

Određivanje kritičnog unosa topline za primjenu korijenske zaštite kod TIG zavarivanja Cr-Ni čelika

Bauer, Bruno

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:958972>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2021.

Bruno Bauer

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv.prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Bruno Bauer

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru Izv.prof.dr.sc. Ivici Garašiću i asistentici dr.sc. Maji Jurici na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem laborantu Krešimiru Sukobljeviću za pomoć prilikom izrade eksperimentalnog rada.

Veliko hvala obitelji i prijateljima na podršci za vrijeme cijelog studiranja.

Bruno Bauer



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 21 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bruno Bauer** Mat. br.: 0035216220

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje kritičnog unosa topline za primjenu korijenske zaštite kod TIG zavarivanja Cr-Ni čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of critical heat input for application of back shielding at TIG welding of Cr-Ni steel**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu opisati TIG postupak zavarivanja s posebnim naglaskom na tehnologiju zavarivanja visokolegiranih austenitnih Cr-Ni čelika. Analizirati značaj korijenske zaštite te navesti koje vrste plinova se koriste i koje su njihove specifičnosti. Proučiti zahtjeve norme HRN EN ISO 15614-1 koji definiraju primjenu korijenske zaštite.

U eksperimentalnom dijelu na odgovarajućem osnovnom materijalu odrediti kritičan unos topline za odabrane debljine pri kojem je potrebno provesti zaštitu korijenske strane zavara. Zavarivanje provesti TIG postupkom bez dodavanja žice na više razina unosa topline uz konstantnu brzinu zavarivanja. Provesti vizualna ispitivanja zavara kao i makrostrukturnu analizu. U konačnici, na temelju dobivenih rezultata dati smjernice za primjenu kritične vrijednosti unosa topline u realnoj proizvodnji u odnosu na zahtjeve definirane u normi HRN EN ISO 15614-1.

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

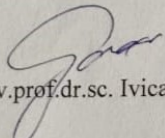
Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

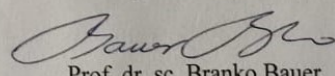
Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


Izv.prof.dr.sc. Ivica Garašić


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| SADRŽAJ..... | I |
| POPIS SLIKA..... | III |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS OZNAKA..... | V |
| SAŽETAK..... | VI |
| SUMMARY..... | VII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. NEHRĐAJUĆI ČELICI..... | 2 |
| 2.1. Općenito o nehrđajućim čelicima..... | 2 |
| 2.2. Austenitni nehrđajući čelici..... | 4 |
| 3. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA..... | 6 |
| 3.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja..... | 6 |
| 3.2. Princip rada TIG zavarivanja..... | 7 |
| 3.3. Oprema za TIG zavarivanje..... | 8 |
| 3.4. Volframova netaljiva elektroda..... | 9 |
| 3.5. Parametri kod TIG zavarivanja..... | 11 |
| 3.6. TIG zavarivanje visokolegiranih austenitnih Cr-Ni čelika..... | 13 |
| 4. ZNAČAJ KORIJENSKE ZAŠTITE..... | 14 |
| 4.1. Općenito o korijenskoj zaštiti..... | 14 |
| 4.2. Zaštitni plinovi..... | 15 |
| 4.3. Opis pojedinačnih zaštitnih plinova za korijensku zaštitu..... | 15 |
| 4.3.1. Argon..... | 15 |
| 4.3.2. Helij..... | 16 |
| 4.3.3. Dušik..... | 16 |
| 4.3.4. Vodik..... | 16 |
| 4.4. Zahtjevi norme HRN EN ISO 15614-1 za korijensku zaštitu..... | 17 |
| 5. EKSPERIMENTALNI RAD..... | 19 |
| 5.1. Opis eksperimenta..... | 19 |
| 5.2. Osnovni materijal..... | 19 |
| 5.3. Elektroda..... | 20 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 5.4. Oprema za navarivanje..... | 21 |
| 5.4.1. Uređaj za TIG zavarivanje..... | 21 |
| 5.4.2. "BUG-O systems" automat..... | 23 |
| 5.5. Navarivanje..... | 23 |
| 5.6. Izrada makroizbruska..... | 28 |
| 5.7. Ispitivanje i analiza..... | 29 |
| 5.7.1. Vizualna kontrola..... | 29 |
| 5.7.2. Makroanaliza..... | 30 |
| 5.7.3. Unos topline..... | 33 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 37 |
| LITERATURA..... | 38 |
| PRILOZI..... | 41 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Ugljični čelik i nehrđajući čelik u doticaju s kiskom [4]..... | 2 |
| Slika 2. Proces samoobnovljivosti pasivnog filma [4]..... | 3 |
| Slika 3. Mikrostruktura asutenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10 [3]..... | 4 |
| Slika 4. Pojednostavljeni shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [6]..... | 6 |
| Slika 5. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [9]..... | 8 |
| Slika 6. Oprema za TIG zavarivanje [11]..... | 9 |
| Slika 7. Geometrija elektrode sa šiljastim vrhom [14]..... | 11 |
| Slika 8. Korijenska strana zavara bez korijenske zaštite (lijevo) i sa korijenskom zaštitom plinskom mješavinom $N_2+10\%H_2$ (desno) [18]..... | 14 |
| Slika 9. Pila "BS 350 GH"..... | 20 |
| Slika 10. Volframova netaljiva elektroda..... | 21 |
| Slika 11. "MagicWave 230i"..... | 22 |
| Slika 12. "BUG-O systems" automat za zavarivanje..... | 23 |
| Slika 13. Izgled uzorka neposredno nakon navarivanja..... | 24 |
| Slika 14. Uzorak 0 (I = 50 A, U = 12,2 V)..... | 25 |
| Slika 15. Uzorak 1 (I = 75 A, U = 12,5 V)..... | 25 |
| Slika 16. Uzorak 2 (I = 100 A, U = 13,2 V)..... | 26 |
| Slika 17. Uzorak 3 (I = 125 A, U = 14 V)..... | 26 |
| Slika 18. Uzorak 4 (I = 150 A, U = 14 V)..... | 27 |
| Slika 19. Uzorak 5 (I = 175 A, U = 14,6 V)..... | 27 |
| Slika 20. Mjesta rezanja uzorka..... | 28 |
| Slika 21. Deformacija uzorka 4..... | 29 |
| Slika 22. Obojenje korijenske strane uzorka 1..... | 30 |
| Slika 23. Poroznost na licu navara uzorka 5..... | 30 |
| Slika 24. Mikroskop Leica MZ6..... | 31 |
| Slika 25. Prikaz kotiranih veličina: penetracija, širina lica, površina poprečnog presjeka navara..... | 31 |
| Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti penetracije o jačini struje..... | 35 |
| Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti širine lica o jačini struje..... | 35 |
| Slika 28. Grafički prikaz ovisnosti površine poprečnog presjeka navara o jačini struje..... | 36 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika [3]..... | 4 |
| Tablica 2. Označavanje volframovih elektroda [8]..... | 10 |
| Tablica 3. Preporučeni zaštitni plinovi prilikom zavarivanja pojedinih metala [20]..... | 15 |
| Tablica 4. Klasifikacija zaštitnih plinova prema normi ISO 14175:2008 [23]..... | 17 |
| Tablica 5. Kemijski sastav čelika AISI 304 [25]..... | 19 |
| Tablica 6. Mehanička svojstva čelika AISI 304 [26]..... | 20 |
| Tablica 7. Karakteristike uređaja "MagicWave 230i" [27]..... | 22 |
| Tablica 8. Parametri navarivanja..... | 24 |
| Tablica 9. Izgled geometrijskih značajki makroizbrusaka..... | 32 |
| Tablica 10. Iznosi penetracije, širine lica, površine navara i unesene topline za pojedini uzorak..... | 34 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-------------------|--|
| v_z | cm/min | Brzina zavarivanja |
| f | Hz | Frekvencija |
| A_5 | % | Istezljivost |
| I | A | Jakost struje |
| k | - | Koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja |
| $R_{p0,2}$ | N/mm ² | Konvencionalna granica razvlačenja |
| m | kg | Masa |
| U | V | Napon |
| Q_{pl} | l/min | Protok plina |
| T | K[°C] | Temperatura |
| HB | - | Tvrdoća po Brinellu |
| HV | - | Tvrdoća po Vickersu |
| KU | J | Udarni rad loma |
| Q | kJ/cm | Unesena toplina |
| R_m | N/mm ² | Vlačna čvrstoća |

SAŽETAK

U ovom je radu obrađena problematika TIG zavarivanja nehrđajućih čelika bez korijenske zaštite. Svrha rada je odrediti iznos unesene topline za koji nije potrebna korijenska zaštita. Rad se sastoji od dva dijela teorijskog i praktičnog.

U teorijskom dijelu opisan je TIG postupak s posebnim naglaskom na tehnologiju zavarivanja visokolegiranih austenitnih Cr-Ni čelika, opremu potrebnu za uspješnu primjenu i parametre zavarivanja. Opisan je značaj korijenske zaštite i zaštitni plinovi koji se koriste za korijensku zaštitu. Proučavani su zahtjevi norme HRN EN ISO 15614-1 koji definiraju primjenu korijenske zaštite.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je automatizirano TIG navarivanje uzoraka izrezanih iz cijevi od nehrđajućeg čelika AISI 304 s različitim unosima topline. TIG navarivanje izvodilo se bez primjene korijenske zaštite. Nakon vizualne kontrole izrađeni su makroizbrusci na kojima se vidi poprečni presjek navara. Proučavane su geometrijske značajke i obojenja površine materijala s korijenske strane za pojedine razine unosa topline. Povećanje unosa topline utjecalo je na povećanje geometrijskih značajki navara. Kod najmanjeg unosa topline pojavilo se obojenje površine materijala s korijenske strane što ukazuje na potrebu za korijenskom zaštitom iako je debljina podloge bila veća od 5 mm za koju prema normi HRN EN ISO 15614-1 nije potrebna korijenska zaštita.

Ključne riječi: TIG, nehrđajući čelici, automatizirano navarivanje, korijenska zaštita.

SUMMARY

This paper deals with the problem of TIG welding on stainless steels without root protection. The purpose of this work is to determine the amount of heat input for which no root protection is required. The paper consists of two parts, theoretical and practical.

The theoretical part describes the TIG process with special emphasis on the welding technology of high-alloyed austenitic Cr-Ni steels, the equipment required for successful application and the welding parameters. The significance of root protection and shielding gases used for root protection are described. The requirements of the HRN EN ISO 15614-1 standard defining the application of root protection have been studied.

In the experimental part, automated TIG bead on plate welding of AISI 304 stainless steel tube with different heat inputs was performed. TIG welding was performed without the application of root protection. After visual inspection, macrographs were made on which the cross-section of the weld can be seen. The geometrical characteristics of the weld cross-section and heat tints on the root side of the material were studied for different heat input levels. The increase in heat input affected the increase in the geometrical characteristics of the welds. At the lowest heat input, heat tints on the root side surface of the material appeared, which indicates the need for root protection, although the thickness of the material backing support was greater than 5 mm, for which root protection is not required according to HRN EN ISO 15614-1.

Key words: TIG, stainless steels, automated welding, root protection

1. UVOD

Nehrđajući ili korozijski postojani čelici imaju široku primjenu u industriji i zavarenim konstrukcijama. Pogodni su za primjenu u raznim specifičnim uvjetima i okolini zbog svoje korozijske postojanosti. Prema mikrostrukturi nehrđajući čelici mogu se podijeliti na četiri osnovne grupe: martenzitni, feritni, austenitni i dupleks (austenit + ferit) nehrđajući čelici. Krom je osnovni legirni element u svim nehrđajućim čelicima. Maseni udio kroma u čeliku mora biti barem 10,5 % kako bi se zadovoljio uvjet korozijske postojanosti. [1]

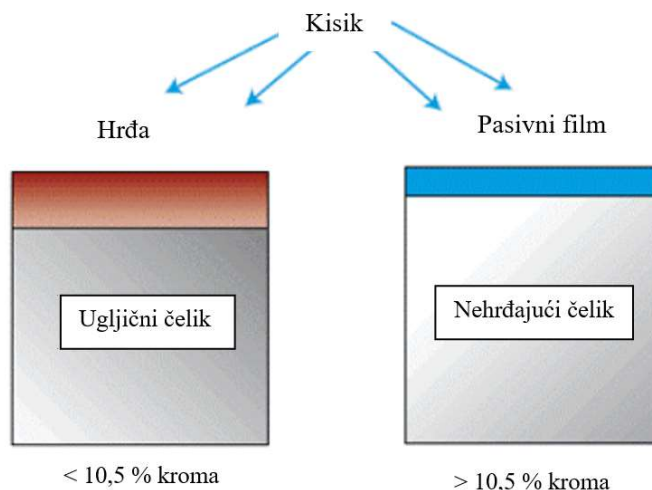
TIG (eng. Tungsten Inert Gas) postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja kod kojeg je električni luk uspostavljen i održavan između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. TIG zavarivanje razvijeno je u avionskoj industriji iz potrebe za zavarivanjem lakih konstrukcija napravljenih od aluminijske i magnezijevske legure. U početku se TIG postupak koristio za zavarivanje lakih metala. Njegova uporaba je danas raširenija te se ovaj postupak primjenjuje za zavarivanje aluminijske i aluminijevske legure, nehrđajućih čelika, titana, magnezijevske i bakrene legure i mnogih drugih. [2]

2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

2.1. Općenito o nehrđajućim čelicima

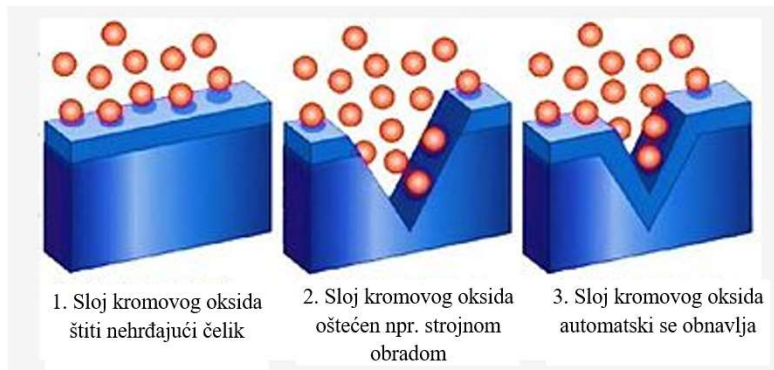
Nehrđajući ili korozijski postojani čelici su visokolegirani čelici koji pokazuju otpornost na kemijsku i elektrokemijsku koroziju. Čimbenici koji utječu na korozijsku postojanost mogu se podjeliti na unutarnje (sastav materijala, mikrostruktura, napetosti) i vanjske (sastav medija, temperatura, naprezanje). Čelici kod kojih nema međudjelovanja s vanjskim medijem su otporni na koroziju. Krom je osnovni legirni element u svim nehrđajućim čelicima. Maseni udio kroma u čeliku mora biti barem 10,5 % kako bi se zadovoljio uvjet korozijske postojanosti. Osim kroma nehrđajućim čelicima dodaje se mnoštvo drugih legirnih elemenata poput molibdena, nikla, mangana, silicija, titana, ugljika, dušika itd. Legirnim elementima se modificira struktura, poboljšava obradivost, čvrstoća ili žilavost na nižim temperaturama i korozijska postojanost. [3]

Krom s kisikom iz zraka formira stabilni oksidni sloj (pasivni film) na površini čelika koji sprječava oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima. Oksidni sloj je iznimno tanak (1 do 5 nm) i vrlo dobro prijanja uz površinu čelika. Kemijski sastav oksidnog sloja je Cr_2O_3 . Slika 1. prikazuje formirani sloj hrđe na ugljičnom čeliku u doticaju s kisikom (lijevo) i pasivni film formiran na nehrđajućem čeliku u doticaju s kisikom (desno). [3]



Slika 1. Ugljični čelik i nehrđajući čelik u doticaju s kisikom [4]

Karakteristika oksidnog sloja je samoobnovljivost u različitim medijima. Slika 2. prikazuje proces samoobnovljivosti pasivnog filma.



Slika 2. Proces samoobnovljivosti pasivnog filma [4]

Svi korozijski postojani čelici otporni su na oksidaciju pri niskoj (do 180 °C) i povišenoj (između 180 i 450 °C) temperaturi, a neki od njih i pri visokoj (iznad 450 °C) temperaturi.

Zbog svojih iznimnih svojstava nehrđajući čelici se primjenjuju u [3]:

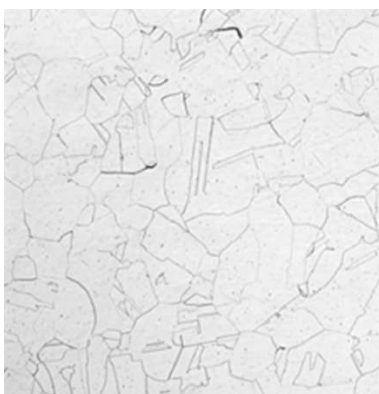
- Kemijskoj, petrokemijskoj i procesnoj industriji,
- Industriji papira i celuloze,
- Farmaceutskoj industriji,
- Postrojenjima za preradu hrane i mliječnih proizvoda,
- Za različite komercijalne proizvode: kućanski uređaji, dijelovi automobila itd.

Danas se najčešće koristi podjela nehrđajućih čelika u četiri osnovne grupe prema njihovoj mikrostrukturi:

- Martenzitni nehrđajući čelici,
- Feritni nehrđajući čelici,
- Austenitni nehrđajući čelici i
- Austenitno-feritni (dupleks) nehrđajući čelici.

2.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici su najveća i najkorištenija skupina nehrđajućih čelika. Sadrže niski maseni udio ugljika od svega 0,03 do 0,08 %. Osnovni legirni elementi u austenitnim nehrđajućim čelicima su: krom (16 - 26 %), nikal (8 - 20 %) i mangan (< 2 %). Dodatni legirni elementi su molibden, dušik, aluminij, bakar, titan, niobij, tantal, selenij i sumpor; kojima se može poboljšati otpornost na neku specifičnu koroziju, mehanička svojstva (dušik), obradivost (selenij, sumpor). Slika 3. prikazuje mikrostrukturu austenitnog nehrđajućeg čelika. [3]



Slika 3. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10 [3]

Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika [3]

| Tvrdoća [HV] | Vlačna čvrstoća [N/mm ²] | Konvencijalna granica razvlačenja [N/mm ²] | Istezljivost [%] |
|-----------------|---|--|---------------------|
| <260 | 520-760 | 205-275 | 40-60 |

Karakteristike austenitnih nehrđajućih čelika [5]:

- Nisu magnetični,
- dobra oblikovljivost u hladnom stanju,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- dobra žilavost pri niskim temperaturama,
- mogu očvrsnuti samo u hladnom stanju,
- visoka žilavost, oksidacija i korozijska otpornost,
- veće napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- visoka otpornost na puzanje pri visokim temperaturama,
- postojana austenitna struktura „solidus“ temperature do ispod sobne temperature, kubično plošno centrirana (FCC) rešetka koja osigurava visoku deformabilnost,
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- osjetljivi su na senzibilizaciju,
- skloni precipitaciji intermetalnih faza između 540 i 900 °C,
- osjetljivi na formiranje martenzita

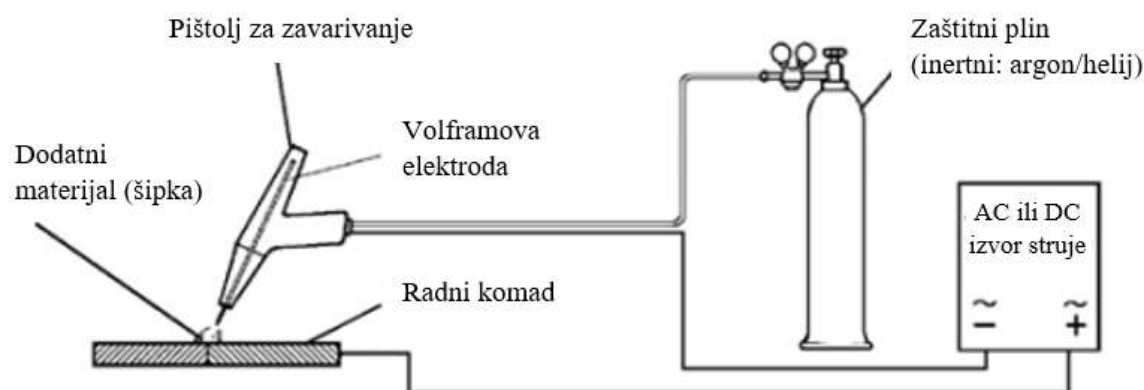
Primjena austenitnih nehrđajućih čelika [3]:

- predmeti u kućanstvu,
- aparati i uređaji u prehrambenoj industriji,
- za tlačne spremnike,
- u industriji masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, šećera, kože, nafte,
- u industriji celuloze, boja, ulja, sapuna, sulfata, gume, foto-pribora, elastične mase, kemikalija,
- uređaji u medicini i ortopediji,
- dijelovi opreme u kontaktu sa sumpornom i fosfornom kiselinom.

3. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

3.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja

TIG zavarivanje je postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina kod kojeg se energija potrebna za zavarivanje dobiva iz električnog luka. Električni luk se uspostavlja i održava između netaljive elektrode i radnog komada. Inertni plinovi korišteni za TIG zavarivanje su najčešće argon ili helij. Inertni plin se prilikom zavarivanja dovodi kroz plinsku sapnicu na vrhu pištolja za zavarivanje u kojem je smještena netaljiva volframova elektroda. TIG zavarivanje može se provoditi s dodatnim materijalom (oznaka 141 prema HRN EN ISO 4063) ili autogeno, bez dodatnog materijala (oznaka 142 prema HRN EN ISO 4063). Slika 4. prikazuje postupak TIG zavarivanja. [6]



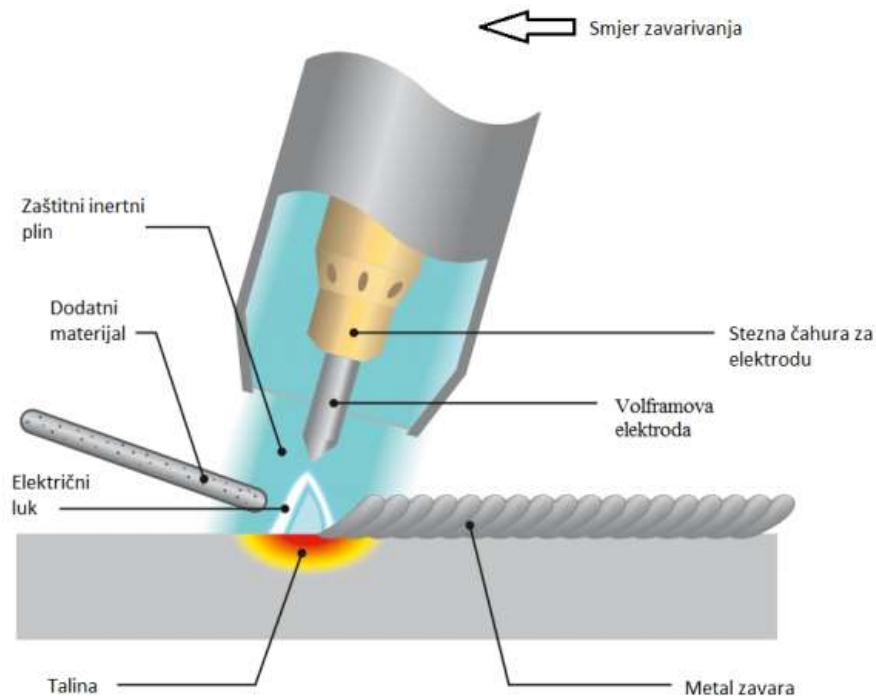
Slika 4. Pojednostavljeni shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [6]

TIG zavarivanje može biti ručno, polu-automatsko ili automatsko. Najčešće se provodi ručno gdje zavarivač pomiče pištolj te u pravilnim vremenskim razmacima dodaje dodatni materijal u prednji rub taline (lijeva tehnika rada). Polu-automatizirani postupak je sličan ručnom postupku, razlika je u tome što se dodatni materijal dodaje pomoću dodavača žice uz pomoć elektromotora. Potpuno automatizirani TIG postupak primjenjuje se u serijskoj proizvodnji. Pištolj za zavarivanje se stavlja na robotsku ruku koja je numerički programirana pomoću adekvatnog CAD/CAM sučelja. Nadzor i mijenjanje parametara može se obavljati preko upravljačkog računala tijekom samog procesa. [6, 7]

TIG postupak zavarivanja ima svoje prednosti i nedostatke. Prednosti TIG zavarivanja su visoka kvaliteta zavora, mogućnost zavarivanja u svim položajima i prikladnost postupka za veliku većinu materijala. S druge strane TIG ima svoje nedostatke kao što su mala produktivnost koja dovodi do neekonomičnosti postupka, nije prikladan za rad na otvorenom, zahtijeva kvalitetnu pripremu spoja i obuku zavarivača. [6]

3.2. Princip rada TIG zavarivanja

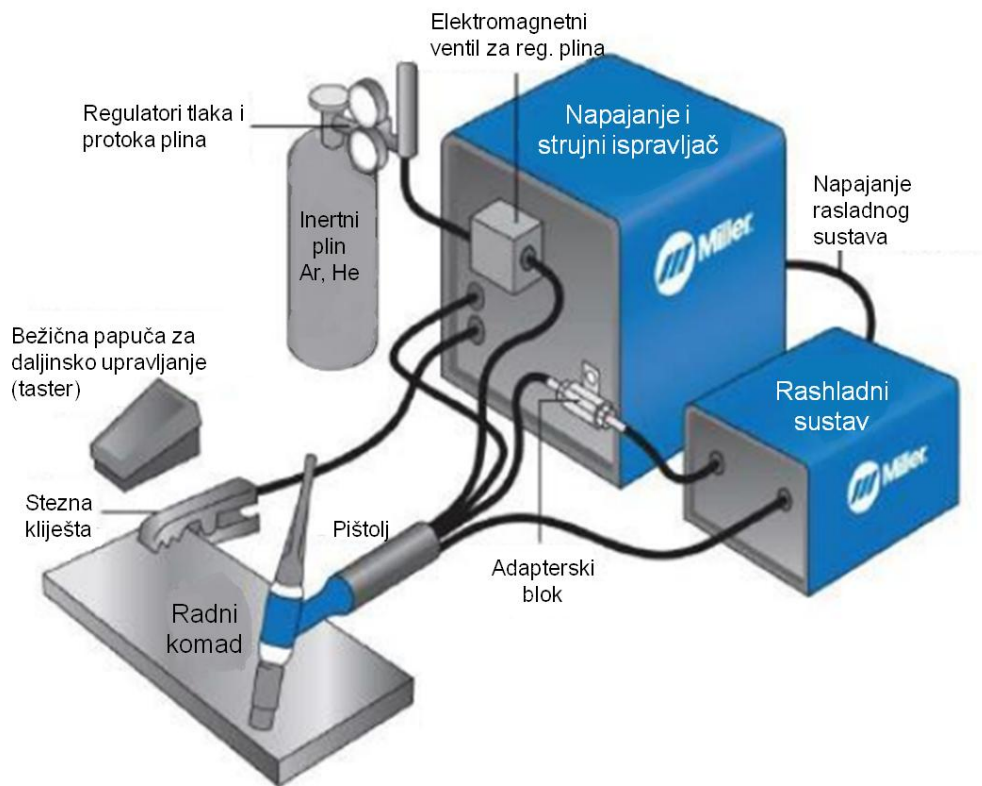
Pritiskom prekidača na pištolju za zavarivanje ili nožnog prekidača započinje postupak ručnog TIG zavarivanja. U trenutku pritiskanja prekidača započinje istjecanje zaštitnog plina kroz sapnicu i cirkulacija rashladnog sredstva. Zaštitni plin štiti talinu metala zavora i zonu utjecaja topline od atmosferskih uvjeta te održava stabilnost električnog luka. Prilikom pritiska prekidača pištolja i primicanja vrha volframove elektrode radnome komadu na udaljenost od 2 do 5 mm dolazi do uspostave električnog luka u inertnoj smjesi plinova. Električni luk doseže temperaturu od oko 20000 °C kojom tali osnovni materijal. Uobičajeno se električni luk uspostavlja bez dodirivanja radnog komada. Kod uređaja za zavarivanje istosmjernom strujom (DC), koji u sebi nemaju ugrađen uređaj za visoki napon visoke frekvencije, električni luk se uspostavlja s dodiranjem volframove elektrode i radnog komada. Dodatni materijal se dodaje u talinu nastalu djelovanjem električnog luka u točno određenim vremenskim intervalima. Dodatni materijal se tali i spaja u metal zavora s osnovnim materijalom. Do prekida električnog luka dolazi prestankom pritiska prekidača pištolja, u to vrijeme zaštitni plin ističe iz sapnice pištolja još nekoliko sekundi kako bi se zaštitili vrh elektrode i talina od reakcije s atmosferom (dok se ne ohlade do zahtijevane temperature). Slika 5. prikazuje shematski prikaz procesa TIG zavarivanja. [7, 8]



Slika 5. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [9]

3.3. Oprema za TIG zavarivanje

Osnovna oprema za TIG zavarivanje sastoji se od izvora struje spojenog na električnu mrežu, pištolja za zavarivanje s volframovom elektrodom, sustava za dovod zaštitnog plina s regulatorima tlaka i protoka te rashladnog sustava. Slika 6. prikazuje opremu za TIG zavarivanje. Pištolj za zavarivanje spojen je na jedan od polova izvora struje (DC+ / DC- / AC) ovisno o materijalu kojeg se zavaruje. Na suprotni pol spojen je radni komad sa steznim kliještima kojima se zatvara strujni krug i omogućuje zavarivanje. Rashladni sustav tijekom zavarivanja hladi izvor struje i pištolj za zavarivanje, a sastoji se od pumpe, hladnjaka i sredstva za hlađenje (voda, antifriz). U atestiranoj čeličnoj boci nalazi se zaštitni plin. Reducir ventil s mjernim instrumentima, regulator tlaka i protoka plina smješteni su na vrhu atestirane čelične boce. [10]



Slika 6. Oprema za TIG zavarivanje [11]

3.4. Volframova netaljiva elektroda

Volfram (eng. tungsten) je tvrd, krt, sjajan srebrnobijeli metal čije je talište najvećeg iznosa među svim kovinama (3422 °C).

Volframova elektroda provodi električnu struju s pištolja na radni komad. Električni luk uspostavljen je između volframove elektrode i radnog komada. Električnim lukom se tali metal osnovnog i dodatnog materijala, pri tome se elektroda ne tali i ne prenosi u zavar. Postoje elektrode od čistog volframa i volframa s dodacima legiranih elemenata. Elektrode se izrađuju u standardnim promjerima i dužinama. Volframove elektrode se identificiraju pomoću boja, a klasifikacija se vrši po legiranim elementima sa slovno-broječanim oznakama prema normi ISO 6848. Tablica 2. prikazuje princip označavanja volframovih elektroda. [12, 13]

Tablica 2. Označavanje volframovih elektroda [8]

| Oznaka (ISO) | Dodatak oksida (%) | Tip oksida | Oznaka bojom |
|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------|
| W | - | - | Zelena |
| WC20 | 1,8-2,2 | CeO ₂ | Siva |
| WL10 | 0,9-1,2 | La ₂ O ₃ | Crna |
| WL15 | 1,4-1,6 | La ₂ O ₃ | Zlatna |
| WL20 | 1,9-2,1 | La ₂ O 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 |

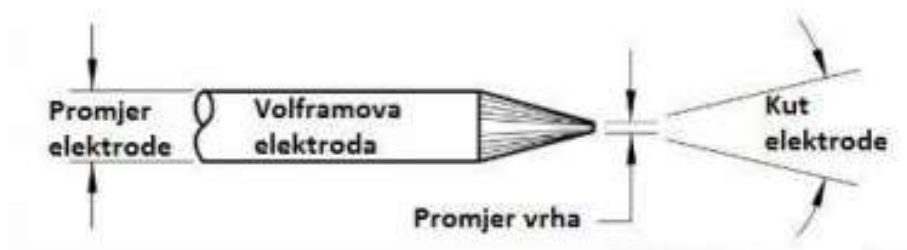
Vrste volframovih elektroda za TIG zavarivanje:

- Elektrode od čistog volframa (W), većinom za zavarivanje izmjeničnom strujom
- Elektrode legirane cerijevim oksidom (CeO₂) koriste se s izvorima izmjenične i istosmjerne struje. Prednost im je jednostavno uspostavljanje i dobra stabilnost električnog luka te dugi životni vijek. Mana im je nemogućnost korištenja s jakim strujama.
- Elektrode legirane lantanovim oksidom (La₂O₃) koriste se za uporabu s izmjeničnim i istosmjernim strujama. Namijenjene su za rad s jakim strujama. Imaju odličan utjecaj na paljenje luka, nisku stopu izgaranja i stabilnost luka.
- Elektrode legirane cirkonijevim oksidom (ZrO₂) pokazuju odlična svojstva pri zavarivanju izmjeničnom strujom. Održavaju vrh elektrode zaobljenim i sprječavaju kontaminaciju zavara.

- Elektrode legirane torijevim oksidom (ThO_2) koriste se s izvorima istosmjerne struje. Omogućuju lakše uspostavljanje električnog luka i rad s 20 % većim strujama zavarivanja u odnosu na čiste volframove elektrode zbog njihove blage radioaktivnosti (emisije α -čestica). Karakterizira ih duži radni vijek i niža granica minimalnog opterećenja. [13]

Izbor promjera elektrode ovisi o debljini materijala, vrsti i jakosti struje zavarivanja.

Osim vrste i promjera važan je i oblik vrha elektrode. Geometrija elektrode utječe na geometriju električnog luka. Vrh elektrode može biti šiljast ili zaobljen ovisno o vrsti i debljini metala koji se zavaruje te vrsti električne struje zavarivanja. Elektrode sa šiljastim vrhom koriste se za zavarivanje istosmjernom strujom dok se elektrode sa zaobljenim vrhom koriste kod zavarivanja izmjeničnom strujom. Slika 7. prikazuje geometriju elektrode sa šiljastim vrhom. [14]



Slika 7. Geometrija elektrode sa šiljastim vrhom [14]

3.5. Parametri kod TIG zavarivanja

Izbor parametara zavarivanja direktno određuje kakva će biti kvaliteta zavara nakon zavarivanja, zato je potrebno pažljivo odabrati parametre zavarivanja.

Utjecajni faktori na kvalitetu zavara koji se odabiru prilikom TIG zavarivanja su:

- Vrsta i promjer elektrode,
- Polaritet elektrode,
- Jakost struje,
- Vrsta i protok zaštitnog plina,
- Brzina zavarivanja,
- Položaj pištolja i dodatnog materijala,
- Dodavanje žice i gibanje pištolja (tehnika rada)

Izbor vrste i promjera elektrode uvelike ovisi o jakosti struje.

Ovisno o polaritetu elektrode zavarivanje TIG postupkom može se izvesti:

- Istosmjernom električnom strujom kada je elektroda spojena na plus pol (DC+), vrlo rijetko i u posebnim slučajevima.
- Istosmjernom električnom strujom kada je elektroda spojena na minus pol (DC-), za zavarivanje svih metala osim magnezija, aluminijskih i njihovih legura.
- Izmjeničnom električnom strujom (AC), kod zavarivanja magnezija, aluminijskih i njihovih legura.

Jakost struje ima najveći utjecaj na oblik zavarenog spoja. Promjenom parametra jakosti struje najbolje se kontrolira dubina penetracije. Jakost struje određuje se na temelju sljedećih faktora: vrsta električne struje, debljina osnovnog materijala, položaj zavarivanja, raspon jakosti struje uređaja, vrsta i promjer elektrode i priprema spoja. [15]

Vrsta i protok zaštitnog plina direktno utječu na stabilnost i kvalitetu električnog luka, izgled zavarenog spoja, geometrijske značajke i količinu para koje se oslobode tijekom zavarivanja. Helij i argon su najčešći zaštitni plinovi. Protok plina najčešće je u rasponu od 4 l/min do 20 l/min.

Brzina zavarivanja utječe na penetraciju i izgled površine zavara. Najčešće je iznosa od 10 cm/min do 25 cm/min. [8]

3.6. TIG zavarivanje visokolegiranih austenitnih Cr-Ni čelika

Visokolegirani austenitni Cr-Ni čelici pokazuju dobru zavarljivost. Unatoč tom svojstvu postoje tri glavna problema kod zavarivanja austenitnih čelika [16]:

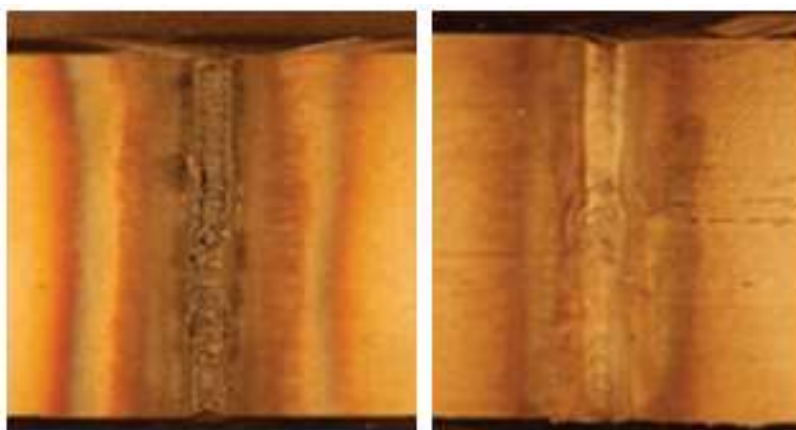
- Formiranje kromovog karbida (CrC) u zoni utjecaja topline
- Formacija pukotina u zavaru
- Formacija sigma faze pri radu s visokim temperaturama

TIG zavarivanje austenitnih čelika se uvijek izvodi istosmjernom strujom (DC) s elektrodom priključenom na minus pol. Primjenom negativnog (DC) polariteta na volframovoj elektrodi postiže se duboka i uska penetracija te stabilniji električni luk. Elektroda koja se koristi je od volframa obično legirana s torijevim oksidom (2% ThO₂) sa šiljastom geometrijom vrha i otporna je na trošenje. Dodatni materijal može se ili ne mora koristiti. Ako se dodatni materijal koristi obično je u obliku šipke za ručne ili u obliku namotane žice za automatizirane postupke. Inertni plin štiti zonu utjecaja topline od atmosferskih uvjeta i omogućuje stabilan električni luk. Zaštitni plinovi koji se najčešće koriste su argon i helij. [8, 17]

4. ZNAČAJ KORIJENSKE ZAŠTITE

4.1. Općenito o korijenskoj zaštiti

Kvaliteta korijenske strane zavara može biti osigurana uklanjanjem atmosferskog zraka iz zone fuzije korištenjem inertnog zaštitnog plina. Korijenska zaštita zavara primjenjuje se zbog mogućnosti onečišćenja zavara raznim nečistoćama iz atmosfere koje nepovoljno utječu na mehanička svojstva zavara. Zavari napravljeni sa zaštitom korijenske strane, u odnosu na zavare napravljene bez korijenske zaštite, imaju će čišće i sjajnije površine te smanjenu mogućnost oksidacije. Zbog toga je potrebna zaštita s obje strane kako bi se postigla visoka kvaliteta zavara. Slika 8. prikazuje izgled korijenskih strana zavara bez i sa korijenskom zaštitom. [18]



Slika 8. Korijenska strana zavara bez korijenske zaštite (lijevo) i sa korijenskom zaštitom plinskom mješavinom $N_2+10\% H_2$ (desno) [18]

Zavarivanje bez korijenske zaštite ili s nezadovoljavajućom zaštitom korijenske strane rezultira pojavi obojenja s korijenske strane zavara. Također prilikom zavarivanja bez korijenske zaštite dolazi do poroznosti zavara. Poroznost u zavaru je problematična zato što oslabljuje mehanička svojstva i korozijsku otpornost. Poroznost u zoni utjecaja topline je česta pojava kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika kao što su AISI 304 i AISI 316. [18]

Najčešći plinovi koji se koriste za zaštitu korijena su argon (Ar), dušik (N₂) i mješavine dušika s vodikom (H₂, uobičajeno 10%). Također se koristi helij (He) i mješavine argona s helijem (Ar/He) te mješavine argona s vodikom (Ar/H₂). [18]

4.2. Zaštitni plinovi

U svim postupcima zavarivanja koriste se zaštitni plinovi koji štite zonu taljenja od atmosfere. Zavarivanjem bez zaštitnih plinova dolazi do reakcije taline s plinovima iz atmosfere što će rezultirati pojavom poroznosti u zavaru. Inertni plinovi poput Ar i He prilikom TIG zavarivanja ne reagiraju s talinom zavara. Plinovi koji sudjeluju u kemijskom procesu s talinom nazivaju se aktivni zaštitni plinovi (CO₂ i O₂). Argon, helij, dušik i vodik se uglavnom koriste kod TIG zavarivanja kao zaštitni plinovi za zavarivanje i za korijensku zaštitu zavarenog spoja. Kvaliteta zavara može se poboljšati optimalnim izborom zaštitnog plina ovisno o parametrima i vrsti zavarivanja, ispravnim odabirom zaštitnog plina također se mogu smanjiti troškovi zavarivanja. Za pojedine materijale prilikom zavarivanja preporučeni su sljedeći zaštitni plinovi prikazani tablicom 3. [19]

Tablica 3. Preporučeni zaštitni plinovi prilikom zavarivanja pojedinih metala [20]

| Plin / Materijal | Ne legirani i niskolegirani čelici | Nehrđajući čelici | Niklove legure | Bakrene legure | Aluminijske legure |
|-------------------|------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|--------------------|
| Ar | x | x | x | x | x |
| Ar/H ₂ | | x | x | | |
| Ar/He | | | x | x | x |
| He | | | | x | x |

4.3. Opis pojedinačnih zaštitnih plinova za korijensku zaštitu

4.3.1. Argon

Argon je kod TIG zavarivanja najupotrebljavaniji zaštitni plin. Dobiva se iz atmosfere odvajanjem od ukapljenog zraka. Argon je jednoatomni inertni plin, ne sudjeluje u kemijskoj reakciji s talinom materijala.

Stupanj čistoće argona važan je prilikom zavarivanja, minimalno može iznositi 99,95% što je prihvatljivo za većinu metala zavarivanih TIG postupkom. Za zavarivanje vatrootpornih i reaktivnih metala poput molibdena, titana i tantala minimalan stupanj čistoće argona iznosi 99,997%. [21]

Čisti argon je najčešće korišten kao korijenski zaštitni plin za TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika kao što su AISI 304 i AISI 316. Zbog male dostupnosti i visoke cijene argona za korijensku zaštitu danas se sve više koristi čisti dušik (N_2) i njegove mješavine. [18]

4.3.2. Helij

Helij je jednoatomni inertni plin male atomske mase i gustoće. Dobiva se odvajanjem od zemnog plina. Cijenovno je znatno skuplji od argona zbog čega se u Europi gotovo i ne koristi. Stupanj čistoće kod zavarivanja minimalno iznosi 99,99%. [21]

Helij se za korijensku zaštitu upotrebljava u rijetkim slučajevima. [18]

4.3.3. Dušik

Dušik je kemijski inertan plin bez boje, mirisa i okusa. Dobiva se frakcijskom destilacijom tekućeg zraka. Mješavine dušika koriste se za zavarivanje duplex čelika, austenitnih čelika i niklovih legura. Kod ostalih metala dušik povećava mogućnost stvaranja pukotina. [21]

Mješavine koje sadrže dušik koriste se za korijensku zaštitu austenitnih i dupleks čelika sa svrhom da nadoknade gubitke N_2 iz područja zavara. [18]

4.3.4. Vodik

Vodik je plin bez boje, mirisa i okusa. Ima najmanju atomsku masu i najveću toplinsku vodljivost. Koristi se u plinskim mješavinama za visokotemperaturne aplikacije poput zavarivanja nehrđajućih austenitnih čelika i niklovih legura. Najuobičajenija plinska mješavina koja sadrži vodik je s argonom. Vodik može prouzročiti proznost u zavaru. [21]

Kao zaštitni plin za korijensku zaštitu vodik pruža reducirajuću atmosferu koja sprječava formiranje oksida s boljom efikasnošću od argona. Uporaba vodika za korijensku zaštitu se preporuča za austenitne nehrđajuće čelike. [18]

4.4. Zahtjevi norme HRN EN ISO 15614-1 za korijensku zaštitu

U normi HRN EN ISO 15614-1 dane su dvije razine (eng. levels) kvalifikacije postupka zavarivanja s obzirom na opseg ispitivanja. Na razini 2 opseg ispitivanja je veći i zahtjevi su restriktivniji u odnosu na razinu 1. [22] Tablica 4. prikazuje klasifikaciju zaštitnih plinova prema ISO 14175:2008.

Tablica 4. Klasifikacija zaštitnih plinova prema normi ISO 14175:2008 [23]

| Kratki naziv | | Sastav u nominalnim postotcima volumena [%] | | | | | |
|--------------|---|---|---------------------------|----------------------|---------------|---------------------------|--------------------------|
| Glavna grupa | Podgrupa | Oksidirajući | | Inertni | | Reducirajući | Nisko reaktivni |
| | | CO ₂ | O ₂ | Ar | He | H ₂ | N ₂ |
| I | 1 | | | 100 | | | |
| | 2 | | | | 100 | | |
| | 3 | | | ostatak ^a | 0,5 ≤ He ≤ 95 | | |
| M | 1 | 0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5 | | ostatak ^a | | 0,5 ≤ H ₂ ≤ 5 | |
| | 2 | 0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5 | | ostatak ^a | | | |
| | 3 | | 0,5 ≤ O ₂ ≤ 3 | ostatak ^a | | | |
| | 4 | 0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5 | 0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5 | ostatak ^a | | | |
| M2 | 0 | 5 < CO ₂ ≤ 15 | | ostatak ^a | | | |
| | 1 | 15 < CO ₂ ≤ 25 | | ostatak ^a | | | |
| | 2 | | 3 < O ₂ ≤ 10 | ostatak ^a | | | |
| | 3 | 0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5 | 3 < O ₂ ≤ 10 | ostatak ^a | | | |
| | 4 | 5 < CO ₂ ≤ 15 | 0,5 ≤ O ₂ ≤ 3 | ostatak ^a | | | |
| | 5 | 5 < CO ₂ ≤ 15 | 3 < O ₂ ≤ 10 | ostatak ^a | | | |
| | 6 | 15 < CO ₂ ≤ 25 | 0,5 ≤ O ₂ ≤ 3 | ostatak ^a | | | |
| M3 | 7 | 15 < CO ₂ ≤ 25 | 3 < O ₂ ≤ 10 | ostatak ^a | | | |
| | 1 | 25 < CO ₂ ≤ 50 | | ostatak ^a | | | |
| | 2 | | 10 < O ₂ ≤ 15 | ostatak ^a | | | |
| | 3 | 25 < CO ₂ ≤ 50 | 2 < O ₂ ≤ 10 | ostatak ^a | | | |
| | 4 | 5 < CO ₂ ≤ 25 | 10 < O ₂ ≤ 15 | ostatak ^a | | | |
| C | 5 | 25 < CO ₂ ≤ 50 | 10 < O ₂ ≤ 15 | ostatak ^a | | | |
| | 1 | 100 | | | | | |
| R | 2 | ostatak | 0,5 ≤ O ₂ ≤ 30 | | | | |
| | 1 | | | ostatak ^a | | 0,5 ≤ H ₂ ≤ 15 | |
| N | 2 | | | ostatak ^a | | 15 < H ₂ ≤ 50 | |
| | 3 | | | ostatak ^a | | | 100 |
| | 4 | | | ostatak ^a | | | 0,5 ≤ N ₂ ≤ 5 |
| | 5 | | | ostatak ^a | | 0,5 ≤ H ₂ ≤ 10 | 5 < N ₂ ≤ 50 |
| | 5 | | | ostatak ^a | | 0,5 ≤ H ₂ ≤ 50 | ostatak |
| O | 1 | | 100 | | | | |
| Z | Plinske mješavine koje sadrže komponente koje nisu navedene u tablici ili mješavine izvan navedenog raspona sastava. ^b | | | | | | |

^a Za ovu klasifikaciju, argon može biti djelomično ili potpuno zamijenjen helijem.

^b Mješavina dvaju plinova sa istom Z klasifikacijom ne može biti zamjenjiva.

Zahtjevi norme HRN EN ISO 15614-1 koji definiraju primjenu korijenske zaštite su sljedeći [22]:

Za razinu 1: Za grupe materijala 7.1 (feritni nehrđajući čelici) i 41 do 48 (nikal i niklove legure), izbacivanje korijenskog plina ili promjena nominalnog sastava korijenskog plina iz inertnog plina u mješavinu koja uključuje ne inertne plinove zahtjeva rekvalifikaciju. Za grupe materijala 7.1 i 41 do 48, za dodavanje pomoćnog plina nije potrebna rekvalifikacija. Za sve ostale grupe materijala, dodavanje ili izbacivanje korijenskog plina ne zahtijeva rekvalifikaciju. [22]

Za razinu 2: Provedeno ispitivanje postupka zavarivanja sučeljenog spoja bez korijenskog plina kvalificira postupak zavarivanja s korijenskim plinom iz grupe I, N1, N2 i N3 prema ISO 14175, ali ne i obrnuto. Glavna grupa korijenskih plinova pokriva sve podgrupe od iste glavne grupe (klasifikacija prema ISO 14175). Za grupe materijala od 1 do 6 (čelici) prema ISO / TR 15608 [24], promjena korijenskog plina između grupa I, N1, N2 i N3 ne zahtijeva prekvalifikaciju. Za grupe materijala 8 (austenitni nehrđajući čelici) i 41 do 48, promjena korijenskog plina između grupa I, N i R ne zahtijevaju prekvalifikaciju. Svaka promjena u klasifikaciji korijenskog plina za grupe materijala 7 (feritni, martenzitni i precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici) i 10 (austenitno-feritni odnosno dupleks čelici) zahtijeva rekvalifikaciju. Ako se proizvodni zavari izrađuju na materijalima debljine veće od 5 mm, izbacivanje korijenskog plina je prihvatljivo. [22]

5. EKSPERIMENTALNI RAD

5.1. Opis eksperimenta

Zadatak eksperimentalnog dijela rada bio je osmisliti plan pokusa i izvesti eksperiment u laboratoriju. Eksperiment je proveden automatiziranim TIG postupkom bez dodatnog materijala s više razina unosa topline uz konstantnu brzinu zavarivanja i protok plina. Unos topline variran je promjenom struje zavarivanja. Kao osnovni materijal korišten je visokolegirani nehrđajući čelik AISI 304, a kao zaštitni plin korišten je čisti argon. Nakon navarivanja provedena su vizualna ispitivanja zavara i makrostrukturalna analiza. Cilj rada je, na temelju dobivenih rezultata, odrediti kritičan unos topline pri kojem je potrebno provesti zaštitu korijenske strane zavara.

5.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal za ovaj eksperiment korišten je nehrđajući čelik oznake AISI 304 (W.Nr. 1.4301). To je austenitni Cr-Ni čelik dobre čvrstoće i odlične korozijske otpornosti. Ovaj čelik nije magnetičan, toplinska i električna vodljivost nije izražena u usporedbi s bakrenim legurama. Velika je otpornost osnovnog materijala na koroziju u pitkoj vodi, u atmosferi te u područjima gdje je koncentracija klorida niska. Široku primjenu ima u prehrambenoj industriji (pivovare, vinarije, mljekare) i naftnoj industriji (spremnici kemikalija), a u novije vrijeme sve se češće primjenjuje u arhitekturi. Kemijski sastav materijala prikazan je u tablici 5., a mehanička svojstva u tablici 6.

Uzorci korišteni u eksperimentu izrezani su iz cijevi pomoću pile "BS 350 GH", slika 9. Debljina stjenke cijevi odnosno uzorka iznosila je 5,5 mm. Duljina uzorka iznosila je 160 mm, a širina 45 mm.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika AISI 304 [25]

| Element | C | Si | Mn | Ni | P | S | Cr | N | |
|---------|-----|------|----|----|------|-------|-------|------|------|
| % | Min | - | - | - | 8 | - | - | 17,5 | - |
| | Max | 0,07 | 1 | 2 | 10,5 | 0,045 | 0,015 | 19,5 | 0,10 |

Tablica 6. Mehanička svojstva čelika AISI 304 [26]

| R_m , min [N/mm ²] | $R_{p0,2}$, min [N/mm ²] | A_5 , min [%] | KU, min [J] | HB, max |
|-------------------------------------|--|--------------------|----------------|---------|
| 520-720 | 195 | 35-40 | 85 | 215 |



Slika 9. Pila "BS 350 GH"

5.3. Elektroda

Za ovaj eksperiment odabrana je netaljiva volframova elektroda legirana s torijevim oksidima. Zavarivanje austenitnih čelika provodi se istosmjernom (DC) strujom s negativnim polaritetom elektrode. Elektroda kod istosmjerne struje ima stabilan električni luk, dug vijek trajanja i otporna je na veće vrijednosti struje. Promjer elektrode u eksperimentu iznosio je 3,2 mm. Navarivanje je provedeno bez korištenja dodatnog materijala. Prije navarivanja elektroda je našiljena pod kutem od 60°. Električni luk kod manjih kuteva šiljenja elektroda uzrokuje usku i duboku penetraciju u osnovni materijal. Između vrha elektrode i radnog komada korišten je razmak 5 mm. Slika 10. prikazuje izgled volframove elektrode.



Slika 10. Volframova netaljiva elektroda

5.4. Oprema za navarivanje

5.4.1. Uređaj za TIG zavarivanje

TIG zavarivanje je izvedeno pomoću uređaja "MagicWave 230i" koji je smješten u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Slika 11. prikazuje "MagicWave 230i". Tablica 7. prikazuje karakteristike uređaja "MagicWave 230i"



Slika 11. "MagicWave 230i"

Tablica 7. Karakteristike uređaja "MagicWave 230i" [27]

| | |
|--|---------------|
| Struja zavarivanja/radni ciklus [10min/40°C] (intermitencija) | 230A / 35% |
| | 195A / 60% |
| | 165A / 100% |
| Radni napon | 10,1 – 19,2 V |
| Napon praznog hoda | 100,0 V |
| Mrežna frekvencija | 50 – 60 Hz |
| Mrežni napon | 230 V |
| Mrežni osigurač | 16 A |
| Dimenzija / b | 210,0 mm |
| Dimenzija / l | 558,0 mm |
| Masa | 17,0 kg |
| Stupanj zaštite | IP23 |

5.4.2. "BUG-O systems" automat

Navarivanje je izvedeno na automatu "BUG-O systems" koji je smješten u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Automat je korišten u eksperimentu kako bi se izbjegla pogreška zavarivača i dobili što točniji rezultati ispitivanja. To je jednostavan uređaj na koji se pričvrsti pištolj za zavarivanje ili rezanje, te on jednolikim pravocrtnim gibanjem služi kao zamjena za zavarivača. Na njemu je moguće podešavati brzinu gibanja pištolja i njegov položaj. Slika 12. prikazuje automat korišten za izvođenje ovog eksperimenta.



Slika 12. "BUG-O systems" automat za zavarivanje

5.5. Navarivanje

Prije TIG navarivanja ručno je provedeno čišćenje površine svih uzoraka alkoholom. Navarivanje je provedeno na šest uzoraka načinjenih rezanjem cijevi od austenitnog Cr-Ni čelika AISI 304 debljine stijenke 5,5 mm. Zaštitni plin korišten za vrijeme navarivanja bio je čisti argon (Ar 4.8). Navarivanje je provedeno bez korijenske zaštite.

Protok plina prilikom navarivanja na svakom uzorku bio je konstantnog iznosa $Q_{pl} = 8$ l/min. Brzina navarivanja svakog uzorka je također bila konstantnog iznosa $v_z = 8$ cm/min. Visina luka je uvijek iznosila 5 mm. Uzorci su navarivani uz promjenu parametra jakosti struje, na svakom uzorku drugačijeg iznosa (50 A, 75 A, 100 A, 125 A, 150 A, 175 A). Volframova elektroda je bila spojena na (-) pol istosmjerne struje. Navarivanje je izvedeno u horizontalnom položaju na svakom uzorku. Slika 13. prikazuje izgled uzorka neposredno nakon navarivanja. Tablica 8. prikazuje parametre navarivanja.

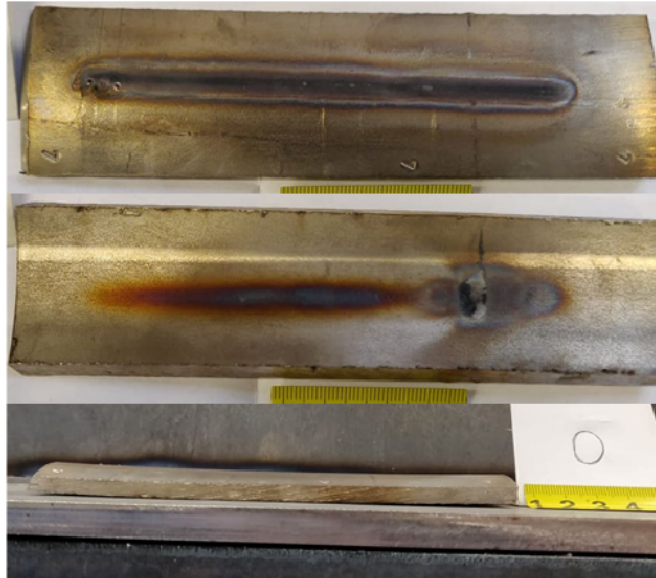


Slika 13. Izgled uzorka neposredno nakon navarivanja

Tablica 8. Parametri navarivanja

| Uzorak | Jakost struje, A | Napon, V | Zaštitni plin (lice zavara) | Protok plina, l/min | Brzina zavarivanja, cm/min | Visina luka, mm |
|--------|------------------|----------|-----------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------|
| 0 | 50 | 12,2 | 100% Ar | 8 | 8 | 5 |
| 1 | 75 | 12,5 | | | | |
| 2 | 100 | 13,2 | | | | |
| 3 | 125 | 14 | | | | |
| 4 | 150 | 14 | | | | |
| 5 | 175 | 14,6 | | | | |

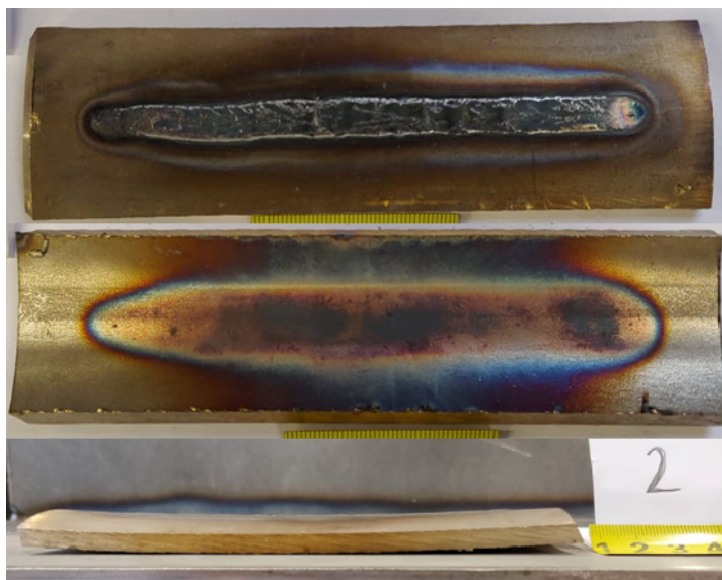
Vidljiva je jasna razlika u širini navara pojedinog uzorka kao posljedica promjene parametra jakosti struje. Uzrok tome je proporcionalan rast unosa topline s porastom parametra jakosti struje. Slike 14.-19. prikazuju izgled lica i korijena navara te bočni izgled pojedinih uzoraka.



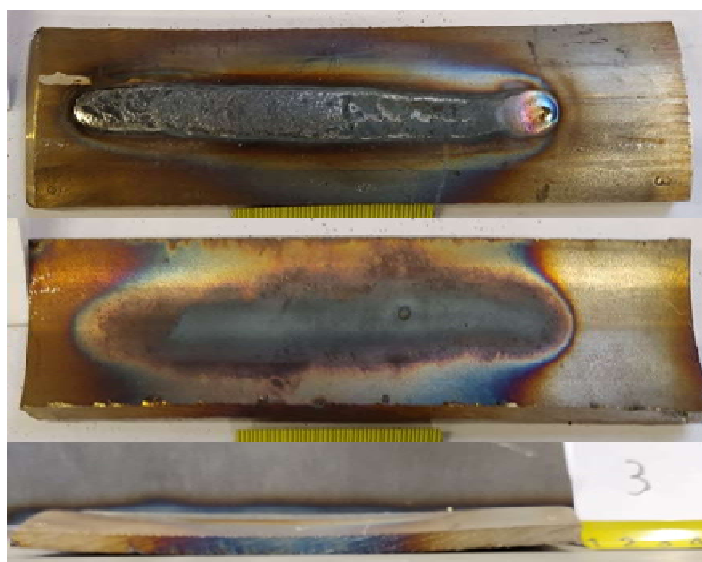
Slika 14. Uzorak 0 ($I = 50 \text{ A}$, $U = 12,2 \text{ V}$)



Slika 15. Uzorak 1 ($I = 75 \text{ A}$, $U = 12,5 \text{ V}$)



Slika 16. Uzorak 2 ($I = 100 \text{ A}$, $U = 13,2 \text{ V}$)



Slika 17. Uzorak 3 ($I = 125 \text{ A}$, $U = 14 \text{ V}$)



Slika 18. Uzorak 4 ($I = 150 \text{ A}$, $U = 14 \text{ V}$)



Slika 19. Uzorak 5 ($I = 175 \text{ A}$, $U = 14,6 \text{ V}$)

5.6. Izrada makroizbruska

Nakon provedenog navarivanja uzorke je potrebno pripremiti za izradu makroizbruska. Izrada makroizbruska obuhvaća rezanje, brušenje, poliranje i kemijsko nagrivanje uzorka. Rezanje uzoraka je potrebno kako bi se dobio poprečni presjek zavora. Uzorci su prerezani pilom "BS 350 GH" prikazanoj na slici 9. Svi uzorci su izrezani na istoj udaljenosti uz iznimku kod uzorka 5. Uzorak 5 je izrezan na mjestu najveće prokapljine. Slika 20. prikazuje mjesto rezanja svih uzoraka (crveno) i mjesto rezanja uzorka 5 (plavo).



Slika 20. Mjesta rezanja uzoraka

Brušenje uzoraka provedeno je brusnim papirom različitih granulacija: P80, P100 i P200. Brušenje kreće papirom s najvećom granulacijom te se nakon određenog vremena prelazi na brusni papir manje granulacije sve dok se ne dođe do brusnog papira najmanje granulacije.

Nakon brušenja uzorci su polirani. Na ispoliranoj površini makroizbrusaka nije bilo nikakvih znakova pora, uključaka ili bilo kakvih nepravilnosti uočljivih vizualnom kontrolom što ukazuje da je postupak navarivanja izveden pravilno i u granicama dozvoljenih parametara. Nakon poliranja uzorke je bilo potrebno nagrivi.

Nagrizanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Uzorci su nagriženi u 10%-tnoj oksalnoj kiselini uz napon 4-5 V. Postupak elektrolitskog nagrivanja trajao je oko 3 minute, tada je reakcija prekinuta ispiranjem uzoraka u toploj vodi. Nakon nagrivanja linije između metala zavara i osnovnog materijala postale su izraženije.

5.7. Ispitivanje i analiza

5.7.1. Vizualna kontrola

Vizualna kontrola je metoda kontrole bez razaranja, koristi se za otkrivanje niza površinskih grešaka kao što su: korozija, kontaminacija, greške završne obrade površine te greške na površini zavara. Ispitivanje može biti sa ili bez pomoćnih uređaja i opreme. Najčešća je i najbitnija primjena vizualne kontrole golim okom i to prije, tijekom i nakon zavarivanja.

Prije navarivanja provjerena je pozicija pištolja iznad uzorka. Također prije navarivanja provjerena je putanja pištolja u svrhu dobivanja navara na sredini uzorka.

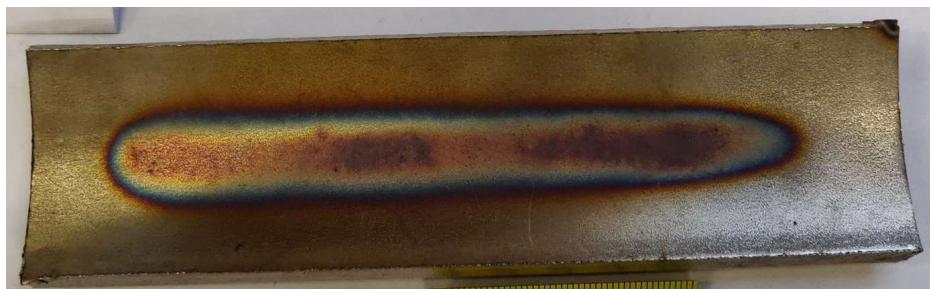
Za vrijeme navarivanja promatrano je ponašanje taline. Izgled taline bio je uobičajen za TIG postupak zavarivanja. Za vrijeme navarivanja pri jakosti struje 125 A pojavila se velika deformacija uzorka 3 koji se značajno savinuo. Kod uzoraka 4 i 5 također se moglo primijetiti savijanje. Savijanje uzoraka 3, 4 i 5 uzrokovalo je progib 2-3 mm. Na uzorku 2 (100 A) također je uočen progib, a kod uzoraka 0 i 1 progib nije bio izražen. Slika 21. prikazuje deformaciju uzorka 4.



Slika 21. Deformacija uzorka 4

Ovaj problem savijanja može se izbjeći korištenjem stega na svakom kraju uzorka za vrijeme navarivanja.

Nakon navarivanja na svim uzorcima uočljivo je obojenje na korijenskoj strani. Do obojenja je došlo zbog navarivanja bez korijenske zaštite. Slika 22. prikazuje obojenje korijenske strane uzorka 1.



Slika 22. Obojenje korijenske strane uzorka 1

Na uzorku 5 uočljiva je poroznost navara. Poroznost je uzrokovana korištenjem zaštitnog plina Ar 4.8 (99,998% Ar) koji sadrži veći udio nečistoća. Korištenjem čistijeg argona (npr. Ar 5.0) vjerojatno bi se izbjegla poroznost u navaru. Slika 23. prikazuje poroznost na licu navara uzorka 5.



Slika 23. Poroznost na licu navara uzorka 5

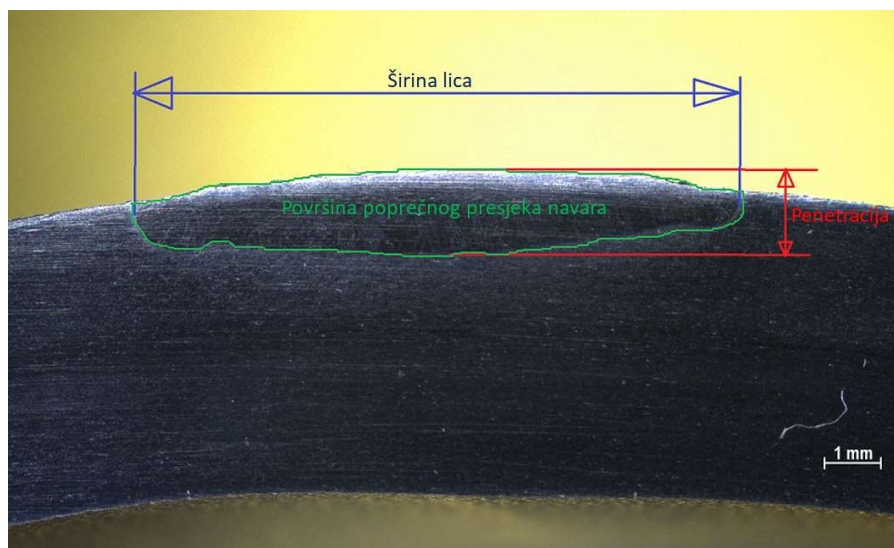
5.7.2. Makroanaliza

Ispitivanje makroizbruska sastoji se od vizualnog pregleda poprečnog presjeka navara golim okom ili uz pomoć mikroskopa. Fotografije geometrije navara na makroizbruscima napravljene su na mikroskopu Leica MZ6 koji je smješten u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Slika 24. prikazuje mikroskop Leica MZ6.



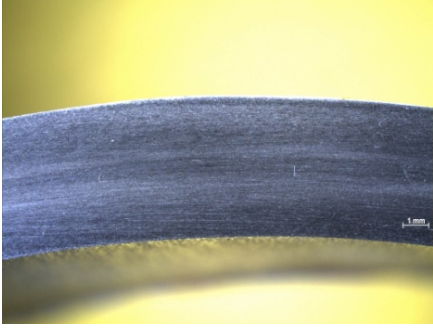
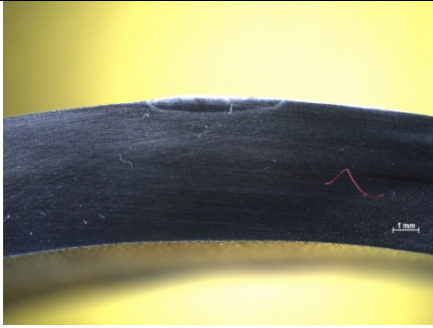


Slika 24. Mikroskop Leica MZ6

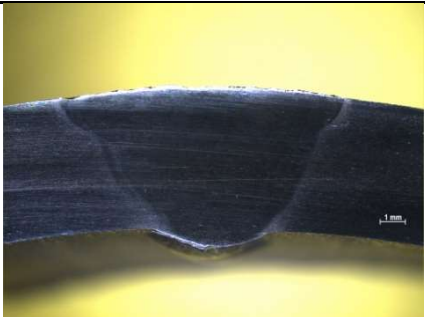
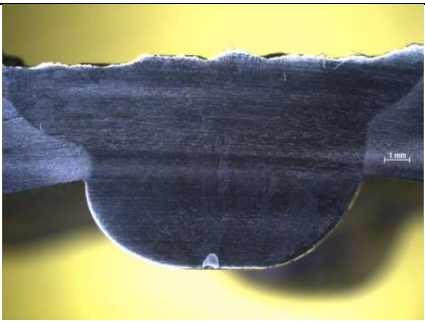
Promatrane geometrijske značajke su penetracija, širina i površina navara. Slika 25. prikazuje kotiranu penetraciju, širinu lica i površinu poprečnog presjeka navara na uzorku 3. Tablica 9. Prikazuju geometrijske značajke makroizbrusaka.



Slika 25. Prikaz kotiranih veličina: penetracija, širina lica, površina poprečnog presjeka navara

Tablica 9. Izgled geometrijskih značajki makroizbrusaka

| Uzorak | Makroizbrusak | Jakost struje [A] | Napon [V] | Unos topline [kJ/cm] |
|--------|---|-------------------|-----------|----------------------|
| 0 |  | 50 | 12,2 | 2,75 |
| 1 |  | 75 | 12,5 | 4,22 |
| 2 |  | 100 | 13,2 | 5,94 |
| 3 |  | 125 | 14 | 7,88 |

| | | | | |
|---|---|-----|------|-------|
| 4 |  | 150 | 14 | 9,45 |
| 5 |  | 175 | 14,6 | 11,50 |

5.7.3. Unos topline

Unos topline je dio energije električnog luka koji se utroši na zavarivanje radnog komada.

Unos topline u navar izračunava se prema formuli [8]:

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

gdje je:

Q – unesena topline [kJ/cm]

U – napon zavarivanja [V]

I – jakost struje zavarivanja [A]

v_z – brzina zavarivanja [cm/min]

k – koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja (prema normi HRN EN 1011-1, $k = 0,6$ za TIG postupak [28])

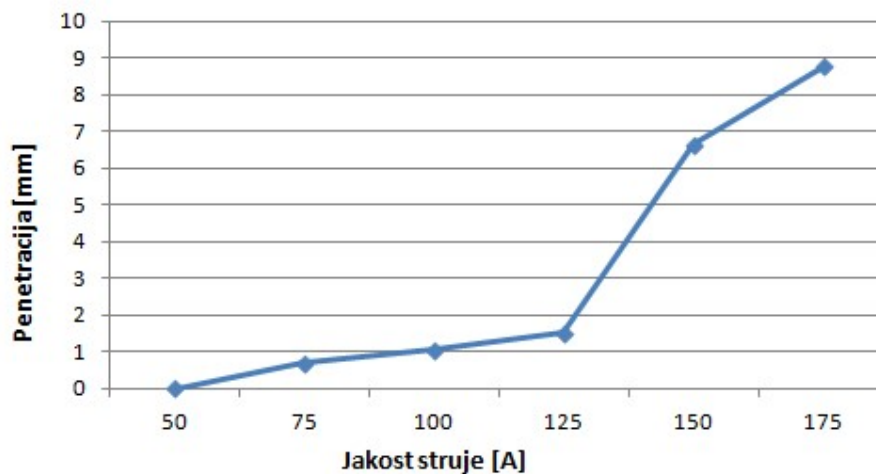
Iznosi veličina penetracije, širine lica i površine poprečnog presjeka navara izmjereni su pomoću programa ImageJ. Tablica 10. prikazuje penetraciju, širinu lica, površinu poprečnog presjeka navara i iznose unesene topline u pojedini uzorak.

Tablica 10. Iznosi penetracije, širine lica, površine navara i unesene topline za pojedini uzorak

| Uzorak | Penetracija [mm] | Širina lica [mm] | Površina navara [mm ²] | Unesena toplina [kJ/cm] |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 2,75 |
| 1 | 0,683 | 5,121 | 2,741 | 4,22 |
| 2 | 1,050 | 8,131 | 6,643 | 5,94 |
| 3 | 1,517 | 10,764 | 12,740 | 7,88 |
| 4 | 6,636 | 11,536 | 48,946 | 9,45 |
| 5 | 8,757 | 18,494 | 105,236 | 11,50 |

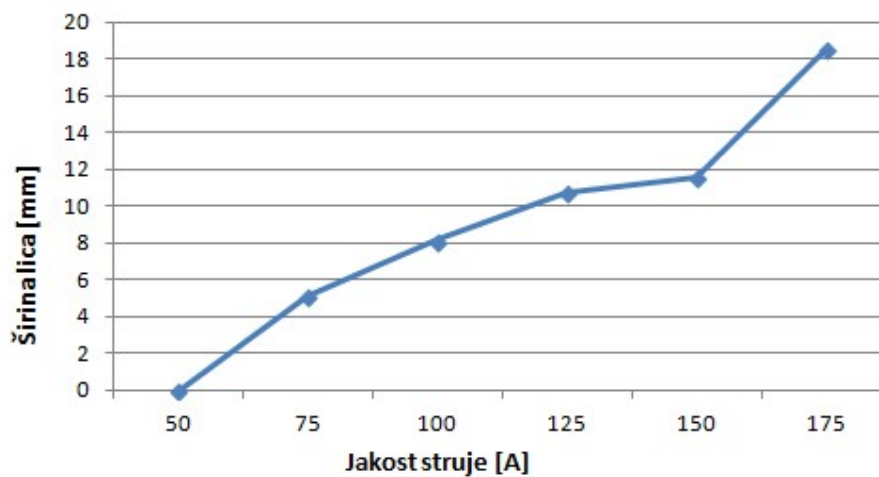
Slike 26., 27. i 28. su grafički prikaz dobivenih vrijednosti penetracije, širine lica i površine navara u odnosu na jakost struje.

Iz grafa ovisnosti penetracije i jakosti struje može se zaključiti da kod jakosti struje od 50 A do 125 A ne dolazi do protaljivanja. Graf ima linearni prirast penetracije do jakosti struje 125 A. Mjestimično protaljivanje se javlja kod iznosa jakosti struje od 150 A na više. Prokapljine na makroizbruscima 4 i 5 rezultiraju skokovitom rastu penetracije na grafu kod 150 A.



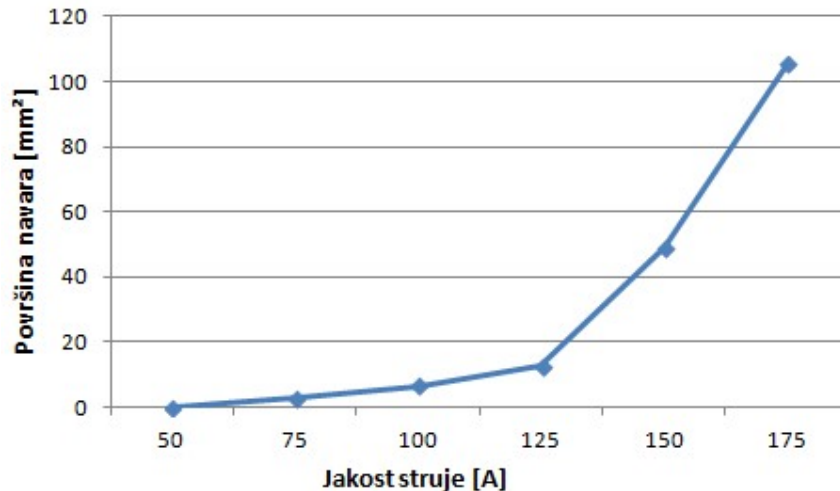
Slika 26. Grafički prikaz ovisnosti penetracije o jačini struje

Graf ovisnosti širine lica o jačini struje ima linearan prirast širine lica s prirastom struje do 125 A. Odstupanje koje primjećujemo kod 175 A postoji iz razloga što je uzorak 5 prerezan na drugom mjestu od ostalih uzoraka, prikazano na slici 20.



Slika 27. Grafički prikaz ovisnosti širine lica o jačini struje

Graf ovisnosti površine navara o jakosti struje ima linearni prirast površine lica do jakosti struje od 125 A. Kod iznosa struje od 150 A i 175 A zbog pojave protaljivanja dolazi do naglog skoka površine navara na grafu.



Slika 28. Grafički prikaz ovisnosti površine poprečnog presjeka navara o jačini struje

Povećanje unosa topline utjecalo je na povećanje geometrijskih značajki navara što je u skladu s rezultatima drugih autora [29, 30]. Geometrijske značajke navara rastu linearno s porastom struje zavarivanja do 125 A. Pri većim strujama 150 A i 175 A mjestimično su se pojavile prokapljine. Makroizbrusci su napravljeni na mjestima prokapljina. Pri većim strujama udio nečistoća u plinu značajnije je utjecao na proces navarivanja i geometrijske značajke navara, što je mogući uzrok pojave prokapljina.

Kod najmanjeg unosa topline pojavilo se obojenje površine materijala s korijenske strane što ukazuje na potrebu za korijenskom zaštitom iako je debljina podloge bila veća od 5 mm za koju prema normi HRN EN ISO 15614-1 nije potrebna korijenska zaštita.

6. ZAKLJUČAK

U završnom radu je opisan TIG postupak zavarivanja s posebnim naglaskom na tehnologiju zavarivanja visokolegiranih austenitnih Cr-Ni čelika. U radu je provedeno TIG zavarivanje bez korijenske zaštite s promjenom parametra jakosti struje. Navari su izvedeni na automatu u svrhu postizanja konstantne brzine navarivanja i eliminacije grešaka zavarivača. Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je utvrditi značaj korijenske zaštite i vidjeti da li je korijenska zaštita potrebna za različite unose topline prilikom TIG zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada navareni su uzorci od materijala AISI 304, s različitom strujom navarivanja. Povećanje unosa topline utjecalo je na povećanje geometrijskih značajki navara. Kod struje od 125 A postignuti iznos unosene topline nije dovoljan za potpunu penetraciju materijala. Korištenjem jakosti struje od 150 A materijal podliježe prokapljivanju. Navarivanjem s parametrom jakosti struje 175 A dolazi do stvaranja pora na navaru zbog korištenja zaštitnog plina Ar 4.8. Za TIG zavarivanje s parametrom jakosti struje 175 A i više treba koristiti Ar 5.0 kako bi izbjegli poroznost u navaru.

Vizualnom kontrolom korijenske strane navara vidi se kako korijenska zaštita ima značajnu ulogu u TIG zavarivanju visokolegiranih austenitnih Cr-Ni čelika. Obojenje korijenske strane navara vidljivo je kod svih uzoraka. Makroanalizom uzorka 0 zavarivanog s malim unosom topline pri jakosti struje od 50 A vidi se da nije postignuta penetracija u materijal. S korijenske strane uzorka 0 uočljivo je obojenje (oksidacija površinskog sloja). Kada dođe do obojenja na korijenskoj strani navara materijal postaje podložan koroziji. Primjenom korijenske zaštite sprječavaju se obojenja i materijal ostaje postojan na različite oblike korozije, jer nije došlo do oštećenja pasivnog filma. Korijenska zaštita je obavezna za TIG zavarivanje visokolegiranih austenitnih Cr-Ni čelika ako su oni izloženi korozijskom djelovanju.

TIG navarivanjem uz korijensku zaštitu izbjegli bi obojenje korijenske strane navara. Preporuka za daljnje istraživanje bi bilo ponoviti ispitivanja s korištenjem korijenske zaštite i zaštitnog plina Ar 5.0.

LITERATURA

- [1] ..., Otokumpu Stainless AB: Handbook of Stainless Steel, Avesta Resarch Centre, Avesta, Sweden, 2013.
- [2] Samardžić, I.: Proizvodne tehnologije - Nastavni materijali, Visoka tehnička škola u Bjelovaru, 2014.
- [3] Rede, V.: predavanja iz kolegija Posebni metalni materijali, FSB, 2020.
- [4] <http://www.heataway.net/index.php/en/products/why-stainless-steel/> , dostupno 10.1.2021.
- [5] Kožuh, S.: Skripta - Specijalni čelici, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [6] Weman, K.: Welding processes handbook, 2nd Edition, Woodhead Publishing Ltd, 2012.
- [7] Lucas, W.: TIG and Plasma Welding Process Techniques, Recommended Practices and Applications-Woodhead Publishing, 1990.
- [8] Živčić, M., TIG zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, 28 (1985), 1.
- [9] Babić, N.: Utjecaj sastava aktivacijskog premaza na svojstva navara pri robotiziranom A – TIG navarivanju čelika AISI 304, Zagreb, 2015.
- [10] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje; FSB Zagreb, 2016.
- [11] <http://www.millerwelds.com/resources/TIGhandbook/>, dostupno 12.1.2021.
- [12] Schubert, Wolf-Dieter, Lassner, E.: Tungsten: properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds, Springer, 1999.
- [13] Cary, H. B.: Helzer, S.C.: Modern welding technology. Upper Saddle River, New Jersey, 2005.
- [14] Tungsten guidebook, Diamond Ground Products, June 2013.
- [15] <http://www.industrysearch.com.au/Products/TIG-Cold-Wire-Feeder-Model-TIGer>, dostupno 14.1.2021.

- [16] Işcan, B., Onar, V., Uluköy, A.: Investigation of the Mechanical Properties of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Joints Produced by TIG and MIG Welding Methods using 308L Filler Wire, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6, (2017), 5-12.
- [17] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: *Zavarivački i srodni postupci*, Zagreb, 2015.
- [18] Taban, E., Kaluc, E., Aykan, T. S.: Effect of the Purging Gas on Properties of 304H GTA Welds, *Welding Journal*, 93, (2014), 124-130.
- [19] Ćordaš, D.: 4. SEMINAR: Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici); Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom; 2005., URL: <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/3.%20RAD.pdf>: (15.1.2021.)
- [20] Branilović, D.: Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju Cr-Ni čelika na geometrijske značajke zavara; *Završni rad 2011.*, FSB
- [21] ..., *Welding Handbook-eight edition-Gas Tungsten arc welding*, 1997., AWS
- [22] ..., HRN EN ISO 15614-1:2017, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla.
- [23] ..., HRN EN ISO 14175:2008, Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srode postupke.
- [24] ..., HRI CEN ISO/TR 15608:2017, Zavarivanje - Smjernice za grupiranje metalnih materijala.
- [25] ..., thyssenkrupp Materials (UK) Ltd, Material data sheet 1.4301-304, 2018.
- [26] ..., HRN EN 10088-3:2014, Nehrđajući čelici - 3. dio: Tehnički uvjeti isporuke za poluproizvode, šipke, valjanu žicu, vučenu žicu, profile i svijetlo vučene proizvode od korozijski postojanih čelika za opće namjene.
- [27] <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/magicwave-230i/> , dostupno 14.12.2020

[28] ..., HRN EN 1011-1:2009, Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 1. dio: opće smjernice za elektrolučno zavarivanje.

[29] Kumar, S., Shahi, A.S.: Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints, *Materials and Design* 32 (2011), 3617–3623.

[30] Chuaiphan, W., Srijaroenpramong, L.: Optimization of gas tungsten arc welding parameters for the dissimilar welding between AISI 304 and AISI 201 stainless steels, *Defence technology*, 15, (2019), 170-178.

PRILOZI

1. CD-R disc