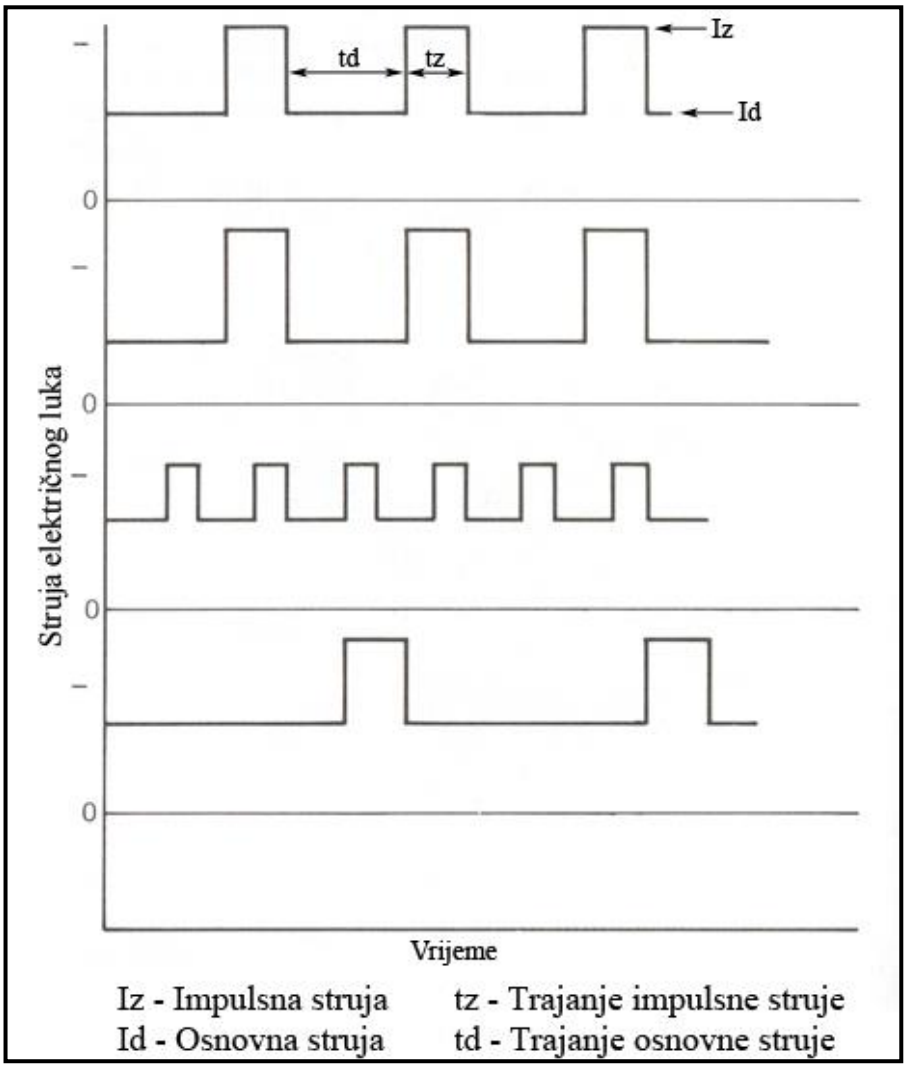
Umjetno osmišljen val kvadratnog ili pravokutnog oblika brže mijenja svoju vrijednost od maksimalno pozitivne do maksimalno negativne dopuštene vrijednosti. Izmjenična struja kvadratnog oblika odlična je za zavarivanje materijala gdje je važno čišćenje i penetracija. Manipulacijom polova moguće je odrediti karakter procesa, tako da se s više pozitivne struje dobiva bolji efekt čišćenja, dok više negativne struje dovodi do bolje penetracije. Poboljšane karakteristike čišćenja i penetracije čiste površinu osnovnog metala od oksida i omogućuju bolje spajanje osnovnog metala [13].

Prednost uporabe impulsne struje kvadratnog oblika je i izbjegavanje kratera na kraju procesa zavarivanja s istosmjernom strujom. Krateri na zavarima karakteristični su za konvencionalne postupke koji su koristili niže struje radi lakšeg uspostavljanja električnog luka.

Struja impulsnog oblika, omogućuje suvremenim uređajima da pale i gase električni luk s najmanjom strujom uređaja (najčešće od 2 do 12 A), dok proces zavarivanja provode na maksimalno odabranoj struji. Neki uređaji imaju mogućnost brzog podizanja struje za vrijeme paljenja luka uporabom nožne pedale [13]. Od ostalih karakteristika impulsnog TIG zavarivanja mogu se nabrojati sljedeće prednosti u odnosu na TIG zavarivanje kontinuiranom istosmjernom strujom: dobra je penetracija i kontrola taline kada se zavaruje u prisilnom položaju, manje su deformacije zbog manjeg unosa topline, lako se zavaruju materijali različitih debljina, a pogotovo tanji materijali [10].

Impulsno TIG zavarivanje je način zavarivanja kojim se jakost električne struje ritmički mijenja između maksimalne vrijednosti (vršna, impulsna struja) i minimalne vrijednosti (osnovna struja). U određenom vremenskom intervalu (t_z) prolazi električna struja veće jakosti (I_z) s kojom se tali i protaljuje, a potom slijedi vremenski interval (t_d) struje manje jakosti (I_d) koja dopušta skrućivanje pretaljenog mjesta bez curenja taline tj. održava stabilnost električnog luka. Na taj način se u određenim vremenskim intervalima ponavlja zavarivanje jačom i slabijom električnom strujom, a zavareni spoj sastavljen je od niza točkica protaljivanja koje se preklapaju. Vrijeme trajanja, te gornja i donja jakost struje namještaju se regulatorima na izvoru struje [8, 11].

Na slici 10. prikazana je mogućnost dobivanja različitih impulsnih oblika električnog luka uz pomoć impulsnog TIG izvora struje.



Slika 10. Osnovne karakteristike različitih impulsnih oblika [11]

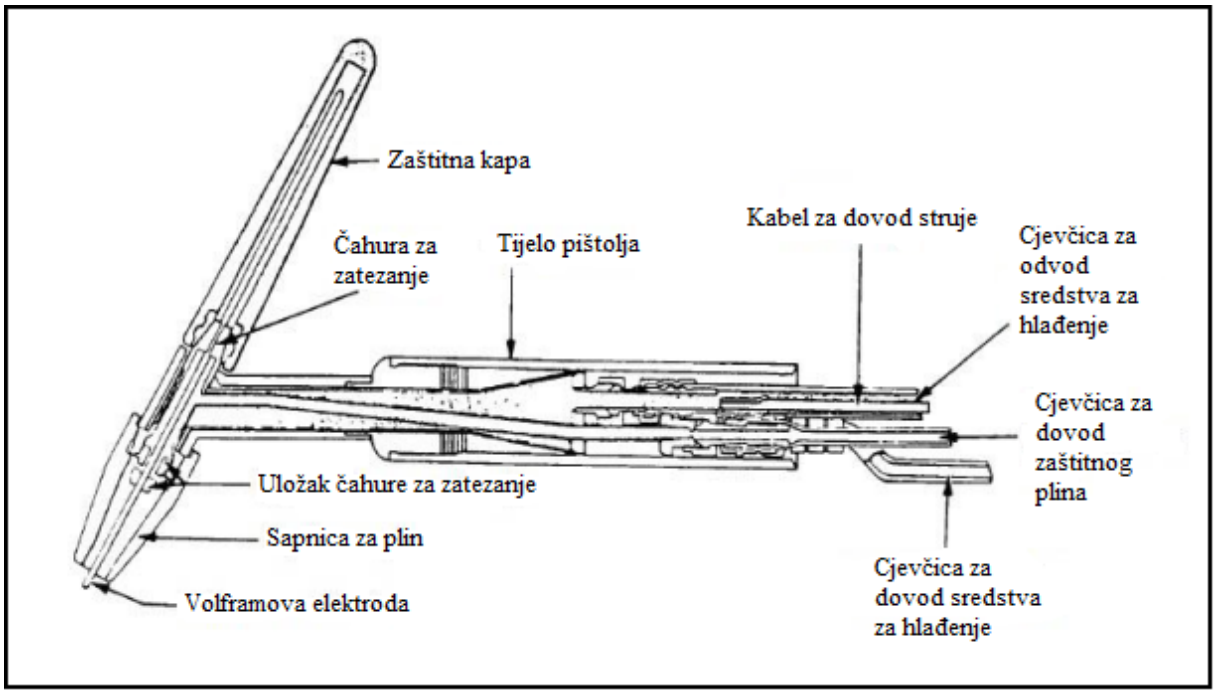
Zavarivanje visokofrekventnim impulsnim strujama

Uz impulsno TIG zavarivanje koje se izvodi u granicama od 5 do 20 impulsa po sekundi, postoji i visokofrekventno impulsno zavarivanje (do 35 kHz). Kod visokofrekventnog impulsnog zavarivanja dolazi do generiranja električnog luka koji ima veću krutost. Krutost električnog luka omogućuje porast brzine zavarivanja, dobru penetraciju i zavarene spojeve kontinuiranog vanjskog oblika. Prilikom povećanja frekvencije poboljšava se miješanje taline metala što pomaže da uključine u zavaru isplivaju na površinu, nakon čega dolazi do boljih metalurških svojstva samog zavara. Visokofrekventno impulsno zavarivanje najčešće se koristi u kombinaciji s automatiziranim uređajima, na mjestima gdje se traži stabilan električni luk i kod zavarivanja malim jakostima električne struje. Nedostatak takvog visokofrekventnog TIG zavarivanja je skup izvor struje [10, 11, 12].

2.3.2. Pištolj za zavarivanje

Gorionici ili pištolji za TIG zavarivanje mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine ovisno o načinu hlađenja (s i bez hlađenja rashladnom tekućinom) i dizajnu (za ručno ili robotizirano zavarivanje). Pištolji koji nemaju hlađenje rashladnom tekućinom, već samo zrakom, primjenjuju se za manje jakosti struje zavarivanja (do 200 A) i kraća vremenska opterećenja, dok se pištolji s rashladnim medijima koriste za struje veće jakosti (do 600 A) i duža vremenska opterećenja. Kao rashladne tekućine u pištoljima s hlađenjem, najčešće se koristi antifriz ili voda. Obično su takvi pištolji teži i skuplji zbog složenije konstrukcije i boljih materijala koji moraju osigurati kontinuirani i siguran rad s jakostima struja zavarivanja od 200 A, pa kod nekih čak i s 500 A. Oblici pištolja mogu biti različiti, kao i njihove dimenzije, ovisno o potrebama zavarivača i situacijama u kojima se zavaruje.

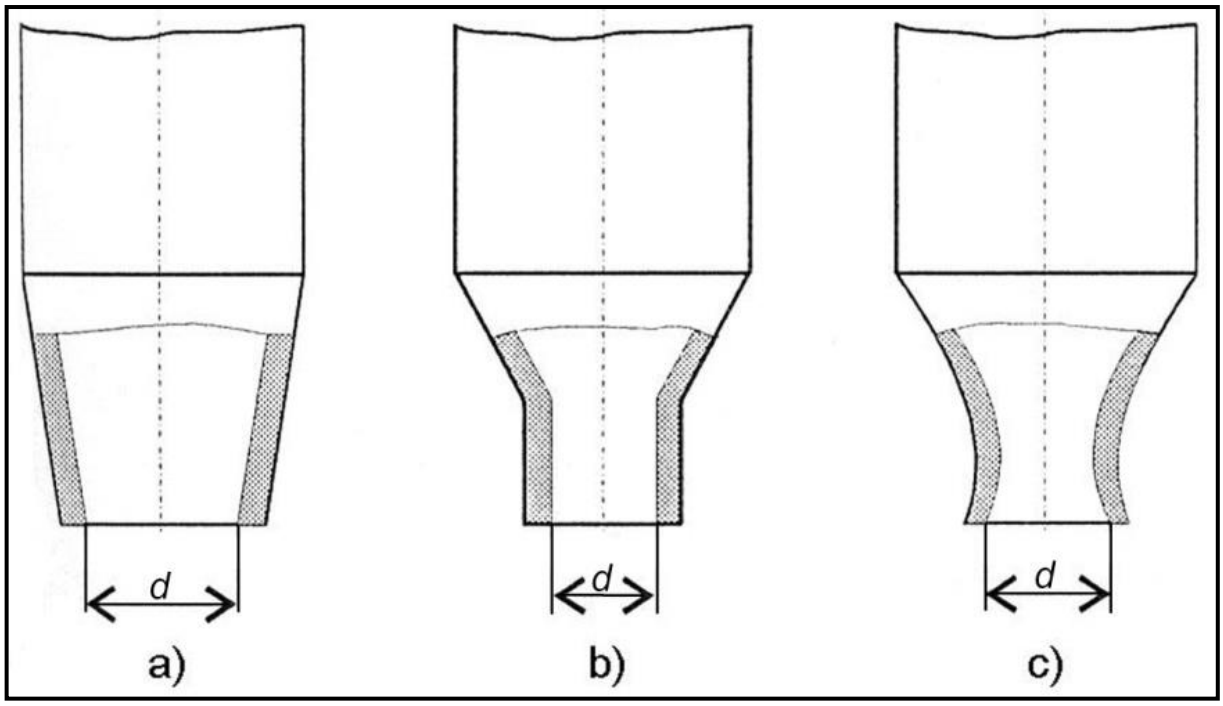
Klasičan pištolj za ručno TIG zavarivanje prikazan je na slici 11., a sastoji se od tijela pištolja, čahure za stezanje elektrode, sapnice za plin, volframove elektrode, zaštitne kape na volframovoj elektrodi i priključaka na tijelu pištolja (priključci za zaštitni plin, dovod i odvod sredstva za hlađenje i kabel za dovod električne struje). Na tijelu pištolja nalazi se prekidač za uključivanje električnih komandi, a na pištolj spojen je snop provodnika u obliku polikabela dužine 5-8 m [7].



Slika 11. Presjek pištolja za ručno TIG zavarivanje [14]

2.3.2.1. Sapnica pištolja za zaštitni plin

Sapnica za plin služi za usmjeravanje protoka zaštitnog plina tijekom zavarivanja. Ovisno o jakosti struje na mjestu zavarivanja, može biti izrađena od različitih materijala u različitim oblicima i veličinama. Važno je da kao provodnik zaštitnog plina bude izrađena od materijala koji je otporan na difuziju, kako bi se spriječilo prodiranje vlage, dušika ili kisika iz atmosfere u zaštitni plin, te da dobro brtvi jer u protivnom dolazi do uvlačenja zraka uslijed injektorskog djelovanja struje izlazećeg plina. Sapnice su najčešće izrađene od keramike, metala ili od kvarcnog stakla. Za manje i srednje jakosti struje zavarivanja koriste se keramičke sapnice, a za veće jakosti struje metalne sapnice hlađene vodom. Biraju se prema unutarnjem promjeru otvora sapnice i promjeru volframove elektrode, budući da se promjer volframove elektrode bira u odnosu na jakost struje zavarivanja. Općenito pravilo za veličinu sapnice je da unutarnji promjer sapnice bude tri puta veći od promjera volframove elektrode. Kod elektroda manjih promjera (do 2,4 mm) odnos promjera elektrode i unutarnjeg promjera sapnice iznosi približno 1:5 do 1:6, dok je kod elektroda većeg promjera taj odnos blizu 1:4. Najčešće korištene izvedbe sapnica prikazane su slikom 12 [5, 15, 18].



Slika 12. Najčešće korištene izvedbe sapnica [16]

a) konusni oblik, b) cilindrični oblik, c) profilirani oblik

Slika 13 prikazuje ovisnost protoka plina o obliku sapnice. Gornja, konusno sužena sapnica uzrokuje turbulentno strujanje plina, dok donja, ravna sapnica laminarno strujanje. Kako bi se spriječile neželjene turbulencije i poboljšala stabilnost protoka plina ponekad se na kraj otvora sapnice stavlja mrežica. Postavljena mrežica čini protok plina laminarnim i na većim udaljenostima od sapnice do radnog komada, kao što je prikazano na slici 13. Prednost takvog dugog stabilnog toka zaštitnog plina je činjenica da elektroda može više viriti van iz pištolja, tj. da zavarivač ima veći pregled nad talinom zavara [5, 15].



Slika 13. Ovisnost protoka zaštitnog plina o obliku sapnice [17]

gore – nestabilan protok, dolje – stabilan protok

2.3.3. Volframova netaljiva elektroda

Volfram (engl. *tungsten*) je tvrd, sjajan srebrnobijeli metal s najvišim talištem od svih kovina (3422 °C). Dobiva se iz rude volframita u obliku sivog praha, koji se grijanjem pod tlakom na temperaturi ispod tališta može pretvoriti u rastezljivi metal. Zbog odličnih fizikalnih svojstava, volfram čini slitine s mnogim metalima te se pronalazi u obliku elektrode kod TIG postupka zavarivanja [19].

Volframova elektroda provodnik je električne struje s pištolja na radni komad. Između volframove elektrode i radnog komada uspostavlja se električni luk koji tali metal osnovnog i dodatnog materijala, a da se pri tome sama elektroda ne tali niti prenosi u zavar. Volframova elektroda se ne tali zbog dobrih fizikalnih svojstava volframa i zbog hlađenja vrha elektrode termoelektronskim emisijama koje nastaju zagrijavanjem elektrode uslijed električnih otpora.

Elektroda se izrađuje iz čistog volframa ili volframa s malim dodacima torijevog oksida (ThO_2), cirkonijevog oksida (ZrO_2), lantanovog oksida (La_2O_3) ili cerijevog oksida (CeO_2) u standardnim promjerima: 0.5, 1.0, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 6.4 i 8.0 mm i standardnim dužinama: 50, 75, 150, 175 i 200 mm. Prema normi ISO 6848, volframove elektrode se identificiraju pomoću boja, a klasificirane su po legirnim elementima sa slovno – brojčanim oznakama, tablica 3 [19, 20].

Tablica 3. Označavanje volframovih elektroda [1]

Oznaka (ISO)	Dodatak oksida (%)	Tip oksida	Oznaka bojom
W	-	-	Zelena
WC20	1,8 – 2,2	CeO_2	Siva
WL10	0,9 – 1,2	La_2O_3	Crna
WL15	1,4 – 1,6	La_2O_3	Zlatna
WL20	1,9 – 2,1	La_2O_3	Plava
WZ8	0,7 – 0,9	ZrO_2	Bijela
WT10	0,8 – 1,2	ThO_2	Žuta
WT20	1,7 – 2,2	ThO_2	Crvena
WT30	2,8 – 3,2	ThO_2	Ljubičasta
WT40	3,8 – 4,2	ThO_2	Narančasta

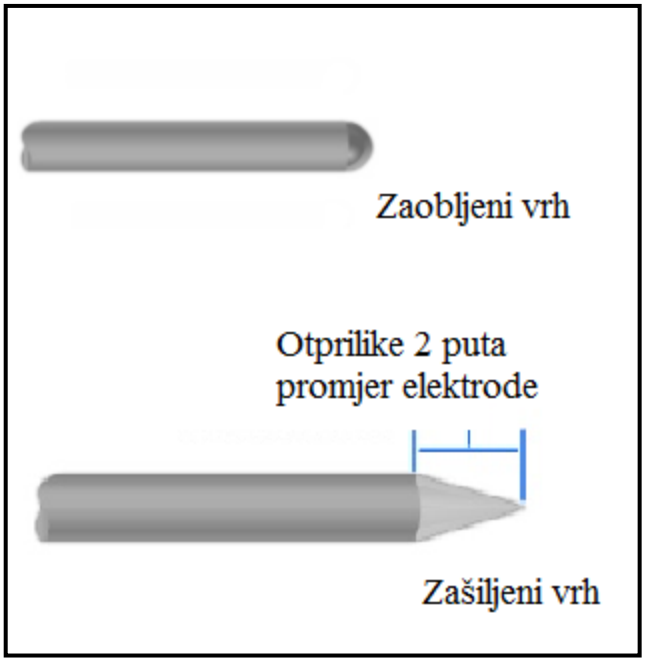
Vrste volframovih elektroda

- Čiste volframove elektrode (W) koriste se većinom za zavarivanje izmjeničnom električnom strujom.
- Elektrode legirane cerijevim oksidom (CeO_2) omogućuju jednostavno uspostavljanje električnog luka, dobru stabilnost električnog luka i dugi životni vijek elektrode. Koriste se s izvorima izmjenične i istosmjerne struje, a mana im je što ne mogu raditi s jakim strujama.
- Elektrode legirane lantanovim oksidom (La_2O_3) namijenjene su za rad s jakim strujama. Imaju odličan utjecaj na paljenje luka, nisku stopu izgaranja i stabilnost luka. Namijenjene su za uporabu s izmjeničnim i istosmjernim strujama, uspostavljaju i održavaju električni luk pri nižim naponima. Odlične su i za rezanje plazmom. U komercijalnoj uporabi danas su tri vrste volframovih elektroda legiranih lantanovim oksidom u omjerima od 1, 1,5 i 2 % prema AWS (engl. *American Welding Society*): EWLa-1, EWLa-1,5 i EWLa-2.
- Elektrode legirane cirkonijevim oksidom (ZrO_2) po svojstvima su između čistih i elektroda legiranih s torijevim oksidom. Imaju odlična svojstva pri zavarivanju izmjeničnom strujom zato što održavaju vrh elektrode zaobljenim i sprječavaju kontaminaciju zavara. Zaobljeni vrh elektrode koristi se uglavnom kod zavarivanja aluminija, magnezija i njihovih legura.
- Elektrode legirane torijevim oksidom (ThO_2) su blago radioaktivne elektrode (blago emitiranje α–čestica) koje omogućuju puno lakše uspostavljanje električnog luka i rad s 20 % većim strujama zavarivanja nego čiste volfram elektrode. Koriste se s izvorima istosmjerne struje, a odlikuje ih i niža granica minimalnog opterećenja te duži radni vijek [20].

Promjer elektrode bira se prema debljini materijala, odnosno vrsti i jakosti struje zavarivanja. Na primjer, za zavarivanje aluminija primjenjuje se elektroda većeg promjera nego kod zavarivanja čelika. Razlog tomu je što se kod zavarivanja aluminija koristi izmjenična struja pa je elektroda jače toplinski opterećena, nego u slučaju zavarivanja istosmjernom strujom i elektrodom spojenom na minus pol.

2.3.3.1. Priprema elektrode

Osim ispravnog izbora elektrode, bitna je i njena priprema. Priprema se sastoji od zaobljenja ili zašiljenja vrha. Geometrija netaljive elektrode izravno utječe na geometriju električnog luka. Oblik vrha volframove elektrode može biti šiljast ili zaobljen, što ovisi o vrsti i dimenzijama metala koji se zavaruje, odnosno korištenom vrstom električne struje zavarivanja, slika 14. Zaobljeni vrh elektrode dobije se kao posljedica velikog toplinskog opterećenja trošenjem, a koristi se kod zavarivanja aluminija, magnezija i njihovih legura izmjeničnom strujom. Pri zavarivanju istosmjernom strujom elektrode zahtijevaju šiljastu geometriju vrha (oblik stošca i visina stošca ovisi o zahtjevima geometrije luka). Prilikom izrade geometrije elektrode pravilnom tehnologijom brušenja izbjegavaju se nestabilnosti luka ili kontaminacija drugim metalima [15, 21].



Slika 14. Zaobljeni i zašiljeni vrh volframove elektrode [22]

Volframova elektroda se ne tali, ali se troši uslijed erozije vrha elektrode, prljanja u slučaju kontakta s radnim komadom, nepravilne tehnike rada i sl. Prosječni vijek trajanja elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Pravilno opterećivanje volframove elektrode rezultirat će produljenjem radnog vijeka same elektrode, stabilnim električnim lukom, a ujedno i smanjenju onečišćenja zavarenog spoja volframom [15, 21, 23].

Tijekom TIG zavarivanja samo je krajnji vrh volframove elektrode vidljivo zagrijan. Kod volframove elektrode s oštrim vrhom talina volframa formira se u obliku kuglice, dok kod elektrode zaobljenog vrha vrh ostaje zaobljen. Jakost struje zavarivanja u odnosu na promjer volframove elektrode računa se prema sljedećoj formuli [15, 21]:

$$I = 100 \cdot d \cdot k \quad [\mathrm{A}]$$

Gdje je d promjer elektrode u mm, a k koeficijent opterećenja elektrode. Vrijednosti koeficijenta opterećenja za svaku vrstu elektrode prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Koeficijenti opterećenja različitih vrsta volframovih elektroda [21]

Vrsta elektrode	W	WT10	WT20	WT30	WT40	WZ8	WL10
k_{min}	0,45	0,40	0,35	0,30	0,50		
k_{max}	0,55	0,65	0,75	0,80	1		

Način brušenja volframove elektrode bitno utječe na vrstu električnog luka. Pravilnim brušenjem u smjeru osi volframove elektrode, dobiti će se stabilan električni luk kao što je vidljivo na slici 15. U slučaju nepravilnog brušenja u smjeru okomitom na os volframove elektrode dobiti će se lutajući električni luk. Vrh elektrode potrebno je izbrusiti pod točno određenim kutom i na što finijoj brusnoj ploči, te kasnije ispolirati prethodno nabrušenu površinu. Pri tome je poželjno da se brusna ploča koja se koristi za brušenje volframovih elektroda ne koristi i za brušenje drugih materijala, kako bi se spriječila njihova kontaminacija [15, 21].



Slika 15. Ispravno i neispravno brušenje volframove elektrode [24]

Onečišćenost i oštećenost vrha elektrode može se pojaviti uslijed preopterećenosti elektrode strujom zavarivanja, oksidacije vrha elektrode, nedovoljnog korištenja zaštitnog plina, doticanja s osnovnim ili dodatnim materijalom, talinom i sl. Na stanje elektrode obično ukazuje boja i izgled. Ako su svi uvjeti zadovoljeni vrh elektrode je čistog metalnog sjaja i bez oštećenja. Takvo stanje obično traje dok se ne uspostavi prvi električni luk između vrha elektrode i metala kojeg se zavaruje. U trenutku uspostavljanja električnog luka, vrh elektrode se kontaminira i oštećuje volfram. Ako je vrh elektrode onečišćen samo stranim metalom, elektroda se može očistiti uspostavljanjem električnog luka na pomoćnoj pločici.

U slučaju da je vrh elektrode taman ili bez sjaja, elektroda je preopterećena jakošću struje zavarivanja te ju je nužno zamijeniti elektrodom većeg promjera. Plavo crvenkasta boja elektrode ukazuje da elektroda nema dobru zaštitu plinom. Radi zaštite taline i vrha elektrode od naglog hlađenja i oksidacije, zaštitni bi plin morao nakon gašenja električnog luka naknadno istjecati 1 sekundu za svakih 10 A jakosti struje kojom se zavaruje [21, 24].

2.3.4. Rashladni sustav i sustav za dovod zaštitnog plina

Rashladni sustav se upotrebljava za hlađenje pištolja, a rashladna sredstva koja se koriste su destilirana voda i/ili antifriz, te različite primjese antikorozivnih dodataka. Rashladni sustav je ugrađen u sklop aparature za TIG zavarivanje, a može biti izveden na tri različite verzije[5]:

1. Otvoreni sustav – kada se crijevo priključuje direktno na vodovod,
2. Zatvoreni centralni sustav – sastoji se od velikog spremnika za vodu i crpke koja služi za pogon vode po dijelovima aparature,
3. Zatvoreni pojedinačni sustav – sastoji se od malog spremnika, hladnjaka, crpke i elektromotora.

U sustavima koji imaju ugrađenu crpku, antifriz je bolje rashladno sredstvo od vode jer istovremeno i podmazuje crpku. Kod rashladnih sustava važno je osigurati dobro brtvljenje sustava, posebno na pištolju za zavarivanje jer vodik iz kondenzata nastalog na pištolju može ući u zavar te stvoriti poroznost zavara koja loše utječe na njegova mehanička svojstva [5].

Sustav za dovod zaštitnog plina služi za dovođenje zaštitnog plina do mjesta zavarivanja u točno određenoj količini tj. protoku.

Sustav za dovod zaštitnog plina sastoji se od [5]: čelične boce ili spremnika plina, redukcijskog ventila s mjeračem protoka plina, crijeva za dovod plina s magnetskog ventila na pištolj, magnetskog ventila i crijeva za dovod plina do pištolja.

2.3.5. Zaštitni plin

Osnovni zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu, koja se što lakše ionizira te da zaštiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. Zaštitni plin direktno utječe na stabilnost i kvalitetu električnog luka, geometrijske karakteristike i estetski izgled zavarenog spoja, te na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja. Uporabom optimalnog zaštitnog plina, ovisno o parametrima i vrsti zavarivanja može se poboljšati kvaliteta zavara i smanjiti troškove zavarivanja [25].

2.3.5.1. Fizikalne karakteristike zaštitnog plina

Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na fizikalna svojstva, metalurške procese u talini zavara i na tehnološke parametre. Odabir prave vrste zaštitnog plina značajan je za električni luk s obzirom na fizikalne karakteristike plina, a to su [25]:

Ionizacijski potencijal

Ionizacijski potencijal je energija, izražena u elektron voltima (eV), potrebna za uzimanje jednog elektrona od atoma plina – pretvarajući ga u ion. Vrijednost potencijala ionizacije se smanjuje kako se molekularna masa plina povećava. Ionizacijski potencijal ima veliki utjecaj na paljenje i na stabilnost električnog luka [25].

Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost pokazuje kako pojedini plin provodi toplinu. Utječe na radijalni gubitak topline od centra prema rubovima električnog luka, kao i na prijenos topline između plazme i rastaljenog metala. Plin koji ima veću toplinsku vodljivost vodi toplinu prema van iz jezgre, što rezultira širom jezgrom i višom temperaturom jezgre električnog luka [25].

Disocijacija

Zaštitni plinovi čije su molekule građene od više atoma (vodik, kisik) prilikom zagrijavanja na visoke temperature unutar električnog luka, disociraju u atome od kojih su građene molekule. Atomi su nakon toga djelomično ionizirani, te tvore slobodne elektrone i protok struje. Kada disocirani plin dođe u kontakt s relativno hladnom površinom radnog komada, atomi se rekombiniraju i otpuste toplinu. Ta toplina rekombinacije djeluje na plin da se ponaša kao da ima višu toplinsku vodljivost [25].

Čistoća plina

Male količine nečistoća u zaštitnome plinu mogu značajno utjecati na brzinu zavarivanja, ponašanje taline, skrućivanje zavara i poroznost zavara. Plin može biti kontaminiran prilikom punjenja u bocu, iako je veća vjerojatnost ulaska nečistoća tijekom zavarivanja. Ovisno o izboru metala ili legure odabiru se zaštitni plinovi potrebne čistoće [25].

Gustoća plina

Gustoća je jedan od glavnih faktora koji utječu na efikasnost zaštitnog plina. Definira se kao masa plina po jedinici volumena. Kako bi osigurali adekvatnu zaštitu taline zavara, plinovi teži od zraka, kao što su argon i ugljični dioksid, trebaju manji protok plina prilikom zavarivanja nego neki lakši plinovi, kao npr. helij [25].

2.3.5.2. Svojstva nekih zaštitnih plinova

U TIG postupku zavarivanja najčešće se koriste inertni zaštitni plinovi argon i helij, te njihove mješavine. Od ostalih plinova, koriste se još vodik i dušik [10].

Argon

Argon je neotrovan plemeniti plin bez boje, okusa i mirisa. Inertan je plin koji ne sudjeluje u kemijskim reakcijama s talinom metala. Dobiva se iz atmosfere frakcijskom destilacijom tekućeg zraka. Zbog svojih svojstava koristi se za zavarivanje konstrukcijskih i nehrđajućih čelika, aluminija i titana. Proizvodi miran, tih i stabilan električni luk bez rasprskavanja, te daje uži i glađi zavar.

Korištenjem argona kao zaštitnog plina, unosi se najmanje topline u osnovni materijal, što uz nisku brzinu zavarivanja može prouzrokovati nastanak poroznosti na materijalima veće debljine. U svrhu sprječavanja nastanka poroznosti, kod većeg unosa energije za taljenje materijala veće debljine najčešće se koriste mješavine 75 % argona / 25 % helija ili 75 % helija / 25 % argona. Prilikom korištenja izmjenične struje, gdje je važna čistoća zaštitnog plina, argon omogućuje čišćenje oksidnog sloja s površine zavarivanog materijala.

Za TIG zavarivanje većine metala koristi se argon čistoće 99,95 %, dok kod zavarivanja vatrootpornih i reaktivnih metala (titan, molibden, tantal) minimalna čistoća argona mora iznositi 99,997 %. Takvi materijali se najčešće zavaruju u komorama iz kojih se prethodno uklanja zrak kako ne bi kontaminirao zavarivani spoj. Argon se koristi i kod zavarivanja duplex čelika kao zaštitni plin korijena zavara [10].

Helij

Helij je inertni plin koji se dobiva odvajanjem iz zemnog plina. Čistoća helija prilikom zavarivanja iznosi najmanje 99,99 %. Veće je toplinske vodljivosti od argona, pa daje širi električni luk. Toplina iz središta električnog luka može se brže prenijeti do površine radnog komada, odnosno zavara, što rezultira većom dubinom penetracije i većom količinom topline unesene u zavar. To svojstvo je korisno kod zavarivanja metala koji imaju veliku toplinsku vodljivost i koji brže odvode toplinu (aluminij i bakar), te kod primjene automatiziranih uređaja i zavarivanja velikim brzinama. Helij ima veći ionizacijski potencijal (24,5 eV) od argona (15,7 eV), što rezultira težom uspostavom električnog luka, naročito kod manjih jakosti električne struje.

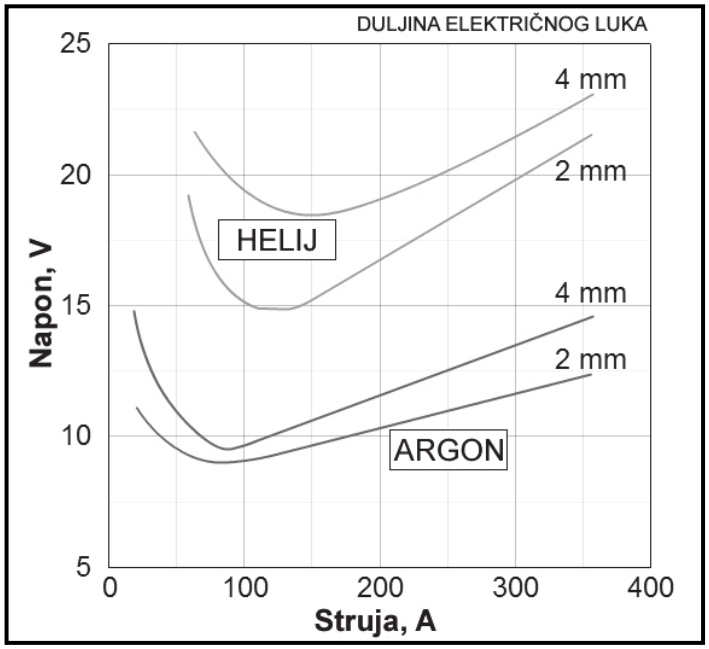
Budući da je helij plin male mase, potrebne su veće brzine protoka. Tri puta veća brzina protoka helija u odnosu na argon, razlog su veće potrošnje helija, pa isplativost njegove uporabe kao zaštitnog plina postaje upitna. Osim visoke cijene, glavni nedostatak zavarivanja s helijem kao zaštitnim plinom je manja stabilnost električnog luka. Helij kao zaštitni plin se najviše koristi u mehaniziranim ili automatskim postupcima zavarivanja [10].

Osim čistog inertnog plina argona i helija, česta je primjena njihovih međusobnih mješavina u različitim omjerima s ciljem povećanja brzine zavarivanja i penetracije u odnosu na TIG zavarivanje u zaštiti 100 % argona. Tablica 5. prikazuje usporedbu karakteristika zavarivanja pri korištenju prethodno spomenutih zaštitnih plinova [10].

Tablica 5. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [10]

Karakteristike	Argon, Ar	Mješavina Ar/He	Helij, He
Brzina zavarivanja	smanjena	veća nego kod 100 % Ar	3x veća nego kod 100 % Ar
Penetracija	smanjena	veća nego kod 100 % Ar	povećana
Čišćenje oksida	dobro (AC: Al, Mg)	sličnije kao kod 100 % Ar	loše
Uspostava luka	laka	bolja nego kod 100 % He	otežana
Stabilnost luka	dobra	bolja nego kod 100 % He	niža kod manjih struja
Oblik luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100 % He	širi
Napon luka	manji	srednji	veći
Protok	manji	veći nego kod 100 % Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego kod 100% Ar	veća nego kod 100 % Ar

Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina prikazana je slikom 16. Na slici se može uočiti fenomen povećanja napona električnog luka pri nižim strujama zavarivanja. Kod helija se fenomen događa između 50 i 100 A, dok je kod argona uočen pri strujama zavarivanja nižim od 50 A te pri nešto nižim temperaturama. Zbog opisanog fenomena i bolje kontrole električnog luka, u većini slučajeva TIG zavarivanja koriste se struje između 50 i 150 A [10].



Slika 16. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina [10]

U mješavine argona i/ili helija moguće je dodavati manji postotak drugih plinova. Među najčešće korištenim su vodik i dušik.

Vodik

Dodatkom vodika, se za istu struju zavarivanja, može povećati penetracija i energija električnog luka u osnovnom materijalu. To je posljedica dobre toplinske vodljivosti vodika. Vodik održava površine zavara čistim te sprječava nastajanje oksida što je pogodno za TIG zavarivanje metala koji lako oksidiraju. Zbog povećanja napona električnog luka, u smjesi s argonom postižu se znatno veće brzine zavarivanja. Vodik se najčešće dodaje smjesi u postotcima od 1 % i 8 % zbog odličnih svojstva pri zavarivanju tankih i debelih materijala. Pretjerano dodavanje vodika može uzrokovati poroznost i pucanje uslijed zaostalog vodika, pa mješavine nikada ne prelaze 35 %. Koristi se kod zavarivanja nehrđajućih čelika, nikal-bakar legura i legura na bazi nikala [25, 26].

Dušik

Dušik se koristi u kombinaciji s argonom (do 3 % dušika) i to obično kod zavarivanja metala koji imaju visoku toplinsku vodljivost (aluminij i bakar). Mješavine dušika upotrebljavaju se još i za zavarivanje duplex čelika, austenitnih čelika, te niklovih legura. Kod ostalih metala dušik se ne koristi jer povećava mogućnost stvaranja pukotina [25, 26].

2.3.5.3. Primjena zaštitnih plinova u ovisnosti o materijalu obratka

Čelik

Za TIG zavarivanje nelegiranih, niskolegiranih i nehrđajućih čelika najčešće se kao zaštitni plin koristi argon. Njegova primjena je tipična i za automatizirane postupke, uz mogućnost miješanja s helijem ili vodikom kako bi se povećao unos topline. Dodatak vodika također pomaže smanjenju stvaranja oksida i formiranju glatkog zavara, ali ga je moguće koristiti samo kod austenitnih nehrđajućih čelika. Čisti argon te mješavine s vodikom se koriste i kod zaštite korijenske strane zavara. Pri zavarivanju austenitno – feritnih (duplex) čelika koristi se dodatak manje količine dušika kako bi se osigurala feritno-austenitna ravnoteža [2].

Aluminij i njegove legure

Za aluminij i aluminijeve legure uobičajena je primjena argona, ili mješavina argona i helija. Helij omogućuje veći unos topline te se koristi pri zavarivanju dijelova većih debljina. Struja zavarivanja je većinom izmjenična ili pri manjim jakostima struje, istosmjerna s elektrodom na pozitivnom polu. Nedostatak korištenja helija je otežana uspostava električnog luka, osobito pri nižim vrijednostima jakosti struje. Zbog toga se za ručne postupke preporučuje argon dok se helij češće koristi kod automatiziranih postupaka [2].

Bakar i njegove legure

Za zavarivanje bakra u svim položajima zavarivanja prikladno je korištenje argona koji daje izvrsne rezultate pri debljinama materijala do 6 mm. Za debljine materijala veće od 6 mm prikladnije je koristiti helij ili mješavinu helija i argona sa 35 % argona. Zbog velike toplinske vodljivosti bakra potrebno je predgrijavanje osnovnog materijala [2].

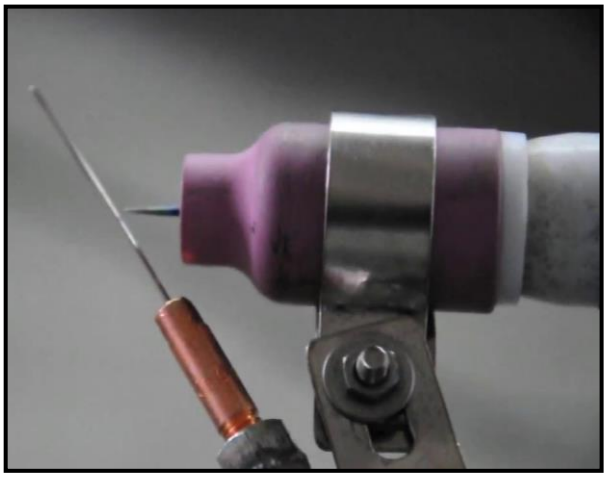
Titanij

Zavarivanje titanija zahtijeva visoku čistoću zaštitnog plina (99,99 %). Za zaštitni plin moguće je koristiti i argon i helij, ovisno o debljini zavarivanog materijala. Za materijale do 3 mm debljine preporučuje se uporaba argona, zbog veće gustoće plina i dobrih zaštitnih svojstava, dok je kod zavarivanje dijelova većih debljina prikladnija uporaba helija, radi većeg unosa topline [2].

2.3.6. Dodatni materijali za zavarivanje

Izvođenje TIG postupka zavarivanja moguće je s ili bez dodatnog materijala. Zavarivanje bez dodatnog materijala, pretaljivanje, upotrebljava se najčešće do debljina osnovnog materijala od 3 mm. Ako postoji potreba za dodatnim materijalom on se dodaje ručno ili automatizirano, slika 17. Kod ručnog dodavanja materijala u zavareni spoj radi se sa šipkama različitih promjera i duljine oko 915 mm. Kod automatiziranog dodavanja, dodatni materijal se mehanizirano dovodi do rastaljenog osnovnog materijala u hladnom (engl. *cold wire*) ili predgrijanom stanju (engl. *hot wire*). Osnovna prednost ovakvog načina dovođenja dodatnog materijala kod TIG zavarivanja je znatno povećanje produktivnosti procesa (veća količina depozita) čime se umanjuje najveći nedostatak TIG postupka zavarivanja.





a) šipke dodatnog materijala **b) dodatni materijal u obliku žice**

Slika 17. Dodatni materijal za

a) ručno i b) automatizirano TIG zavarivanje [28]

Dodatni materijal se odabire tako da ima jednak sastav osnovnom materijalu, osim kada se od dodatnog materijala zahtjeva da smanji porozitet u zavarenom spoju, poboljša kemijsku reakciju i sl. Takvi dodatni materijali proizvode se uz posebnu pažnju na kemijski sastav, čistoću i kvalitetu u usporedbi s osnovnim materijalima. Često se koriste dezoksidacijski elementi za osiguranje kvalitete zavara te dodatni elementi kako bi se omogućila bolja reakcija na toplinske postupke. Zavareni spoj mora ispuniti zahtjeve za vlačna i udarna svojstva, otpornost na koroziju, električnu i toplinsku vodljivost i dr.

Kod ručnog zavarivanja način dodavanja materijala znatno utječe na broj potrebnih prolaza i završni izgled zavarenog spoja, dok kod automatiziranog zavarivanja brzina dodavanja žice određuje količinu unesenog dodatnog materijala. Smanjenjem brzine dodavanja dodatnog materijala povećava se penetracija i smanjuje nadvišenje zavara, ali i raste mogućnost pojave pukotina po sredini zavarenog spoja te nedovoljne popune zavara. Tanki materijali (3 – 4 mm) mogu biti sučeljeno spojeni zavarivanjem s jedne strane bez korištenja dodatnog materijala, dok veće debljine zahtijevaju određenu pripremu spoja i korištenje dodatnog materijala [26].

2.4. Varijante TIG postupaka zavarivanja

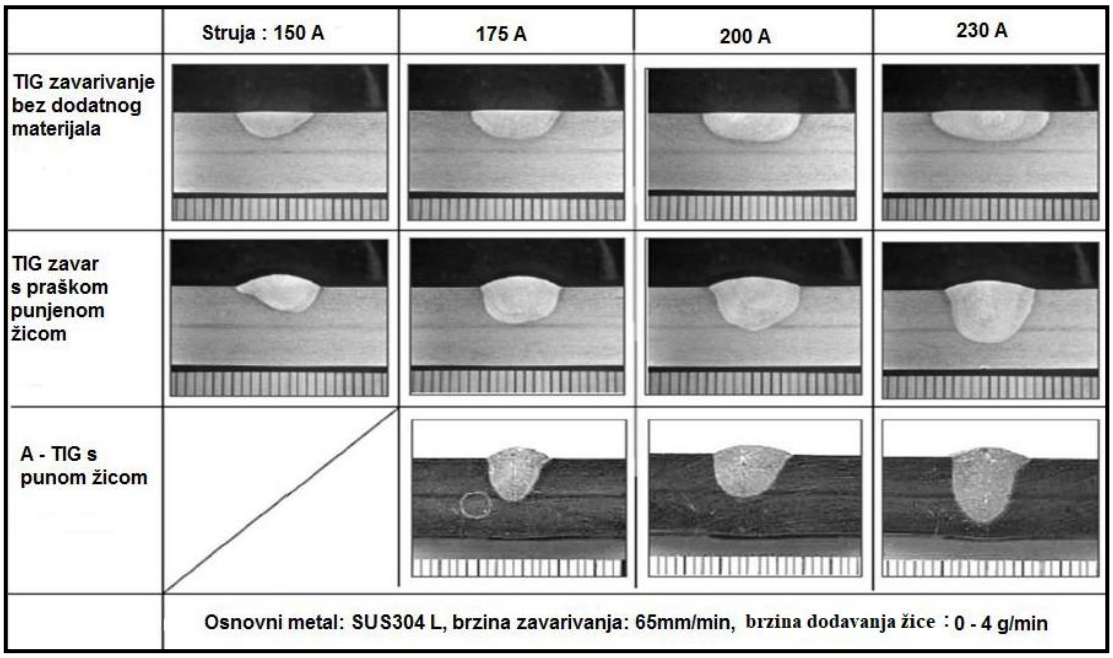
Konvencionalni TIG postupak zavarivanja ima određene nedostatke kao što su niska produktivnost, relativno plitka penetracija, visoka osjetljivost na površinske uvjete i kemijski sastav osnovnog metala. U svrhu eliminacije tih nedostataka i kao odgovor na zahtjeve industrije oko precizne regulacije unesene topline i utjecaja na geometriju zavara otkrivene su nove inačice TIG zavarivanja. Među najpoznatijim modificiranim postupcima TIG zavarivanja su FC–TIG i A–TIG, TIP TIG, K – TIG i orbitalno TIG zavarivanje [31].

2.4.1. FC–TIG i A–TIG

FC–TIG zavarivačka metoda za dodatni materijal koristi praškom punjene žice. Korištenjem takvih žica stvara se dodatni zaštitni plin i/ili troska, te se omogućava veća brzina zavarivanja i veća dubina penetracije. Kvaliteta zavara i produktivnost FC–TIG metode mjerljiva je i s MIG/MAG postupcima. Ostale prednosti FC–TIG zavarivanja su [30]:

- znatno poboljšanje sastava i mikrostrukture zavara zbog povećane učinkovitosti prijenosa legirnih elementa,
- zavari dobrih svojstava, bez pukotina ili poroznosti,
- značajan porast penetracije zavara u usporedbi s TIG zavarivanjem hladnom žicom,
- visoka stopa depozita dodatnog materijala, oko 11 kg/h.

A–TIG modificirani postupak TIG zavarivanja razvijen je s ciljem povećanja produktivnosti i penetracije. Povećanje penetracije se ostvaruje nanošenjem tankog sloja premaza na mjesto zavarivanja koji uzrokuje promjene strujanja taline (tzv. Marangoni efekt). Premaz uzrokuje veće gustoće struje i sile električnog luka u talini, a namijenjen je prvenstveno za zavarivanje nehrđajućih čelika. Ovaj postupak se ne primjenjuje često u industriji zbog dodatnog utroška vremena prilikom nanošenja premaza, cijene premaza, te zbog potrebnog čišćenja ostataka premaza na zavarenom spoju.
Slika 18. prikazuje usporedbu postupaka zavarivanja u penetraciji između konvencionalnog TIG, FC–TIG i A–TIG s punom žicom [30].



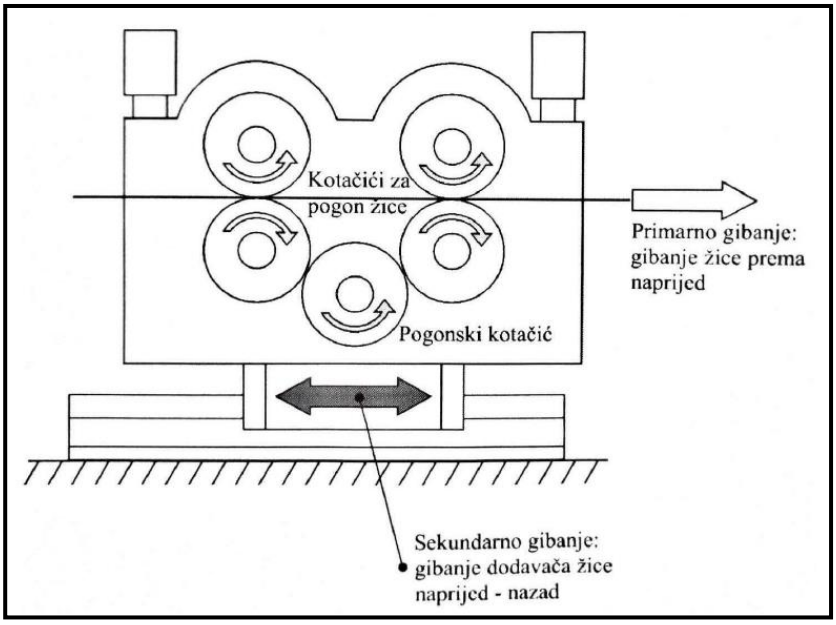
Slika 18. Usporedba penetracije između TIG, FC–TIG i A–TIG s punom žicom [29]

2.4.2. TIP TIG zavarivanje

TIP TIG postupak zavarivanja je nadogradnja klasičnog TIG postupka zavarivanja s uređajem za automatsko dodavanje žice kao dodatnog materijala, slika 19. Postupak dodavanja žice se sastoji od primarnog gibanja žice prema naprijed u smjeru taline zavara i sekundarnog linearnog gibanja naprijed–nazad kojeg proizvodi dodavač žice. Kinetička energija tog gibanja smanjuje površinsku napetost taline, poboljšava spajanje osnovnog i dodatnog materijala, te olakšava nečistoćama i plinovima izlaz iz taline.

TIP TIG zavarivanjem ostvaruje se veći depozit dodatnog materijala, visoka kvaliteta zavara, i manje deformacija radnog komada zbog niskog unosa topline. Ova inačica TIG zavarivanja koristi se pri zavarivanju konstrukcijskih, nehrđajućih i visokolegiranih čelika, titana, aluminija te njihovih legura [30, 31].

TIP TIG postupak svoju primjenu pronalazi u području robotike i automatike, te brojnim industrijama: naftna, prehrambena, kemijska, vojna, avio i auto industrija. Zbog zavara odličnih metalurških i mehaničkih svojstava, TIP TIG zavarivanje se koristi kod izrade cjevovoda, spremnika, tlačnih posuda i kod precizne obrade metala [38].



Slika 19. Shematski prikaz gibanja dodavača žice kod TIP TIG zavarivanja [31]

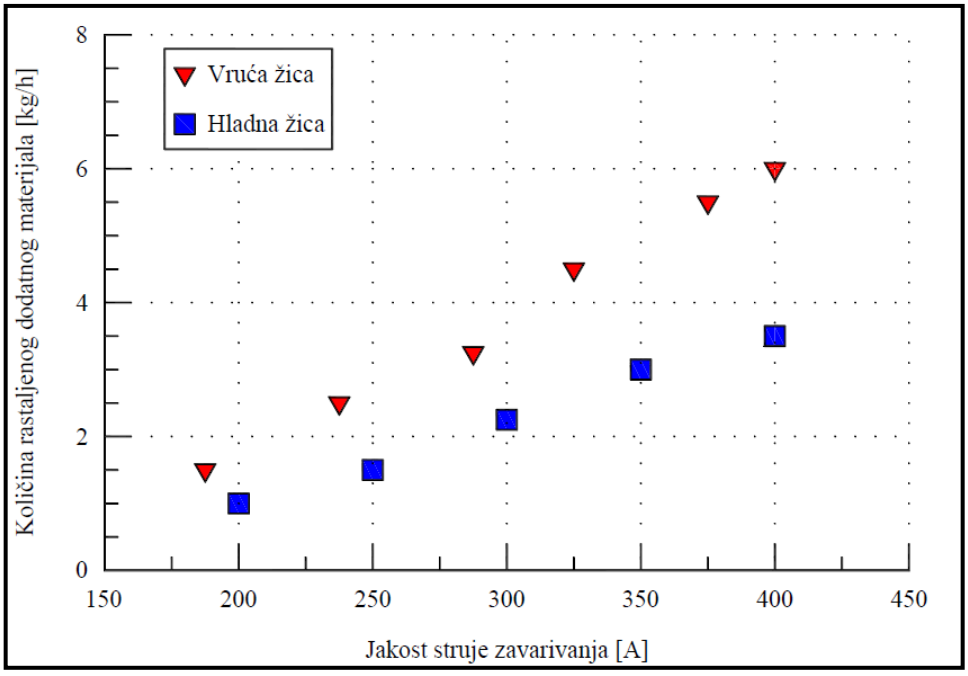
Postoje dvije vrste TIP TIG postupka zavarivanja, obzirom na predgrijavanje žice – dodatnog materijala.

a) Zavarivanje hladnom žicom jednostavnija je varijanta TIP TIG postupka. Primjena ovog postupka ista je kao i za varijantu s vrućom žicom uz nižu količinu unesene topline u zavareni spoj, te manju efikasnost i brzinu postupka. Sustav dodavanja hladne žice sličan je većini automatskih dobavljača žice, te se sastoji od tri dijela: mehanizma za dodavanje žice, uređaja za kontrolu brzine dodavanja te vodilice koja dodatni materijal usmjerava u metal zavara [30, 31]. Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja s hladnom žicom postižu se zavari odlične kvalitete i izgleda koji posjeduje izvrsna mehanička i metalurška svojstva. Također, ovim postupkom je moguće zavarivati galvanski, elektrolitski, i vruće pocinčane presvučene materijale. Tokom zavarivanja nema prskanja kapljica nataljenog metala, niti potrebe za naknadnom obradom zavarenog spoja [31].

b) Zavarivanje s vrućom žicom varijanta je TIP TIG postupka gdje se dodatni materijal (žica) predgrijava i dodaje iza električnog luka desnom tehnikom rada te pod kutem od 40° do 60° u odnosu na netaljivu elektrodu. Žica se predgrijava efektom Joulesove topline pomoću električne struje koju proizvodi dopunski izvor energije. Predgrijavanje se ne preporučuje kod aluminijevih i bakrenih žica jer mala vrijednost otpora dodatnog materijala zahtijeva velike jakosti struje predgrijavanja koje rezultiraju pretjeranim puhanjem električnog luka.

Predgrijana žica ulazi u talinu zavara s manjom energije električnog luka za taljenje što rezultira značajnim povećanjem depozita (do 4,5 kg/h), uskom zonom utjecaja topline, te minimalnim deformacijama radnog komada. Glavna prednost ovog postupka u odnosu na postupke zavarivanja s taljivom elektrodom je mogućnost odvojenog upravljanja unosom energije i unosom dodatnog materijala u talinu zavara. Ova prednost se u praksi najviše očituje u potpunoj kontroli početne i završne faze zavarivanja kao i mogućnosti da se izvrsno mogu odrađivati reparaturna zavarivanja. TIP TIG postupak zavarivanja s vrućom žicom primjenjuje se za zavarivanje svih faza spoja (korijenski prolaz, popuna, završni prolaz), a može se koristiti i kod zavarivanja stijenki većih debljina [30].

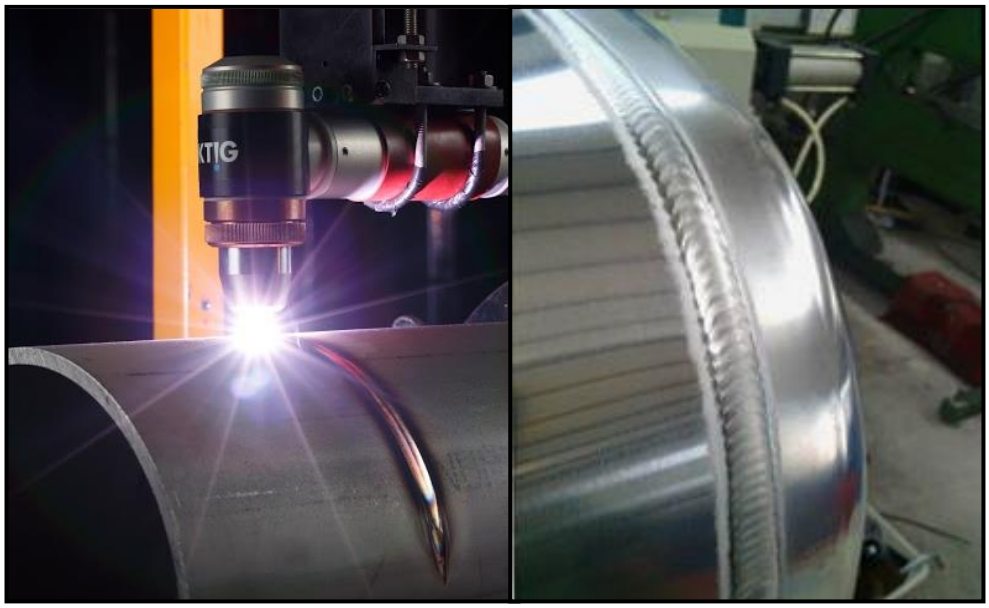
Na slici 20. prikazana je usporedba depozita kod TIP TIG postupka s hladnom i vrućom žicom. Za istu struju zavarivanja kod varijante s vrućom žicom unesena je veća količina topline u zavar što se može iskoristi za veću količinu nataljenog materijala, odnosno povećanje brzine zavarivanja ili za smanjivanje parametara. U usporedbi s hladnom žicom pri istoj brzini dodavanja žice i istoj struji zavarivanja, količina dodatnog materijala kod varijante s vrućom žicom se može još dodatno regulirati jačinom struje kojom se grije žica čime se utječe ili na brzinu procesa ili na količinu nataljenog materijala [31].



Slika 20. Usporedba TIP TIG postupka s vrućom i hladnom žicom [31]

2.4.3. K – TIG zavarivanje

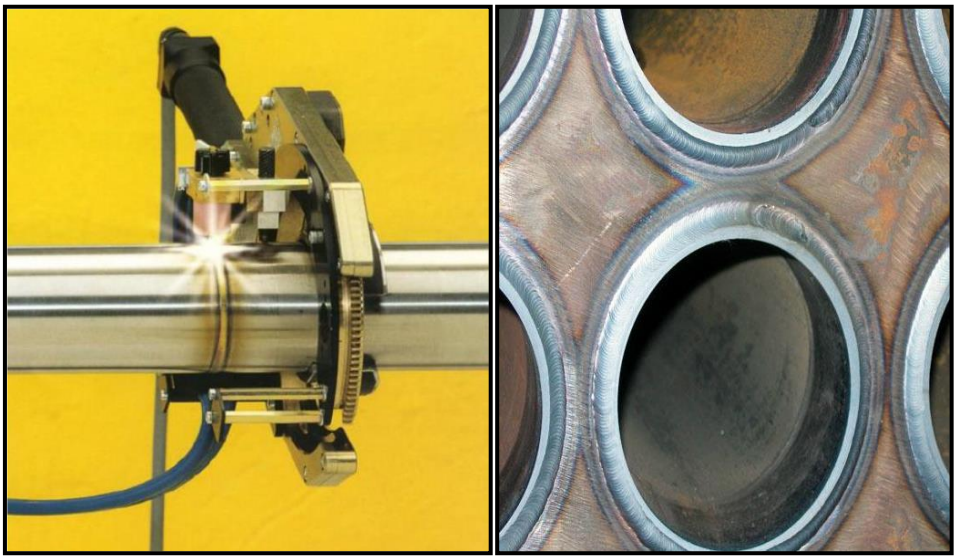
K – TIG postupak zavarivanja je automatiziran proces zavarivanja u vodoravnom (PA) položaju koji koristi efekt ključanice (engl. *Keyhole*). Postupak se temelji na stvaranju zavarenog spoja iz protaljivanja rupe u materijalu te povlačenju električnog luka u svrhu zatvaranja te rupe. Koristi se za zavarivanje željeznih i neželjeznih legura debljina od 3 do 12 mm, a moguće je i zavarivanje cijevi uz upotrebu okretaljki. Idealan je za materijale male toplinske provodljivosti, poput nehrđajućih čelika i titana, slika 21. Kvaliteta zavara je ista kao kod klasičnog konvencionalnog TIG postupka, ali uz puno veću produktivnost. Ostale prednosti su minimalna potreba za dodatnim materijalom i pripremom spoja, te izrada zavara u samo jednom prolazu [36].



Slika 21. K – TIG zavarivanje [37]

2.4.4. Orbitalno TIG zavarivanje

Orbitalno TIG zavarivanje je postupak koji se koristi za zavarivanje cijevi, lukova, koljena, T–spojeva, prirubnica, te raznih priključaka, slika 22. Razvijen je iz potrebe za većom produktivnosti i zahtjeva za većom kvalitetom zavarenog spoja kao što su bolja mehanička i korozijska svojstva, te estetski izgled zavarenog spoja. Orbitalnim TIG zavarivanjem postiže se ravan, jednolik i homogen korijenski zavar. Koristi se u kemijskoj, naftnoj, farmaceutskoj te zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Automatski TIG uređaji koji služe za zavarivanje cjevovoda i plinovoda promjera do 800 mm, u većini slučajeva koriste TIG postupak za jednostrano zavarivanje korjenih i popunskih zavara čeličnih cijevi [31, 35].



Slika 22. Orbitalno TIG zavarivanje cijevi [35]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

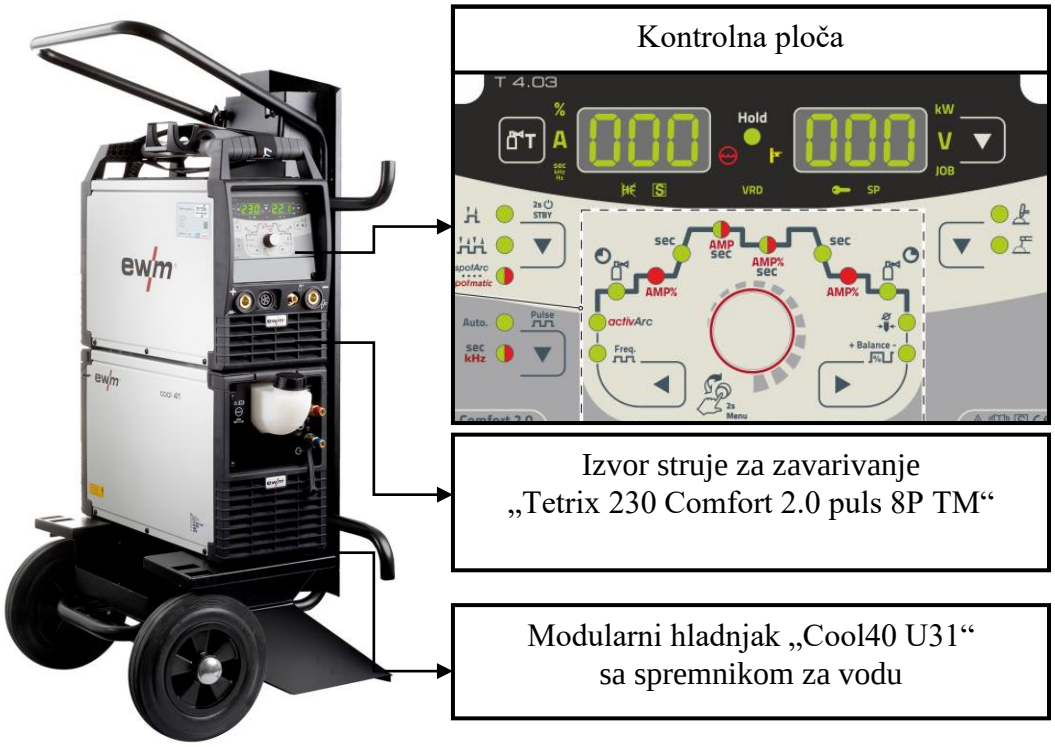
Eksperimentalni rad proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Impulsnim TIG zavarivanjem navareno je dvanaest pločica dimenzija

100 x 50 x 10 mm s različitim parametrima zavarivanja koji su se ispitivali. Navarivanje ispitnih pločica izvedeno je pomoću TIG stroja za zavarivanje s ciljem ispitivanja utjecaja parametara impulsnog zavarivanja na stabilnost procesa, produktivnost i geometrijske značajke navara. Nakon navarivanja ispitnih pločica od austenitnog čelika, izrezani su uzorci na kojima se analizirala geometrija profila koja je postignuta ovom tehnologijom zavarivanja.

Eksperiment se odvijao u nekoliko etapa: izrada i priprema pločica (podloge) za navarivanje, navarivanje pločica različitim parametrima, izrada makro uzoraka rezanjem, brušenje i obrada površina makro uzoraka te analiza dobivenih rezultata.

3.1. Oprema i izvor struje za zavarivanje

Navarivanje ispitnih pločica provedeno je TIG uređajem za zavarivanje „Tetrix 230 Comfort 2.0 puls 8P TM“ tvrtke EWM. Uređaj se nalazi u Laboratoriju za zavarivanje, a njegov izgled i oprema prikazani su na slici 23.



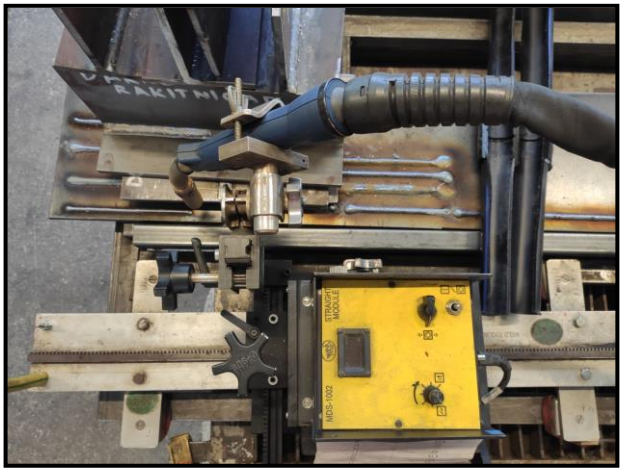
Slika 23. Uređaj za TIG zavarivanje – „Tetrix 230 Comfort 2.0 puls 8P TM“ [32]

Glavni dio uređaja čine izvor struje s upravljačkom jedinicom i modularni hladnjak s vodenim spremnikom za hlađenje TIG pištolja. Izvor struje je digitalno upravljiv te omogućuje TIG i REL zavarivanje impulsnim strujama. Uređaj može raditi na istosmjernoj i na izmjeničnoj struji, a ovisno o odabranom režimu rada omogućuje niz različitih mogućnosti zavarivanja.

U ovom radu koristila se istosmjerna DC struja s elektrodom spojenom na negativnom polu i impulsno TIG zavarivanje. Automatizacija procesa navarivanja ostvarena je pomoću sustava za automatsko upravljanje „Bug-o Systems“ (slika 24.) koji se zajedno s pričvršćenim pištoljem za TIG zavarivanje paralelno gibao uz radno mjesto. Tijekom eksperimenta navarivanja uređaj za automatizaciju procesa bio je postavljen na istu brzinu od 9 cm/min, zajedno s pištoljom koji je održavao konstantnu visinu luka od 5 mm. Drugi parametri navarivanja unosili su se pomoću kontrolne ploče (slika 23.) koja se nalazi na samom izvoru struje ovog uređaja.

a) 

b) 

c) 

Slika 24. Radna jedinica za automatizaciju procesa TIG zavarivanja – „Bug-o Systems“

Najveća jakost struje koju „Bug-o Systems“ uređaj može postići iznosi 230 A pri intermitenciji od 40 %. Zbog svoje težine od samo 17,2 kg nalazi se među najlakšim i najmobilnijim izvorima struje za zavarivanje na svijetu. Ostale tehničke karakteristike prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje „Tetrix 230 Comfort 2.0 puls“ [32]

Vrsta izvora struje		Tetrix 230 Comfort 2.0 puls	
Priključni napon		230 V (- 40 % / + 15 %), 50/60 Hz	
Napon praznog hoda		90 V	
Strujni opseg (TIG – AC/DC)		3 A – 230 A	
Strujni opseg (REL)		5 A – 180 A	
Struja zavarivanja	Intermitencija	230 A	40 %
		200 A	60 %
		170 A	100 %
Stupanj zaštite		IP 23	
Dimenzije (D x Š x V)		539 x 210 x 415 mm	
Težina		17,2 kg	

3.2. Osnovni materijal i njegova priprema

Osnovni materijal korišten u eksperimentalnom dijelu rada je visokolegirani Cr-Ni čelik AISI 304. To je austenitni čelik dobre čvrstoće i odlične korozijske otpornosti. Nemagnetičan je, dobre obradljivosti i odlične zavarljivosti. Analiza kemijskog sastava osnovnog materijala provedena je u Laboratoriju za zaštitu materijala korištenjem prijenosnog XRF uređaja tvrtke Olympus, slika 25. Rezultati dobiveni XRF analizom prikazani su u tablici 7. Osnovni materijal imao je oblik ploče dimenzija 1500 x 750 x 10 mm, dok je za potrebe ispitivanja izrezano 12 ispitnih pločica dimenzija 100 x 50 x 10 mm po kojima se kasnije navarivalo, slika 26. Sve pločice izrezane su iz iste šarže kako bi se isključio utjecaj promijenjenog kemijskog sastava kod usporedbe rezultata. Površinska priprema izrezanih pločica sastojala se od ručnog grubog brušenja brusnim papirom, smanjujući veličinu zrnatosti redom: P80, P120, P240. Nakon brušenja, pločice su očišćene etanolom kako bi se odmastila površina i odstranile sve preostale nečistoće.



Slika 25. Ispitivanje kemijskog sastava ploče AISI 304

(Olympus XRF Analyzers DELTA Pro)

Tablica 7. Rezultati XRF analize – kemijski sastav ploče AISI 304

	Kemijski element								
	Fe	Cr	Ni	Al	Mn	Si	Cu	Mo	V
Maseni udio (%)	67,01	17,71	7,17	5,75	1,25	0,4	0,34	0,23	0,15
Odstupanje od izmjerenog udjela (%)	0,28	0,12	0,11	0,56	0,06	0,05	0,03	0,006	0,03



Slika 26. Izrezane ispitne pločice od osnovnog materijala

3.3. Izbor volframove elektrode i zaštitnog plina

Za potrebe eksperimenta i ovisno o jačini korištene struje navarivanja austenitnih pločica, odabrana je volframova elektroda WT20 (crvena) legirana s torijevim oksidima. Ta vrsta elektrode ima dugi vijek trajanja, otpornija je na veće vrijednosti struje i održava električni luk stabilnijim kod korištenja istosmjerne (DC) struje. Tijekom eksperimenta koristila se ista elektroda promjera 3.2 mm, s razmakom između vrha elektrode i radnog komada od 5 mm. Sapnica pištolja za zavarivanje bila je unutarnjeg promjera 10 mm, vrh elektrode je imao oblik zašiljenog konusa, dok se dodatni materijal nije koristio.

Kao zaštitni plin koristio se argon 4.8 (grupa I1 prema normi ISO 14175) proizvođača Messer, slika 27. Razlog korištenja argona kao zaštitnog plina je rad s austenitnim pločicama koji tijekom navarivanja stvaraju okside u zoni utjecaja topline koji kasnije mogu uzrokovati različite oblike korozije. Inertnost zaštitnog plina argona određuje kvalitetu zavarenog spoja. Osim dobre kvalitete zavara, argon omogućuje stabilan električni luk, manje štrcanje, uži profil zavara i ljepši izgled zavara. Za navarivanje svih pločica protok plina je iznosio 7 l/min.



Slika 27. Zaštitni plin – Argon 4.8

3.4. Parametri navarivanja

Prethodno izrezane pločice podijeljene su u četiri serije: A, B, C i D. Svaku seriju činile su tri ispitne pločice. Ispitivao se utjecaj promjene određenog parametra na svojstva, izgled i dimenzije navara. Prije početka navarivanja, dogovoreno je da će se promatrati utjecaj četiri najznačajnijih parametara kod impulsnog zavarivanja: frekvencija, balans vršne i osnovne struje, promjena vršne struje te promjena osnovne struje. Ostali parametri držali su se konstantnima kako bi rezultati na kraju eksperimenta bili usporedivi. Optimalni parametri navarivanja dobiveni su probnim zavarivanjima prije početka eksperimenta. Uzorci su navarivani pojedinačno i u horizontalnom (PA) položaju.

- Serija uzoraka A

U prvoj seriji uzoraka (A) ispitivao se utjecaj promjene frekvencije navarivanja. Uzorak A1 navaren je najnižom frekvencijom od 50 Hz, uzorak A2 sa 250 Hz, dok je uzorak A3 navaren s najvećom frekvencijom od 500 Hz. Svi ostali parametri zavarivanja bili su konstantni tokom navarivanja u sva tri uzorka. Vrijednosti zadanih i ispitivanih parametara prve serije uzoraka A prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Parametri navarivanja prve serije uzoraka A – utjecaj frekvencije

serija uzorka	uzorak	$I_{vršna}$/A	$I_{osnovna}$/A	$U_{postavljen}$ /V	$v_{navarivanja}$ /[cm/min]	*f*/Hz	*balans*/%
A	1	200	50	18	9	50	50
	2	200	50	18	9	250	50
	3	200	50	18	9	500	50

- Serija uzoraka B

U drugoj seriji uzoraka (B) promatralo se koliko balans tj. vrijeme navarivanja s vršnom strujom utječe na svojstva zavara. Uzorak B1 navaren je s 20 % vremena na vršnoj struji, uzorak B2 s pola vremena na vršnoj, a pola na osnovnoj, dok je posljednji uzorak ove serije B3 navaren s 80 % vremena navarivanja na vršnoj struji. Vrijednosti zadanih i ispitivanih parametara druge serije uzoraka B prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Parametri navarivanja druge serije uzoraka B – utjecaj balansa

serija uzorka	uzorak	$I_{vršna}$/A	$I_{osnovna}$/A	$U_{postavljen}$/V	$v_{navarivanja}$ /[cm/min]	*f*/Hz	*balans*/%
B	1	200	50	18	9	500	20
	2	200	50	18	9	500	50
	3	200	50	18	9	500	80

- Serija uzoraka C

U trećoj seriji uzoraka (C) ispitalo se koliko promjena vršne struje utječe na svojstva i izgled zavara u odnosu na ostale parametre navarivanja. Uzorci C1, C2 i C3 navareni su vršnim strujama od 150 A, 200 A, te 230 A, koliko iznosi i maksimalna moguća struja zavarivanja ovog uređaja, tablica 10.

Tablica 10. Parametri navarivanja treće serije uzoraka C – utjecaj vršne struje

serija uzorka	uzorak	$I_{vršna}$/A	$I_{osnovna}$/A	$U_{postavljen}$/V	$v_{navarivanja}$ /[cm/min]	*f*/Hz	*balans*/%
C	1	150	50	16	9	500	50
	2	200	50	18	9	500	50
	3	230	50	19,3	9	500	50

- Serija uzoraka D

U četvrtoj seriji uzoraka (D) ispitalo se koliko navarivanje različitim osnovnim strujama utječe na svojstva i izgled zavara. Uzorci D1, D2 i D3 navareni su osnovnim strujama u iznosu od 20 A, 60 A te 100 A, tablica 11.

Tablica 11. Parametri navarivanja četvrte serije uzoraka D – utjecaj osnovne struje

serija uzorka	uzorak	$I_{vršna}$/A	$I_{osnovna}$/A	$U_{postavljen}$/V	$v_{navarivanja}$ /[cm/min]	*f*/Hz	*balans*/%
D	1	200	20	18	9	500	50
	2	200	60	18	9	500	50
	3	200	100	18	9	500	50

Tijekom navarivanja svih 12 pločica, sa TIG uređaja su očitavani „realni“ parametri navarivanja kako bi se mogli usporediti sa početno „postavljenim“ vrijednostima. Pratila se i zapisivala promjena napona (U_{realno}) te promjena srednje struje koju je prikazivao uređaj za zavarivanje ($I_{srednja_realna}$). Postavljene i realne vrijednosti parametara navarivanja prikazane su u tablici 12.

Tablica 12. Prikaz postavljenih i realnih vrijednosti parametri navarivanja

serija uzorka	uzorak	$U_{postavljeno}$ /V	U_{realno} /V	$I_{vršna}$ /A	$I_{osnovna}$ /A	$I_{srednja_realna}$ /A	f /Hz	*balans* /%
A	1	18	13	200	50	125	50	50
	2	18	13	200	50	126	250	50
	3	18	12	200	50	126	500	50
B	1	18	10	200	50	80	500	20
	2	18	13	200	50	126	500	50
	3	18	14	200	50	171	500	80
C	1	16	12	150	50	100	500	50
	2	18	13	200	50	126	500	50
	3	19,3	14	230	50	143	500	50
D	1	18	11	200	20	115	500	50
	2	18	12	200	60	130	500	50
	3	18	13	200	100	150	500	50

Nakon popunjavanja prethodne tablice, za svaki je uzorak izračunato vrijeme navarivanja na vršnoj struji (t_1), vrijeme navarivanja na osnovnoj struji (t_2), te izračunata srednja vrijednost struje ($I_{srednja_izračunata}$) prema sljedećim izrazima [40]:

- za balans 50%: $t_1 = \frac{f}{60} \qquad t_2 = t_1$

- za balans 20 i 80%: $t_1 = \frac{balans \times f}{100 \times 60} \qquad t_2 = \frac{(100 - balans) \times f}{100 \times 60}$

- izračunata srednja vrijednost struje: $I_{srednja_izračunata} = \frac{I_{vršna}\, t_1 + I_{osnovna}\, t_2}{t_1 + t_2}$

Unosi topline (Q) računali su se sa postavljenim i realnim vrijednostima pa su sukladno tome i nazvani, postavljeni unos topline ($Q_{\text{postavljeno}}$), odnosno realni unos topline (Q_{realno}). [33]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000}$$

$$Q_{\text{realno}} = k \times \frac{U_{\text{realno}} \times I_{srednja_\text{realna}}}{v_{\text{navarivanja}}} \times \frac{60}{1000}$$

$$Q_{\text{postavljeno}} = k \times \frac{U_{\text{postavljeno}} \times I_{\text{srednja}_izračunata}}{v_{\text{navarivanja}}} \times \frac{60}{1000}$$

Gdje je:

Q – unos topline, kJ/cm

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja

(prema normi HRN EN 1011-1 za TIG postupak iznosi 0,6)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min.

(za sve uzorke brzina je bila konstantna i iznosila je 9 cm/min)

Između postavljenog i realnog unosa toplina izračunato je odstupanje prema izrazu:

$$Odstupanje = 100 - (\frac{Q_{\text{realno}}}{Q_{\text{postavljeno}}} \times 100)$$

Prethodno opisane izračunate vrijednosti prikazane su u tablici 13. Temperatura se nije mjerila jer se svaki uzorak navarivao u istim uvjetima.

Tablica 13. Prikaz izračunatih vrijednosti parametara navarivanja

serija uzorka	uzorak	t_1/s	t_2/s	$I_{srednja_izračunata}$ /A	Q_{realno} /[kJ/cm]	$Q_{postavljeno}$ /[kJ/cm]	*odstupanje* /%
A	1	0,83	0,83	125	6,5	9	28
	2	4,17	4,17	125	6,55	9	28
	3	8,33	8,33	125	6,05	9	33
B	1	1,67	6,67	80	3,2	5,76	44
	2	8,33	8,33	125	6,55	9	27
	3	6,67	1,67	170	9,58	12,24	23
C	1	8,33	8,33	100	4,8	6,4	25
	2	8,33	8,33	125	6,55	9	27
	3	8,33	8,33	140	8	10,81	26
D	1	8,33	8,33	110	5,06	7,92	32
	2	8,33	8,33	130	6,24	9,36	33
	3	8,33	8,33	150	7,8	10,8	28

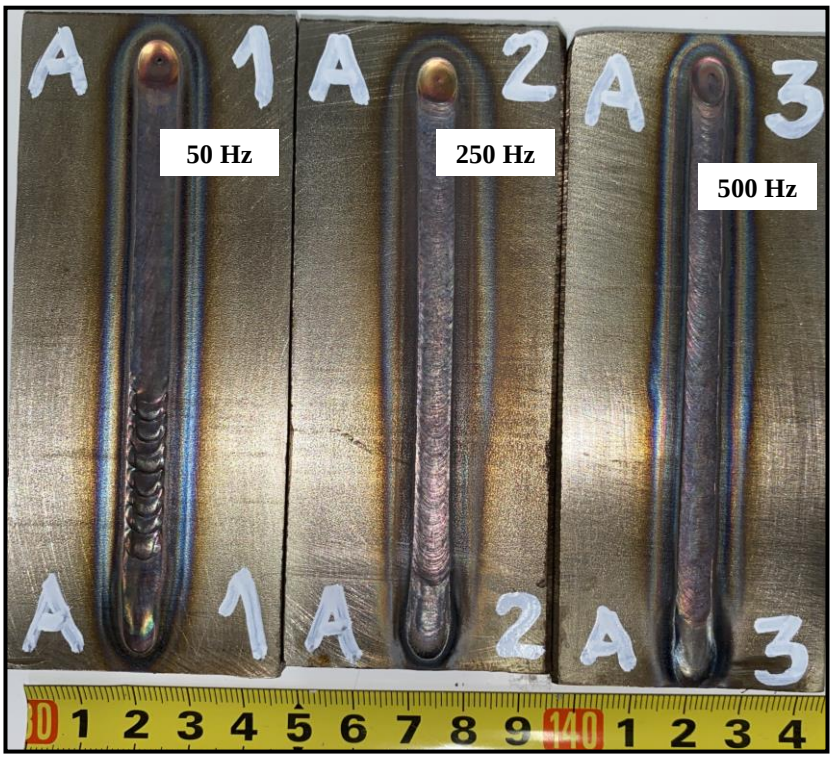
3.5. Analiza i rezultati navarivanja

Tijekom izvođenja procesa navarivanja, vizualnom kontrolom se pratilo mjesto navarivanja i ponašanje taline. Talina se kod svih uzoraka ponašala mirno i bez štrcanja, kako je i karakteristično za TIG postupak zavarivanja. Kada su navarene pločice dostigle temperaturu okoline, svaki navar na ploči bio je označen flomasterom. Uzorci su posloženi po serijama jedan uz drugi kako bi se lakše mogli usporediti i analizirati. U nastavku slijede slike navara po serijama te analiza pripadnih uzoraka.

- Serija uzoraka A – utjecaj frekvencije

Navarivanjem uzoraka iz serije A uočeno je kako se povećanjem frekvencije električni luk primjetno sužavao i poprimao skoro cilindrični oblik. Također, rad s većom frekvencijom zavarivanja uzrokovao je nelagodan pisak koji je otežavao uvjete rada.

Početak navara je kod sva tri uzorka približno jednak zahvaljujući izvoru struje koji kod rada sa strujom impulsnog oblika, uvijek pali električni luk s najmanjom strujom uređaja, najčešće od 2 do 12 A, dok proces nastavlja na maksimalno odabranoj struji. Unatoč radu s istosmjernom strujom i završetku navarivanja na najmanjoj struji uređaja uočljivi su blagi krateri na kraju procesa navarivanja. Lica navara svih uzoraka serije A estetski su zadovoljavajuća, slika 28.

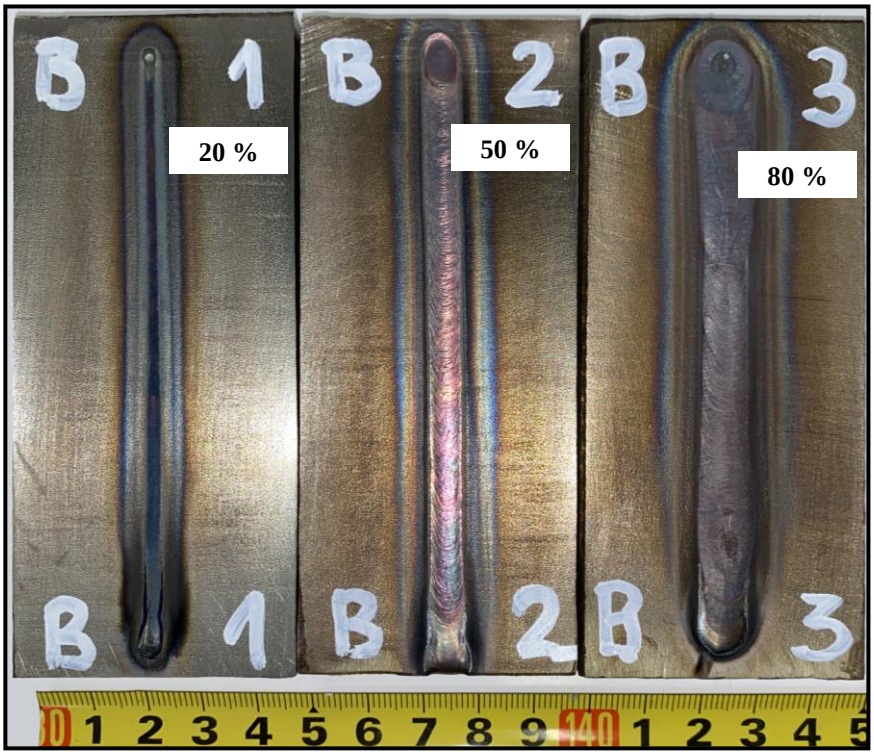


Slika 28. Serija uzoraka A – rezultati navarivanja

- Uzorak A1 ima najširi navar i jedini od uzoraka serije A pokazuje nakupljanje taline tokom navarivanja. Ova pojava je povezana s nižom frekvencijom i brzinom navarivanja.
- Uzorak A2 ima najširu zonu utjecaja topline (7 mm) što se i primjećuje kroz najveću širinu obojenja oksidnog sloja na površini AISI 304 čelika. U ovaj uzorak je unesena najvećeg količina topline, (Q_{realno} = 6,55 kJ/cm).
- Uzorak A3 navaren je s najvišom frekvencijom. Električni luk kod ovog uzorka čitavo je vrijeme bio simetričan, pravilan i stabilan. Najveća frekvencija dala je najjuži profil zavara uz najmanji realni unos topline.

- Serija uzoraka B – utjecaj balansa

Postotak uključenog impulsa ili balans je vrijeme trajanja vršne električne struje impulsa izraženo u postotku, a kontrolira koliko dugo se održava vršna električna struja, prije nego što se vrati na donju vrijednost jakosti električne struje zavarivanja. Ovom serijom uzoraka dokazano je da se duljim držanjem vršne električne struje u impulsu postiže najveći unos topline te najveća širina navara uz blagi krater na kraju procesa navarivanja, slika 29.

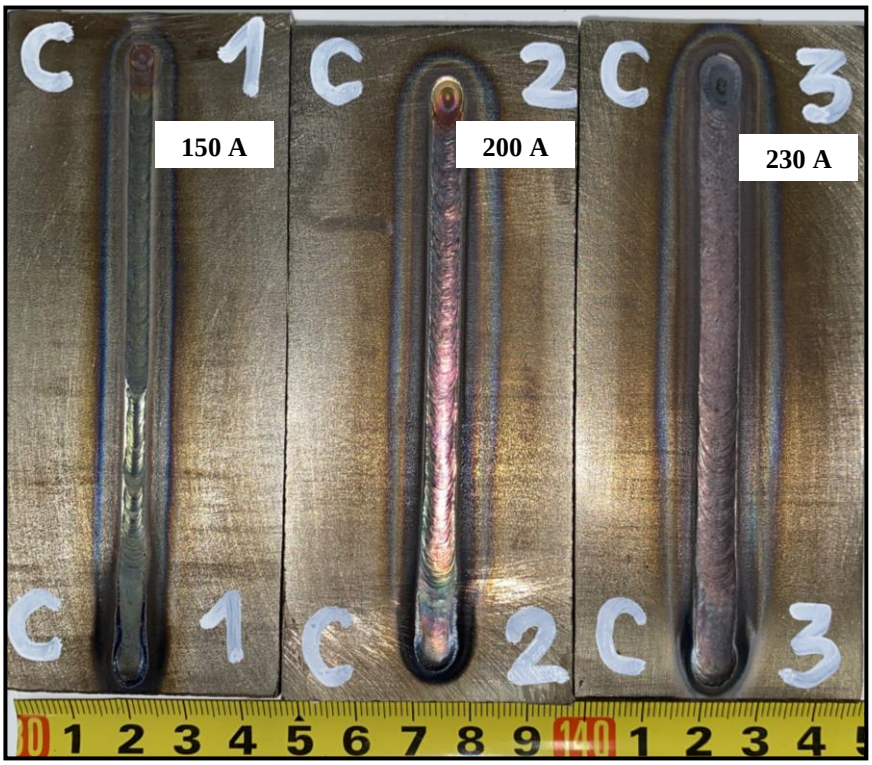


Slika 29. Serija uzoraka B – rezultati navarivanja

- Uzorak B1 ima najuži zavar, ZUT i obojenje oksidnog sloja. Na početnom dijelu navara vidljivo je postojanje veće količine taline oko koje je prilično velika crna mrlja od propaljenosti. Nakon tog početnog dijela, širina i izgled navara su jednoliki. Navar je preuzak i za očekivati je da je premali unos topline doveo do slabe penetracije u osnovni materijal.
- Uzorak B2 navarivan je jednako dugo na vršnoj i na osnovnoj struji. Prema izgledu navara, može se zaključiti da su parametri bili u optimalnoj kombinaciji.
- Uzorak B3 pokazao je kako dulje držanje vršne električne struje ne ostavlja dobre rezultate na navaru. Uzorak B3 imao je najveći unos topline, (Q_{realno} = 9,58 kJ/cm), što se vidi po njegovom nepravilnom, razlivenom obliku i boji zone utjecaja topline.

- Serija uzoraka C – utjecaj vršne struje

Gornja (vršna) i donja (osnovna) jakost struje namještaju se regulatorima na izvoru struje. Uzorcima C1, C2 i C3 ispitano je koliko jakost vršne struje utječe na izgled navara, slika 30. Navarivalo se redom sa 150 A, 200 A te 230 A što je ujedno bila i najveća struja izvora struje za zavarivanje.

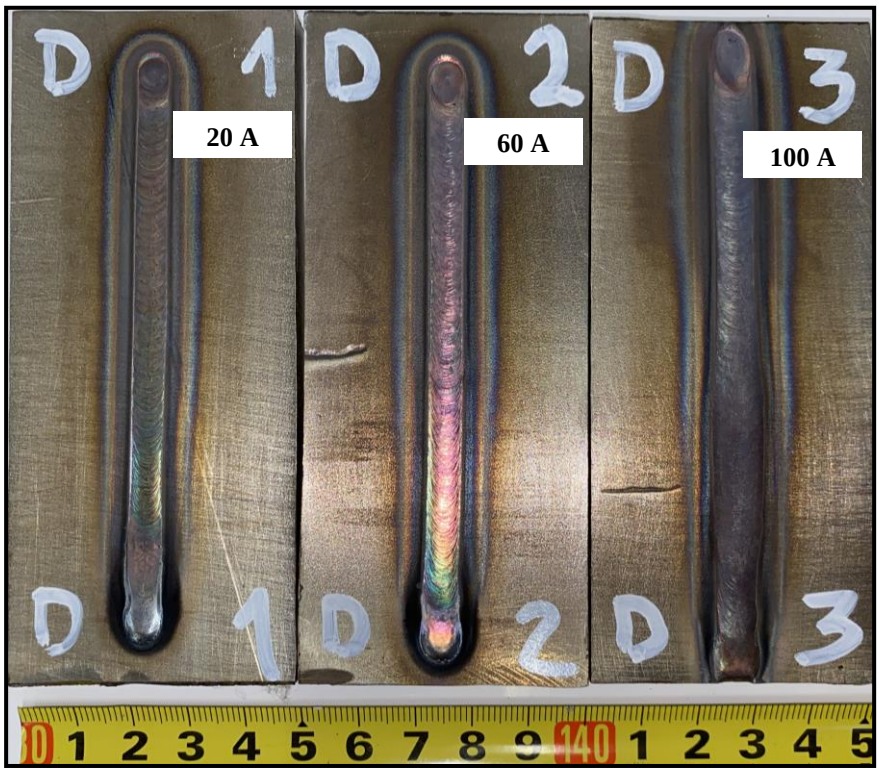


Slika 30. Serija uzoraka C – rezultati navarivanja

- Uzorak C1 pokazao je kako i niža vršna struja daje dobre rezultate uz nešto niži unos topline. Obojenje je ravnomjerno po duljini navara i kreće se od sivog uz rub navara preko smeđeg, svjetlo plavog i ljubičastog do tamnog. Na početnom dijelu nema pojave kratera, ali se pojavilo blago zacrnjenje zone utjecaja topline uzrokovano postojanjem veće količine početne taline.
- Uzorci C2 i C3 dali su slične rezultate zbog sličnih vršnih struja s kojima se radilo. Ujednačeniji izgled lica navara imao je uzorak C3 s nešto većim realnim unosom topline s kojim se postigla veća širina navara.

- Serija uzoraka D – utjecaj osnovne struje

Uzorci koji su se navarivali različitim osnovnim strujama slično su reagirali kao i uzorci iz serije C kojima su se mijenjale vršne struje. Prema slici 31. može se zaključiti kako se najbolji rezultati postižu korištenjem nižih vrijednosti osnovne struje. Između uzoraka postoji razlika u obojenju oksidnog sloja što ukazuje na različite brzine hlađenja uzoraka. Također, pri nižim osnovnim strujama navarivanja, uočena je nestabilnost električnog luka pri njegovom paljenju. Ostale razlike će se usporediti nakon izrade makrouzoraka i promatranja uzoraka preko mikroskopa.



Slika 31. Serija uzoraka D – rezultati navarivanja

3.6. Izrada i priprema makrouzoraka

Nakon završetka navarivanja iz osnovnih austenitnih pločica izrađeni su makrouzorci kako bi se dobio uvid u geometrijske značajke navara. Uzorci su izrezani iz osnovnog materijala pomoću tračne pile uz hlađenje emulzijom, slika 32. Tako je izbjegnut negativan utjecaj prevelikog unosa topline na mikrostrukturu izradaka. Uzorci su izrezani na dimenziju

45 x 25 x 10 mm, s time da je početak rezanja bio na udaljenosti 50 mm od početka austenitne pločice zbog nestabilnosti električnog luka na početku svakog navarivanja.



Slika 32. Tračna pila i postupak izrade makrouzoraka

Nakon rezanja slijedilo je čišćenje površine makrouzoraka od srhova i grubo brušenje na uređaju Struers LaboPol-6 s rotirajućom pločom (300 okretaja/min) i vodenim hlađenjem, slika 33. Uzorci su izbrušeni brusnim papirom smanjujući veličinu zrnatosti i to redom: P240, P400 i P500.

Nastavak brušenja uzoraka proveden je u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju Buehler Phoenix Alpha Grinder Polisher, slika 34. Fino brušenje provedeno je sljedećim brusnim papirima: P1000, P2400 i P4000. Brzina brušenja je bila 300 okretaja/min za sve hrapavosti brusnog papira. Tijekom svih faza finog brušenja korištena je voda kao rashladno sredstvo.

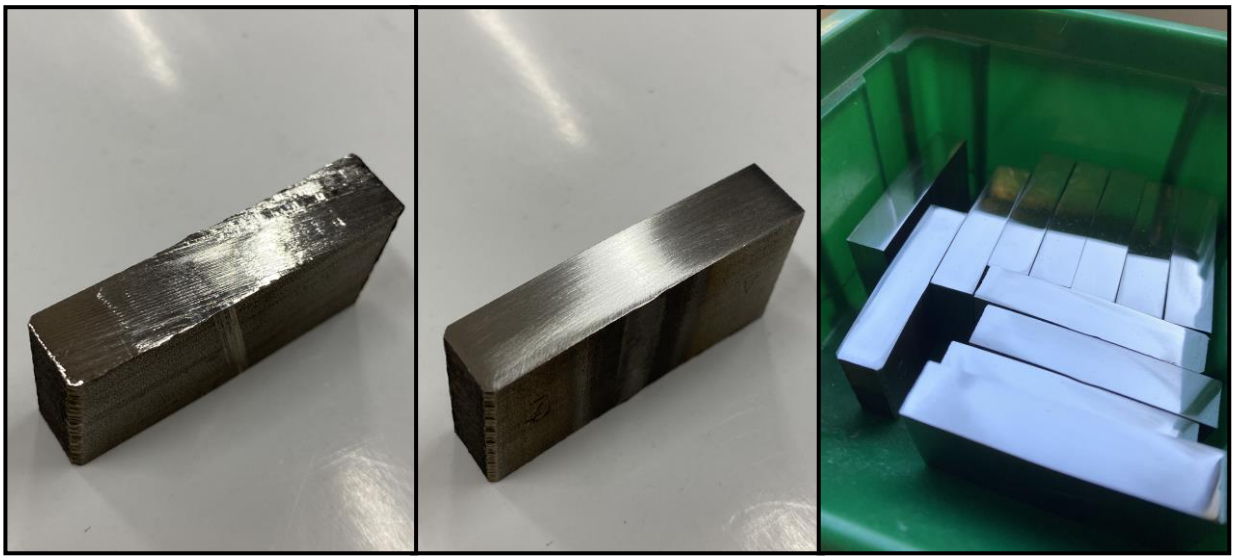


Slika 33. Uređaj za grubo brušenje „Struers LaboPol6“



Slika 34. Uređaj za fino poliranje „Phoenix Alpha Grinder“

Slika 35. prikazuje izgled površina makrouzoraka nakon rezanja tračnom pilom, brušenja i poliranja.

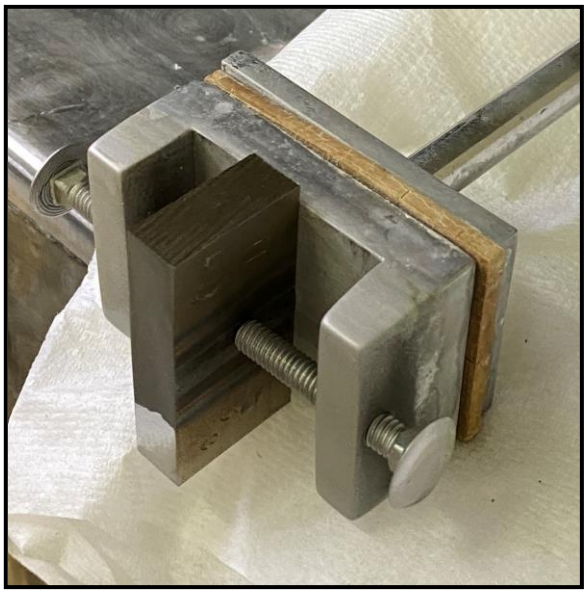


a) **b)** **c)**

Slika 35. Izgled makrouzoraka nakon:

a) rezanja na tračnoj pili, b) brušenja, c) poliranja

Za daljnju makrostrukturnu analizu ispolirani uzorci su elektrokemijsko nagrizeni u 10 % - oj oksalnoj kiselini, $C_2H_2O_4$ u trajanju od 45 sekundi, pri naponu od 6 V i struji od 5 A, slika 36. Makrouzorci su zatim uronjeni u vruću vodu kako bi se prekinula kemijska reakcija.



a)



b)



c)

Slika 36. Elektrokemijsko nagrizanje makrouzoraka

a) Stezanje makrouzoraka

b) Uranjanje makrouzoraka u 10 % -tnu oksalnu kiselinu

c) Izvor struje za elektrokemijsko nagrizanje

3.7. Analiza geometrijskih značajki makrouzoraka

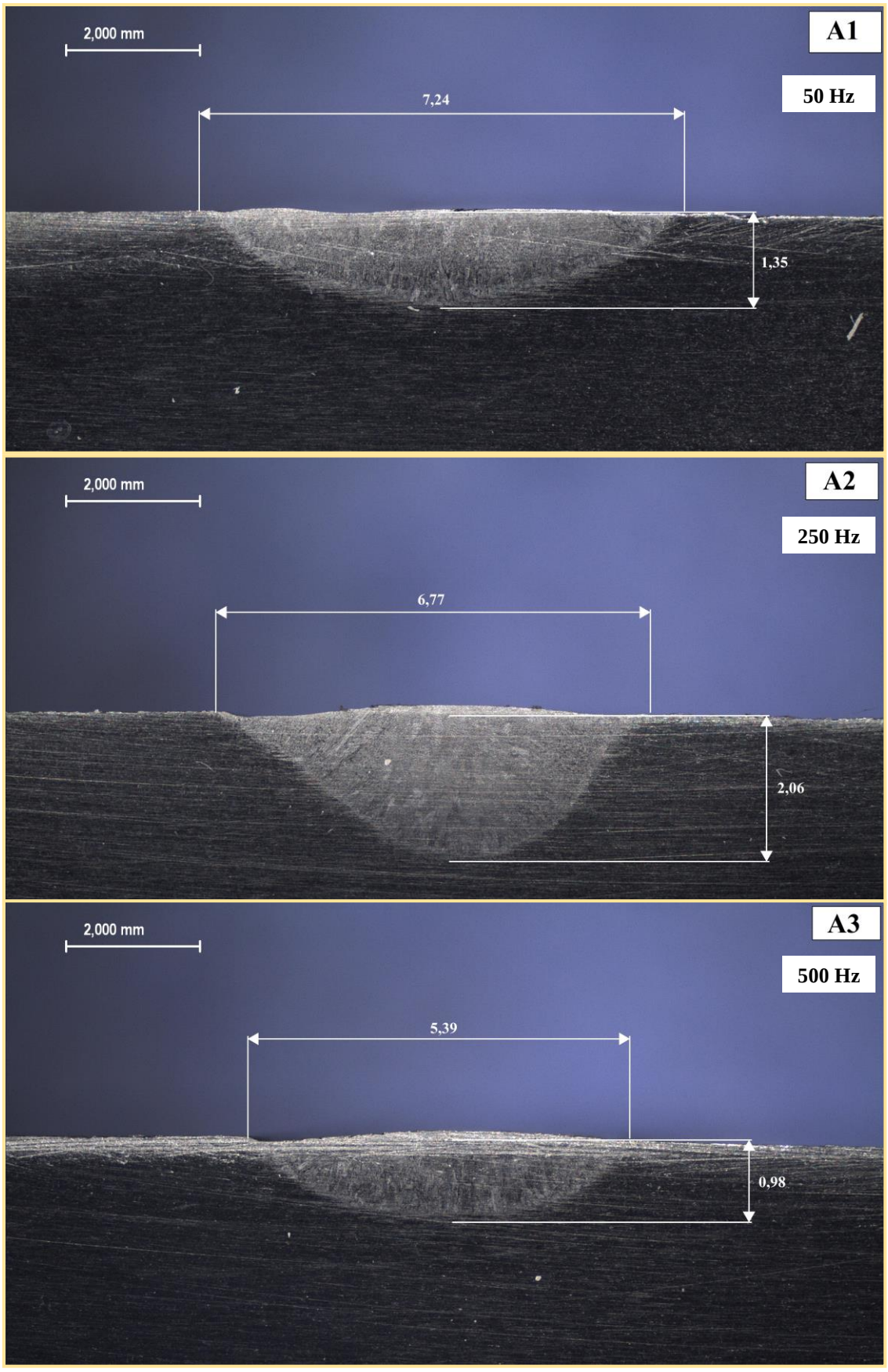
Nakon nagrizanja makrouzoraka, na površini su se jasnije isticala područja zahvaćena električnim lukom tj. područja navara, zone staljivanja i zone utjecaja topline. Zadatak analize makrouzoraka bio je prikazati promjene u širini i penetraciji navara koje su nastale kao utjecaj promjene jednog od ispitivanih parametara te razlike i sličnosti u zoni utjecaja topline uzoraka. Nagrizeni uzorci snimljeni su modularnim stereomikroskopom Leica MZ6, dok su slike makrouzoraka obrađene u programu Leica Application Suite. Slika 37. prikazuje radno mjesto u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu te pripadnu opremu s kojom se provodila analiza geometrijskih značajki makrouzoraka.



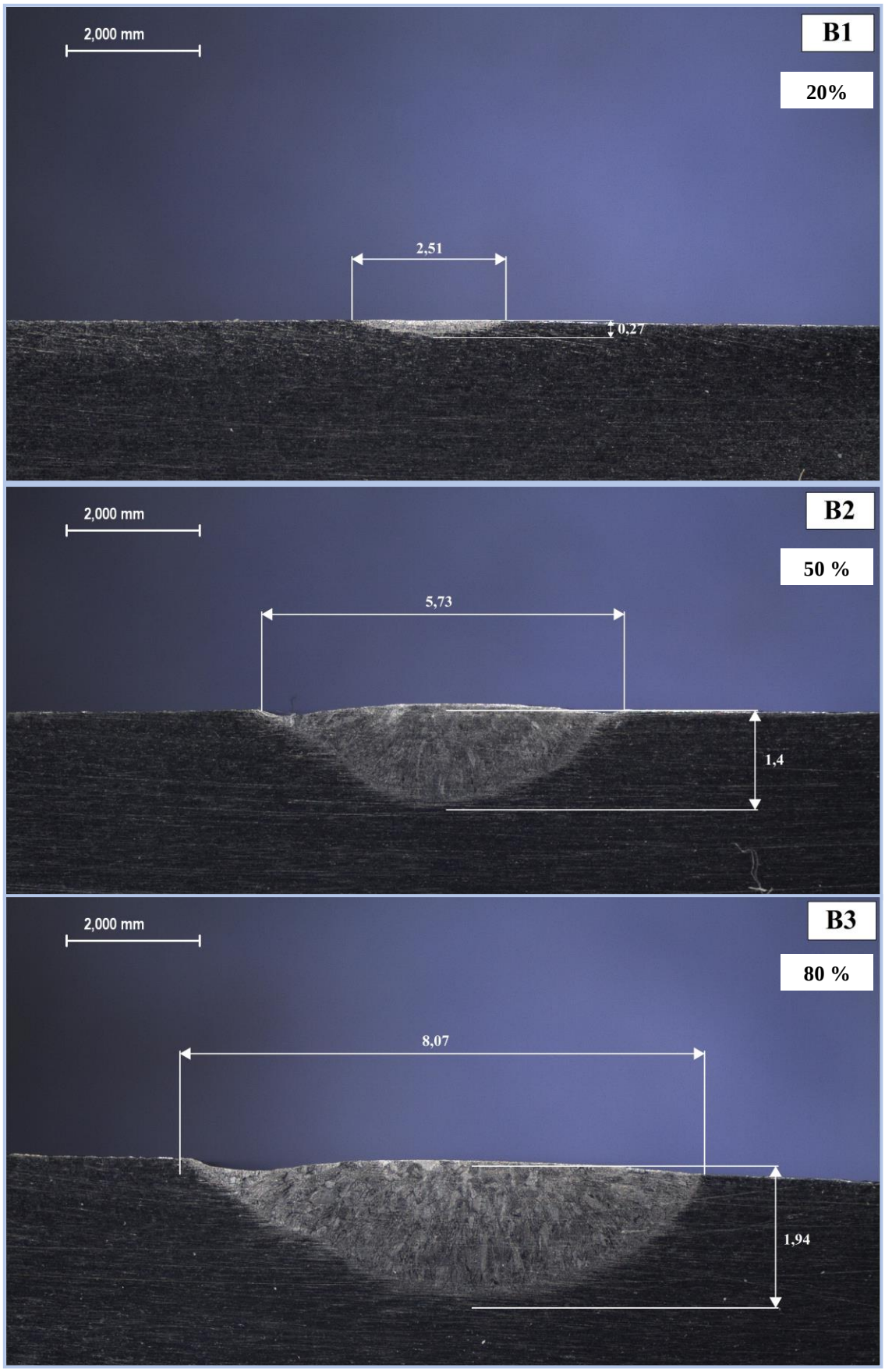
Slika 37. Snimanje makrouzoraka i obrada snimki –

Leica MZ6 - program Leica App Suite

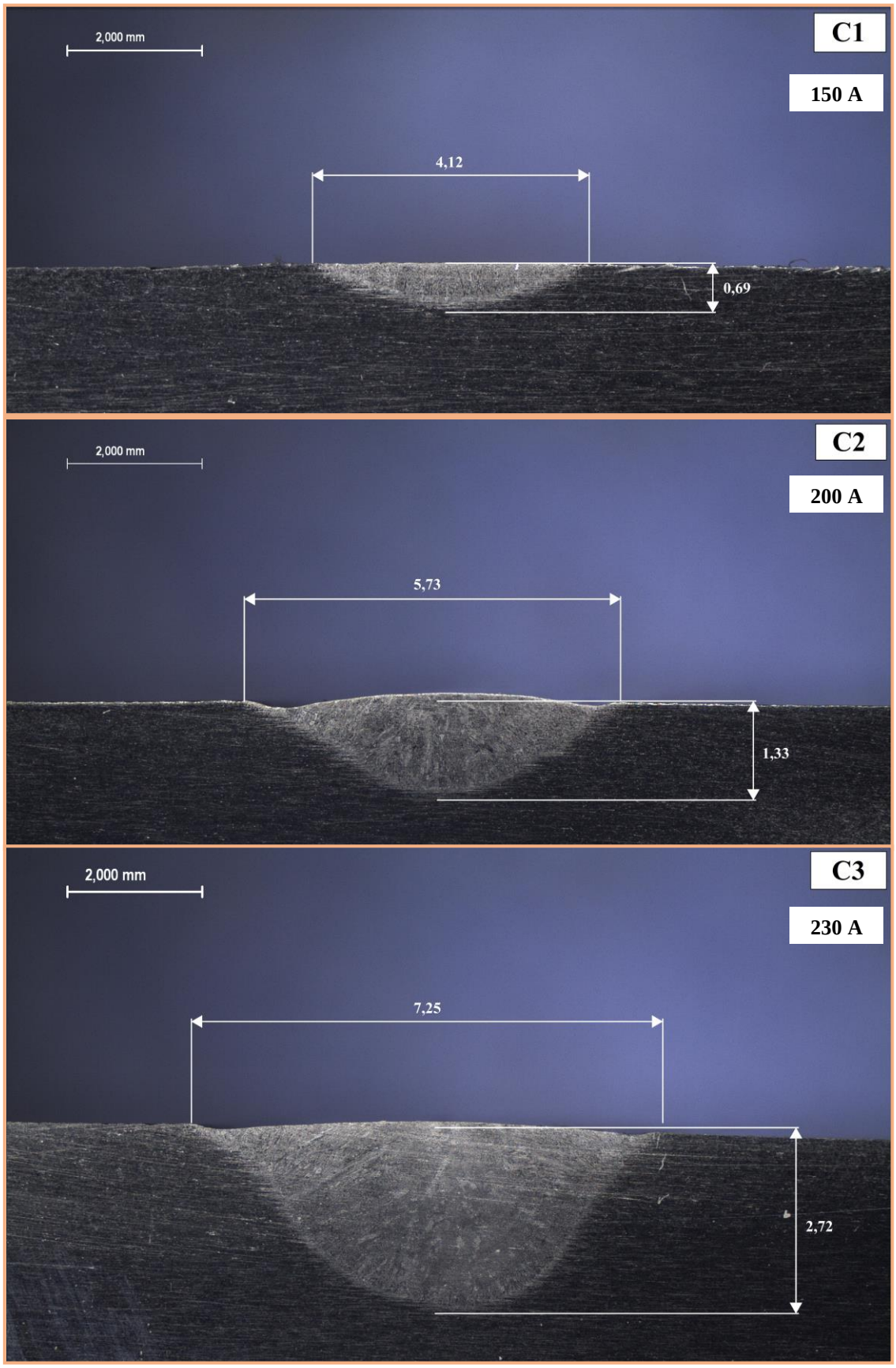
Programom „ImageJ“ izmjerene su dubine, širine i nadvišenja svih navara makrouzoraka. Program je mjerio duljine i visine navara tako da se kalibrirao pomoću poznate dužine sa slike, nakon čega je preko duljine piksela mjerio bilo koju dužinu sa slike. Slike 38, 39, 40, 41 i 42 prikazuju usporedbu makroizbrusaka svih navarenih uzoraka s kotiranim karakteristikama navara (dubine penetracije i širine navara).



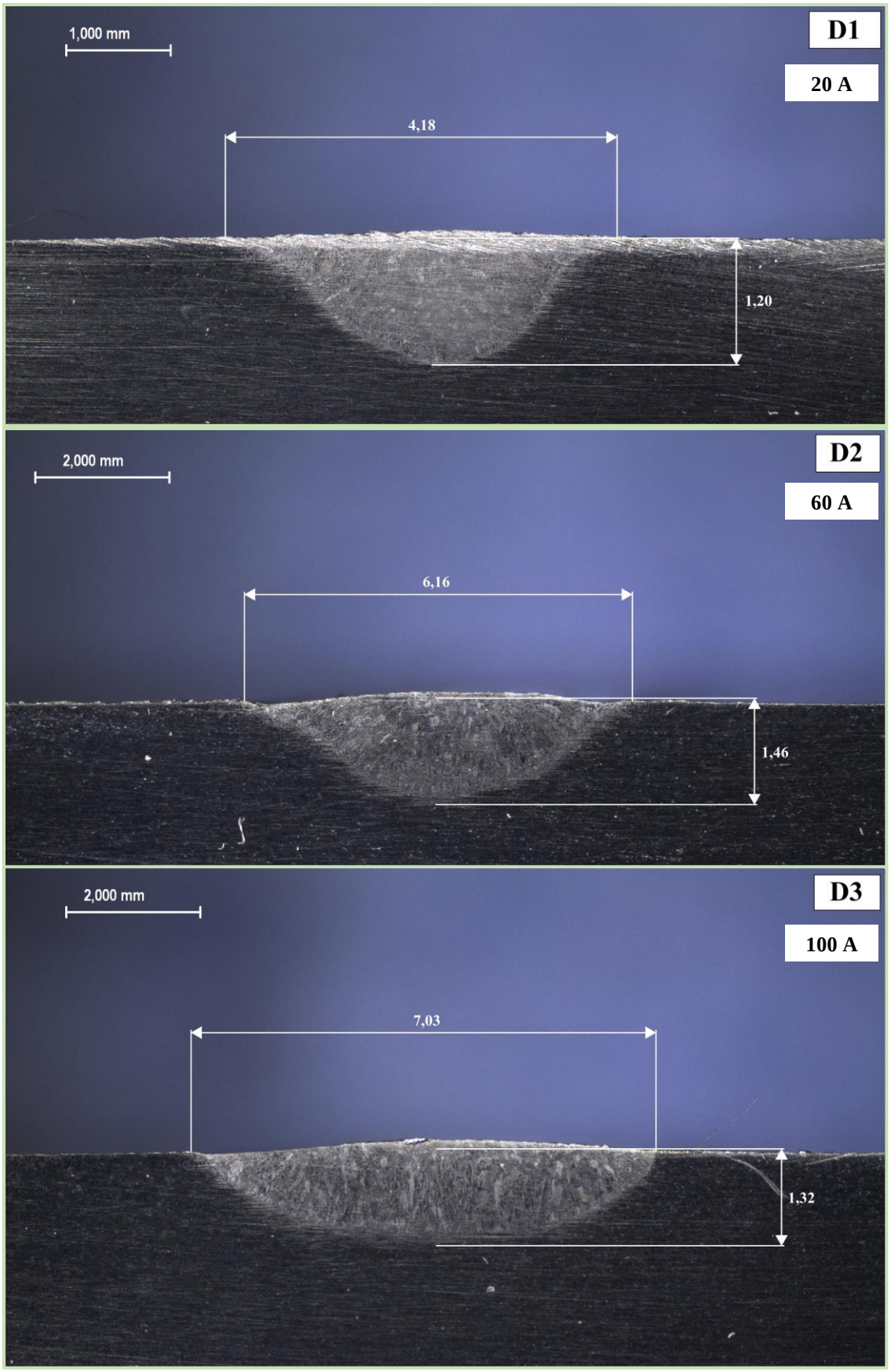
Slika 38. Makrouzorci serije A – utjecaj frekvencije



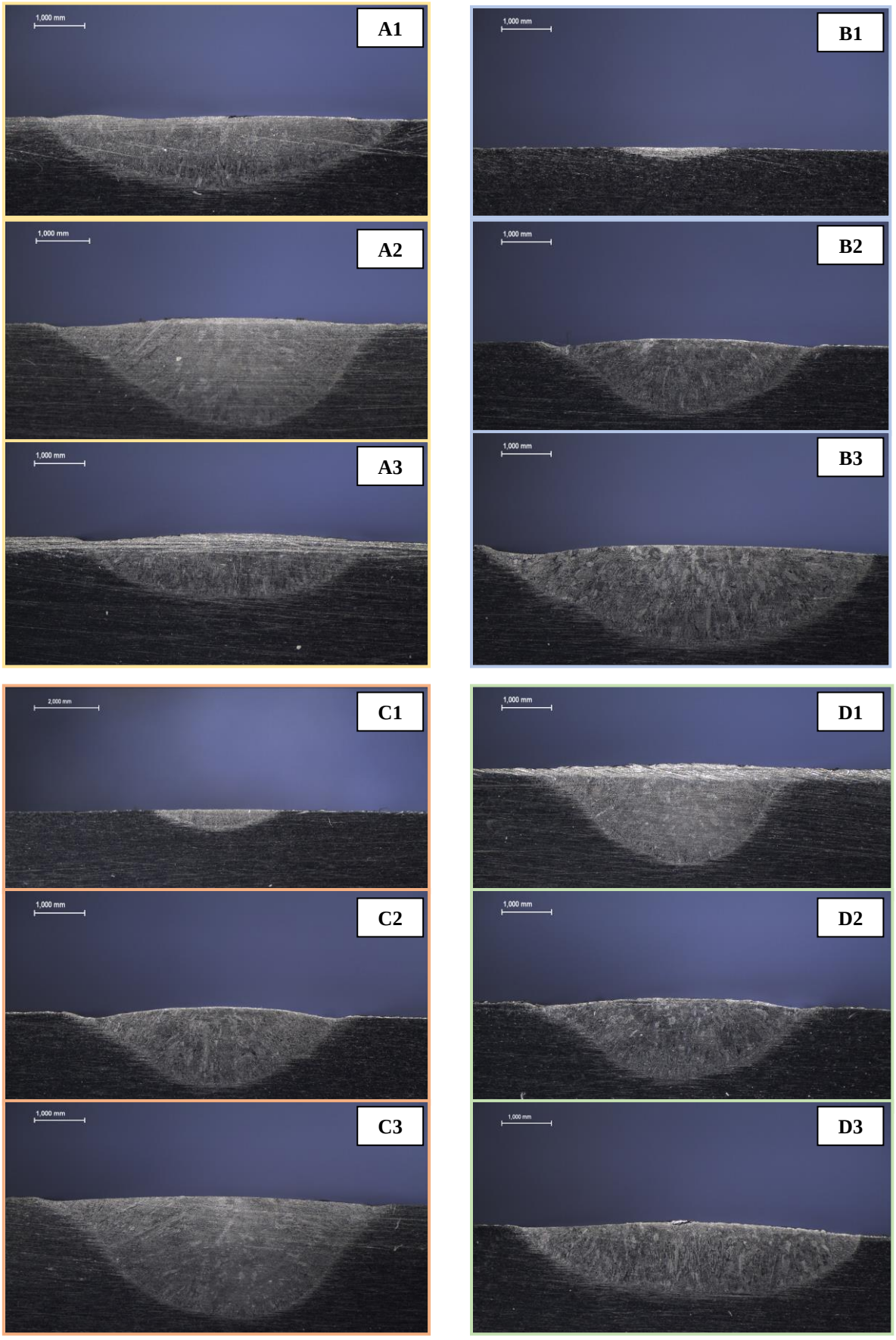
Slika 39. Makrouzorci serije B – utjecaj balansa



Slika 40. Makrouzorci serije C – utjecaj vršne struje



Slika 41. Makrouzorci serije D – utjecaj osnovne struje



Slika 42. Usporedba geometrijskih značajki navara svih makrouzoraka

Makroskopskom analizom uzoraka nisu uočene nepravilnosti i poroznosti. Uočena je mala penetracija u osnovnoj ploči kod uzoraka B1 i C1 što se i očekivalo s obzirom na parametre navarivanja tih uzoraka. U tablici 14. navedene su izmjerene dimenzije navara: širine navara, dubine penetracija, širine zona utjecaja topline, te realni i postavljeni unosi toplina.

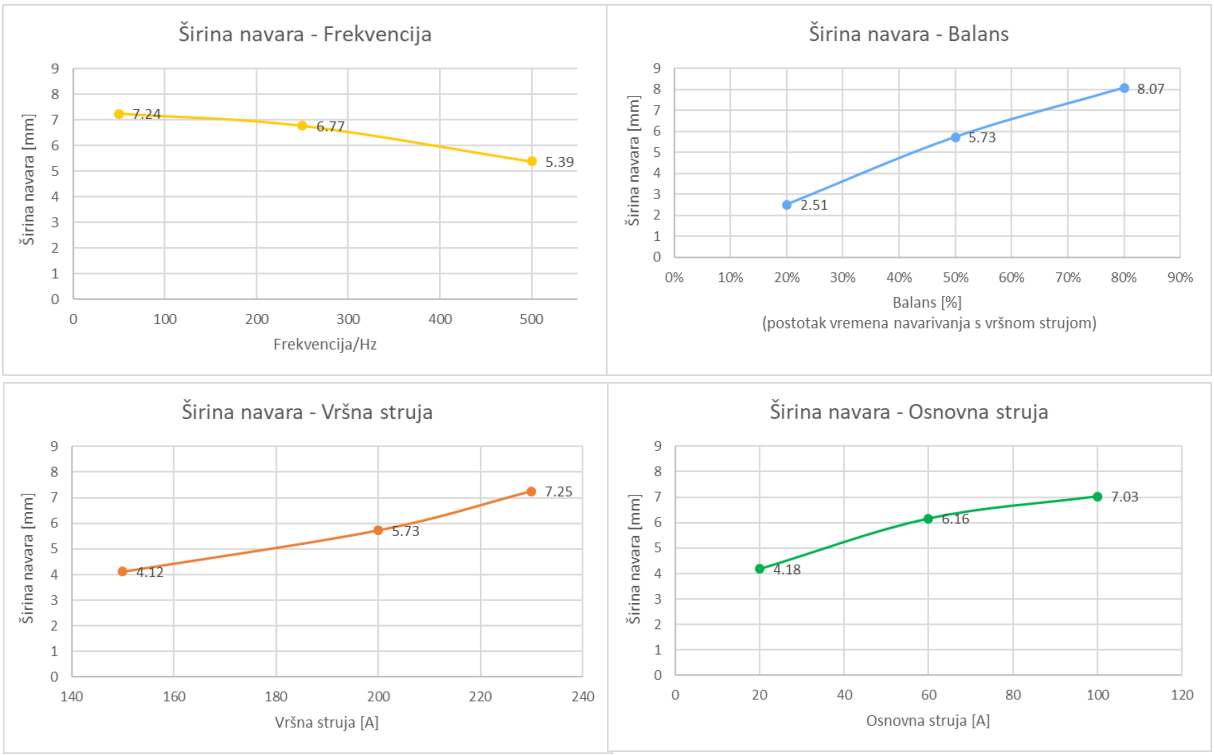
Tablica 14. Izmjerene dimenzije navara makrouzoraka

serija uzorka	uzorak	*širina navara* /mm	*dubina penetracije* /mm	*širina ZUT-a* /mm	Q_{realno} /[kJ/cm]	$Q_{postavljeno}$ /[kJ/cm]
A	1	7,24	1,35	4	6,5	9
	2	6,77	2,06	7	6,55	9
	3	5,39	0,98	4.8	6,05	9
B	1	2,51	0,27	4	3,2	5,76
	2	5,73	1,40	5	6,55	9
	3	8,07	1,94	7	9,58	12,24
C	1	4,12	0,69	6	4,8	6,4
	2	5,73	1,33	6	6,55	9
	3	7,25	2,72	7,5	8	10,81
D	1	4,18	1,20	6,5	5,06	7,92
	2	6,16	1,46	5,5	6,24	9,36
	3	7,03	1,32	3,5	7,8	10,8

3.8. Utjecaj parametara navarivanja na geometrijske značajke makrouzoraka

Svaki ispitivani parametar navarivanja drugačije je utjecao na izgled i strukturu navara.

- Na širinu navara najveći utjecaj je imao balans, odnosno postotak vremena navarivanja s vršnom strujom. Iz slike 43. može se primijetiti značajna razlika u ostvarenoj širini navara pri navarivanju 20 %, odnosno 80 % vremena na vršnoj struji. Također se uočava pad širine navara pri povećanju frekvencije navarivanja. To je ujedno i jedini parametar koji svojim povećanjem smanjuje širinu navara.

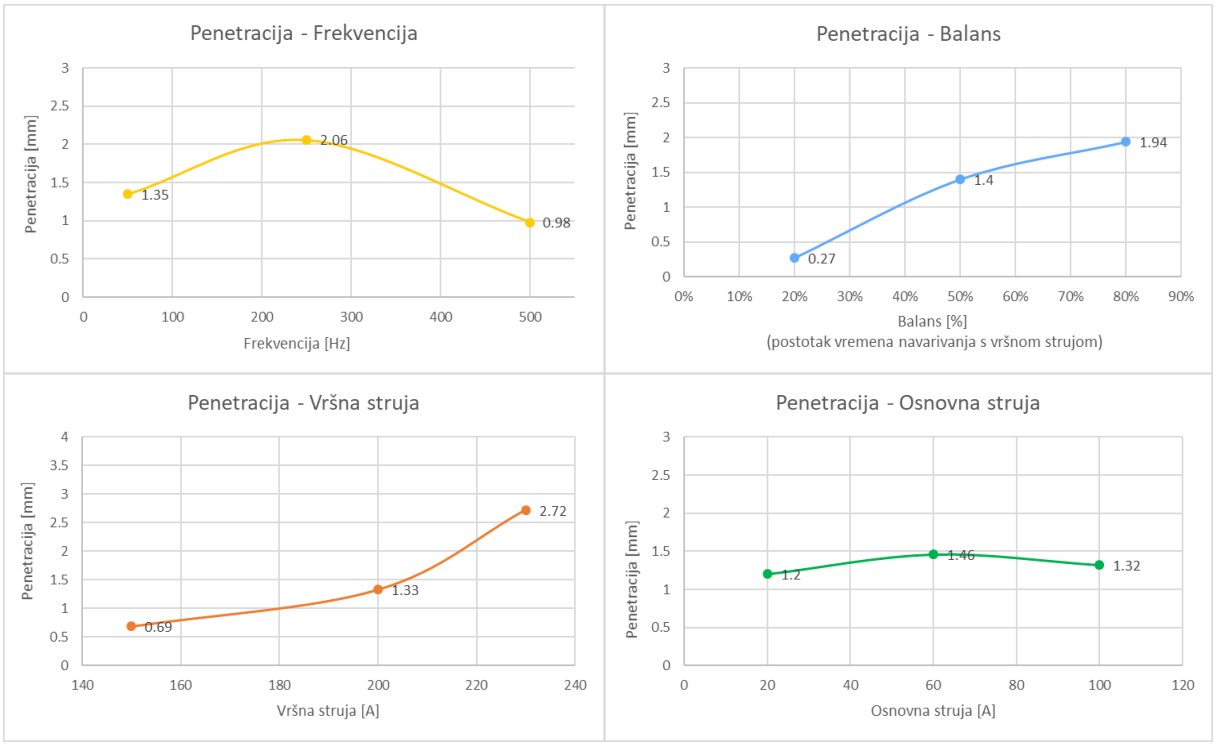


Slika 43. Utjecaj različitih parametara navarivanja na širinu navara

- Frekvencija ima dobar utjecaj na dubinu penetracije. Na slici 44. uočava se kako se s frekvencijom od 250 Hz postiže gotovo jednaka dubina penetracije kao pri navarivanju s najvećom strujom uređaja od 230 A koja pritom unosi puno više topline u osnovni materijal.

  Kod serije uzorka A, promjene u dubini penetracije su se postizale sa istom jakosti srednje struje koje je za sva tri uzorka iznosila 125 A. Iz toga se može zaključiti da se prilikom navarivanja Cr-Ni čelika može dodatno povećati brzina navarivanja. Veća brzina navarivanja, uz veće frekvencije bi dovela do još manjeg unosa topline u radni komad te još veće produktivnosti. Za druge čelike bi trebalo provesti naknadna istraživanja, iako bi i oni najvjerojatnije pokazivali sličan trend.

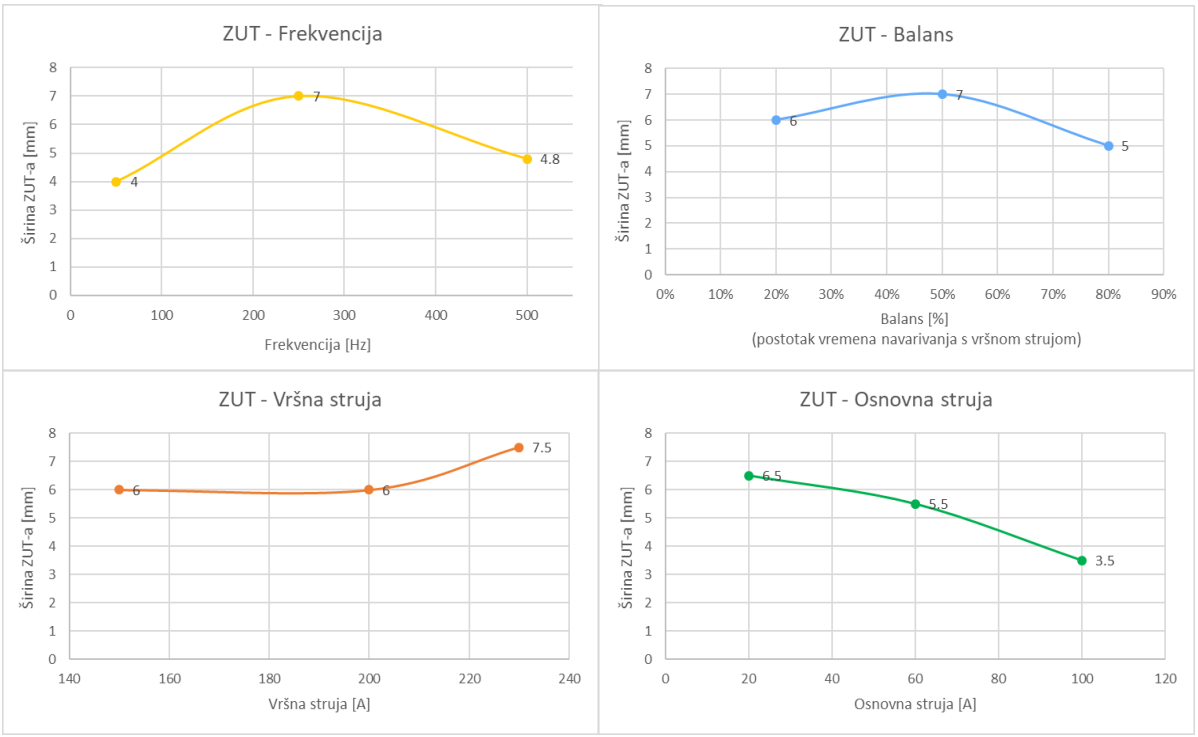
  Grafički prikaz dokazuje kako nema smisla opterećivati elektrodu previsokim strujama kada se s promjenom frekvencije mogu postići jednaki, a ponekad i bolji rezultati u geometriji navara.



Slika 44. Utjecaj različitih parametara navarivanja na penetraciju navara

- Navarivanje s različitim parametrima dovelo je do brojnih strukturnih promjena materijala u zoni utjecaja topline. Unešena toplina uništila je površinski sloj oksida, Cr-Ni pločica, koji štiti osnovni materijal od korozije. Ako se površina naknadno ne pasivizira (stavi zaštitni sloj) na tim mjestima može doći do pojave korozijskih produkata. Što je zona utjecaja topline uža, dolazi do manjeg razaranja, a samim time i manjom potrebom za naknadnim pasiviranjem.

  Najoštećeniji uzorci u eksperimentu bili su oni s najvećim širinama ZUT-a, a to su uzorci serije A navarivani većim vršnim strujama. Ostali dobiveni rezultati su očekivani s obzirom na unos topline i ostvarene karakteristike navara, slika 45.



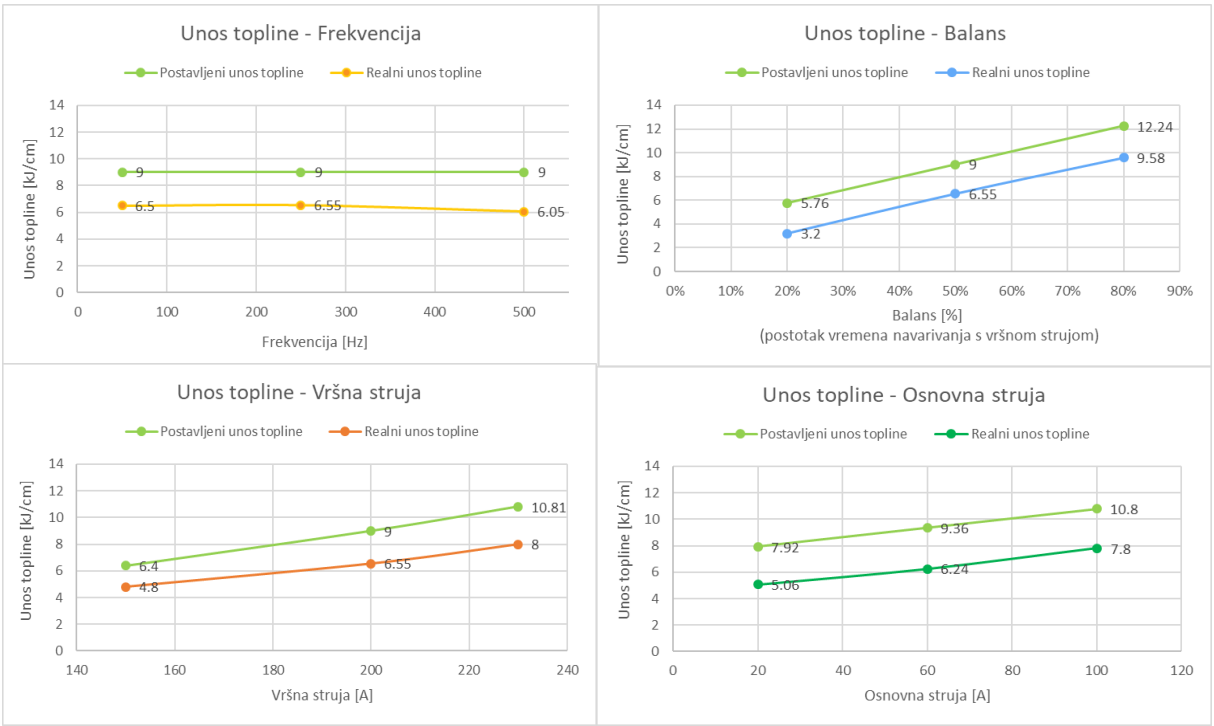
Slika 45. Utjecaj različitih parametara navarivanja na širinu zone utjecaja topline

- Realni unos topline je kod svih ispitivanih uzoraka bio manji od zadanog unosa topline i nije značajno odstupao između uzoraka.

  Nižom frekvencijom navarivanja postižu se jednaki rezultati u geometriji navara uz 30 % manji unos topline nego što je slučaj kad se navaruje s višom osnovnom ili vršnom strujom. Takvo navarivanje je posebno primjenjivo kod rada s materijalima manjih debljina i kod materijala koji dobro provode toplinu.

  Najveće odstupanje u smislu najvećeg i najmanjeg unosa topline za različite zadane parametre navarivanja pokazuje uzorak B1. Taj uzorak se navarivao 20 % vremena s vršnom strujom te mu realni unos topline (3,2 kJ/cm) odstupa za 44,44 % u odnosu na postavljeni unos topline (5,76 kJ/cm).

  Najmanje odstupanje pokazuje uzorak B3 navarivan s vršnom strujom 80 % ukupnog vremena svog navarivanja. Odstupanje između realnog (9,58 kJ/cm) i postavljenog unosa topline (12,24 kJ/cm) iznosi 21,73 %. Može se zaključiti kako balans navarivanja može značajno utjecati na unos topline. Također, važno je primijetiti kako kod rada s različitim frekvencijama, unos topline ostaje približno konstantan, slika 46.



Slika 46. Utjecaj različitih parametara navarivanja na unos topline

3.9. Rezultati makroanalize

Na temelju analize prethodnih slika, tablica i grafova makrouzoraka može se po serijama ispitnih uzoraka zaključiti sljedeće:

Serija uzoraka A

- povećanjem frekvencije navarivanja, navar postaje uži i penetracija u osnovni materijal postaje veća (uz blago odstupanje uzorka A3),
- povećanjem frekvencije navarivanja, realni unos topline blago i kontinuirano opada,
- korištenjem viših frekvencija navarivanja (mogućnost rada uređaja i do 10 kHz) postigle bi se veće razlike u geometriji između uzoraka serije A.
- najveća širina zone utjecaja topline je uočena pri radu sa srednjom frekvencijom od 250 Hz kod uzorka A2. Ova kombinacija parametara pokazala se optimalnom za zavarivanje Cr-Ni čelika 10 mm debljine.

Serija uzoraka B

- balans ili duljina vremenskog perioda navarivanja s vršnom strujom utječe proporcionalno na širinu navara, penetraciju i zonu utjecaja topline (kod ove serije uzoraka postignute su najveće širine navara),
- povećanjem balansa navarivanja s 20 na 80 %, postižu se sve veće širine i dubine penetracije navara – najznačajnija je promjena u širini zavara od 30 % (s 2,5 mm na 8,07 mm)
- balansom navarivanja od 80 % unosi se najviše topline u osnovni materijal (Q_{realno} = 9,58 kJ/cm),
- kod ove serije uzoraka uočljiva su značajna odstupanja između postavljenog i realnog unosa topline (odstupanje realnog od postavljenog unosa topline iznosi 44,44 % za uzorak B1),

Serija uzoraka C

- porastom vršne struje, uz konstantnu osnovnu struju, frekvenciju i balans navarivanja, raste proporcionalno širina navara, dubina penetracije navara i širina zone utjecaja topline,
- rad s najvećom mogućom vršnom strujom (230 A) unosi oko 40 % više topline i povećava penetraciju za 75 % u odnosu na rad s najnižom vršnom strujom koja se koristila u radu (150 A),
- veću penetraciju je bolje postizati različitim frekvencijama navarivanja, nego podizanjem vršne struje zbog prevelikog unosa topline u osnovni materijal što potvrđuje i najšira zona utjecaja topline kod uzorka C3.

Serija uzoraka D

- porastom osnovne struje, uz konstantnu vršnu struju, balans i frekvenciju navarivanja, proporcionalno raste širina navara i penetracija (uz blago odstupanje uzorka D3), dok se smanjuje zona utjecaja topline,
- porastom osnovne struje, unos topline raste, ali sporije nego kad se povisuje vršna struja.

Analizom makroizbrusaka utvrđena je pravilna geometrija navara. Na temelju jednoličnog izgleda svih navara, može se zaključiti kako su parametri bili adekvatno namješteni.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu, ispitani su utjecaji najznačajnijih parametara zavarivanja na TIG postupak zavarivanja koji se sve češće primjenjuje kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja različitih vrsta materijala. Dokazano je kako napredak u elektroničkoj industriji omogućuje oblikovanje struje prema potrebi zavarivačkog procesa i kako korištenje različitih oblika struje pozitivno utječe na svojstva zavara, ali i na energetsku učinkovitost. Impulsno TIG zavarivanje pokazalo se kao efikasan i ekonomičan postupak koji može zamijeniti klasične metode izrade dijelova na puno brži, precizniji i isplativiji način.

Na temelju provedenog eksperimenta može se zaključiti sljedeće:

- Vizualna kontrola navarenih uzoraka pokazala je da se talina tijekom svih procesa TIG navarivanja ponašala „mirno“ i da se TIG postupkom navarivanja postigla vrlo visoka kvaliteta, kako u pogledu broja grešaka u navarenom spoju, tako i sa stajališta estetskog izgleda i mehaničkih svojstava navara.
- Impulsnim TIG zavarivanjem moguće je povećati produktivnost proizvodnje i ostvariti značajne uštede u ukupnom vremenu zavarivanja. Uštede se postižu zbog manjeg trošenja elektrode kao i zbog nepotrebne naknadne obrade materijala zbog manjih deformacija.
- Analizom geometrijskih značajki navarenih uzoraka dokazano je da se frekvencijom od 125 Hz, te konstantnom srednjom jakosti struje od 125 A može postići najveća penetracija uz najmanji unos topline pri zavarivanju Cr-Ni čelika debljine 10 mm.
- Promjenom frekvencije mogu se postići jednaki, a ponekad i bolji rezultati u geometriji navara, bez da se prethodno opterećuje elektroda s previsokim strujama.
- U odnosu na druge postupke zavarivanja, TIG postupak zavarivanja je manje pogodan za automatizaciju i robotizaciju, te je manje učinkovit kod zavarivanja materijala debljine veće od 6 mm.

Primijenjena tehnologija dala je optimalne rezultate. Daljnja istraživanja usmjeravaju se na usavršavanje izvora struje za zavarivanje, razvoj dodatnih materijala koji će poboljšati svojstva zavara, te na adaptivnu kontrolu procesa i praćenje parametara tijekom zavarivanja.

LITERATURA

[1] Samardžić, I.: Proizvodne tehnologije - Nastavni materijali, Visoka tehnička škola u Bjelovaru, 2014.

[2] Weman, K.: Welding processes handbook, 2nd Edition, Woodhead Publishing Ltd, 2012.

[3] Lucas, W.: TIG and Plasma Welding Process Techniques, Recommended Practices and Applications-Woodhead Publishing, 1990.

[4] Izvor slike: https://www.fronius.com/en, google slike (dostupno 20.6.2020.)

[5] Živčić, M.: Tig zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, broj 1., 1985.

[6] Web stranica: https://www.millerwelds.com/ (dostupno 20.6.2020.)

[7] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje; FSB Zagreb, 2016.

[8] Kralj, S.: Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1, FSB Zagreb

[9] Izvor slike: http://media-cacheak0.pinimg.com/736x/31/6b/d7/316bd75500b64574e5b722ba010748f6.jpg (dostupno 20.6.2020.)

[10] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Stručni članak, 2014.

[11] Handbook for GTAW – Gas Tungsten Arc Welding, AWS, 1987.

[12] Dzelnitziki, D.: TIG-Direct-Current Welding with High-Frequency Pulses, An Ineresting Process Variant, EWM Hightec Welding, 2000.

[13] Klingman, D.: New square-wave power sources live up to their promise of improved weldability when welders become familiar with their unique characteristics

[14] Web stranica: http://www.wcwelding.com/tig-welding.html (dostupno 20.6.2020.)

[15] H. B. Cary, S. C. Helzer: Modern welding technology. Upper Saddle River, New Jersey, 2005.

[16] Grbin, M., Kovačević, B., Živčić, M.: Elektrolučno zavarivanje u zaštiti plinova, UNIMEX, d.o.o., Zagreb, 1996.

[17] Web stranica: http://www.eastwood.com/tig-gas-lens-components-and-kits.html (dostupno 20.6.2020.)

[18] TIG welding – method and application, AWS, 1992.

[19] Schubert, Wolf-Dieter; Lassner, E.: Tungsten: properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds, Springer, 1999.

[20] Cary, H. B. ; Helzer, S.C.: Modern welding technology. Upper Saddle River, New Jersey, 2005.

[21] Živčić, M.: Časopis zavarivanje 1/2/3/ 85g. - TIG zavarivanje; Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske; FSB, Zagreb, 1985.

[22] Web stranica: http://navybmr.com/study%20material/14250a/14250A_ch9.pdf, (dostupno 20.6.2020.)

[23] Horvat, M.; Kondić, V.; Brezovečki, D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Technical journal 8, 426-432, 2014.

[24] Samardžić, I.; Bogovac, D.; Jorgić, T.; Kovačić, K.: Primjena TIG POSTUPKA zavarivanja u spajanju pozicija

[25] ASM International Handbook Committe: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials park, 1993.

[26] O´Brien, Annette: Welding Handbook, Volume 2, 9. izdanje, American Welding Society, Miami, 2008.

[27] Storer, J., Haynes, J.H.: The Haynes Welding Manual, Haynes publishing group, SAD, 1994.

[28] Web stranica: https://www.rapidwelding.com/dynamic/DisplayItem.aspx?c=182450, (dostupno 20.6.2020.)

[29] Strojevi i oprema za zavarivanje, podloge, Zagreb, 2013.

[30] Yan, B.; Flux-Cored-Wire TIG Welding, Tianjin Steel Inc., P. R. China

[31] Kralj, S; Kožuh Z.; Garašić I.; Panjković V.: Automatizirano TIG zavarivanje, 5. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje, Robotizacija i automatizacija u zavarivanju i ostalim tehnikama, Slavonski Brod, 2009.

[32] Web stranica: https://www.ewm-sales.com/en/TIG_welding_machines /Tetrix_DC/Tetrix_230_Comfort_2_0_puls_8P_TM--090-000240-00504.html (dostupno 20.6.2020.)

[33] HRN EN 1011-1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.

[34] Izvor slike: https://dailygazette.com/galleries/2015/06/02/no22-bicycle-company-johnstown (dostupno 26.6.2020.)

[35] Izvor slike: https://www.diytrade.com/china/pd/12038517/Tube_To_Tube_Sheet_Automatic_Welding_Machine_TIG.html (dostupno 26.6.2020.)

[36] B.L. Jarvis: Keyhole gas tungsten arc welding: a new process variant, University of Wollongong, 2001.

[37] Izvor slike: https://www.manmonthly.com.au/features/exciting-things-in-the-pipeline-for-sa-welding-tech-company/ (dostupno 26.6.2020.)

[38] Web stranica: https://servus.hr/strucni-clanci/tip-tig-postupak-zavarivanja/ (dostupno 26.6.2020.)

[39] Izvor slike: https://tiptig.com/stainless-steel-tank-manufacturing-using-the-tip-tig-welding-technology/ (dostupno 26.6.2020.)

[40] HRN EN 1011-1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.