

A-TIG zavarivanje Cu-ETP bakra

Švogor, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:429801>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-31**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 072/STR/2022

A-TIG zavarivanje Cu-ETP bakra

Marin Švogor, 2084/336

Varaždin, rujan 2022. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Strojtarstvo

Diplomski rad br. 072/STR/2022

A-TIG zavarivanja Cu-ETP bakra

Student

Marin Švogor, 2084/336

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl.ing.stroj.

Varaždin, rujun 2022. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Marin Švogor

MATIČNI BROJ 2084/336

DATUM 13.09.2022.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA A-TIG zavarivanje Cu-ETP bakra

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU A-TIG welding of Cu-ETP copper

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, predsjednica povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. doc. dr. sc. Tanja Tomić, članica povjerenstva
4. doc. dr. sc. Tomislav Vellki, zamjenski član povjerenstva
- 5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 072/STR/2022

OPIS

U teoretskom dijelu diplomskog rada na temelju literaturnih podataka potrebno je dati pregled svojstava, podjele i primjene bakra i legura bakra. Detaljno obraditi ručno i automatizirano TIG zavarivanje. Navesti opremu, plinove i vrste elektroda koje se koriste pri TIG zavarivanju. Navesti prednosti i nedostatke te specifičnosti i primjenu ovog postupka zavarivanja. Objasniti TIG zavarivanje bakra i legura bakra te problematiku koja se pojavljuje. Opisati i objasniti A-TIG zavarivanje, te moguću primjenu ovog postupka za zavarivanje bakra i legura bakra.

U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima lima bakra provesti A-TIG zavarivanje uz korištenje različitih komponenti premaza pri zavarivanju. Na izvedenim zavarenim spojevima provesti vizualnu kontrolu, ispitivanje penetrantima, statičko vlačno ispitivanje i analizirati geometriju zavarenih spojeva na poprečnom presjeku zavarenog spoja. Prema rezultatima ispitivanja donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

14. 09. 2022.



PODPIS MENTORA

M. Bušić

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Matiju Bušiću, dipl.ing.stroj. na pruženoj stručnoj pomoći i strpljivosti te upućenim savjetima pri izradi diplomskog rada.

Velika hvala svim profesorima i djelatnicima Sveučilišta Sjever koji su svojim radom pomogli u stjecanju moga znanja. Želim se zahvaliti svim kolegama i prijateljima koji su bili uz mene te uljepšali moje studentske dane. Najveća hvala ide dragom Bogu i obitelji na pruženoj potpori i ukazanom povjerenju tijekom cijelog mog studija.

Sažetak

Svrha ovog diplomskog rada jest prikazati mogućnost zavarivanja bakra TIG postupkom zavarivanja. U teorijskom dijelu rada opisana su svojstva, podjela i primjena bakra i njegovih legura. Također opisana je problematika zavarivanja bakra. Zatim je navedena oprema, zaštitni plinovi i vrste elektrode koji se koriste kod TIG zavarivanja. Opisan je sam postupak TIG zavarivanja te su dani prednosti i nedostaci ovog postupka. Na kraju opisan je A-TIG postupak zavarivanja i potrebni aktivacijski premazi.

U eksperimentalnom dijelu rada izvedeno je zavarivanje tri uzorka. Prvi uzorak se zavarivao konvencionalnim TIG postupkom, dok su druga dva uzorka zavarivana A-TIG postupkom uz korištenje različitih komponenti aktivacijskog premaza. Kako bi se utvrdila kvaliteta zavarenog spoja, nakon zavarivanja provedena su ispitivanja na uzorcima. Na temelju dobivenih rezultata donesen je zaključak.

Ključne riječi: bakar, TIG zavarivanje, A-TIG zavarivanje, aktivacijski premaz, kvaliteta zavarenog spoja

Summary

The purpose of this thesis is to present different forms of welding copper in the TIG welding process. The theoretical part of the thesis covers features, division and application of copper and its alloys. The issue of welding copper is also described in this part. Moreover, there is a list of equipment, protective gases and electrode types that are used in the process of TIG welding. Next, there is a detailed description of the TIG welding procedure, as well as the advantages and disadvantages of this process. The final part offers a description of the A-TIG welding process and the required activation coatings.

In the experimental part of the thesis, three samples were used in the process of welding. The first sample was welded using the conventional TIG process, while the other two samples were welded in the A-TIG process using different components of the activation coating. In order to determine the quality of the welded joint, there were tests carried out on the samples after welding. Finally, the conclusion has been made based on the obtained results.

Key words: copper, TIG welding, A-TIG welding, activation coating, quality of the welded joint

Popis korištenih kratica

| | |
|--------------|--|
| Cu | Cuprum – bakar |
| Zn | Zincum – cink |
| O | Oxygenium – kisik |
| H | Hydrogenium – vodik |
| ISO | International Organization for Standardization |
| TIG | Tungsten Inert Gas |
| A-TIG | Activated Tungsten Inert Gas |
| MIG | Metal Inert Gas |
| EPP | Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom |
| DC | Direct Current |
| AC | Alternating Current |
| DCEP | Direct Current Electrode Positive |
| DCEN | Direct Current Electrode Negative |
| A | Amper |
| min | Minuta |
| mm | Milimetar |
| cm | Centimetar |
| °C | Stupanj Celzija |
| l | litra |

Sadržaj

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Uvod..... | 1 |
| 2. | Bakar i njegove legure | 2 |
| 2.1. | Bakar | 3 |
| 2.2. | Legure bakra..... | 3 |
| 2.3. | Zavarivanje bakra | 5 |
| 3. | TIG postupak zavarivanja | 8 |
| 3.1. | Općenito | 8 |
| 3.2. | Utjecajni faktori..... | 10 |
| 3.2.1. | <i>Izvor struje i polaritet elektrode</i> | 10 |
| 3.2.2. | <i>Zaštitni plinovi</i> | 11 |
| 3.2.3. | <i>Netaljive elektrode</i> | 12 |
| 3.2.4. | <i>Oprema</i> | 14 |
| 3.3. | Princip rada | 17 |
| 4. | A-TIG postupak zavarivanja..... | 22 |
| 4.1. | Mehanizmi utjecaja aktivacijskog premaza na zavareni spoj | 22 |
| 4.1.1. | <i>Marangonijev efekt strujanja fluida</i> | 22 |
| 4.1.2. | <i>Kontrakcija električnog luka</i> | 23 |
| 4.2. | Svojstva i sastav aktivacijskog premaza | 24 |
| 4.3. | Prednosti i nedostaci..... | 25 |
| 5. | Eksperimentalni dio | 27 |
| 5.1. | Materijal | 27 |
| 5.2. | Oprema | 27 |
| 5.2.1. | <i>Izvor struje</i> | 27 |
| 5.2.2. | <i>Zaštitni plin</i> | 29 |
| 5.2.3. | <i>Gorionik (pištolj)</i> | 29 |
| 5.2.4. | <i>Uređaj za automatizaciju</i> | 31 |
| 5.3. | Zavarivanje uzoraka | 32 |
| 5.3.1. | <i>Uzorak 1</i> | 32 |
| 5.3.2. | <i>Uzorak 2</i> | 33 |
| 5.3.3. | <i>Uzorak 3</i> | 34 |
| 5.4. | Ispitivanje uzoraka i analiza rezultati..... | 35 |
| 5.4.1. | <i>Vizualna kontrola</i> | 36 |
| 5.4.2. | <i>Ispitivanje penetrantima</i> | 37 |
| 5.4.3. | <i>Makro presjek zavarenog spoja</i> | 39 |
| 6. | Zaključak..... | 42 |
| 7. | Literatura..... | 44 |
| | Popis slika | 46 |
| | Popis tablica..... | 48 |

1. Uvod

Bakar je poznat čovjeku još od prapovijesnog vremena te je jedan od prvih obrađivanih metala. Možemo ga pronaći u svakodnevnim proizvodima koji nas okružuju i olakšavaju nam život. Ima odličnu električnu i toplinsku vodljivost, dobru oblikovljivost i dobru otpornost na koroziju. Danas se bakar pretežito koristi u elektrotehnici, dok se u strojogradnji ili brodogradnji koriste njegove legure. Neki od nedostataka bakra su: visoka cijena, relativno visoko talište, ne smije se koristiti u dodiru s hranom zbog otrovne zelene prevlake (bakrov acetat).

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina argona, helija ili njihovoj mješavini. Ovim postupkom moguće je zavarivanje širokog spektra materijala te se mogu zavarivati raznorodni materijali. Nema rasprskavanja kapljica, nema troske i moguće je zavarivanje u svim položajima. TIG postupkom zavarivanja postiže se visoka kvaliteta zavarenog spoja pa se često ovaj postupak primjenjuje za reparaturna zavarivanja. Glavni nedostaci TIG postupka zavarivanja su: spor proces, mali depozit materijala, precizna priprema i čistoća površine koja se zavaruje, težina izvedbe zavarivanja kod ručnog načina rada.

U ovom radu objašnjena je problematika zavarivanja bakra koja se javlja zbog svojstva dobre vodljivosti topline bakra. Također opisani je klasični TIG postupak, oprema, plinovi, vrste elektrode, kao i noviji A-TIG postupak zavarivanja. A-TIG postupak izvodi se jednako kao i klasični TIG postupak uz korištenje aktivacijskog premaza. Ovaj postupak je relativno nov te se još razvija. Postavljena je pretpostavka da se A-TIG postupkom postižu bolji rezultati zavarivanja. U eksperimentalnom dijelu uspoređena je kvaliteta zavarenog spoja oba postupaka.

2. Bakar i njegove legure

Bakar i bakrove legure koriste se još od davnine (bakreno doba, brončano doba). Danas se bakar upotrebljava većinom u elektrotehnici, dok se njegove legure uglavnom koriste kao konstrukcijski materijali u strojogradnji i brodogradnji. Najvažnija svojstva bakra su:

- velika toplinska vodljivost
- električna vodljivost čistog bakra bolja je od svih metala izuzev srebra na volumnoj osnovi i aluminija na masenoj osnovi
- svojstva čistog bakra - čvrstoća, otpornost na oksidaciju, otpornost na puzanje, otpornost na umor, otpornost na koroziju i livljivost (mogu se poboljšati legiranjem, ali se pri tome snižava električna i toplinska vodljivost)
- većina Cu legura ima izvrsnu duktilnost u žarenom stanju i posebno su pogodne za proizvodnju cijevi, duboko vučenje, kovanje, oblikovanje u toplom stanju
- dobra otpornost na koroziju u atmosferskim uvjetima i u morskoj sredini stvaranjem "patine"
- kemijski je postojan u neutralnim i lužnatim vodenim otopinama dok ga nagrizaju kiseline, naročito oksidirajuće.

Kao nedostatak može se navesti visoka cijena, visoko talište i stvaranje otrovne zelene prevlake (bakrov acetat) zbog čega bakar ne smije doći u dodir s hranom. [1]

U Tablica 2.1 prikazana su fizikalna i mehanička svojstva bakra.

Tablica 2.1 Fizikalna i mehanička svojstva bakra (*ovisi o stanju) [1]

| | Oznaka | Vrijednost | Mjerna jedinica |
|-------------------------|---------------|------------|--------------------------------|
| Gustoća | ρ | 8.930 | kg/m ³ |
| Talište | ϑ_T | 1.083 | °C |
| Toplinska rastezljivost | a_T | 17 | 10 ⁶ /K |
| Električna vodljivost | G | 35...58 | m/(Ω mm ²) |
| Toplinska vodljivost | λ | 240...386 | W/(mK) |
| Modul elastičnosti | E | 125.000 | MPa |
| Vlačna čvrstoća* | R_M | 200...360 | MPa |
| Istezljivost* | A | 2...45 | % |

2.1. Bakar

Bakar je široko primjenjiv materijal te ga poznajemo po crvenkasto-smeđoj boji (Slika 2.1). U elementarnom stanju ima kubičnu plošno centriranu kristalnu rešetku. Tako posjeduje 12 kliznih sustava zbog kojih je bakar vrlo duktilan materijal. Jedno od najvažnijih svojstva bakra jest električna vodljivost. Poslije srebra, čisti bakar ima najveću električnu vodljivost čija vodljivost najviše ovisi o njegovoj čistoći. Nepovoljan utjecaj imaju primjese topive u bakru. Tako se primjerice dodaje kadmij (oko 1 %) u svrhu povećanja čvrstoće, čija količina ne smanjuje električnu vodljivost ispod granice konvencionalne prihvatljivosti. Najmanja vrijednost električne vodljivosti materijala za električne vodiče mora biti $57\text{ m}/(\Omega\text{mm}^2)$. Fosfor je najdjelotvorniji dezoksidans te njegovim dodavanjem već u malim količinama značajno se smanjuje električna vodljivost bakra. Elementi koji nisu topivi u bakru gotovo ne utječu na električnu vodljivost. Jedan od takvih elemenata jest kisik koji može zaostati u postupku dobivanja bakra, kao i olovo i telur koji se dodaju za poboljšanje rezljivosti. [1][2]



Slika 2.1 Bakar [6]

Zbog pokretljivosti slobodnih elektrona metalnih stanja bakar ima dobru toplinsku vodljivost. Ovo svojstvo je važno kod izmjenjivača topline za koje nije potreban bakar najviše čistoće. Kod prijelaza topline moramo uzeti u obzir prijelaz topline preko graničnih površina gdje se mogu naći naslage oksida ili naslage drugog podrijetla. Zbog toga se ne može u potpunosti iskoristiti toplinska vodljivost bakra. [1]

2.2. Legure bakra

Bakrove legure se tradicionalno nazivaju: mjedi i bronce. To je klasifikacija prema vrsti i udjelu glavnih legiranih elemenata, sa cinkom i bez cinka, koja je dana u Tablica 2.2. Mjedi su legure bakra sa cinkom pri čemu mogu biti dodani i drugi elementi. Dvije su osnovne skupine mjedi: α mjedi oblikovane deformiranjem u hladnom stanju i $(\alpha+\beta)$ mjedi koje su oblikovane

deformiranjem u toplom stanju. Homogeno područje alfa mješanca jest do 32,5 % Zn, dok se za veće koncentracije cinka dobiva dvofazna (heterogena) $\alpha+\beta$ struktura. Homogene mjedi s maksimalnim udjelom cinka imaju najveću rastezljivost, dok heterogene mjedi imaju veću čvrstoću. [1][2]

Tablica 2.2 Klasifikacija bakrovih legura [1]

| Legure bakra s cinkom | |
|-------------------------------|---|
| | Legure bakra s cinkom (> 50 % Cu i < 44 % Zn) – mjedi |
| | Posebne mjedi (54...62 % Cu, oko 7 % drugih elemenata i ostatak Zn) |
| | Legure bakra s niklom i cinkom – novo srebro |
| Legure bakra bez cinka | |
| | Legure bakra s kositrim (< 15 % Sn) – kositrene bronce |
| | Legure bakra s aluminijem (< 14 % Al) – aluminijeve bronce |
| | Legure bakra s olovom (< 25 % Pb) – olovne bronce |
| | Legure bakra s berilijem (< 2 % Be) – berilijeve bronce |
| | Legure bakra s manganom – manganove bronce |
| | Legure bakra sa silicijem – silicijeve bronce |
| | Legure bakra s niklom (< 45 % Ni) |

Legura bakra s kositrom smatra se kao tipična bronca. U pravilu pod broncom u širem smislu podrazumijeva se legura bakra i ostalih elemenata, osim cinka u većinskom udjelu. Tako kada ulogu kositra preuzme neki drugi element, tada se bronca naziva po tom elementu (npr. fosforna, berilijeva, manganska, aluminijska bronca). Kositrena bronca idealna je za izradu kliznih ležajeva zbog svoje mikrostrukture. Kositar tvori tvrde čestice δ faze otporne na trošenje koje se nalaze u matrici α faze koja je duktilna i žilava. Fosforna bronca sadrži malu količinu fosfora koji s bakrom tvori bakrov fosfid te je fino raspršen u matrici. Time je materijalu povećana čvrstoća a tako i tvrdoća. Manganska bronca vrlo je žilava te je otporna na koroziju i kavitaciju, pa se često upotrebljava za izradu brodskih propelera i rotora pumpi. Aluminijska bronca često se upotrebljava u zamjenu za kositrenu broncu zbog niže cijene. Ima visoku čvrstoću, otporna je na koroziju u morskoj vodi i vrlo dobro se zavaruje. [1][2]

Osim mjedi i bronca razlikujemo još tehnički bakar te bakar s manjim dodacima. Tehnički bakar sadrži najmanje 99,5 % bakra, a ostalo su primjese. Najvažnije su vrste:

- Visokoprovodljivi elektrolitički bakar, ETP-bakar (99,90 % Cu; 0,4 % O), upotrebljava se za izradu električnih sabirnica, sklopki i prekidača, tiskarskih

valjaka te kao materijal za izradu krovnih pokrova i bakrene galanterije u građevinarstvu.

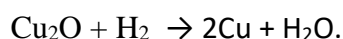
- Visokoprovodljivi bakar bez kisika, OFHC-bakar (99,92 % Cu, bez rezidualnog kisika) ovaj bakar najčišći je konstrukcijski metal koji se danas koristi u industriji za vodiče, elektronske cijevi, električne sabirnice, grijače, radijatore te uljna hladila.
- Arsen bakar (99,65% Cu; 0,025% P; 0,30% As) se upotrebljava za izradu bojlera, radijatora, izmjenjivače topline, cijevi za kondenzaciju, itd. [15]

Bakar s manjim dodacima ima visok sadržaj bakra (iznad 98 %), a svojstva mu ovise o dodacima. Najbitniji su:

- Kadmij-bakar (99,00 % Cu; 0,6-1,0 % Cd). Upotrebljava se za elastične dijelove aparata koji se zagrijavaju ili leme, izradu posuda, električne vodove i elektrode za zavarivanje.
- Krom-bakar (99,50 % Cu; 0,5 % Cr) i telurij-bakar (99,50 % Cu; 0,5 % Te). Odlikuju se čvrstoćom na visokoj temperaturi, otpornošću na koroziju i lakom mehaničkom obradom. Koristi se za izradu elektroda za zavarivanje, elektromotore i za dijelove električnih aparata.
- Berilij-bakar legure Tip1 i Tip2 (Tip1: 98 % Cu; 2 % Be i Tip2: 97 % Cu; 0,4 % Be; 2,6 % Co). Ove legure imaju visoku čvrstoću i tvrdoću, a upotrebljavaju se za telefonske vodove, dijelove u rotorima elektromotora i za izradu opruga. [15]

2.3. Zavarivanje bakra

Jedan od problema kod zavarivanja bakra jest njegovo svojstvo dobrog provođenja topline koje je oko 6 puta veće nego kod čelika. Stoga je potrebno predgrijavanje, ovisno o postupku zavarivanja i debljini materijala. Također, bakar u rastaljenom stanju ima veliki afinitet s kisikom i vodikom. Zato kod bakra koji sadrži kisik uslijed djelovanja vodika iz plina za zavarivanje ili zaštitnog plina može doći do tzv. Vodikove bolesti. Vodik se u atomarnom stanju otapa u bakru te zbog vrlo male veličine atoma lako difundira u rešetku. Kada vodik dođe do čestica bakrovog oksida kemijskom reakcijom nastaje vodena para:



Nastala vodena para stvara pore, a bakar postaje krhak i neupotrebljiv. Tako nastalo stanje je nepovratno, naziva se Vodikova bolest. Zbog toga, pri zavarivanju bakra, ako je moguće treba odabrati dezoksidirajući bakar.[1][2][4]

Bakar je moguće zavarivati raznim postupcima kao što su: plinsko zavarivanje, TIG i MIG postupak, elektrolučno zavarivanje, EPP postupak. Prednost zavarivanja s zaštitnim plinom argonom (TIG i MIG postupak) u odnosu na plinsko zavarivanje jest veća brzina zavarivanja, uža utjecajna zona zagrijavanja i manja sklonost porozitetu. Kod TIG zavarivanja bakra poželjno je rubove spoja i žicu premazati talilom da bi se izbjegla oksidacija u toplinskoj zoni. Zavarivanje se vrši istosmjernom strujom, minus pol je na elektrodi dok je plus pol na radnom komadu. Protok zaštitnog plina argona jest 6-10 l/min, ovisno o veličini sapnice. Za debljine lima veće od 6 mm potrebno je predgrijavanje. Kvalitetno zavareni spoj zahtjeva jednoliku brzinu zavarivanja, jednaku jačinu struje i održavanje jednake dužine luka. Parametri za zavarivanje bakra TIG postupkom nalaze se u Tablica 2.3. [5]

Tablica 2.3 Parametri zavarivanja bakra TIG postupkom [5]

| Debljina lima (mm) | Spoj | Promjer žice (mm) | Broj prolaza | Jakost struje (A) | Predgrijavanje (°C) |
|---------------------------------------|------|----------------------|--------------|----------------------|------------------------|
| Zavarivanje s jedne strane | | | | | |
| 1 | I | 1,6 | 1 | 80-90 | - |
| 2 | I | 2,4 | 1 | 130-150 | - |
| 3 | I | 2,4 | 1 | 170-210 | - |
| 5 | V | 3,2 | 2 | 250-320 | 250-300 |
| 8 | V | 4 | 2 | 310-370 | 350-400 |
| 10 | V | 4 | 2-3 | 350-410 | 400-500 |
| 12 | V | 4,7 | 3 | 390-450 | 450-500 |
| Zavarivanje s obje strane istovremeno | | | | | |
| 4 | I | 2,4 | 1 | 140-160 | - |
| 6 | I | 2,4-3,2 | 1 | 190-220 | - |
| 8 | I | 3,2 | 1 | 230-260 | - |
| 10 | I | 3,2 | 1 | 270-300 | - |
| 12 | X | 4 | 1 | 300-320 | 200-300 |
| 14 | X | 4 | 1 | 320-340 | 300 |
| 16 | X | 4 | 1 | 340-360 | 300-400 |

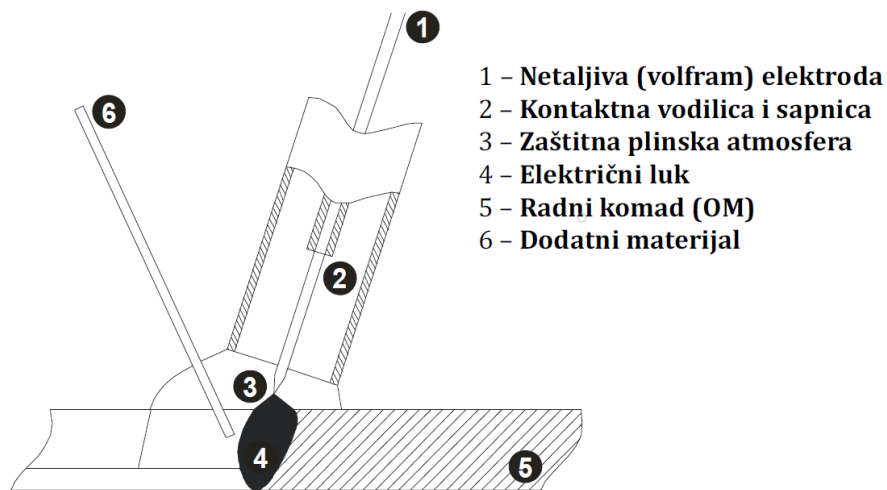
Glavnu ulogu kod zavarivanja bakra pod zaštitnim praškom (EPP) ima prašak koji je specijalno namijenjen za tu svrhu. Ovaj postupak se koristi za veće debljine lima te je potrebno predgrijavanje (350-600 °C). Žica je od dezoksidiranog bakra legirana fosforom i kositrom, a osnovni materijal može biti bakar s kisikom, kao i dezoksidirajući bakar.

Teško je zavarivati bakar elektrootpornim zavarivanjem zbog njegovog svojstva vrlo dobre električne vodljivosti. Međutim, moguće je zavarivanje tankih limova (do 2 mm) uz korištenje velike jakosti struje i kratkog vremena zavarivanja. Bakar se može zavariti i elektrolučnim zavarivanjem ugljenom elektrodom. Promjer elektrode treba biti malo veći od promjera žice koja se dodaje kao dodatni materijal. Najkvalitetniji zavari postižu se žicom od fosforne bronce. Također moguće je zavarivanje bakra s kisikom, kao i bez kisika. [5]

3. TIG postupak zavarivanja

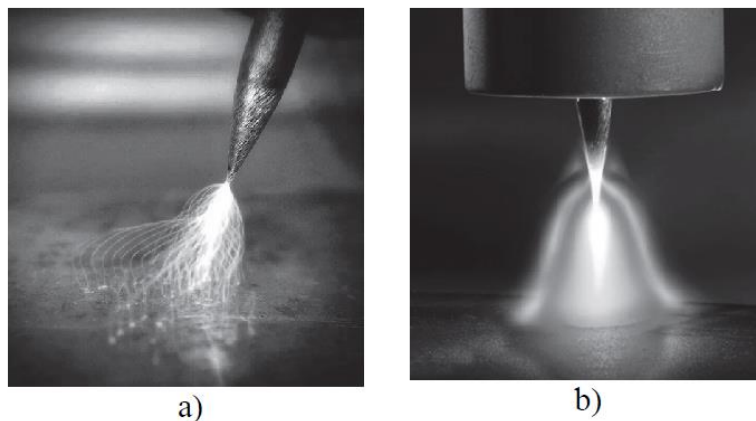
3.1. Općenito

TIG zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u kojem se za zaštitnu atmosferu koristi inertni plin ili smjesa plinova. Začeci ovog postupka počeli su početkom II. svjetskog rata (1941.) u svrhu zamjene za plinsko zavarivanje legura na bazi magnezija u avioindustriji. Ovaj postupak patentirao je Russell Meredith koji je radio za Northrup Aircraft pod nazivom Heli-Arc Welding. Smatra se da je taj patent preteča današnjeg TIG zavarivanja. Patent je kupila tvrtka Linde koja nastavlja razvoj primjenom različitih gorionika, sapnica i proučavanjem strujanja zaštitnog plina. Tako komercijalna primjena TIG postupka počinje 50-tih godina prošlog stoljeća. [7]



Slika 3.1 Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [7]

TIG postupak zavarivanja spada u skupinu zavarivanja taljenjem putem električnog luka. Električni luk uspostavlja se između netaljive volframove elektrode i radnog materijala pod zaštitom inertnog plina (Slika 3.1). Zavarivanje se izvodi uz dodavanje dodatnog materijala (žica) ili bez njega (pretaljivanje). Kod dodavanja dodatnog materijala važno je da vrh žice uvijek bude u zaštitnom plinu. Netaljiva elektroda služi za uspostavu električnog luka na čiju karakteristiku utječe sama geometrija elektrode. Uspostava električnog luka vrši se pomoću visokofrekventnog generatora, koji je integriran zajedno s izvorom struje i upravljanjem. Nakon uspostave električnog luka (Slika 3.2) koji traje djelić sekunde, visokofrekventni generator se isključuje te slijedi zavarivanje. Temperature koje nastaju kod TIG postupka zavarivanja funkcija su osnovnih parametara zavarivanja, vrste zaštitnog plina te vrste osnovnog materijala, a u samoj osi plazme električnog luka mogu dosežati preko 20.000 °C. [7]



Slika 3.2 a) Uspostava električnog luka, b) Električni luk [7]

TIG zavarivanje široko se primjenjuje u proizvodnom zavarivanju, navarivanju i reparaturnom zavarivanju. Koristi se za zavarivanje materijala kao što su: magnezij i legure, aluminij i legure, nehrđajući čelici, bakar i legure, titan i legure te za korijen nelegiranih i nisko legiranih čelika. Glavne prednosti ovog postupka zavarivanja su:

- nema rasprskavanja kapljica ni troske, a količina štetnih plinova je minimalna
- zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura
- koncentrirani električni luk čime je smanjena zona utjecaja topline
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- visoka kvaliteta zavarenog spoja
- može se izvoditi u radionici ili na terenu te je pogodno za reparaturu
- pogodno za zavarivanje malih debljina materijala te za korijen zavara
- brzina dodavanja dodatnog materijala ne ovisi o energiji električnog luka
- odličan izgled zavarenog spoja
- mogućnost automatizacije. [7][11]

Dok su najveći nedostaci TIG zavarivanja sljedeći:

- mala brzina zavarivanja
- neekonomičnost zavarivanja većih debljina zbog malog depozita dodatnog materijala
- zahtjeva se precizna priprema zavarenog spoja

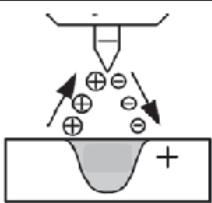
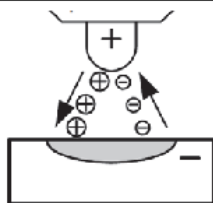
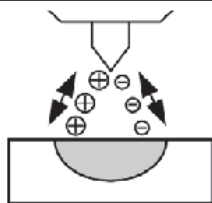
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova
- duža izobrazba zavarivača
- potrebna ventilacija u skućenim prostorima
- dugotrajan rad može uzrokovati štetne posljedice na zdravlju zavarivača
- kvaliteta zavarenog spoja ovisi o zavarivaču. [7][11]

3.2. Utjecajni faktori

3.2.1. Izvor struje i polaritet elektrode

Izbor vrste struje za zavarivanje i polariteta elektrode utječe na raspodjelu topline između netaljive elektrode i radnog komada. Tako postoje tri pogodne kombinacije struje i polariteta koje su prikazane u Tablica 3.1.

Tablica 3.1 Karakteristike zavarivanja ovisno o izboru pogodne vrste struje i polariteta elektrode [7]

| Vrsta struje | DC | DC | AC |
|---------------------|---|--|---|
| Polaritet | - | + | |
| |  |  |  |
| Čišćenje oksida | NE | DA | DA (pola ciklusa) |
| Raspodjela topline | 1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu | 2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu | 1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu |
| Penetracija | uska, duboka | plitka, široka | srednje široka srednje duboka |
| Kapacitet elektrode | odličan npr: Ø3,2/400A | loš npr: Ø6,4/120A | dobar npr: Ø3,2/255A |

Najčešće korištena kombinacija jest istosmjerna struja s negativnim polom na elektrodi (DCEN). Zavarivanje pri ovim uvjetima dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada. Tako je toplinsko opterećenje na radnom komadu 2/3, dok je na elektrodi upola manje 1/3. Ovakva raspodjela topline pogodna je za korištenje zašiljene elektrode s manjim promjerom te rad s velikim strujama što rezultira dobrom penetracijom zavarenog spoja.

Zavarivanje istosmjernom strujom pri čemu je elektroda na pozitivnom polu (DCEP) daje obratnu raspodjelu toplinskog opterećenja u odnosu na prvi slučaj. Dakle, 2/3 toplinskog opterećenja jest na elektrodi, dok je 1/3 na radnom komadu. Zbog toga se koriste elektrode s većim promjerom i zaobljenim vrhom te rad s manjim strujama. Prednost ove kombinacije struje i polariteta jest u tome što se pozitivni ioni gibaju od elektrode ka radnom komadu. Rezultat toga je razaranje površinskih oksida osnovnog materijala što je bitno kod zavarivanja aluminija i magnezija.

Treća kombinacija je zavarivanje izmjeničnom strujom (AC) gdje se tok elektrona mijenja u jedinici vremena. Stoga je raspodjela toplinskog opterećenja podjednaka na elektrodi i na radnom komadu. Moguće je dobro čišćenje oksida kao i dobra penetracija zavarenog spoja. Balansiranjem izmjenične struje, koliko dugo će elektroda biti na plus, a koliko dugo na minus polu, te promjenom frekvencije, možemo utjecati na geometriju zavarenog spoja, a tako i na termičko opterećenje elektrode i ranog komada. Osim ove 3 kombinacije vrste struje i polariteta, moguće je zavarivanje impulsnim strujama. Njih se koristi za zavarivanje tankih limova jer se na taj način unosi manje topline i shodno tome manje su deformacije radnog komada. [7]

3.2.2. Zaštitni plinovi

Primarna zadaća zaštitnog plina je zaštita rastaljenog materijala od utjecaja atmosfere. No, zaštitni plin utječe i na geometrijske karakteristike zavarenog spoja, stabilnost električnog luka te estetski izgled zavarenog spoja. Kod TIG postupka zavarivanja koriste se inertni plinovi helij i argon. Argon je plin 1,4 puta teži od zraka što je dobro jer potiskuje zrak i potreban je manji protok. Ima niži ionizacijski potencijal što olakšava uspostavu električnog luka i pruža stabilnost istog. Argon je najjeftiniji inertni plin, a u odnosu na helij ima slabiju toplinsku vodljivost što rezultira manjom penetracijom i protaljivanjem.

Helij ima deset puta manju masu od argona, pa je potreban oko tri puta veći protok u odnosu na argon. Uspostava električnog luka je otežana, dok se toplina brže prenosi na osnovni materijal što pridonosi dubljoj penetraciji i boljem protaljivanju. Stoga, helij je pogodan kod zavarivanja materijala većih debljina i materijala velike toplinske vodljivosti. U svrhu dobivanja optimalnih rezultata zavarivanja često se koriste mješavine argona i helija. Karakteristike ovih plinova prikazane su u Tablica 3.2. [7]

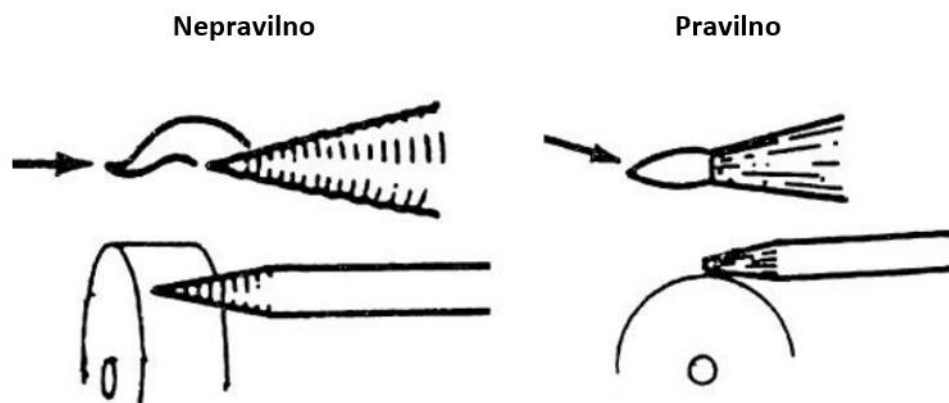
Tablica 3.2 Karakteristike zaštitnih plinova argona i helija [7]

| Karakteristika | Ar | Mješavina Ar/He | He |
|--------------------|----------------|--------------------------|------------------------|
| Brzina zavarivanja | smanjena | veća nego kod 100% Ar | veća |
| Penetracija | smanjena | veća nego kod 100% Ar | povećana |
| Čišćenje oksida | dobro | sličnije kao kod 100% Ar | loše |
| Uspostava luka | laka | 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 | srednja | veći |
| Protok | manji | veći nego kod 100% Ar | povećan |
| Cijena | niža | veća nego 100% Ar | veća nego 100% Ar |

Osim mješavine argona i helija moguće je dodati mali udio drugih plinova. Tako dodavanjem vodika možemo povećati penetraciju, ali ne smijemo ga koristiti kod zavarivanja bakra i aluminija jer uzrokuje pore. Dušik se obično dodaje pri zavarivanju austenitnih čelika. Primjerice kod zavarivanja bakra dušik uzrokuje intenzivno rasprskavanje što je nepovoljno. [7]

3.2.3. Netaljive elektrode

Glavna uloga elektrode jest uspostava električnog luka s radnim komadom. Iako je ona netaljiva, ipak dolazi do trošenja uslijed djelovanja termičkog opterećenja. Stoga je potrebno brušenje vrha elektrode, jer geometrija elektrode utječe na stabilnost električnog luka, a time i na oblik zavara. Važno je napomenuti da se elektroda brusi u aksijalnom smjeru kako ne bi došlo do nestabilnosti električnog luka (Slika 3.3). Elektroda sa zaobljenim vrhom pogodna je za zavarivanje aluminija i magnezija, istosmjernom strujom na plus polu ili izmjeničnom strujom. Dok se za ostale materijale koristi elektroda sa šiljastim vrhom (kut vrha ovisi o zahtjevima) pri istosmjernoj struji na minus polu.



Slika 3.3 Utjecaj načina brušenja volframove elektrode na električni luk [30]

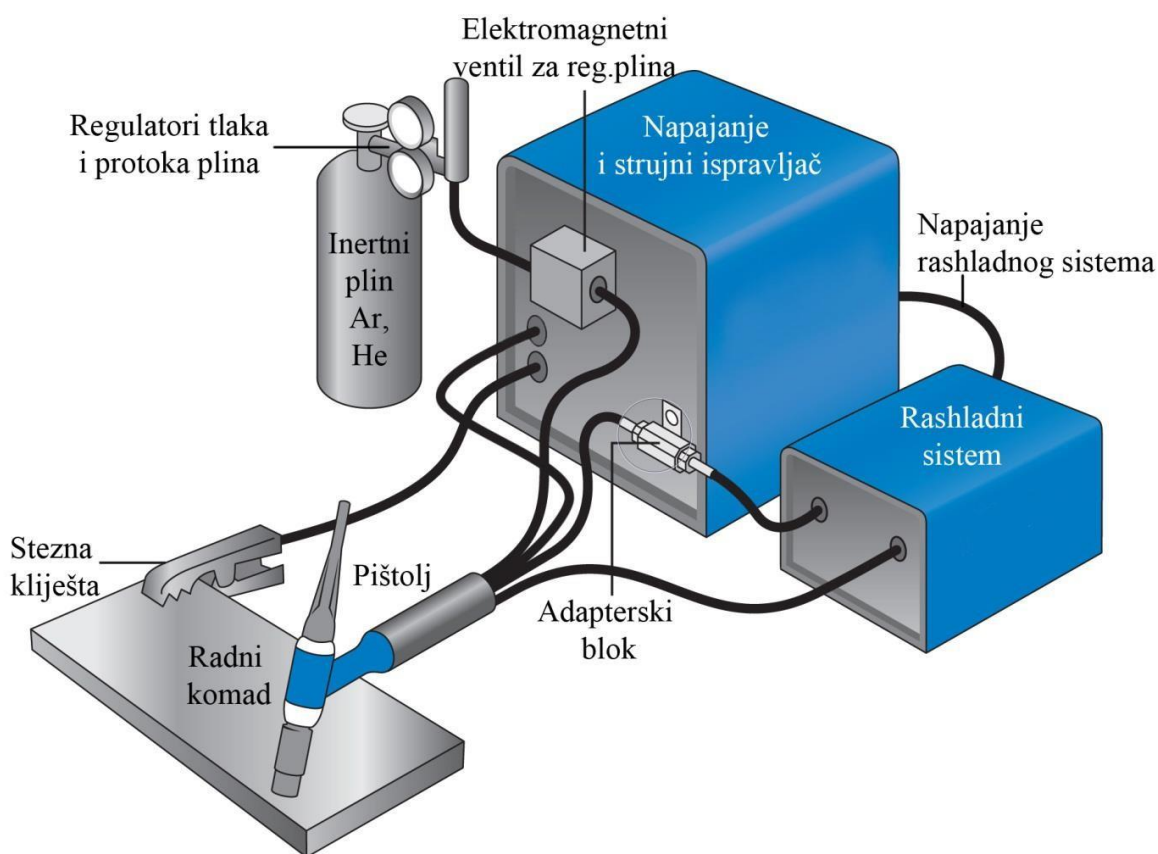
Netaljive elektrode izrađuju se u promjerima: 0.5, 1.0, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 6.4, 8.0 mm i standardnim dužinama: 50, 75, 150, 175, 200 mm. Prosječno vrijeme trajanja elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Materijal od kojeg se izrađuju je volfram čije talište iznosi 3.422 °C. Zbog sve većih zahtjeva u volfram se dodaju oksidi pojedinih elemenata da se postignu što bolje karakteristike. Primjeri dodataka oksida volframovim elektrodama, kao i njihove oznake, karakteristike i primjena nalaze se u Tablica 3.3. [7][8][11]

Tablica 3.3 Vrste netaljivih elektroda te njihove oznake, karakteristike i primjena [7]

| Tip elektrode | Oznaka (boja) | Primjena i karakteristike |
|---|--|---|
| W | ZELENA | dobra stabilnost luka kod AC zavarivanja, otporna na onečišćenja, niža cijena |
| dodatak oksida 1,8-2,2 % CeO ₂ | SIVA | karakteristike slične kao i kod elektroda sa torijevim oksidom, laka uspostava luka, duži vijek trajanja |
| dodatak oksida 1,7-2,2 % ThO ₂ | CRVENA ŽUTA LJUBIČASTA NARANČASTA | laka uspostava luka, veća stabilnost luka, podnosi veće opterećenje, duži vijek trajanja, otežana stabilnost luka kod oblog oblikovanja na AC strujama |
| dodatak oksida 1,3-1,7 % La ₂ O ₃ | ZLATNA CRNA PLAVA | vrlo slične karakteristike kao kod elektroda s torijevim oksidom |
| dodatak oksida 0,15-0,40 % ZrO ₂ | SMEĐA | izvrsne karakteristike kod AC zavarivanja i zaobljenog vrha elektrode, visoka otpornost na onečišćenja, laka uspostava električnog luka, prikladno kod zahtjeva gdje nije dozvoljeno prisutstvo wolframa u zavaru |

3.2.4. Oprema

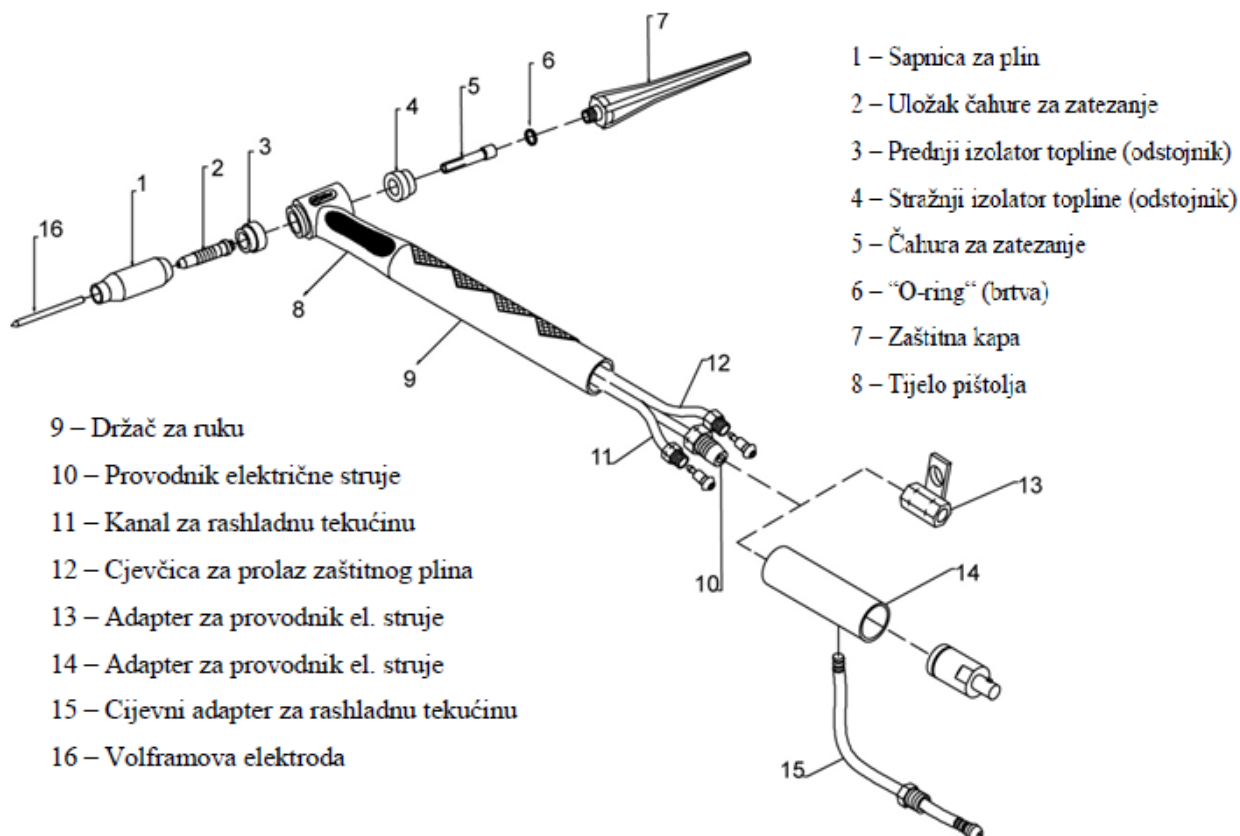
Osnovni dijelovi uređaja za TIG zavarivanje (Slika 3.4) su sljedeći: transformatorsko napajanje, strujni ispravljač, upravljačka elektronika i sistem za rashlađivanje pištolja, koji su ukomponirani u kućište. Na samom kućištu nalazi se prekidač za uključivanje/isključivanje uređaja i gumbi kojima se namještaju ženjeni parametri. Također, na kućište je potrebno dovesti priključak inertnog plina koji se nalazi u atestiranim bocama na koje se montira manometar. Ovisno o zahtjevima zavarivanja, pištolj (volframova elektroda) se spaja na ženjeni pol (-/+AC). Da bi zatvorili strujni krug potrebno je stezna kliješta (masa) spojiti na radni komad. Između radnog komada i pištolja za zavarivanje paralelno je spojen visokofrekventni modul koji uspostavlja električni luka te štiti zavarivača od strujnog udara zbog "Skin" efekta. [7][13]



Slika 3.4 Osnovna oprema za TIG zavarivanje [12]

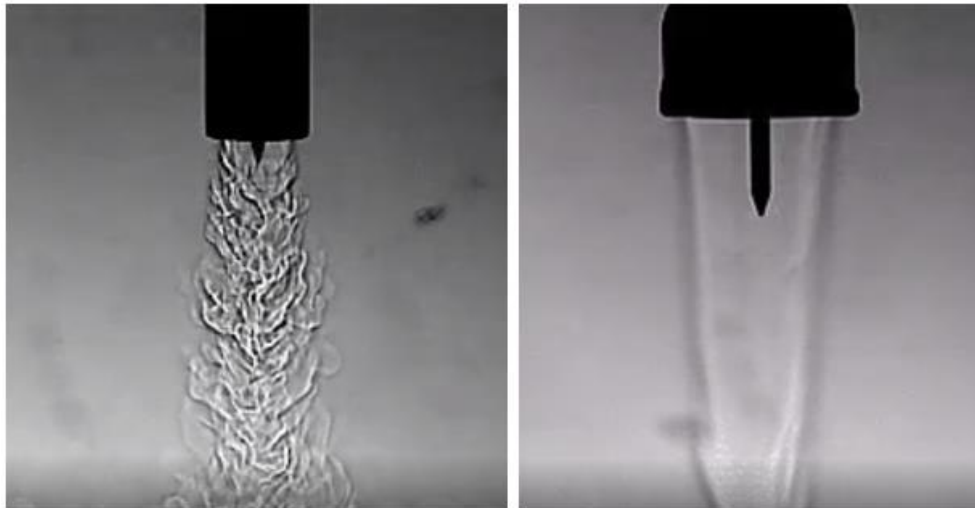
Pištolji za zavarivanje (gorionici) dostupni su u različitim konstrukcijama (veličina, oblik, dužina kape, fleksibilnost itd.) zbog specifičnosti potreba zavarivanja. Osnovna podjela gorionika jest: zrakom hlađeni gorionici za ručno zavarivanje (najčešće do 200A), antifrizom (tekućina za hlađenje) hlađeni gorionici za ručno zavarivanje (od 200 do 600A), vodom hlađeni gorionici za strojno (automatsko) zavarivanje. Za zavarivanje na teško pristupačnim mjestima izabiru se pištolji

posebnih oblika i veličina. Postoje standardni pištolji te posebni savitljivi pištolji koje zavarivač može rukom plastično deformirati u željeni oblik. Tipičan pištolj (antifrizom hlađeni gorionik za ručno zavarivanje) koji se najčešće primjenjuje prikazan je na Slika 3.5. Sastoji se od držača za ruku, stezača volframove elektrode sa steznom kontaktnom cjevčicom, sapnice za plin, volframove elektrode i zaštitne kape na volframovoj elektrodi. [7][10][13]



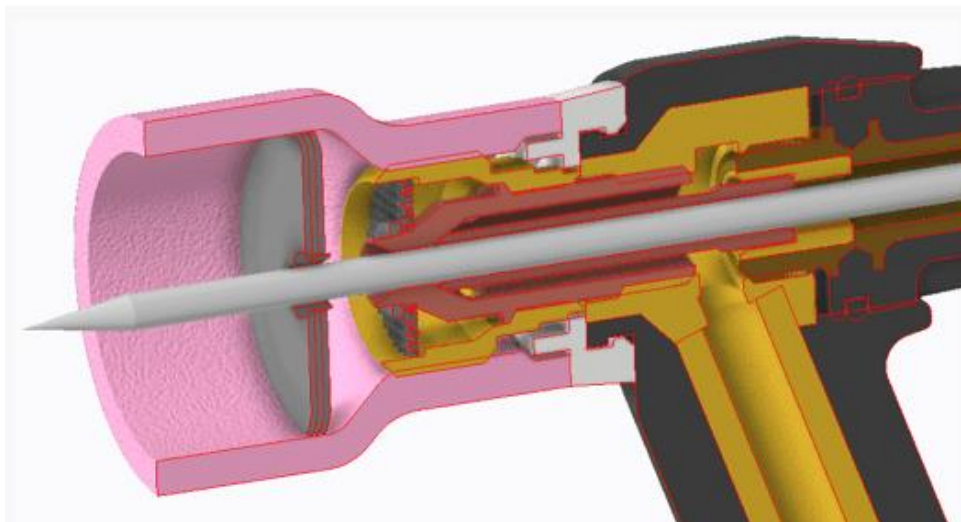
Slika 3.5 Gorionik hlađen antifrizom za ručno zavarivanje te sastavni dijelovi [8]

Važan dio gorionika jest i vanjska sapnica. Ona ima direktan učinak na karakteristike zaštite metala zavara, ali i netaljive elektrode. Ovisno o izvedbi konstrukcije sapnice, može doći do turbulentnog strujanja zaštitnog plina. Turbulentno strujanje zaštitnog plina dovodi do nestabilnosti električnog luka te smanjene zaštite metala zavara i netaljive elektrode. Vanjske sapnice izrađuju se najčešće od keramičkih materijala koje podnose visoke temperature, ali je i dostupna transparenta sapnica za posebne zahtjeve vidljivosti zavarenog spoja te sapnice za specijalne namjene (zavarivanje titana itd.). [7]

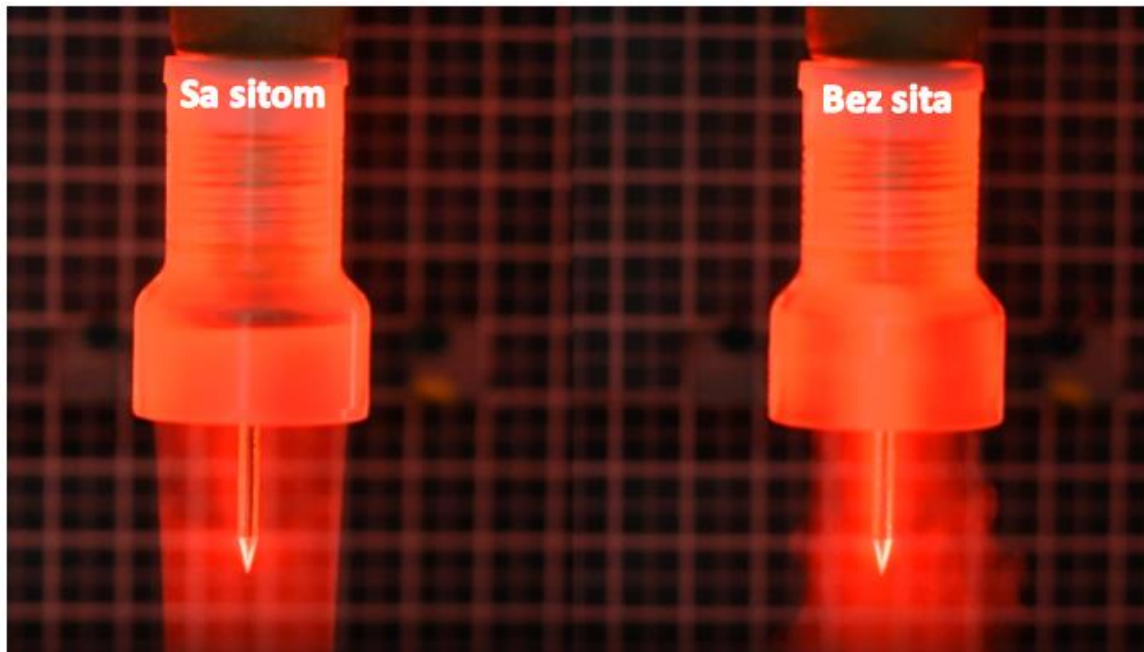


Slika 3.6 Prikaz turbulentnog (lijevo) i laminarnog (desno) strujanja zaštitnog plina [24]

Na Slika 3.6 prikazano je turbulentno (lijevo) i laminarno (desno) strujanje zaštitnog plina. Pošto je oprema za TIG zavarivanje u konstantnom razvoju, na tržištu su dostupne keramičke sapnice s ugrađenim raspršivačem, takozvanim sitom (Slika 3.7). Njima se postiže postojan laminaran protok zaštitnog plina cijelom površinom sapnice. Usporedba strujanja zaštitnog plina sa i bez raspršivača prikazana je na Slika 3.8. Korištenje sapnice s raspršivačem ima to veći značaj kod zavora na teško dostupnim mjestima gdje je potrebno veće napuštanje elektrode izvan sapnice, što rezultira lakšom i kvalitetnijom izvedbom spoja. [24]



Slika 3.7 Keramička sapnica s raspršivačem [24]

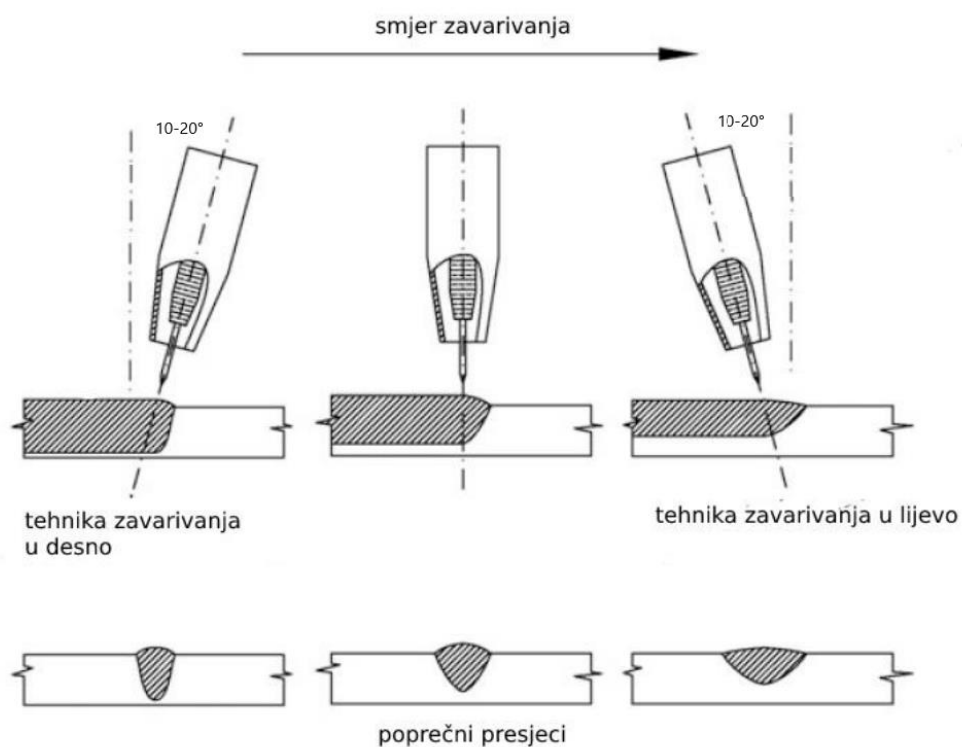


Slika 3.8 Usporedba protoka plina kod sapnice sa sitom i bez sita [24]

3.3. Princip rada

TIG postupak zavarivanja najčešće se izvodi ručno, ali moguća je poluautomatska ili automatska izvedba. Ručni TIG postupak najzahtjevniji je elektrolučni postupak zavarivanja te je potrebna najduža izobrazba zavarivača. Izvodi se tako da se gorionik pozicionira na mjesto zavara pod određenim kutom te pritiskom na gumb, koji se nalazi na gorioniku, uspostavlja se električni luk. Tijekom zavarivanja, drugom rukom, dozira se dodatni materijal u obliku šipke čiji vrh cijelo vrijeme mora biti u struji zaštitnog plina. Na kraju zavara, kada se električni luk ugasi, potrebno je zadržati gorionik na mjestu jer zaštitni plin još izlazi par sekundi kako bi zaštitio talinu, dodatni materijal i elektrodu od utjecaja atmosfere.

Geometrija i izgled zavarenog spoja uvelike ovisi o orijentaciji elektrode. Orijentacija elektrode definira se na dva načina, kut među elektrode i radnog komada te kao kut između elektrode i osi smjera zavarivanja. Desnom tehnikom zavarivanja, otklon gorionika $10-20^\circ$ u smjeru zavarivanja, postiže se dublja penetracija i stabilniji električni luk. No dolazi do smanjenja vidljivosti putanje. Ova tehnika rada koristi se za materijale veće debljine, od 3 mm nadalje. Tehnika rada u lijevo, otklon gorionika $10-20^\circ$ suprotno od smjera zavarivanja, primjenjuje se za tanke materijale ili materijale s nižim talištem. Udaljenost električnog luka je veća i nastaje zavar koji je širi i plići. Prikaz poprečnih presjeka zavarenog spoja u ovisnosti o nagibu elektrode nalazi se na Slika 3.9.



Slika 3.9 Poprečni presjeci zavarenog spoja u ovisnosti o nagibu elektrode [22][23]

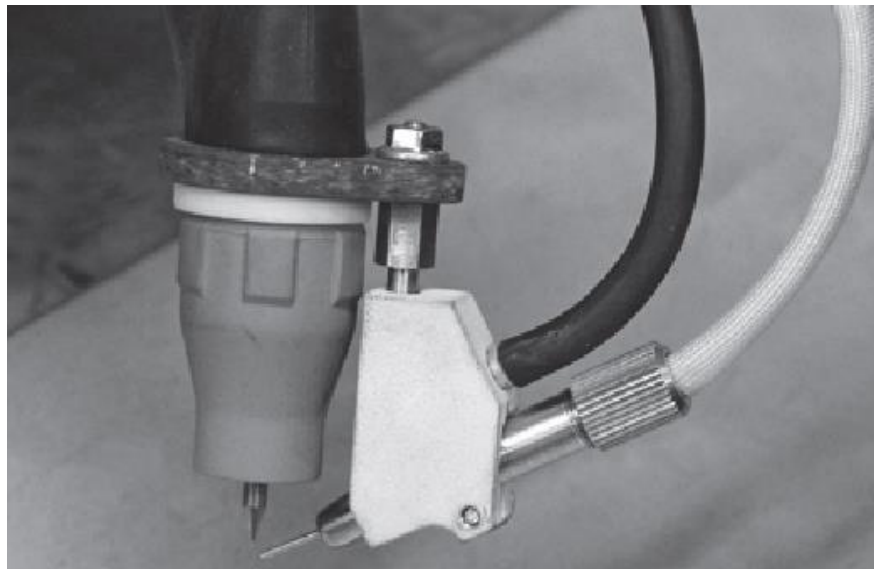
U prikazane su tehnike zavarivanja u ovisnosti o vrsti zavarenog spoja. Neke od njih su vrlo zahtjevne te je potrebno puno iskustva kako bi se iste pravilno izvele, pogotovu u teško pristupačnim mjestima.

Tablica 3.4 Tehnike zavarivanja u ovisnosti o vrsti zavarenog spoja [7]

| | |
|----------------|--|
| Sučeoni spoj | |
| Preklopni spoj | |
| Kutni spoj | |
| Rubni spoj | |

Poluautomatizirano TIG zavarivanje razlikuje se od ručnog po sustavu za automatsko dodavanje dodatnog materijala. Na pištolj za ručno zavarivanje montirano je vođenje za dodavanje materijala u obliku žice čija se brzina dodavanja regulira (Slika 3.10). Time se uklanja veliki

nedostatak TIG zavarivanja a to je mali depozit materijala. Žica se može dodavati u hladnom (cold wire) ili predgrijanom stanju (hot wire). Korištenjem poluautomatiziranog TIG zavarivanja postiže se veća produktivnost procesa. Takvo poluautomatizirano zavarivanje omogućuje zavarivaču lakšu izvedbu te bolju kontrolu nad zavarenim spoje. [7]



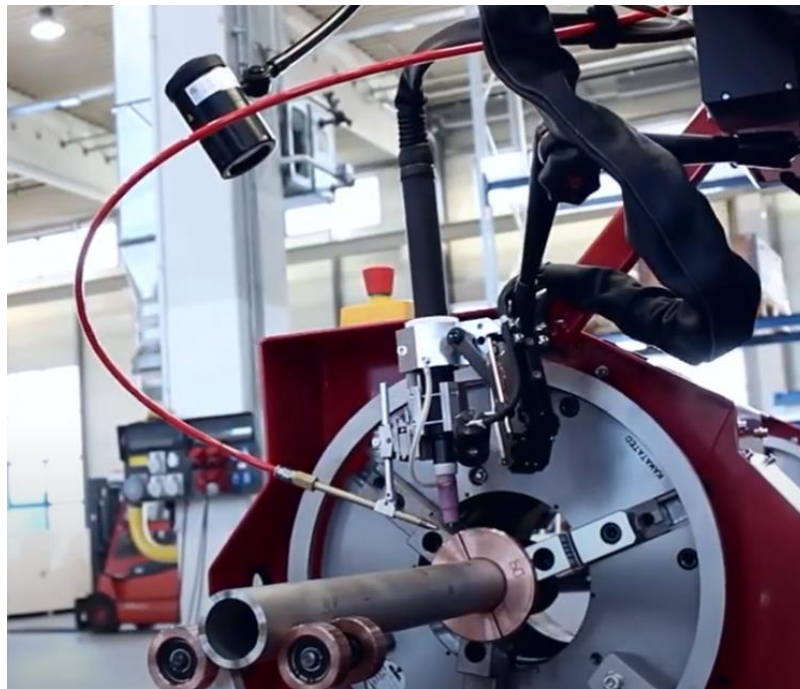
Slika 3.10 Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [7]

TIG postupak zavarivanja moguće je potpuno automatizirati korištenjem manipulatora (automata) ili robota. Tako se uklanja utjecaj zavarivača i dobiva ponovljivost zavarivanja. Automatizacijom procesa postiže se konstantna brzina zavarivanja, jednaki razmak između elektrode i radnog komada te pravac zavarivanja. Kod cilindričnih zavara obično se giba radni komad, dok za pravocrtne zavare gibanje vrši gorionik. Za jednostavne pravocrtne zavare koriste se razni automati (Slika 3.11), međutim za kompleksnije pozicije potrebno je robotizirano gibanje gorionika (Slika 3.12). Glavne prednosti automatizacije postupka su:

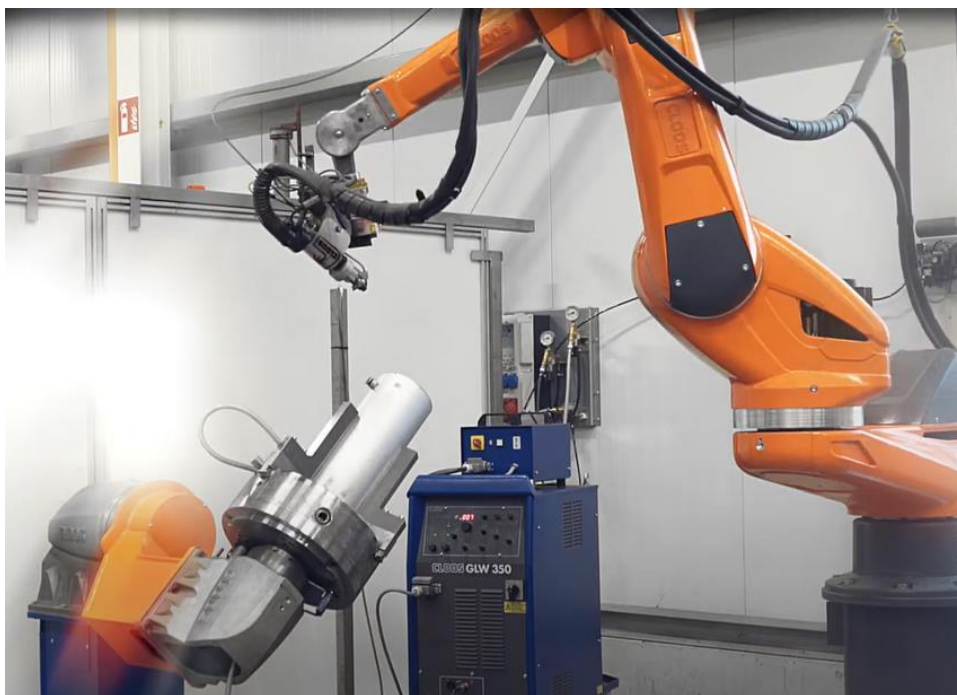
- veća brzina zavarivanja što dovodi do veće produktivnosti postupka
- ponovljivost procesa, primjena jednakih parametara za x ponavljanja
- mogućnost neprestanog rada, 24 sata dnevno
- nema štetnog utjecaja na zdravlje zavarivača
- manji utrošak materijala i zaštitnog plina.

Najveći nedostatak automatizacije jest velika početna investicija koja se kasnije, na velikim serijama, višestruko isplati. Te nedostatak fleksibilnosti procesa. Zavarivač se brzo

prilagodi novom radnom komadu i parametrima, pa može odmah početi s radom. Dok je kod automatiziranog procesa potrebno programiranje istog i provođenje testnog zavarivanja.



Slika 3.11 Automat za automatizirano TIG zavarivanje [28]



Slika 3.12 Robotizirano TIG zavarivanje [29]

4. A-TIG postupak zavarivanja

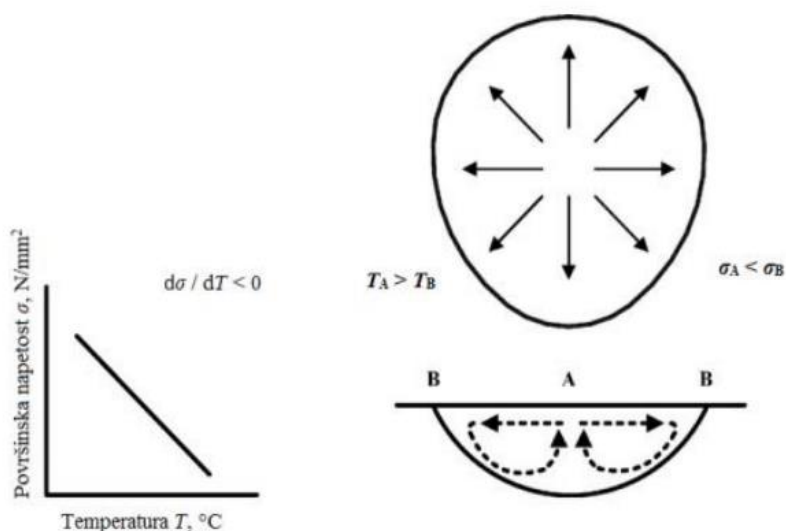
Primjena TIG postupka uz korištenje aktivacijskog premaza krenula je 1950-ih godina na EO Paton Institute of Electric Welding u bivšem Sovjetskom savezu. Isti postupak opisan je 1960-ih godina u znanstvenim radovima kod zavarivanja titanovih legura. Danas zvani A-TIG postupak zavarivanja nastao je s ciljem povećanja produktivnosti, tj. povećanja dubine penetriranja. Kako bi se to ostvarilo potrebno je povećati probojnost električnog luka, a to se postiže tankim aktivacijskim premazom koji se nanosi na radni komad. Takvi premazi mogu biti u obliku aerosola ili paste te se mogu koristiti za zavarivanje C-Mn čelik, Cr-Mo čelik, nehrđajućih čelik i legura na bazi nikla i bakra. Uz pravilnu primjenu moguće je postići potpunu protaljivost u jednom prolazu komada debljine do 12 mm. Međutim ovaj postupak slabo se implementirao u industriju jer se smatra da je aktivacijski premaz dodatan trošak, a nanošenje na radni komad dodatna operacija. [25]

4.1. Mehanizmi utjecaja aktivacijskog premaza na zavareni spoj

Nije u potpunosti istraženo kako aktivacijski premaz djeluje na zavareni spoj, no pretpostavlja se da postoje dva mehanizma utjecaja aktivnog premaza na zavareni spoj. Jedan mehanizam utjecaja temelji se na Marangonijevom efektu strujanja fluida dok se drugim smatra povećanje gustoće električnog luka uslijed kontrakcije, tj. suženja luka.

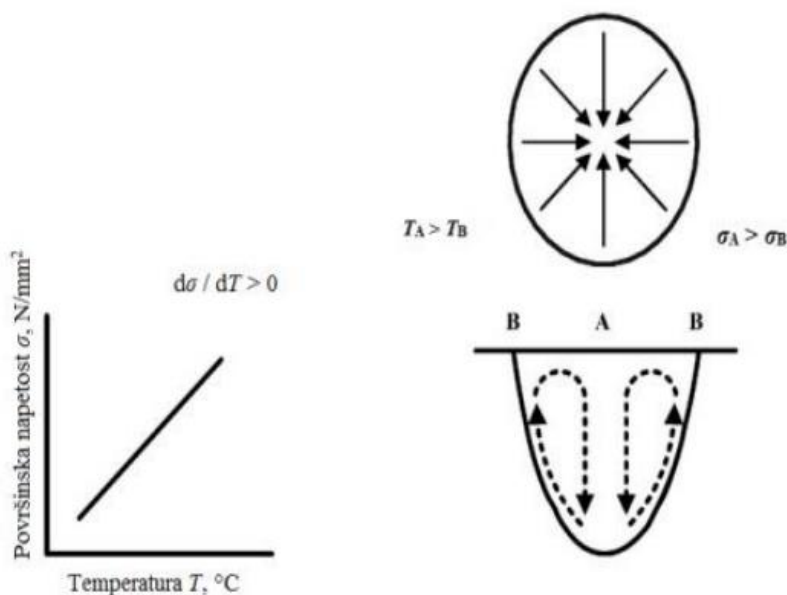
4.1.1. Marangonijev efekt strujanja fluida

Pomoću Marangonijevog efekta strujanja fluida objašnjavaju se različite vrste profila taline kod TIG i A-TIG postupka zavarivanja. Zbog različitih toplinskih koeficijenata površinske napetosti (TKPN) rastaljenog materijala, dolazi do promjene strujanja taline. Tako se prilikom zavarivanja bez aktivacijskog premaza stvara talina čija je vrijednost TKPN negativna. To znači da okolna talina koja je hladnija ima veću površinsku napetost od one u sredini. Takvom raspodjelom površinskih napetosti stvara se centrifugalni Marangonijev efekt (Slika 4.1) koji za rezultat ima lakše kretanje taline od sredine zavara prema rubovima što tvori širi i plići profil zavara. [25][27]



Slika 4.1 Centrifugalni Marangonijev efekt [27]

Suprotno se događa kod zavarivanja uz korištenje aktivacijskog premaza. Talina ima pozitivnu vrijednost TKPN što predstavlja veću napetost u centru taline od one oko hladnije. Stoga se stvara centripetalni Marangonijev efekt (Slika 4.2) zbog kojeg se talina lakše kreće od rubova zavara prema sredini. Tako se tvori uži i dublji profil zavara, tj. dublja penetracija. [25]

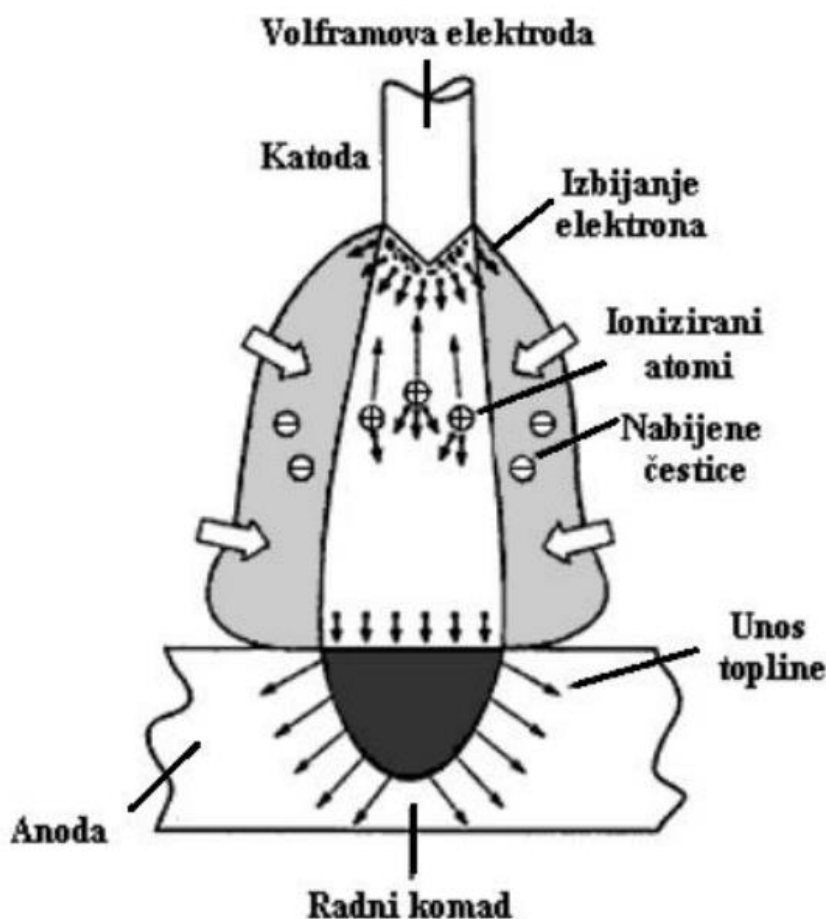


Slika 4.2 Centripetalni Marangonijev efekt [27]

4.1.2. Kontrakcija električnog luka

Smatra se da isparavanjem aktivacijskog premaza dolazi do zahvaćanja elektrona u vanjskom dijelu električnog luka što dovodi do suženja luka. Dolazi do apsorpcije elektrona gdje se elektroni vežu uz isparavajuće molekule i disocirane atome stvarajući negativno nabijene čestice (Slika 4.3).

Tako spojeni elektroni zauzimaju vanjski hladniji dio električnog luka. Da bi se na taj način suzio električni luk, isparavajuće molekule i atomi moraju biti velikog poprečnog presjeka ili molekule i atomi moraju biti u velikom broju da bi zauzeli što veći volumen vanjskog dijela električnog luka što ovisi o samim komponentama aktivacijskog premaza. U sredini električnog luka dolazi do ionizacije što rezultira višom temperaturom i većom energijom elektrona. Na taj se način, uz suženje električnog luka, postiže dublja penetracija. [25]



Slika 4.3 Mehanizam kontrakcije električnog luka [25]

4.2. Svojstva i sastav aktivacijskog premaza

Pošto je ovaj postupak relativno neistražen i još se razvija, na tržištu nema mnogo komercijalnih premaza. Aktivacijski premaz se sastoji od komponenti koje sadrže elektrone poput oksida, fluorida i halida. Oni omogućavaju veću penetraciju te gustoću energije električnog luka. Komponente premaza se odabiru prema svojstvu materijala kojeg je potrebno zavariti, pa je poželjno da su im tališta približno slična osnovnom materijalu. Komponente koje se koriste za dobivanje aktivacijskog premaza za zavarivanje obojenih metala su:

- natrijev cijanid – NaCN,
- bakrov cijanid – Cu(CN)₂,
- natrijev hidroksid – NaOH,
- natrijev hidrosulfit – Na₂S₂O₄,
- natrijev nitrit – NaNO₂,
- bakrov oksid – CuO,
- silicijev dioksid – SiO₂. [8][9][20]

Kako bi se aktivacijski premaz nanio na radni komad, potrebno je praškaste komponente dodati u etanol ili neko slično otapalo te miješati dok otopina ne postane homogena. Tako napravljena otopina može se kistom nanijeti na mjesto zavarivanja. Debljina nanosa mora biti ujednačena, zbog stabilnosti procesa, te ne smije iscuriti u spoj. Isto tako da ne dođe do smanjenja kvalitete zavarenog spoja i do narušavanja estetike zavara, aktivacijski premaz ne smije stvarati stabilne čvrste faze s talinom zavara. [9]

4.3. Prednosti i nedostaci

Mnoge su prednosti A-TIG postupka zavarivanja koje ga svrstavaju u pogodnije rješenje u odnosu na klasični TIG postupak, a neke od njih su:

- koristi se ista oprema kao kod klasičnog TIG zavarivanja
- ne koristi se dodatni materijal, što omogućuje veće brzine zavarivanja te lakšu izvedbu postupka u teško pristupačnim položajima
- postiže se dublja penetracija, što utječe na bolju kvalitetu zavarenog spoja
- postupak je lakši za automatizaciju
- smanjenje broja prolaza u odnosu na klasični TIG postupak
- nije potrebno predgrijavanje radnog komada
- metal zavara je sitnozrnate strukture zbog koje su poboljšana svojstva kao što su otpornost prema toplim i hladnim pukotinama
- ušteda zaštitnog plina. [8][20]

Najveći nedostatak A-TIG postupka jest dodatni trošak i utrošeno dodatno vrijeme za pripremu i nanošenje premaza na radni komad. Također negativna strana je stvaranje troske te estetski zavar izgleda lošije nego kod klasičnog TIG postupka.

5. Eksperimentalni dio

Zadatak eksperimentalnog dijela ovog rada jest provesti A-TIG zavarivanje na odgovarajućim pločama lima od bakra te ih usporediti s pločama zavarenim klasičnim TIG postupkom. Potrebno je izvršiti vizualnu kontrolu, ispitivanje penetrantima i makro analizu poprečnog presjeka zavarenog spoja. Na temelju dobivenih rezultata donijeti zaključak o izvršenom eksperimentu.

5.1. Materijal

U eksperimentu kao osnovni materijal koristio se bakar oznake Cu-ETP u obliku lima dimenzija 200x70x3 mm. To je elektrolitički pročišćeni bakar čije su karakteristike dane u Tablica 5.1 prema normi EN 13599. Atest materijala nalazi se u prilogu rada. Ovaj električno visoko provodljivi bakar koji sadrži kisik upotrebljava se za izradu električnih sabirnica, sklopki i prekidača, tiskarskih valjaka te kao materijal za izradu krovnih pokrova i bakrene galanterije u građevinarstvu. [15]

Tablica 5.1 Rezultati atesta za materijal Cu-ETP

| Karakteristike | Mjerna jedinica | Min. | Max. | Rezultat |
|-----------------------|--------------------------------|-------|-------|----------|
| Udio bakra (Cu) | % | 99,90 | - | 99,90 |
| Vlačna čvrstoća | MPa | 240,0 | 300,0 | 248,9 |
| Istezanje | % | 15,0 | - | 39,8 |
| Granica tečenje | MPa | 180,0 | - | 216,8 |
| Električna vodljivost | m/(Ω mm ²) | 57,0 | - | 57,1 |

5.2. Oprema

5.2.1. Izvor struje

Zavarivanje u eksperimentu izvedeno je uređajem VARTIG 2005 AC/DC proizvođača Varstroj koji je prikazan na Slika 5.1. Ovim uređajem moguće je izvesti TIG AC/DC, TIG pulsno i REL zavarivanje. U Tablica 5.2 dane su karakteristike uređaja.



Slika 5.1 Varstroj VARTIG 2005 AC/DC uređaj za zavarivanje

Tablica 5.2 Tvornički podaci VARTIG 2005 AC/DC uređaja [16]

| TIP | Vartig 2005 AC/DC (G i W) |
|---------------------------------|--|
| Priključni napon: | 1 x 230 V |
| Osigurač (spori): | 20 A |
| Područje zavarivanja TIG DC: | 5 – 170 A |
| Područje zavarivanja TIG AC/DC: | 5 – 200 A |
| Područje zavarivanja REL: | 5 – 170 A |
| Intermitencija TIG AC/DC: | 40% - 200 A 60% - 160 A / 170 A 100% - 130 A / 130 A |
| Napon zavarivanja REL/TIG: | 20-26,8V / 10-16,8V |
| Promjer elektrode: | Ø 1,5 – 4 mm |
| Hlađenje izvora: | prisilno - ventilator |
| Masa: | 18 kg |
| Dimenzije (mm): | 440 x 222 x 480 |

5.2.2. Zaštitni plin

U eksperimentu koristio se zaštitni plin proizvođača Messer trgovačkog naziva Aluline He50. Prema normi ISO 14175 ovaj plin pripada u skupinu I3, što predstavlja mješavinu argona i helija u omjeru 50:50 (Slika 5.2).



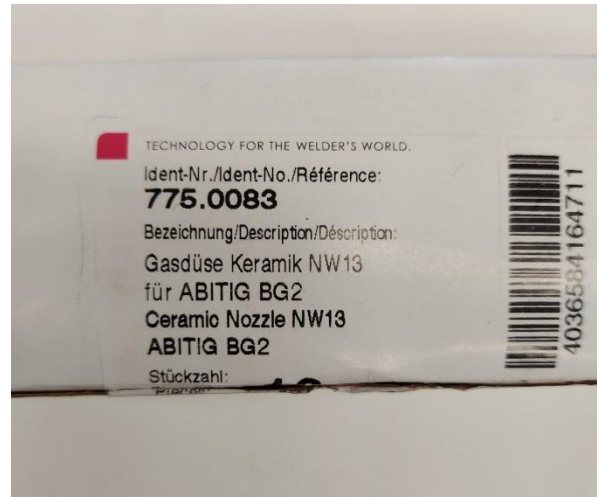
Slika 5.2 Zaštitni plin Aluline He50

5.2.3. Gorionik (pištolj)

Korišten je gorionik ABITIG GRIP 450 W prikazan na Slika 5.3. U pištolju nalazi se netaljiva volframova elektroda s dodatkom lantanovih oksida, promjera 3,2 mm i početne dužine 175 mm (Slika 5.5). Elektroda je na vrhu šiljasto nabrušena te viri iz sapnice 5 mm. Pištolj ima integrirano hlađenje tekućinom za hlađenje, te je na njega montirana keramička sapnica promjera 13 mm koja je prikazana na Slika 5.4.



Slika 5.3 Gorionik ABITIG GRIP 450 W



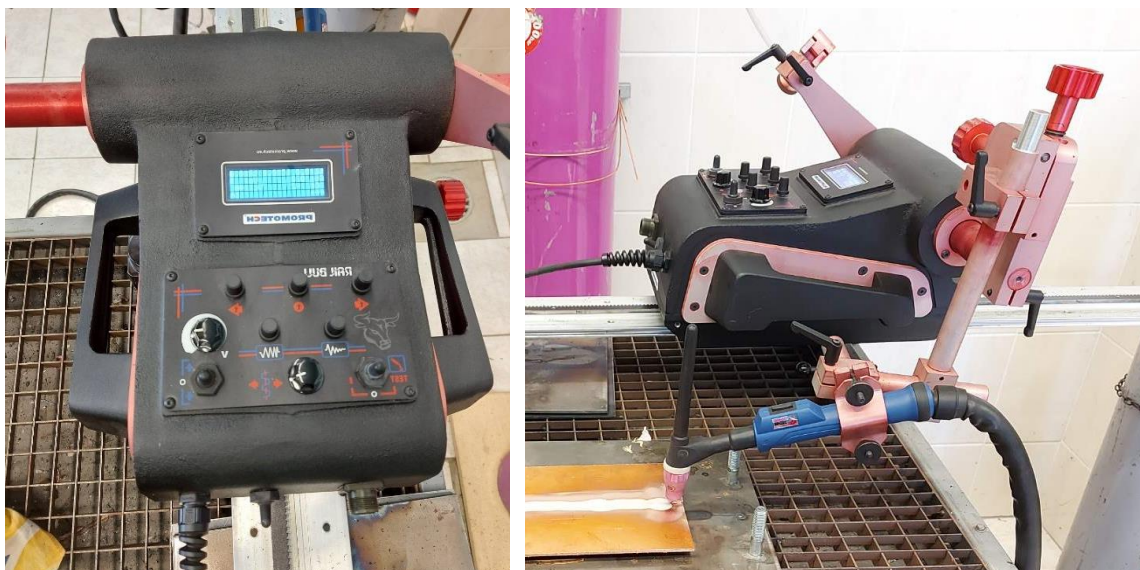
Slika 5.4 Keramička sapnica i pripadajuća deklaracija



Slika 5.5 Netaljive elektrode s deklaracijom

5.2.4. Uređaj za automatizaciju

Kako bi se osigurala ponovljivost zavarivanja na uzorcima i smanjio utjecaj zavarivača, korišten je uređaj za automatizirano zavarivanje. Ovaj uređaj (manipulator) RAIL BULL (Slika 5.6), čiji je proizvođač Promotech, omogućuje konstantnu brzinu zavarivanja, razmak između elektrode i radnog komada te pravac zavarivanja. Prije zavarivanja potrebno je montirati gorionik na manipulator te na konzoli namjestiti parametre gibanja. Tvornički podaci uređaja prikazani su u Tablica 5.3.



Slika 5.6 Uređaj RAIL BULL za automatizirano zavarivanje

Tablica 5.3 Tvornički podaci uređaja RAIL BULL za automatizirano zavarivanje [17]

| | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Napon | 230 V, 50-60 Hz |
| Snaga | 100 W |
| Horizontalna vučna sila | 350 N |
| Vertikalna vučna sila | 150 N |
| Raspon podešavanja poprečnog klizača | 0-35 mm |
| Horizontalna brzina | 0-120 mm/min |
| Vertikalna brzina | 0-110 mm/min |
| Masa | 20 kg |
| Vrsta oscilacije | linearno |
| Uzorak osciliranja | trapez, trokut, pravac |
| Širina osciliranja | 0-50 mm |
| Brzina osciliranja | 0-1500 mm/min |

5.3. Zavarivanje uzoraka

Izrada eksperimenta tj. zavarivanje uzoraka izvršeno je u prostoru Sveučilišta Sjever u laboratoriju za strojarstvo. Zavarivanje se vršilo na tri uzorka. Uzorak čine dva lima dimenzija 70x200 mm koji su ranije pripojeni (Slika 5.7). Svi uzorci su zavarivani istosmjernom strujom s elektrodom na minus polu i pod neutralnim kutom (elektroda okomita na uzorak). Također kod svih uzorka jakost struje za zavarivanje bila je 150 A, dok je brzina zavarivanja bila 20 cm/min s protokom plina od 15 l/min.



Slika 5.7 Uzorak pripremljen za zavarivanje

5.3.1. Uzorak 1

Prvi uzorak zavaren je klasičnim TIG postupkom. Stoga je uzorak prije zavarivanja kontaktno predgrijan na 300 °C. Temperatura uzorka mjerila se kontaktnim termometrom. Uzorak je stavljen na radni stol tako da su ispod uzorka postavljeni odstoynici od 10 mm u svrhu što manjeg odvođenja topline, jer zrak djeluje kao izolator. Uzorak nakon zavarivanja prikazan je na Slika 5.8, dok su parametri zavarivanja dani u Tablica 5.4.

Tablica 5.4 Parametri zavarivanja za Uzorak 1

| | |
|---------------------------|-------------|
| Predgrijavanje | 300 °C |
| Vrsta struje zavarivanja | istosmjerna |
| Jakost struje zavarivanja | 150 A |
| Pol elektrode | negativan |
| Brzina zavarivanja | 20 cm/min |

| | |
|--------------------------------|----------|
| Protok plina | 15 l/min |
| Udaljenost elektrode od uzorka | 3 mm |
| Aktivacijski premaz | - |



Slika 5.8 Uzorak 1 nakon zavarivanja

5.3.2. Uzorak 2

Drugi uzorak zavaren je A-TIG postupkom. Za ovaj postupak potreban je aktivacijski premaz, koji je napravljen tako da se u 40 ml etanola (koncentracija 70 %) dodaje 40 g silicijevog oksida (SiO_2). Potrebno je umiješati praškastu komponentu u tekućinu. Tako napravljen premaz kistom je nanijeta na uzorak. Uzorak je stavljen na radni stol tako da su ispod uzorka postavljeni odstojnici od 10 mm u svrhu što manjeg odvođenja topline, jer zrak djeluje kao izolator. Uzorak prije i nakon zavarivanja prikazan je na Slika 5.9, dok su parametri zavarivanja dani u Tablica 5.5.

Tablica 5.5 Parametri zavarivanja za Uzorak 2

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Predgrijavanje | - |
| Vrsta struje zavarivanja | istosmjerna |
| Jakost struje zavarivanja | 150 A |
| Pol elektrode | negativan |
| Brzina zavarivanja | 20 cm/min |
| Protok plina | 15 l/min |
| Udaljenost elektrode od uzorka | 3 mm |
| Aktivacijski premaz | SiO_2 + etanol |



Slika 5.9 Uzorak 2 prije i nakon zavarivanja

5.3.3. Uzorak 3

Treći uzorak također je zavaren A-TIG postupkom. Razlika u odnosu na Uzorak 2 jest u aktivacijskom premazu. U aktivacijski premaz za Uzorak 2, koji se sastoji od 40 ml etanola (koncentracija 70 %) i 40 g silicijevog oksida (SiO_2), dodano je talilo LP 5 proizvođača Rothenberger Industrial. To je talilo za tvrdo lemljenje skupine FH 10 koje služi za čišćenje oksida te potpomaže (ubrzava) kvašenje materijala. Primjenjuje se kod čelika, bakra i bakrenih legura te se mora istisnuti iz spoja.

Premaz isto je nanijeta kistom na uzorak. Uzorak je stavljen na radni stol tako da su ispod uzorka postavljeni odstoynici od 10 mm u svrhu što manjeg odvođenja topline, jer zrak djeluje kao izolator. Uzorak prije i nakon zavarivanja prikazan je na Slika 5.10, dok su parametri zavarivanja dani u Tablica 5.6.

Tablica 5.6 Parametri zavarivanja za Uzorak 3

| | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Predgrijavanje | - |
| Vrsta struje zavarivanja | istosmjerna |
| Jakost struje zavarivanja | 150 A |
| Pol elektrode | negativan |
| Brzina zavarivanja | 20 cm/min |
| Protok plina | 15 l/min |
| Udaljenost elektrode od uzorka | 3 mm |
| Aktivacijski premaz | SiO ₂ + etanol + talilo |



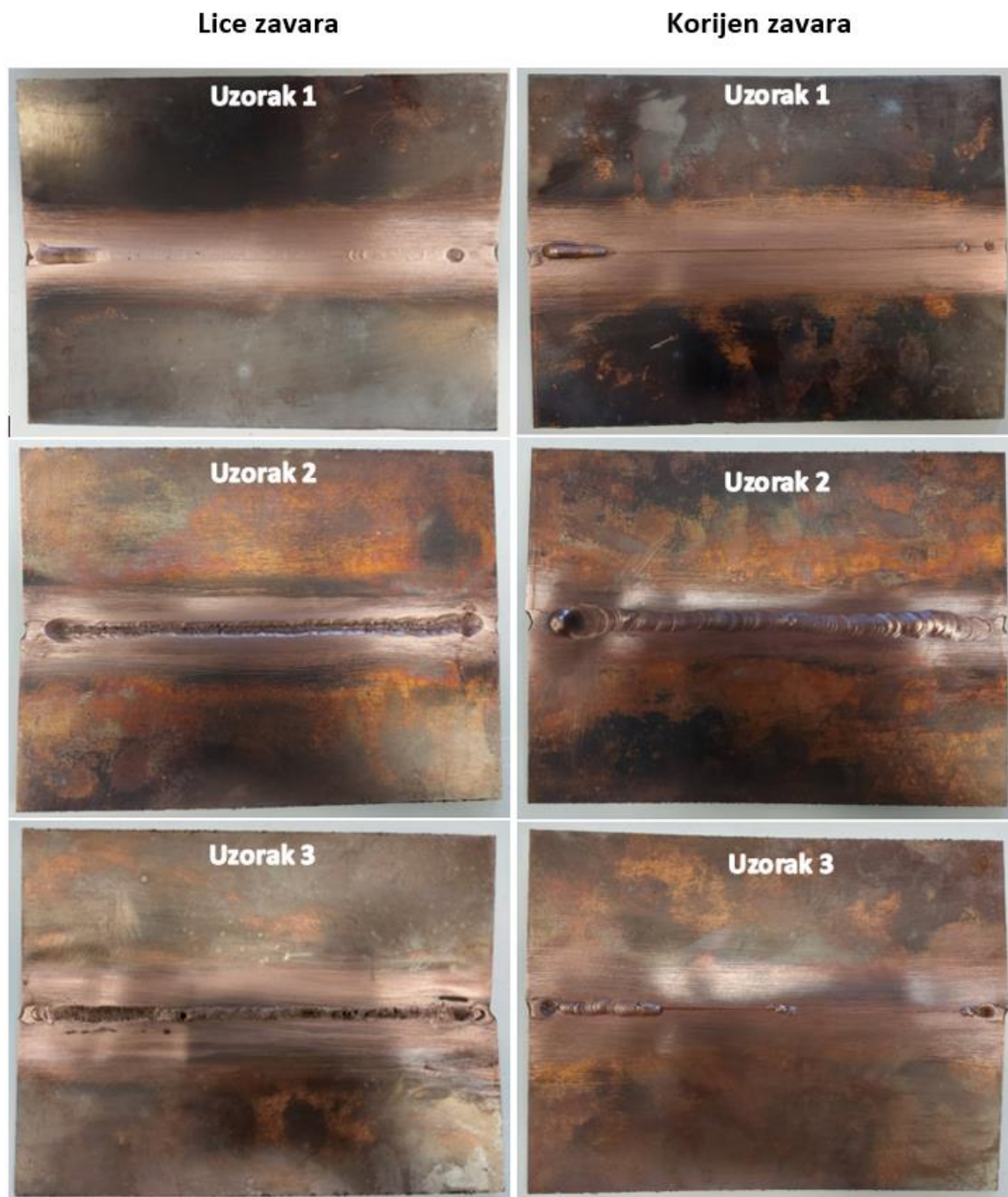
Slika 5.10 Uzorak 3 prije i nakon zavarivanja

5.4. Ispitivanje uzoraka i analiza rezultati

Kako bi se mogla utvrditi kvaliteta zavarenih spojeva potrebno je provesti ispitivanje zavarenih uzoraka. Uzorci su ispitani nerazornim metodama, vizualnom kontrolom i ispitivanjem penetrantima. Zatim su izrezani te je napravljena makro analiza presjeka zavarenih spojeva.

5.4.1. Vizualna kontrola

Nakon zavarivanja uzorci su četkom očišćeni od troske i oksida. Na Slika 5.11 prikazani su očišćeni uzorci sa strane lica te sa strane korijena zavara. Na prvom uzorku lice zavara je glatko ali korijen zavara nije protaljen. Korijen zavara na drugom uzorku u potpunosti je protaljen dok je površina lica zavara hrapava. Treći uzorak većim dijelom nije protaljen s korijenske strane zavara, a lice zavara je najlošije od svih uzoraka. Površina je hrapava te su vidljive velike pukotine.



Slika 5.11 Prikaz lica i korijena zavara nakon čišćenja uzoraka

5.4.2. Ispitivanje penetrantima

Ispitivanje penetrantima nam pokazuje površinsku prisutnost pora. Tako je nakon vizualne kontrole uzoraka, na njih jednoliko nanesen crveni penetrant (Slika 5.12). Djelovanje penetranta trajalo je 15 minuta te su uzorci isprani vodom. Potom je nanesen razvijajući u trajanju od 10 minuta.



Slika 5.12 Nanošenje crvenog penetranta na uzorke

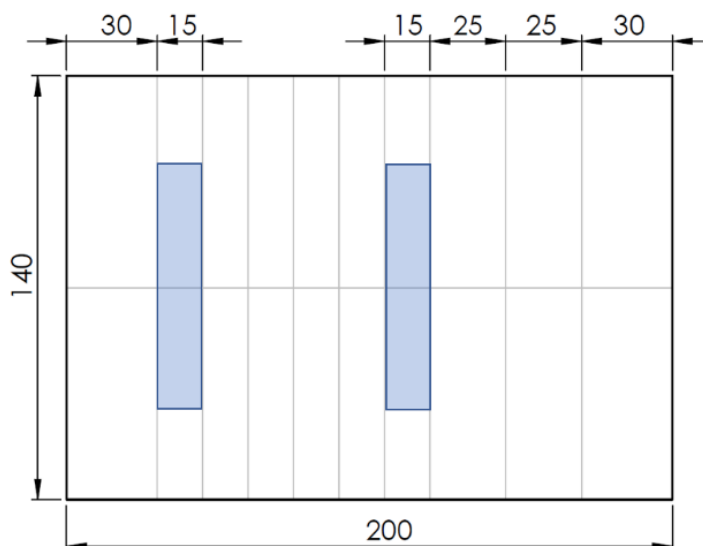
Nakon djelovanja razvijajuća dobiveni su rezultati ispitivanja koji su prikazani na Slika 5.13. Na prvom uzorku jasno se vidi nekoliko pora. Na drugom uzorku ne može se primijetiti prisutnost pora. Razlog tome jest taj što je površina lica zavora hrapava te se penetrant nije u potpunosti isprao. Stoga, nakon djelovanja razvijajuća, dobivena je slika zaostalog penetranta. Uzorak 3 ima slični problem kao prethodni uzorak. Međutim, na njemu se jasno vide prisutne pore.



Slika 5.13 Rezultati ispitivanja penetrantima

5.4.3. Makro presjek zavarenog spoja

Poslije ispitivanja uzoraka nerazornim metodama, isti su razrezani za dobivanje makro analize presjeka zavarenih spojeva. Iz svakog uzorka izrezana su dva komada prema planu rezanja koja se nalazi na Slika 5.14. Dimenzije izrezanog komada za makro analizu su 15x80 mm.



Slika 5.14 Plan rezanja uzoraka za makro izbrusak

Nakon izrezivanja uzoraka (Slika 5.15), potrebno je brušenje istih. Brušenje se izvodilo na brusilici Forcipol 1V, marke Metkon (Slika 5.16). Korišteni su brusni papiri sljedećih granulacija: P120, P240, P320, P600 i P1000. Nakon brušenja dobila se površina poprečnog presjeka metalnog sjaja.



Slika 5.15 Izrezani uzorci za makro izbrusak



Slika 5.16 Brusilica Forcipol IV, marke Metkon

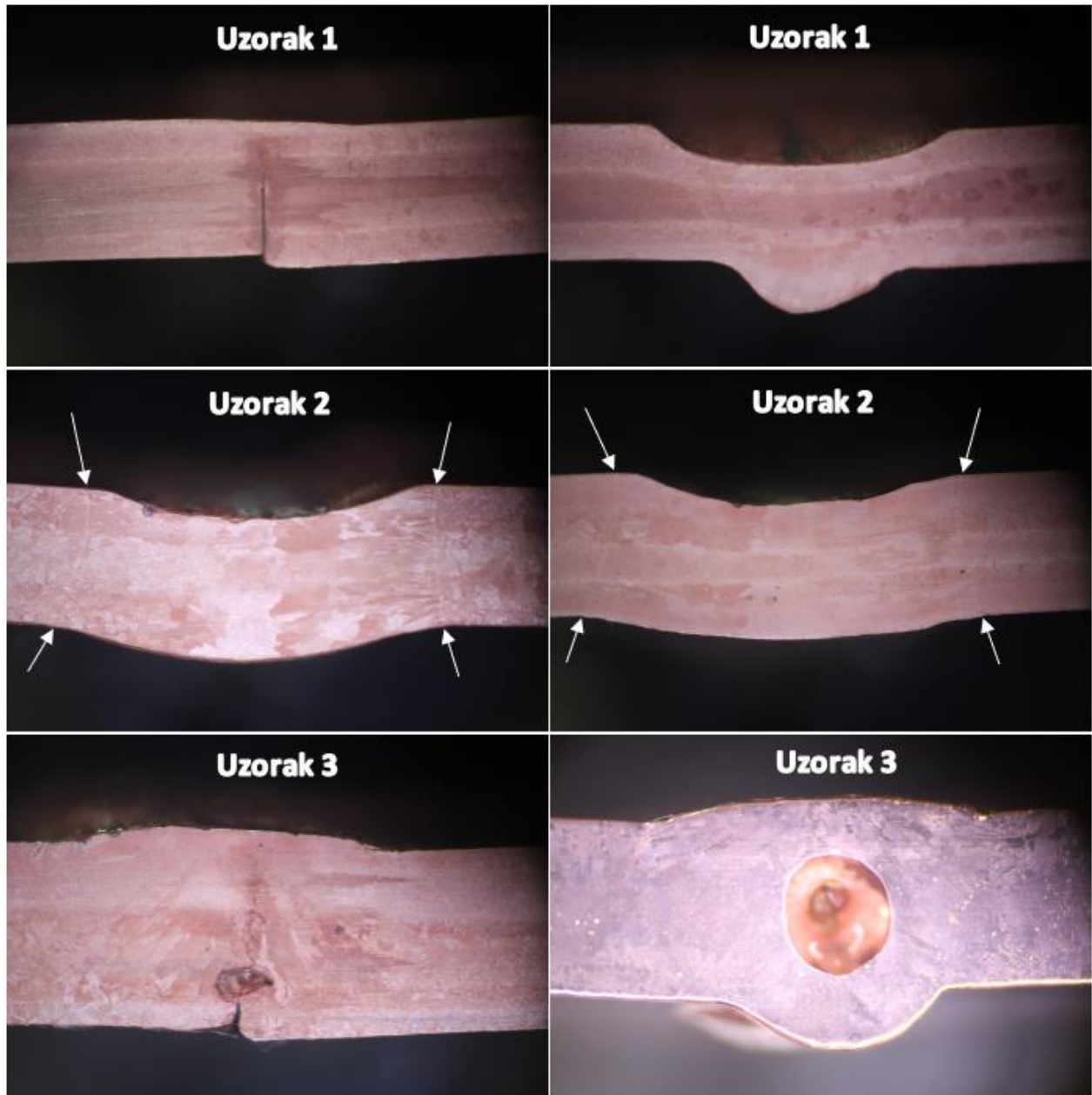
Kako bi se dobila kvalitetna slika makro analize provedeno je nagrivanje uzoraka. Za nagrivanje koristila se otopina feriklorida (FeCl_3) u trajanju od jedne minute. Zatim se uzorak isprao u 19 % koncentriranoj solnoj kiselinu (HCl) u trajanju 15 sekundi. Konačno, uzorci su promatrani na stereo mikroskopu (Slika 5.17) te fotografirani digitalnim fotoaparatom marke Canon EOS 20D.



Slika 5.17 Stereo mikroskop

Makro presjeci zavarenih spojeva povećani su 25 puta i prikazani na Slika 5.18. Promatrajući Uzorak 1 jasno se vidi neprovar te pukotina u protaljeni dio. Drugi presjek Uzorka 1 je protaljen te je talina formirala izbočenje na korijenu zavara. Uzorak 2 unatoč hrapavoj površini na licu zavara, zavareni spoj u potpunosti je protaljen te se jasno vidi linija staljivanja koja je označena strelicama. Na Uzorku 3 vidljiva je pukotina s korijenske strane zavarenog spoja nakon koje se

nalazi šupljina. Nadalje, iz šupljine se opet proteže pukotina u središte zavarenog spoja. Na drugom presjeku također je vidljiva jedna velika šupljina.



Slika 5.18 Makro presjeci zavarenih spojeva

6. Zaključak

Primjena bakra vrlo je široka zbog njegovih svojstava dobre električne vodljivosti, provođenja topline te korozijske postojanosti. Upravo zbog svojstva dobrog provođenja topline, nastaje problem kod zavarivanja bakra. Tako je kod klasičnog TIG postupka zavarivanja potrebno predgrijavanje radnog komada od 100 °C po milimetru debljine. To iziskuje dodatna financijska sredstva kao i otežane uvjete zavarivanja zbog isijavanja topline (do 600 °C). U ovom diplomskom radu pokazano je kako se može dobiti kvalitetan zavareni spoj bez predgrijavanja prije zavarivanja. To je postignuto A-TIG postupkom zavarivanja, tj. korištenjem aktivacijskog premaza silicijevog oksida.

U eksperimentalnom dijelu rada izvršeno je zavarivanje triju uzoraka pomoću uređaja za automatizirano zavarivanje. Na taj se način uklonio utjecaj zavarivača te dobili jednaki uvjeti zavarivanja za sve uzorke. Uzorak 1 se zavarivao klasičnim TIG postupkom uz predgrijavanje. Zavarivanje je u samom početku dobro krenulo, no kako se zavarivalo prema sredini radnog komada tako je toplota sve više odlazila. Shodno tome, na početku je došlo do provara dok ostatak zavara nije protaljen, što pokazuje provedena ispitivanja. Uzorak 2 zavaren je A-TIG postupkom zavarivanja bez predgrijavanja. Za zavarivanje su korišteni isti parametri kao za Uzorak 1 uz korištenje aktivacijskog premaza silicijevog oksida. Makro analiza presjeka zavarenog spoja pokazuje odličnu kvalitetu zavarenog spoja, zavar je u potpunosti protaljen i nisu pronađene greške u zavaru.

Treći uzorak zavaren je na isti način i s istim parametrima kao drugi uzorak uz razliku u aktivacijskom premazu gdje je dodano talilo. Svrha talila jest sprečavanje oksidacije uslijed visokih temperatura. Ovaj uzorak nakon zavarivanja nije u potpunosti potamnio kao ostali uzorci uslijed djelovanja visoke temperature. Ali nije se postigla željena kvaliteta zavarenog spoja, naime došlo je do provara, no nastale su pukotine. Pretpostavlja se da je talilo ušlo u zavareni spoj te su nastale greške u njemu.

A-TIG postupak zavarivanja relativno je slabo korišteni postupak te se još istražuje. Ovaj postupak zavarivanja uvelike može smanjiti troškove proizvodnje s obzirom da je cijena aktivacijskog premaza relativno mala u odnosu na utrošak energije za predgrijavanje. Zbog dublje penetracije smanjuje se broj prolaza zavarivanja. Jedini nedostatak toga jest utrošeno vrijeme na pripremu spoja i nanošenje premaza.



IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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

Ja, **MARIN ŠVOGOR** pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom **A-TIG zavarivanje bakra** te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.


Student:
Marin Švogor



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

Ja, **MARIN ŠVOGOR** neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom **A-TIG zavarivanje bakra** čiji sam autor.

Student:
Marin Švogor



7. Literatura

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2009.
- [2] I. Grabarić, S. Šitić: Materijali I, skripta, Split, rujan 2012.
- [3] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=5344>, dostupno: 13.8.2022.
- [4] https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180308_093522_sakan_2.Korozijska.svojstva.pojedinih.tehnickih.materijala.pdf, dostupno: 13.8.2022.
- [5] M. Živčić, Zavarivanje i srodni postupci, Društvo za tehniku zavarivanja SRH, Zagreb, 1975.
- [6] <https://www.thoughtco.com/copper-facts-chemical-and-physical-properties-606521>, dostupno: 14.8.2022.
- [7] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki, Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Tehnički glasnik, 2014.
- [8] L. Obelić, A-TIG zavarivanje bakra i legura bakra, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, 2020.
- [9] I. Trubelja, A-TIG zavarivanje bakra, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2022.
- [10] I. Samardžić, D. Bogovac, T. Jorgić, K. Kovačić, Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija, Tehnički glasnik, 2015.
- [11] T. Tomić, Zavarljivost i pogreške u zavarenim spojevima, predavanja, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2022.
- [12] <https://www.millerwelds.com/resources/TIGhandbook>, dostupno: 3.9.2022.
- [13] L. Čolić, Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A-TIG postupkom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [14] N. Babić, A-TIG zavarivanje duplex čelika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [15] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/cu/spojevi.html>, dostupno: 23.9.2022.
- [16] https://servus.hr/wp-content/uploads/2017/10/Vartig_1705-2005.pdf, dostupno: 20.9.2022.
- [17] <https://www.promotech.eu/en/products/welding-cutting-track-carriage-with-oscillation/>, dostupno: 24.9.2022.
- [18] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/investigation-of-the-a-tig-mechanism-and-the-productivity-benefits-in-tig-welding-may-2009>, dostupno: 24.9.2022.
- [19] D. Pongrac, Utjecaj aktivacijskog premaza na mehanička i korozijska svojstva zavarenog spoja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [20] <https://pdfslide.tips/documents/atig-zavarivanje-55a758ab23a2e.html>, dostupno: 24.9.2022.

- [21] M. Parać, Razvoj tehnologije tvrdog lemljenja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [22] N. R. Mandal, Ship Construction and Welding, Springer, Kharagpur, India, 2016.
- [23] M. Roš, Automatizirano TIG zavarivanje bakra, Sveučilište sever, Varaždin, 2021.
- [24] <https://www.eurotehnika.hr/2021/12/01/novost-u-ponudi/>, dostupno: 24.9.2022.
- [25] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/investigation-of-the-a-tig-mechanism-and-the-productivity-benefits-in-tig-welding-may-2009>, dostupno: 24.9.2022.
- [26] https://ijetae.com/files/Volume4Issue8/IJETAE_0814_25.pdf, dostupno: 24.9.2022.
- [27] K. H. Tseng, C. Y. Hsu, Performance of activated TIG process in austenitic stainless steel welds, Journal of Materials Processing Technology, 503–512, 2011.
- [28] https://www.youtube.com/watch?v=24AO3zi_jvs&ab_channel=FroniusRussia, dostupno: 25.9.2022.
- [29] https://www.youtube.com/watch?v=BWoieSFJNgo&ab_channel=CloosWelding, dostupno: 25.9.2022.
- [30] <https://homele.ru/hr/to-help-the-plumbing/tungsten-electrodes-with-thorium-welding-with-tungsten-electrode/>, dostupno: 25.9.2022.

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 2.1 Bakar [6]..... | 3 |
| Slika 3.1 Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [7] | 8 |
| Slika 3.2 a) Uspostava električnog luka, b) Električni luk [7]..... | 9 |
| Slika 3.3 Utjecaj načina brušenja volframove elektrode na električni luk [30]..... | 13 |
| Slika 3.4 Osnovna oprema za TIG zavarivanje [12]..... | 14 |
| Slika 3.5 Gorionik hlađen antifrizom za ručno zavarivanje te sastavni dijelovi [8]..... | 15 |
| Slika 3.6 Prikaz turbulentnog (lijevo) i laminarnog (desno) strujanja zaštitnog plina [24] | 16 |
| Slika 3.7 Keramička sapnica s raspršivačem [24] | 16 |
| Slika 3.8 Usporedba protoka plina kod sapnice sa sitom i bez sita [24] | 17 |
| Slika 3.9 Poprečni presjeci zavarenog spoja u ovisnosti o nagibu elektrode [22][23] | 18 |
| Slika 3.10 Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [7] | 20 |
| Slika 3.11 Automat za automatizirano TIG zavarivanje [28]..... | 21 |
| Slika 3.12 Robotizirano TIG zavarivanje [29] | 21 |
| Slika 4.1 Centrifugalni Marangonijev efekt [27]..... | 23 |
| Slika 4.2 Centripetalni Marangonijev efekt [27] | 23 |
| Slika 4.3 Mehanizam kontrakcije električnog luka [25]..... | 24 |
| Slika 5.1 Varstroj VARTIG 2005 AC/DC uređaj za zavarivanje..... | 28 |
| Slika 5.2 Zaštitni plin Aluline He50 | 29 |
| Slika 5.3 Gorionik ABITIG GRIP 450 W | 29 |
| Slika 5.4 Keramička sapnica i pripadajuća deklaracija | 30 |
| Slika 5.5 Netaljive elektrode s deklaracijom | 30 |
| Slika 5.6 Uređaj RAIL BULL za automatizirano zavarivanje | 31 |
| Slika 5.7 Uzorak pripremljen za zavarivanje..... | 32 |
| Slika 5.8 Uzorak 1 nakon zavarivanja | 33 |

| | | |
|------------|--|----|
| Slika 5.9 | Uzorak 2 prije i nakon zavarivanja..... | 34 |
| Slika 5.10 | Uzorak 3 prije i nakon zavarivanja..... | 35 |
| Slika 5.11 | Prikaz lica i korijena zavara nakon čišćenja uzoraka | 36 |
| Slika 5.12 | Nanošenje crvenog penetranta na uzorke | 37 |
| Slika 5.13 | Rezultati ispitivanja penetrantima | 38 |
| Slika 5.14 | Plan rezanja uzoraka za makro izbrusak | 39 |
| Slika 5.15 | Izrezani uzorci za makro izbrusak..... | 39 |
| Slika 5.16 | Brusilica Forcipol 1V, marke Metkon..... | 40 |
| Slika 5.17 | Stereo mikroskop..... | 40 |
| Slika 5.18 | Makro presjeci zavarenih spojeva | 41 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 2.1 Fizikalna i mehanička svojstva bakra (*ovisi o stanju) [1] | 2 |
| Tablica 2.2 Klasifikacija bakrovih legura [1] | 4 |
| Tablica 2.3 Parametri zavarivanja bakra TIG postupkom [5] | 6 |
| Tablica 3.1 Karakteristike zavarivanja ovisno o izboru pogodne vrste struje i polariteta elektrode [7]..... | 10 |
| Tablica 3.2 Karakteristike zaštitnih plinova argona i helija [7]..... | 12 |
| Tablica 3.3 Vrste netaljivih elektroda te njihove oznake, karakteristike i primjena [7]..... | 13 |
| Tablica 3.4 Tehnike zavarivanja u ovisnosti o vrsti zavarenog spoja [7]..... | 19 |
| Tablica 5.1 Rezultati atesta za materijal Cu-ETP..... | 27 |
| Tablica 5.2 Tvornički podaci VARTIG 2005 AC/DC uređaja [16] | 28 |
| Tablica 5.3 Tvornički podaci uređaja RAIL BULL za automatizirano zavarivanje [17]..... | 31 |
| Tablica 5.4 Parametri zavarivanja za Uzorak 1 | 32 |
| Tablica 5.5 Parametri zavarivanja za Uzorak 2 | 33 |
| Tablica 5.6 Parametri zavarivanja za Uzorak 3 | 35 |

Prilozi

Prilog 1. Atest bakra



Valjaonica bakra Sevojno AD
 Prvomajska bb, 31205 Sevojno, SLO
 Tel: (+386 31) 531 757 Fax: (+38



CERTIFICATE No: A80060756

Date: 31.03.2020

Contract no: 81-20000704

| | |
|--|--|
| CUSTOMER: ALCU D.O.O LJUBLJANSKA 51 A 1241 KAMNIK Slovenia (SI) | Order: 49557 Delivery: 80060756 Contract no.: 81-20000704 |
|--|--|

Material 3118453 - SHEETS Cu-ETP 1,0X1000X2000 R240(1/2T) EN, Total: 542,000

Batch V1375/20, Neto 542 KG

Standard: EN 13599 OR EN 1652

| CHARACTERISTIC | UoM | MIN. | MAX. | RESULT |
|-----------------------|-------|--------|-------|-------------|
| Sample 200154811 | | | | |
| 1. % Cu | % | 99,900 | - | 99,900 % |
| 2. Tens. strength Rm | N/mm2 | 240,0 | 300,0 | 286,3 N/mm2 |
| 3. Elongation A50 | % | 6,0 | - | 37,2 % |
| 4. Yield strength Rp0 | N/mm2 | 180,0 | - | 202,4 N/mm2 |
| 5. electrical conduct | SIM | 57,0 | - | 57,0 SIM |

Material 3059367 - SHEETS Cu-ETP 3,0X1000X2000 R240(1/2T) EN, Total: 546,000

Batch V1365/20, Neto 546 KG

Standard: EN 13599 OR EN 1652

| CHARACTERISTIC | UoM | MIN. | MAX. | RESULT |
|-----------------------|-------|--------|-------|-------------|
| Sample 200154353 | | | | |
| 1. % Cu | % | 99,900 | - | 99,900 % |
| 2. Tens. strength Rm | N/mm2 | 240,0 | 300,0 | 248,9 N/mm2 |
| 3. Elongation A50 | % | 15,0 | - | 39,8 % |
| 4. Yield strength Rp0 | N/mm2 | 180,0 | - | 213,8 N/mm2 |
| 5. electrical conduct | SIM | 57,0 | - | 57,1 SIM |



This document has been generated electronically and is valid without a signature.

Acc to EN 10204 3.1