

Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju titana

Vukoja, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:298612>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Vukoja

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Matija Vukoja

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na savjetima, podršci, sugestijama i vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem višoj asistentici dr. sc. Maji Jurica (Remenar) na pomoći, strpljenju i susretljivosti tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se i djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za zaštitu materijala te Laboratorija za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Za kraj, zahvaljujem obitelji i bližnjima na odricanju, strpljenju i podršci tijekom studija.

Matija Vukoja



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

| | |
|--|---------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: | |
| Ur. broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA VUKOJA** Mat. br.: **0035184864**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju titana**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of shielding gas at TIG welding of titanium**

Opis zadatka:

Analizirati zavarljivost titana te opisati specifičnosti tehnologije zavarivanja sa stanovišta postupaka, zaštitnih plinova i dodatnih materijala. Za TIG postupak opisati način izvođenja zavarivanja titana te navesti prikladne parametre ovisno o debljini materijala i vrsti spoja. Navesti primjenjive plinove i njihove mješavine te analizirati mogući utjecaj na geometriju i mikrostrukturu zavarenog spoja.

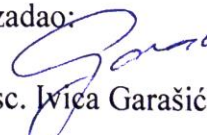
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je oblikovati plan pokusa kojim će se moći kvantificirati utjecaj plinske mješavine argona i helija na tehnologiju zavarivanja titana. Zavarivanje je potrebno provesti mehaniziranim postupkom u zaštitnoj komori. Odrediti utjecaj udjela helija na brzinu zavarivanja i penetraciju kao i eventualne primjene u geometriju zavara. U konačnici donijeti zaključke o mogućnost primjene plinskih mješavina argona i helija pri TIG zavarivanju titana.

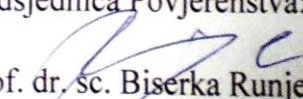
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| 1 UVOD | 1 |
| 2 TITANIJ I NJEGOVE LEGURE | 2 |
| 2.1 Općenito | 2 |
| 2.2. Svojstva | 2 |
| 2.3 Nelegirani (tehnički) titanij | 5 |
| 2.4 Alfa (α) legure | 7 |
| 2.5 Alfa+beta ($\alpha+\beta$) legure | 8 |
| 2.6 Beta (β) legure | 10 |
| 2 ZAVARIVANJE TITANIJA I NJEGOVIH LEGURA..... | 12 |
| 2.1 Općenito | 12 |
| 2.2 Zavarljivost i utjecaj zavarivanja na mikrostrukturu legura..... | 13 |
| 2.3 Korišteni postupci zavarivanja | 17 |
| 2.3.1 MIG zavarivanje..... | 18 |
| 2.3.2 Zavarivanje plazmom..... | 20 |
| 2.3.3 Zavarivanje elektronskim mlazom (EM) | 21 |
| 2.3.4 Zavarivanje laserom | 22 |
| 2.3.5 Zavarivanje trenjem..... | 22 |
| 2.3.6 Elektrootporno zavarivanje | 23 |
| 2.4 Pogreške u zavarenim spojevima titanija | 23 |
| 2.4.1 Pukotine..... | 23 |
| 2.4.2 Povećanje krhosti uslijed onečišćenja vodikom..... | 24 |
| 2.4.3 Pore..... | 24 |
| 2.4.4 Pad duktilnosti..... | 25 |
| 3 TIG ZAVARIVANJE | 26 |
| 3.1 Općenito | 26 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2 Princip rada | 28 |
| 3.3 Oprema za TIG postupak | 29 |
| 3.3.1 Izvor struje..... | 29 |
| 3.3.2 Pištolj za zavarivanje..... | 30 |
| 3.3.3 Volframova elektroda..... | 31 |
| 3.3.4 Zaštitni plinovi | 32 |
| 3.3.5 Dodatni materijal..... | 36 |
| 3.4 Specifičnosti zavarivanja titanija i njegovih legura TIG postupkom..... | 40 |
| 4 EKSPERIMENTALNI RAD..... | 44 |
| 4.1 Opis i ciljevi | 44 |
| 4.2 Osnovni materijal | 44 |
| 4.3 Oprema za zavarivanje | 46 |
| 4.3.1 Izvor struje za zavarivanje..... | 46 |
| 4.3.2 Oprema za mehanizirani postupak zavarivanja..... | 47 |
| 4.3.3 Komora za zavarivanje..... | 48 |
| 4.3.4 Zaštitni plin | 49 |
| 4.3.5 Netaljiva elektroda | 50 |
| 4.4 Postupak navarivanja..... | 50 |
| 4.4.1 Parametri navarivanja..... | 52 |
| 4.5 Provedena ispitivanja | 53 |
| 4.5.1 Vizualna kontrola | 53 |
| 4.5.2 Makroanaliza | 53 |
| 4.6 Analiza rezultata ispitivanja | 55 |
| 4.6.1 Rezultati vizualne kontrole..... | 55 |
| 4.6.2 Rezultati makroanalize | 57 |
| 4.7 Rasprava | 60 |
| 5 ZAKLJUČAK..... | 63 |

LITERATURA 65

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1: Kristalne rešetke čistog titanija | 2 |
| Slika 2: Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama za odabrane Ti-legure..... | 3 |
| Slika 3: Statička izdržljivost nakon 150 sati opterećenja za odabrane Ti-legure..... | 4 |
| Slika 4: Utjecaj intersticijskih elemenata na čvrstoću nelegiranog titanija..... | 6 |
| Slika 5: Primjena TIG postupka za zavarivanje cijevi izrađene od titanija | 12 |
| Slika 6: Shematski prikaz mikrostrukturnih promjena koje se javljaju kao posljedica elektrolučnog zavarivanja $\alpha+\beta$ legura..... | 14 |
| Slika 7: Kompozit mikrostrukture dijela zavarenog TIG postupkom | 15 |
| Slika 8: Lamelarna mikrostruktura u zoni utjecaja topline pod većim uvećanjem | 15 |
| Slika 9: Dio zone utjecaja topline gdje nije premašena temperatura prekrystalizacije..... | 16 |
| Slika 10: Mikrostruktura osnovnog materijala..... | 17 |
| Slika 11: Prikaz procesa taljenja za MIG postupak..... | 19 |
| Slika 12: Shema sapnice i pištolja kod plazma zavarivanja..... | 20 |
| Slika 13: Shema zavarivanja mlazom elektrona | 21 |
| Slika 14: Princip šavnog zavarivanja | 23 |
| Slika 15: TIG postupak zavarivanja | 26 |
| Slika 16: Prikaz elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnih plinova – TIG postupak zavarivanja | 28 |
| Slika 17: Komponente TIG sustava za zavarivanje | 29 |
| Slika 18: Pištolj za TIG postupak zavarivanja hlađen rashladnom tekućinom | 30 |
| Slika 19: Šipke dodatnog materijala za ručno zavarivanje TIG postupkom | 36 |
| Slika 20: TIG sustav za zavarivanje uz pomoć predgrijane žice..... | 37 |
| Slika 21: Unos materijala za mehanizirani TIG postupak zavarivanja s predgrijanom žicom i sa žicom na sobnoj temperaturi | 38 |
| Slika 22: Izvođenje postupka zavarivanja u komori za zavarivanje | 41 |
| Slika 23: Sustav za XRF analizu kemijskog sastava materijala..... | 45 |
| Slika 24: Fronius MagicWave 2200 Job G/F korišten u eksperimentu..... | 46 |
| Slika 25: „BUGO Systems" sustav za mehanizaciju postupka zavarivanja..... | 48 |
| Slika 26: Komora za zavarivanje | 49 |
| Slika 27: Boce korištenih zaštitnih plinova..... | 50 |
| Slika 28: Mehanizirani TIG postupak i korištena komora | 51 |
| Slika 29: Izgled unutrašnjosti komore prije izvođenja jedne od faza navarivanja..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Slika 30: Tračna pila IMET GBS 185 Eco AutoCut..... | 54 |
| Slika 31: Profil navara i izmjerena dubina penetracije na uzorku A1..... | 58 |
| Slika 32: Profil navara i izmjerena dubina penetracije na uzorku A2..... | 59 |
| Slika 33: Profil navara i izmjerena dubina penetracije na uzorku B1..... | 59 |
| Slika 34: Profil navara i izmjerena dubina penetracije na uzorku B2..... | 60 |
| Slika 35: Graf ovisnosti dubine penetracije i brzine navarivanja o korištenoj mješavini zaštitnog plina..... | 62 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1: Fizikalna i mehanička svojstva titanija | 4 |
| Tablica 2: Sastav i mehanička svojstva nekoliko komercijalnih razreda čistog titanija | 5 |
| Tablica 3: Sastav i svojstva nekih α i približno α legura titanija | 8 |
| Tablica 4: Sastav i svojstva nekih $\alpha+\beta$ legura titanija..... | 9 |
| Tablica 5: Sastav i svojstva nekih β legura titanija | 10 |
| Tablica 6: Relativna usporedba postupaka zavarivanja titanija | 18 |
| Tablica 7: Kemijski sastav volframovih elektroda | 31 |
| Tablica 8: Mehanička svojstva tehničkog titana razreda ASTM 1 | 45 |
| Tablica 9: Kemijski sastav uzoraka dobiven XRF analizom | 46 |
| Tablica 10: Tehničke karakteristike uređaja MagicWave 2200 Job G/F | 47 |
| Tablica 11: Promjenjivi i konstantni parametri prilikom provedenog navarivanja | 53 |
| Tablica 12: Sastav korištene otopine za nagrivanje uzoraka te vrijeme držanja..... | 54 |
| Tablica 13: Izgled lica zavara uzoraka nakon provedenog navarivanja..... | 56 |
| Tablica 14: Uzorci pripremljeni za makroanalizu..... | 57 |
| Tablica 15: Pregled izmjerenih vrijednosti pri provedbi eksperimenta | 61 |

POPIS KRATICA

| Kratika | Opis |
|----------------|--|
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| BCC | Body Centered Cubic |
| DC | Direct Current |
| ELI | Extra Low Interstitials |
| EM | Zavarivanje elektronskim mlazom |
| GTAW | Gas Tungsten Arc Welding |
| HCP | Hexagonal Close Packed |
| HRN | Hrvatska Norma |
| ISO | International Organization for Standardization |
| MAG | Metal Active Gas |
| MIG | Metal Inert Gas |
| MZ | Metal zavara |
| TIG | Tungsten Inert Gas |
| REL | Ručno elektrolučno zavarivanje |
| WIG | Wolfram Inert Gas |
| XRF | X-ray Fluorescence |
| ZUT | Zona utjecaja topline |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| A | % | Istezljivost |
| I | A | Jakost struje |
| λ | $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ | Koeficijent toplinske vodljivosti |
| ρ | kg/m^3 | Gustoća |
| Re | N/mm^2 | Granica razvlačenja |
| Rm | N/mm^2 | Vlačna čvrstoća |
| T_t | °C | Temperatura tališta |
| T_S | °C | Temperatura solidifikacije |
| U | V | Napon |
| v_z | cm/min | Brzina zavarivanja |

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je odrediti utjecaj brzine zavarivanja i mješavine zaštitnog plina kod TIG zavarivanja titanija na dubinu penetracije. U teorijskom dijelu rada iznesene su karakteristike titanija i njegovih legura kao karakteristike pojedinih postupaka kojima se uobičajeno zavaruje navedeni materijal. Detaljnije je analiziran TIG postupak te detalji vezani uz njega kao korišteni dodatni materijal, plinske mješavine, specifičnosti pri zavarivanju titanija ovim postupkom te uobičajeni parametri rada.

U eksperimentalnom dijelu rada u laboratoriju su rađeni navari mehaniziranim TIG postupkom na uzorcima titanija pri čemu su korištene dvije mješavine zaštitnog plina te dvije različite brzine zavarivanja kako bi se utvrdio njihov utjecaj na dubinu penetracije. Nakon izvedenog navarivanja analizirana je profil zavara te je izmjerena dubina penetracije. Na osnovu izmjerenih vrijednosti doneseni su zaključci o utjecaju mješavine zaštitnog plina kao i brzine zavarivanja na dubinu penetracije za TIG postupak zavarivanja titanija.

Ključne riječi: TIG zavarivanje, titanij, dubina penetracije, zaštitni plin, brzina zavarivanja

SUMMARY

The aim of this master's thesis is to determine the influence of welding speed and shielding gas mixture on the depth of penetration for TIG welding of titanium. The characteristics of titanium and its alloys along with the characteristics of welding procedures usually used for joining them are examined in the theoretical part. The TIG process is further analyzed along with the details regarding filler materials, gas mixtures and specificities are examined regarding welding titanium with this procedures along with the typical welding parameters.

The experimental research was done in the laboratory and it included a mechanized TIG process used to make beads while two different shielding gas mixtures and welding speeds were used to determine their influence on the depth of penetration. After the welding procedure was done, the weld profile was analyzed and the depth of penetration was measured. Based on the measurements obtained conclusions were made on the influence of the shielding gas and welding speed on the depth of penetration for TIG welding of titanium.

Key words: TIG procedure, titanium, depth of penetration, shielding gas, welding speed

1 UVOD

Izvršna svojstva poput visoke čvrstoće, niske gustoće te otpornosti koju iskazuje prema koroziji najvažnija su svojstva zbog kojih titanij danas širi područje primjene u različitim granama industrije. Primjeri uključuju zrakoplovnu i automobilsku industriju te brodogradnju i medicinu, a sve češće je primjena i u arhitekturi. Iako je relativno visoka cijena ograničila upotrebu, pravilnim iskorištavanjem svojstava koje pruža pronađene su mnoge primjene. [1, 2]

Glavna podjela titanijevih legura vrši se prema mikrostrukturnom stanju, pa tako ovisno o udjelu unutar mikrostrukture razlikuju se različiti tipovi legure. Svaki od tipova legura i njihova svojstva biti će opisani u radu. Upravo ovisno o mikrostrukturnom stanju, svojstva titanijevih legura mogu značajno varirati. Ono je određeno pak vrstom i udjelom legiranih dodataka pa će u sklopu rada biti pojašnjena njihova uloga pri promjeni mikrostrukturnog stanja. [1, 2]

Osim utjecaja na mehanička svojstva mikrostruktura utječe i na zavarljivost. Određene mikrostrukture prilikom zagrijavanja prelaze temperature prekrystalizacije čime su im narušena mehanička svojstva u odnosu na osnovni materijal. Različitim postupcima toplinske obrade moguće je ujednačiti svojstva materijala međutim to poskupljuje proces proizvodnje pa je ponekad ispravnim izborom materijala bolje izbjeći ovakve scenarije. Legure titanija mogu se spajati pomoću nekoliko različitih postupaka uključujući TIG, MIG, elektrootporno zavarivanje, zavarivanje elektronskim mlazom, zavarivanje laserom i drugi. Specifičnosti svakog opširnije će biti opisani unutar rada. [1, 2]

Opširnije je opisan TIG postupak zavarivanja s obzirom na to da se u praksi najčešće susreće kada je u pitanju zavarivanje titanija. Kao i kod drugih postupaka u odnosu na druge materijale postoje određene specifičnosti kada je riječ o titaniju koje treba imati na umu.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je ispitivanje koje je za cilj imalo ustanoviti utjecaj brzine zavarivanja i korištenog zaštitnog plina na dubinu penetracije kod TIG postupka zavarivanja titanija.

2 TITANIJ I NJEGOVE LEGURE

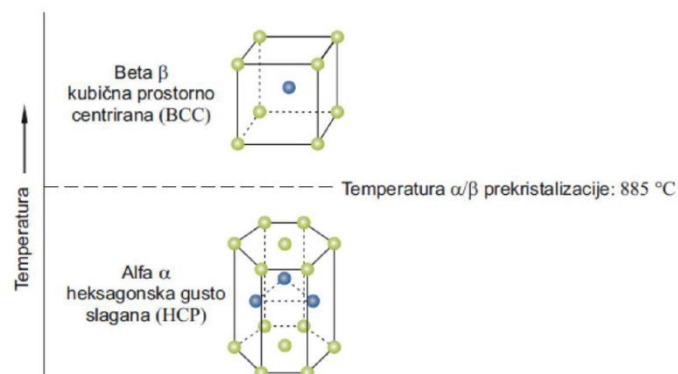
2.1 Općenito

Titanij i njegove legure sve su zastupljeniji konstrukcijski materijali zahvaljujući visokoj čvrstoći, niskoj gustoći i visokoj otpornosti na koroziju. U uvjetima u kojima spomenute karakteristike dolaze do izražaja titanij sve češće mijenja čelik i niklove legure. U prirodi se nalazi kao rutil (TiO_2) i ilmenit (FeTiO_3). [1, 2, 3]

Postupak dobivanja titanija i njegovih legura odvija se u nekoliko faza. Prva faza je dobivanje granula koje se potom miješaju s legirnim dodacima ako se radi o proizvodnji legura. Razlikuju se α , $\alpha+\beta$ i β legure. Zatim slijedi prešanje u odgovarajući oblik i zavarivanje otpresaka u elektrode duljine 4 do 5 m koje se tale u vakuumskim elektrolučnim pećima. Kako bi se postigla maksimalna homogenost, dobiveni ingoti se ponovno pretaljuju pri čemu ingoti dobiveni prvim taljenjem služe kao elektrode za drugo taljenje. Slijedi toplo kovanje, tokarenje za otklanjanje površinskih onečišćenja i rezanje na potrebne dimenzije za daljnju preradu u konačne proizvode postupcima obrade deformiranjem ili odvajanjem čestica i zavarivanjem. [3, 4]

2.2. Svojstva

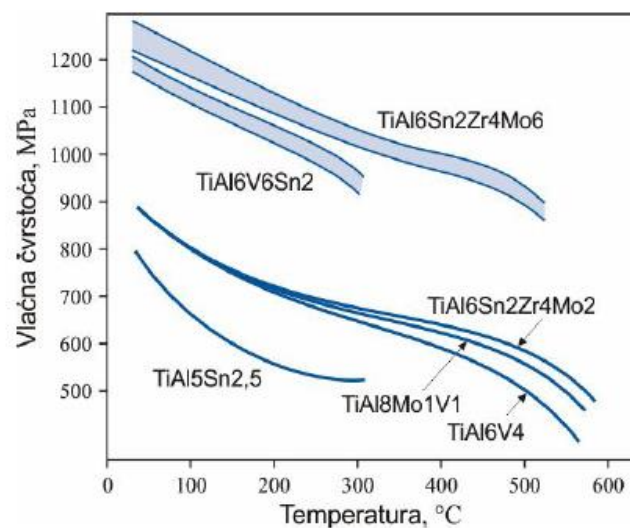
Ovisno o vrsti i mikrostrukturnom stanju, svojstva titanijevih legura mogu značajno varirati. Spomenuto mikrostrukturno stanje određeno je pak vrstom i udjelom legirnih dodataka. Bitan utjecaj na titanijeva svojstva imaju alotropske modifikacije kristalne rešetke s obzirom na to da se radi o polimorfnom materijalu. Na sobnoj temperaturi titanij ima heksagonalnu gusto slaganu (HCP) rešetku, α -titanij, prikazanu na slici 1. Na temperaturi od 885 °C rešetka prelazi u kubičnu prostorno centriranu (BCC) zvanu β -titanij, također prikazanu na slici 1, koja se zadržava do tališta. [1, 2, 5]



Slika 1: Kristalne rešetke čistog titanija [1]

Razlozi primjene titanija su [1]:

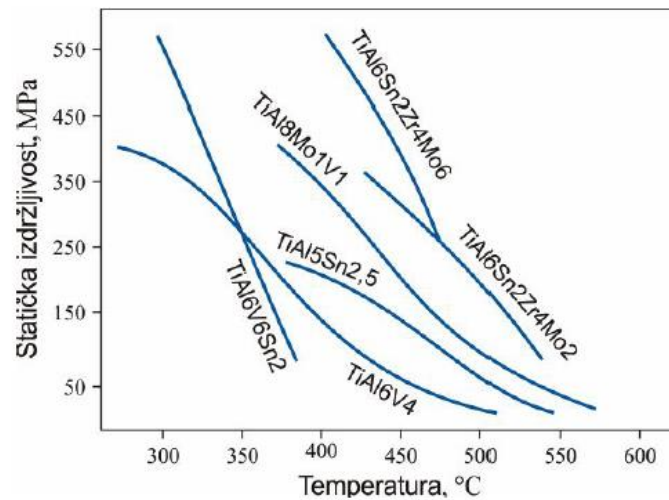
- Visoka čvrstoća; Vrijednosti vlačne čvrstoće kao i granice razvlačenja su vrlo visoke osobito kod toplinski obradljivih precitipacijski očvrnutih legura.
- Relativno niska gustoća; S gustoćom od oko 4500 kg/m^3 titanijeve legure dvostruko su lakše od čelika i niklovi superlegura što im daje odličan omjer čvrstoće i gustoće.
- Visoka specifična čvrstoća; Visoka čvrstoća u odnosu na masu omogućuje titanijevim legurama da supstituiraju čelik u mnogim primjenama gdje je odlučujuća čvrstoća i dobra lomna žilavost. Visoku specifičnu čvrstoću zadržavaju u širokom području temperatura od $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+550 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Visoka dinamička izdržljivost; Ti-legure imaju mnogo bolju dinamičku izdržljivost od Al-legura.
- Toplinska stabilnost; Legure titanija postoje su do temperatura $+315 \text{ }^\circ\text{C}$ odnosno $+600 \text{ }^\circ\text{C}$, ovisno o tipu legure, prikazano na slici 2.



Slika 2: Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama za odabrane Ti-legure [1]

- Korozijska postojanost; Korozijska otpornost titanijevih materijala znatno je bolja od aluminijevih legura i čelika. Titanijeve legure su visoko postojane u različitim agresivnim medijima kao što su kloridne otopine, morska voda i kiseline. Razlog tome je vrlo stabilna i postojana, čvrsto prionjiva oksidna prevlaka koja nastaje na površini metala u oksidirajućoj okolini.

- Odlična biokompatibilnost; Ti i njegove legure otporne su na djelovanje tjelesnih tekućina što im daje značajnu prednost u primjeni u medicini.
- Dobra otpornost na puzanje; Određene legure titanija (α legure) posjeduju znatnu otpornost na puzanje. Statička izdržljivost nekih Ti-legura prikazana je na slici 3.



Slika 3: Statička izdržljivost nakon 150 sati opterećenja za odabrane Ti-legure [1]

U tablici 1 prikazana su fizikalna i mehanička svojstva titanija.

Tablica 1: Fizikalna i mehanička svojstva titanija [3]

| | |
|---|---------|
| Gustoća [kg/m ³] | 4500 |
| Talište [°C] | 1670 |
| Modul elastičnosti [N/mm ²] | 110 000 |
| Toplinska rastezljivost [10 ⁻⁶ /K] | 9 |
| Vlačna čvrstoća* [N/mm ²] | 250-700 |
| Istezljivost* [%] | >10 |

*ovisno o stanju obrade i udjelu nečistoća

Osim spomenutih svojstava bitno je spomenuti i koeficijent toplinske vodljivosti $\lambda = 16,75 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Njegov koeficijent toplinske rastezljivosti niži je od onog za čelik i duplo manji od aluminijevog što osigurava visoku dimenzijsku postojanost dijelova od titanija. Dijelovi od titanija pokazuju i veću krutost od aluminijevih, a manju od čeličnih. [1]

Sposobnost hladnog oblikovanja je ograničena i ako se zahtijevaju veći stupnjevi deformacije potrebna su česta međužarenja. Pri višim temperaturama oblikovljivost je bolja ali se pri tom ne smije prijeći 950 °C zbog velikog afiniteta titanija prema kisiku, vodiku, dušiku i ugljiku. Pri toplinskoj obradi ili tijekom deformiranja na zraku površina se prekriva oksidnom prevlakom koju je potrebno naknadno mehanički ukloniti. Zato se sitni dijelovi toplinski obrađuju u vakuumu ili zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Titanij je teško obradljiv odvajanjem čestica jer je vrlo žilav pa se lijepi a postoji opasnost od zapaljenja strugotine. Sve vrste titanijevih legura dobro su zavarljive u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumu. [1]

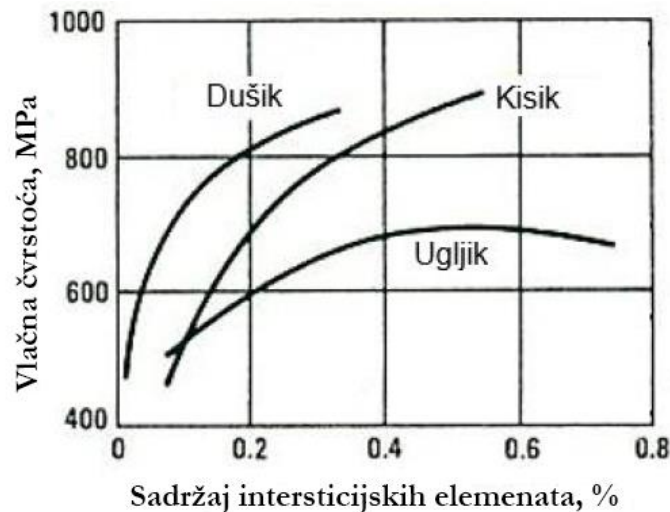
2.3 Nelegirani (tehnički) titanij

Tehnički čist titanij sadrži između 98,9 % i 99,5 % Ti. Ostatak čine nečistoće. U najvećoj mjeri nečistoće su kisik i željezo te imaju značajan utjecaj na mehanička svojstva kao što je prikazano u tablici 2. Vlačna čvrstoća tehničkog titanija raste s porastom udjela kisika i željeza. [3, 5]

Tablica 2: Sastav i mehanička svojstva nekoliko komercijalnih razreda čistog titanija [4]

| Oznaka | Re [MPa] | Rm [MPa] | Maks. sadržaj nečistoća [%] | | | | | Sadržaj legirnih elemenata [%] | | | | |
|----------------|-------------|-------------|-----------------------------|------|-------|-----|------|--------------------------------|----|----|----|--------|
| | | | N | C | H | Fe | O | Al | Sn | Zr | Mo | Ostali |
| ASTM razred 1 | 170 | 240 | 0,03 | 0,08 | 0,015 | 0,2 | 0,18 | - | - | - | - | - |
| ASTM razred 2 | 280 | 340 | 0,03 | 0,08 | 0,015 | 0,3 | 0,25 | - | - | - | - | - |
| ASTM razred 3 | 380 | 450 | 0,05 | 0,08 | 0,015 | 0,3 | 0,35 | - | - | - | - | - |
| ASTM razred 4 | 480 | 550 | 0,05 | 0,08 | 0,015 | 0,5 | 0,4 | - | - | - | - | - |
| ASTM razred 7 | 280 | 340 | 0,03 | 0,08 | 0,015 | 0,3 | 0,25 | - | - | - | - | - |
| ASTM razred 11 | 170 | 240 | 0,03 | 0,08 | 0,015 | 0,2 | 0,18 | - | - | - | - | - |

Dušik i ugljik koji su prisutni u manjoj mjeri također imaju utjecaj na svojstva. Utjecaj dušika, kisika i ugljika na vlačnu čvrstoću prikazan je na slici 4. Vlačna čvrstoća povisuje se hladnim oblikovanjem. Može se zaključiti da je titanij zapravo legura titanija s elementima koji tvore uključinske kristale mješance (kisik, vodik, dušik, ugljik) i željezom. [3]



Slika 4: Utjecaj intersticijskih elemenata na čvrstoću nelegiranog titanija [1]

Tehnički titanij je otporan na mnoge kiseline (osim HF, H_3PO_4 i koncentriranu H_2SO_4) i lužine. Najčešće koristi u primjenama koje zahtijevaju visoku otpornost na koroziju te oblikovljivost, osobito ako se radi o primjeni kada čvrstoća materijala nije presudna. Visoka topljivost intersticijskih elemenata kisika i dušika specifične su za titanij u usporedbi s drugim metalima ali ta specifičnost stvara i poteškoće zbog oksidacije kod zagrijavanja. Dolazi i do otvrdnuća površine koje je posljedica difuzije kisika i dušika u površinske slojeve. Pri tome se formira površinski otvrdnuti α -sloj koji se mora ukloniti nekim od mehaničkih postupaka iz razloga što smanjuje dinamičku izdržljivost i duktilnost. [1, 3]

Legiranjem se tvore intersticijski i supstitucijski kristali mješanci, a deformirana kristalna rešetka rezultira povećanom čvrstoćom. Dodatkom legirnih elemenata mijenjaju se udjeli α i β faze kao i temperatura α/β prekrystalizacije. Elementi koji povisuju temperaturu α/β prekrystalizacije stabiliziranjem α faze nazivaju se α -stabilizatorima i uključuju ugljik, kisik, dušik, aluminij i kositar. Elementi koji snižavaju temperaturu prekrystalizacije i time stabiliziraju β fazu pri nižim temperaturama poznati su kao β -stabilizatori. [1]

Beta stabilizatori se dijele na β izomorfne elemente (molibden, vanadij, niobij i tantal) koji imaju visoku topivost u titaniju i β eutektoidne elemente (mangan, krom, silicij, željezo, kobalt, nikal i bakar) ograničene topljivosti koji formiraju intermetalne spojeve. Kositar i cirkonij se smatraju neutralnim elementima jer oni nemaju utjecaja na temperaturu prekrystalizacije ali s obzirom na to da pridonose čvrstoći, česti su legirni dodaci. [1]

2.4 Alfa (α) legure

Glavni legirni element u α legurama je aluminij. Aluminij naj snažnije djeluje u pogledu povišenja čvrstoće legure. Zavarljivost, žilavost, čvrstoća i stabilnost pri povišenim temperaturama glavne su karakteristike α legura. Nasuprot onima s BCC rešetkom, u njima je brzina difuzije kisika, dušika i ugljika, tj. elemenata koji uzrokuju krhkost znatno manja. Zbog toga imaju prednost za primjene pri višim temperaturama, a imaju i visoku otpornost prema puzanju u području temperatura 315 °C do 590 °C. Za razliku od β legura, α legure nisu toplinski očvrstive. Oblikovanje je otežano te imaju dobru lomnu žilavost. Loša oblikovljivost može rezultirati većoj sklonosti greškama pri oblikovanju. Iako se češće upotrebljavaju pri povišenim temperaturama, zahvaljujući heksagonalnoj gusto slaganoj (HCP) rešetci, koja osigurava žilavost i čvrstoću pri niskim temperaturama dobro se ponašaju i u takvim uvjetima. [1, 3, 4]

Postoji i detaljnija podjela legura titanija koja razlikuje α i približno α legure. U toj podjeli približno α legure sadrže do 10% β -faze dok α legure ne sadrže β -fazu. Navedeni postotak β -faze dolazi od prisutnosti malog udjela (1-2%) β -stabilizatora. β -faza poboljšava čvrstoću i oblikovljivost legura te predstavlja kompromis između svojstava kao što su visoka čvrstoća $\alpha+\beta$ legura i dobre otpornosti prema puzanju α legura. [5]

Alfa legure se koriste uglavnom u kemijskoj i procesno energetske industriji radi prije spomenute visoke otpornosti na koroziju dok je najšira primjena približno α legura u uvjetima visokih temperatura kod zrakoplova. Približno α legure koriste se i za izradu dijelova plinskih turbina kao što su disk kompresora i lopatice kod plinskih turbina zrakoplovnog motora. Sastav i svojstva nekih od legura iz ove skupine prikazani su u tablici 3. [5]

Tablica 3: Sastav i svojstva nekih α i približno α legura titanija [2]

| Vrsta legure | Re [MPa] | Rm [MPa] | Maks. sadržaj nečistoća [%] | | | | | Sadržaj legirnih elemenata [%] | | | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-----------------------------|------|--------|------|------|-----------------------------------|-----|-----|-----|--------------------|
| | | | N | C | H | Fe | O | Al | Sn | Zr | Mo | Ostali |
| TiAl5Sn2,5 | 760 | 790 | 0,05 | 0,08 | 0,020 | 0,5 | 0,2 | 5 | 2,5 | - | - | - |
| TiAl5Sn2,5 ELI | 620 | 690 | 0,07 | 0,08 | 0,0125 | 0,25 | 0,12 | 5 | 2,5 | - | - | - |
| Ti Al8Mo1V1 | 830 | 900 | 0,05 | 0,08 | 0,015 | 0,3 | 0,12 | 8 | - | - | 1 | 1V |
| TiAl6Sn2Zr4Mo2 | 830 | 900 | 0,05 | 0,05 | 0,0125 | 0,25 | 0,15 | 6 | 2 | 4 | 2 | 0,08Si |
| TiAl6Nb2Ta1Mo0,8 | 690 | 790 | 0,02 | 0,03 | 0,0125 | 0,12 | 0,1 | 6 | - | - | 1 | 2 Nb, 1 Ta |
| TiAl2,25Sn11Zr5Mo1 | 900 | 1000 | 0,04 | 0,04 | 0,008 | 0,12 | 0,17 | 2,25 | 11 | 5 | 1 | 0,2 Si |
| TiAl5,8Sn4Zr3,5Nb0,7 Mo0,5Si0,35 | 910 | 1030 | 0,03 | 0,08 | 0,006 | 0,05 | 0,15 | 5,8 | 4 | 3,5 | 0,5 | 0,7 Nb, 0,35 Si |

2.5 Alfa+beta ($\alpha+\beta$) legure

Ove legure čine glavni dio proizvodnje titanijevih legura. Među njima je i TiAl6V4 koja se koristi u količini jednakoj svim ostalim titanijevim materijalima. ($\alpha+\beta$) legure posjeduju najbolju kombinaciju mehaničkih svojstava i primjenjive su pri temperaturama 315 °C do 400 °C. Iako posjeduju vrlo dobra mehanička svojstva nedostatak su im loša svojstva pri povišenim temperaturama u odnosu na α i približno α legure. Upravo zbog toga se mogu samo kratkotrajno izlagati povišenim temperaturama premda nisu otporne puzanju. U odnosu na α i približno α legure imaju bolju oblikovljivost. [1, 3, 5]

Alfa+beta legure sadrže 4-16 % β -stabilizatora. Pri sobnoj temperaturi njihova mikrostruktura tipično sadrži 10-20 % β -faze. Moguć je i udio do 50 % β -faze. Čvrstoća ove grupe titanijevih legura ovisi o udjelima α i β -faza i o legirnim elementima otopljenim u njima kao i efektima toplinske obrade koja se temelji na metastabilnosti, tj. raspadu metastabilne β -faze. [3, 4, 5]

Povišenje čvrstoće $\alpha+\beta$ legura, kao i promjena drugih svojstava može se postići toplinskom obradom. Postupak je doduše vrlo osjetljiv jer nepravilnim provođenjem može doći do pojave krhkosti radi izlučivanja metastabilne prijelazne ω -faze. [3, 4]

Najvažnija, ranije spomenuta legura TiAl6V4 sadrži 90% Ti, 6% Al i 4% V. Razvijena je 50-ih godina 20-og stoljeća te ima dobra mehanička svojstva i dobru obradivost. Radi tog razloga ona je standardna legura s kojom se uspoređuju ostale titanijeve legure. [1]

Primjenu nalazi kod izrade diskova i lopatica plinske turbine mlaznog motora te elemenata okvira zrakoplova. TiAl6V4 legura može se toplinski obraditi na jedan od sljedećih načina: [1]

1. Meko žarenje – mekim žarenjem se postiže vlačna čvrstoća od približno 900 MPa, dobra otpornost na umor, osrednja lomna žilavost i umjerena brzina rasta napukline. Ovaj tip toplinske obrade je najčešći.
2. Rekristalizacijsko žarenje – koristi se za dijelove koji zahtijevaju povećanu otpornost na pojavu oštećenja. Njime se neznatno snižava čvrstoća i dinamička izdržljivost, a poboljšava lomna žilavost i usporava brzina rasta napukline.
3. Betatizacijsko žarenje – primjenjuje se u slučaju kada je potrebno maksimalno povećati lomnu žilavost i usporiti rast napukline. Bitno je spomenuti da ovo žarenje značajno snižava vrijednost dinamičke izdržljivosti.
4. Rastopno žarenje i dozrijevanje – ovaj postupak osigurava maksimalnu čvrstoću tako da se koristi za dijelove koji zahtijevaju vlačnu čvrstoću od 1100 MPa i veću.

U tablici 4 su navedene neke $\alpha+\beta$ legure s pripadajućim svojstvima.

Tablica 4: Sastav i svojstva nekih $\alpha+\beta$ legura titanija [2]

| Vrsta legure | Re [MPa] | Rm [MPa] | Maks. sadržaj nečistoća [%] | | | | | Sadržaj legirnih elemenata [%] | | | | |
|-------------------|-------------|-------------|-----------------------------|------|--------|------|------|--------------------------------|-----|----|----|------------------|
| | | | N | C | H | Fe | O | Al | Sn | Zr | Mo | Ostali |
| TiAl6V4 | 830 | 900 | 0,05 | 0,1 | 0,0125 | 0,3 | 0,2 | 6 | - | - | - | 4V |
| TiAl6V4 ELI | 760 | 830 | 0,05 | 0,08 | 0,0125 | 0,25 | 0,13 | 6 | 2,5 | - | - | 4V |
| TiAl6V6Sn2 | 970 | 1030 | 0,04 | 0,05 | 0,015 | 0,1 | 0,2 | 3 | 2 | - | - | 0,75 Cu, 6 V |
| TiAl6Sn2Zr4Mo6 | 1100 | 1170 | 0,4 | 0,4 | 0,0125 | 0,25 | 0,15 | 6 | 2 | 4 | 6 | - |
| TiAl5Sn2Zr2Mo4Cr4 | 1055 | 1125 | 0,04 | 0,05 | 0,0125 | 0,3 | 0,13 | 5 | 2 | 2 | 4 | 4 Cr |
| TiAl6Sn2Zr2Mo2Cr2 | 965 | 1035 | 0,03 | 0,05 | 0,0125 | 0,25 | 0,14 | 5,7 | 2 | 2 | 2 | 2 Cr, 0,25 Si |
| TiAl3V2,5 | 520 | 620 | 0,015 | 0,05 | 0,015 | 0,3 | 0,12 | 3 | - | - | - | 2,5 |
| TiAl4Mo4Sn2Si0,5 | 960 | 1100 | 0,04 | 0,2 | 0,0125 | 0,2 | 0,14 | 4 | 2 | - | 4 | 0,5 Si |

TiAl6V4 ELI legura s niskim sadržajem kisika (< 0,13 %) ima visoku lomnu žilavost. Koristi se za lomno kritične elemente te pri niskim temperaturama. ELI legure općenito posjeduju oko 25 % veću lomnu žilavost, ali i manju čvrstoću od komercijalnih titanijevih legura. [1]

2.6 Beta (β) legure

Beta legure sadrže elemente poput vanadija, niobija i molibdena koji snižavaju temperaturu α/β prekrystalizacije i tako potiču razvoj prostorno centrirane kubične (BCC) rešetke β -faze. Beta legure osjetljivije su na toplinsku obradu, imaju bolju duktilnost i žilavost u žarenom stanju te znatno bolju oblikovljivost u odnosu na α i $\alpha+\beta$ legure. Osim što ih je u odnosu na α legure lakše oblikovati također je u to moguće obaviti u širem temperaturnom području. Imaju dobru zavarljivost, visoko su prokaljive, pokazuju visoku lomnu žilavost i dobru otpornost rastu napukline ali su ograničeno primjenjive pri povišenim temperaturama (do 370 °C) zbog opasnosti od puzanja. Glavni nedostatak ovih legura je krhkost pri niskim temperaturama te povišena gustoća zbog udjela elemenata koji se dodaju radi stabilizacije β -faze. [1, 4]

Iako osjetljive na toplinsku obradu, β legure njome mogu postići visoku čvrstoću, osobito u hladnom stanju. Toplinsko očvršnuće ostvaruje se rastopnim žarenjem i dozrijevanjem. Određene legure iz ove grupe posjeduju visoki omjer čvrstoća/gustoća te visoku duktilnost. Gustoća ovih legura povećana je dodatkom kroma i vanadija, teških metala visoke gustoće, koji se dodaju radi stabilizacije β -faze. Sastav i svojstva nekih od legura iz ove skupine prikazani su u tablici 4. [1, 3]

Tablica 5: Sastav i svojstva nekih β legura titanija [2]

| Vrsta legure | Re [MPa] | Rm [MPa] | Maks. sadržaj nečistoća [%] | | | | | Sadržaj legirnih elemenata [%] | | | | |
|----------------------|-------------|-------------|--------------------------------|------|-------|------|------|-----------------------------------|----|----|----|--------------------|
| | | | N | C | H | Fe | O | Al | Sn | Zr | Mo | Ostali |
| TiV10Fe2Al3 | 1100 | 1170 | 0,05 | 0,05 | 0,015 | 2,5 | 0,16 | 3 | - | - | - | 10V |
| TiAl3V8Cr6Mo4Zr4 | 830 | 900 | 0,03 | 0,05 | 0,020 | 0,25 | 0,12 | 3 | - | 4 | 4 | 6 Cr, 8 V |
| TiV15Al3Cr3Sn3 | 985 | 1096 | 0,05 | 0,05 | 0,015 | 0,25 | 0,13 | 3 | 3 | - | - | 15 V, 3 Cr |
| TiMo15Al3Nb2,7Si0,25 | 793 | 862 | 0,05 | 0,05 | 0,015 | 0,25 | 0,13 | 3 | - | - | 15 | 2,7 Nb, 0,25 Si |

Ističe se specijalno razvijena legura TiMo15Al3Nb2,7Si0,25 koja je razvijena radi oksidacijske postojanosti na temperaturama do 650 °C i namijenjena je izradi metalnih matrica kompozita za visoke temperature. Iako se radi o β leguri, ima prihvatljivu otpornost na puzanje. Radi se o jedinoj leguri titanija koja je otporna na hidraulička ulja koja se između ostalog rabe u komercijalnim zrakoplovima. [1]

Ova svojstva omogućuju i primjenu ove legure za ispušne sustave motora, uglavnom onda kada je potrebno maksimalno smanjiti težinu komponente kao što je to primjerice kod sportskih automobila ili trkaćih motocikala. [1]

2 ZAVARIVANJE TITANIJA I NJEGOVIH LEGURA

2.1 Općenito

Titanij se smatra dobro zavarljivim, no treba obratiti veliku pozornost na čistoću površine i nužnost primjene inertnih plinova koji sprečavaju onečišćenje iz okoline. Određeni elektrolučni postupci poput MIG-a i TIG-a (prikazano na slici 5), zavarivanje plazmom, zavarivanje elektronskim mlazom, zavarivanje laserom, difuzijsko zavarivanje te zavarivanje trenjem su samo neki od korištenih postupaka. Nekoliko čimbenika utječe na zavarljivost titanija: njegova niska toplinska vodljivost sprječava odvođenje topline, niski koeficijent toplinskog istezanja pridonosi smanjenju napetosti uslijed zavarivanja, a zahvaljujući visokom specifičnom električnom otporu moguće ga je i elektrootporno zavarivati. Razvijene su i tehnike koje omogućuju zavarivanje titanija u relativno širokom rasponu uvjeta u radioni, u komori za zavarivanje ili na terenu. [2, 6, 7]



Slika 5: Primjena TIG postupka za zavarivanje cijevi izrađene od titanija [8]

Kada je riječ o zavarljivosti titanija i njegovih legura postoji određeni broj ograničenja i problema kojima je potrebno pridodati posebnu pozornost. Bilo koji oblik elektrolučnog zavarivanja titanija podrazumijeva zaštitu metala zavara i zone utjecaja topline od atmosfere uz pomoć inertnih plinova. S obzirom na to da se tijekom zavarivanja metal lokalno tali, potrebno je poduzeti odgovarajuće mjere kako ne bi došao u kontakt sa zrakom iz okoline s čijim elementima kao što su kisik i dušik lako stupa u reakciju. Osim toga zavar može biti onečišćen vodikom koji potiče iz vlage u zraku. Općenito, potrebno je obratiti pozornost da su okolina kao i sami obradak čisti kako bi se izbjeglo povećanje krhkosti metala. [2, 6, 7]

2.2 Zavarljivost i utjecaj zavarivanja na mikrostrukturu legura

Sastav legure i njena mikrostruktura određuju zavarljivost. Općenito zavarljivost titanijevih legura je proporcionalna s povećanjem udjela α faze i obrnuto proporcionalna porastu čvrstoće legure. Razlog tome je što se kod visokočvrstih legura svojstva zavara značajno razlikuju od onih osnovnog materijala i što dio takvih legura može sadržavati legirne elemente poput željeza i kroma, koji utječu na solidifikaciju i mehanička svojstva zavara. [2, 9, 10]

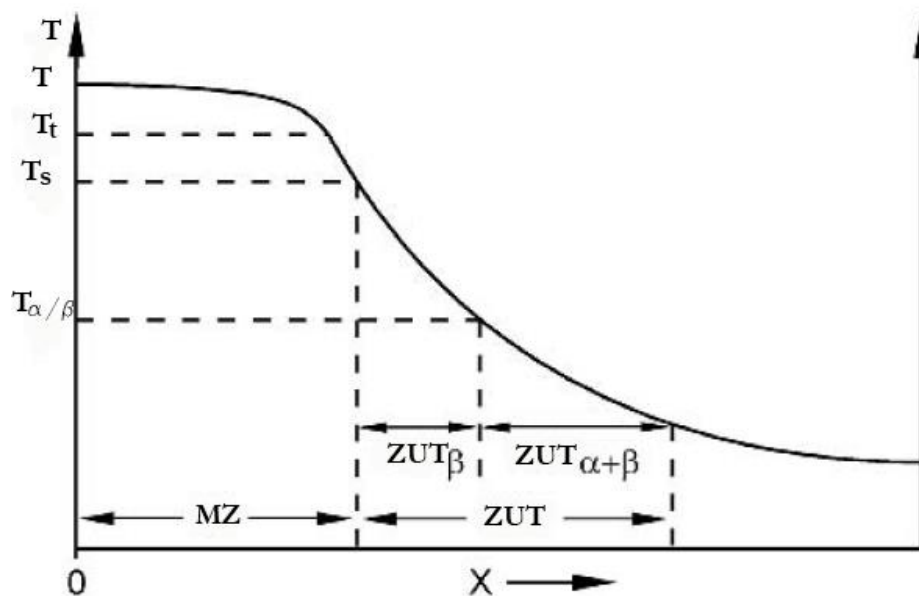
Osamdesetih godina prošlog stoljeća američka mornarica bila je zainteresirana za oplata podmornica napravljene od titanijevih legura kao odgovor na sovjetske podmornice klase Alfa. Interes je trajao oko pet godina tijekom čega su napravljena opširna istraživanja na velikim dijelovima srednje vlačne čvrstoće (700-750 MPa). Interes se smanjio kako je postajalo očito da su oplata tog tipa preskupe. Danas je većina zavarivanih radnih komada većih dimenzija u obliku spremnika za kemijsku i petrokemijsku industriju te je korišten materijal uglavnom tehnički titanij. [9]

Čisti titanij, približno α i neke $\alpha+\beta$ legure pokazuju dobru zavarljivost. Neke visokočvrste $\alpha+\beta$ legure, npr. TiAl6V6Sn2 i TiAl6Sn2Zr4Mo6, sklone su pukotinama pa nisu tako dobro zavarljive kao primjerice legura TiAl6V4. Metastabilne β legure imaju ograničenu zavarljivost jer metal zavara i zona utjecaja topline imaju tendenciju povećanja krhkosti zbog faznih transformacija koje se javljaju prilikom zavarivanja i naknadno hlađenjem nakon postupka zavarivanja. Zavarivanje titanija s drugim metalima dolazi uz velike poteškoće zbog povećanja krhkosti uslijed formiranja intermetalnih faza. [2, 9, 10]

Ako osnovni materijal sadrži legirne elemente kao što su željezo ili krom, ovi elementi će se segregirati na mjestima metala zavara koji se nakon obavljenog postupka najsporije hlade. Na dijelu zavara koji posljedično postaje bogat ovim elementima raste opasnost od nastanka pukotina. Radi se o središnjim dijelovima metala zavara, te se pucanje javlja usred toplinskih naprezanja. Predgrijavanje obratka je najbolji način za izbjegavanje ovakvih tipova pukotina kod titanijevih legura. [9]

Kod $\alpha+\beta$ legura metal zavara te dijelovi zone utjecaja topline uz metal zavara uslijed prelaska temperature α/β prekrystalizacije mijenjaju mikrostrukturu pa tako i svojstva vezana uz mikrostrukturu. Kao posljedica, zavarivanje $\alpha+\beta$ legura rezultira različitim mehaničkim svojstvima ovisno o udaljenosti odabrane točke materijala od metala zavara. [9]

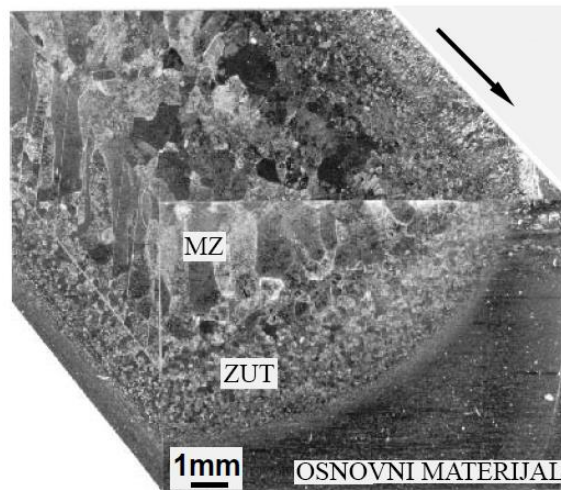
Mikrostrukturne promjene koje se javljaju kao posljedica elektrolučnog zavarivanja $\alpha+\beta$ legura prikazane su grafički na slici 6. Graf prikazuje lokalnu temperaturu u području metala zavara (MZ) i zone utjecaja topline (ZUT) u ovisnosti o udaljenosti od središta metala zavara. Označene temperature predstavljaju talište (T_t), temperaturu solidifikacije (T_s) te temperaturu α/β prekrystalizacije ($T_{\alpha/\beta}$). Granica koja određuje zonu metala zavara definirana je temperaturom solidifikacije. Granice koje omeđuju zonu utjecaja topline je teže odrediti ali je granica na kojoj unutar zone utjecaja topline nastupa α/β prekrystalizacija jasno određena temperaturom α/β prekrystalizacije. [9]



Slika 6: Shematski prikaz mikrostrukturnih promjena koje se javljaju kao posljedica elektrolučnog zavarivanja $\alpha+\beta$ legura [9]

Mehanička svojstva zavarenih spojeva rijetko dostižu vrijednosti osnovnog materijala, te obično odgovaraju svojstvima lamelarnih mikrostrukture obično dobivenih lijevanjem, a slična se javljaju pri zavarivanju. Tipično su vlačna čvrstoća, granica tečenja, duktilnost i dinamička čvrstoća zavara smanjene u odnosu na osnovni materijal. Ali svojstva koja su poboljšanja uslijed pojave lamelarne strukture u zoni utjecaja topline su otpornost na rast pukotine uslijed zamora materijala te otpornost na puzanje. Preduvjet je kvalitetan zavar. [10]

Primjer ovakve lamelarne strukture prikazan je na sljedećim slikama pod različitim uvećanjima. Uz lamelarnu mikrostrukturu, različitog stupnja grubosti ovisno o postignutoj temperaturi, koja se tipično javlja u zoni utjecaja topline vidljiva je i mikrostruktura metala zavara koja je izrazito pogrubljena. Na slici 7 prikazan je kompozit pri malom uvećanju koji prikazuje sve ranije navedene zone zavara određenog dijela. Vidljivo je da su beta zrna veća i stupolikog oblika. [9]



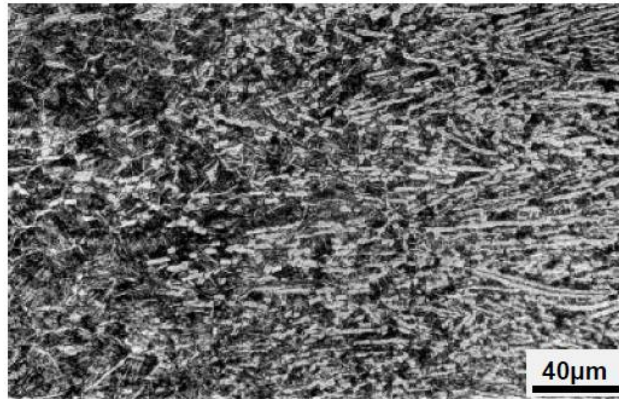
Slika 7: Kompozit mikrostrukture dijela zavarenog TIG postupkom [9]

Slika 8 prikazuje isti spoj samo pod većim uvećanjem. Prikazani su dijelovi zone utjecaja topline koji su zagrijani iznad temperature α/β prekrystalizacije. Lamelarna struktura u ovom dijelu vrlo je slična onoj metalu zavara, samo su beta zrna manje veličine. [9]



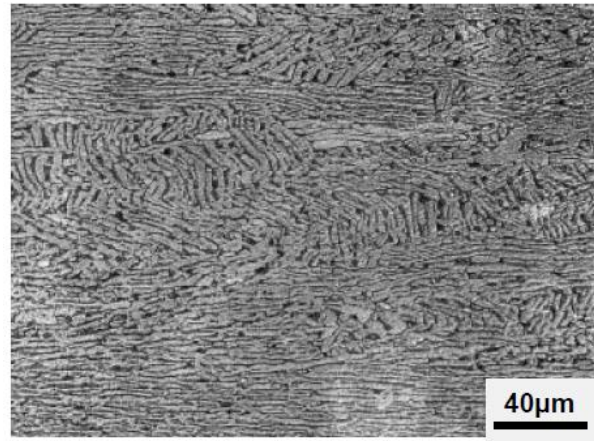
Slika 8: Lamelarna mikrostruktura u zoni utjecaja topline pod većim uvećanjem [9]

Slika 9 prikazuje dijelove zone utjecaja topline čija temperatura prilikom zavarivanja nije prešla temperaturu α/β prekrystalizacije. Vidljiva su sitnija zrna u odnosu na prethodno prikazane slike. Iako nije postignuta temperatura α/β prekrystalizacije i dalje je postignuta dovoljno visoka temperatura da se razvije lamelarna mikrostruktura. [9]



Slika 9: Dio zone utjecaja topline gdje nije premašena temperatura prekrystalizacije [9]

Osnovni materijal je prikazan na slici 10 radi usporedbe te se radi o tipičnoj žarenoj mikrostrukturi toplo valjane ploče koja se nije u potpunosti rekristalizirala. Kod tankih dijelova brzina gašenja može biti velika, rezultirajući visokočvrstom mikrostrukturuom kod $\alpha+\beta$ legura ili zadržavanjem β strukture kod β legura. Uobičajeno je reducirati zaostala naprezanja na oko 700 °C. Ako se naprezanja reduciraju na dijelu kojemu je površina završno obrađena granica je 550 °C zbog opasnosti od onečišćenja površine pri višim temperaturama, čak i ako se toplinska obrada provodi u vakuumu. [9]



Slika 10: Mikrostruktura osnovnog materijala [9]

Ranije spomenuto opadanje čvrstoće (u pravilu zbog djelovanja dušika) i smanjenje duktilnosti (zbog djelovanja kisika) izbjegava se odgovarajućom zaštitom od atmosfere ali zadržavanje svojstava osnovnog materijala, osobito duktilnosti postaje sve teže kako raste čvrstoća legura. Ove opasnosti su gotovo zanemarive kod tehničkog titanija ili legura manje čvrstoće kao što je Ti3Al2,5V. Pogrubljenje zrna pri visokim temperaturama na koje su legure osjetljive izbjegava se zavarivanjem uz mali unos topline. Pri hlađenju se mogu javiti toplinska naprezanja te uz prisutnost nepovoljne krhke strukture nastale upijanjem plinova postoji opasnost od hladnih pukotina. Smanjenjem sadržaja vodika na manje od 0.01 % hladne pukotine se mogu izbjeći. Drugim riječima, čistoća inertnog plina koja štiti zavar mora biti najmanje 99,99 %. [2, 9]

Premda većina titanijevih legura zahtijeva smanjenje zaostalih naprezanja nakon zavarivanja, posebno pri dugotrajnom dinamičkom opterećenju koje uzrokuje umor, razredi čistog titanija 1, 2 i 3 ne zahtijevaju naknadno reduciranje napetosti nastalih uslijed zavarivanja, osim ako se ne radi o visoko napregnutom dijelu u reducirajućoj atmosferi. [2]

2.3 Korišteni postupci zavarivanja

Neke uobičajene tehnike kao što je ručno elektrolučno zavarivanje (REL) nisu prikladne zbog toga što titanij lako stupa u reakciju s plinovima i troškom koji nastaju zavarivanjem. Budući da kisik, vodik i dušik iz atmosfere uzrokuju krhkost, zavarivanje se mora provesti u zaštitnoj atmosferi (argon, helij) ili vakuumskoj komori. Značajke pojedinih postupaka dane su u tablici 6. [2]

Tablica 6: Relativna usporedba postupaka zavarivanja titanija [2]

| | TIG | MIG | Zavarivanje plazmom | EM |
|--|-----------------|-----------------|---------------------|----------------|
| Debljina materijala [mm] | 0,8-6,3 | 6,3-76,0 | 3,2-9,6 | do 76,0 |
| Jednostavnost postupka | Dobra | Zadovoljavajuća | Dobra | Izvrсна |
| Priprema žlijeba | Često | Uvijek | Ne | Ne |
| Automatizirani ili ručni postupak | Oba postupka | Automatizirani | Oba postupka | Automatizirani |
| Mehanička svojstva | Zadovoljavajuća | Zadovoljavajuća | Dobra | Izvrсна |
| Kvaliteta spoja | Dobra | Zadovoljavajuća | Izvrсна | Izvrсна |
| Cijena opreme | Niska | Visoka | Sredna | Vrlo visoka |
| Deformacije | Vrlo velike | Velike | Srednje | Vrlo male |

Općenito se poštuju dva principa. Svi metalni dijelovi koji su izloženi temperaturama većim od 200 °C trebaju biti zaštićeni inertnim plinom. Drugi princip nalaže izvođenje postupaka u vakuumskoj komori unutar koje je moguće dodatno upuhati inertni plin. Postupci TIG i MIG funkcioniraju poštujući ranije navedeno načelo dok zavarivanje elektronskim mlazom (EM) spada u standardni primjer postupka koji se izvodi prema potonjem načelu. TIG zavarivanje je najšire upotrebljavani postupak za zavarivanje titanijevih legura, te će u skladu s time biti opširnije opisan u zasebnom poglavlju, dok se postupci poput zavarivanja plazmom, elektrootpornog zavarivanja, zavarivanja elektronskim mlazom i zavarivanje laserom primjenjuju u posebne svrhe. [2, 10]

2.3.1 MIG zavarivanje

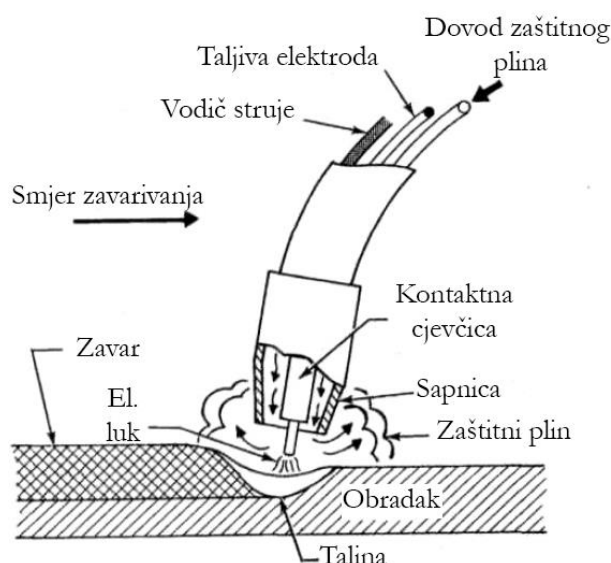
MIG (engl. *Metal inert gas*) zavarivanje koristi dodatni materijal u obliku namotaja žice koji je ujedno i taljiva elektroda. Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Glavna prednost korištenja MIG postupka je prikladnost zavarivanju spojeva gdje je razmak između dijelova koji se zavaruju relativno velik, obično u slučajevima kada se zavaruju deblji komadi. Ovakva situacija se nerijetko nalazi kod većih obradaka gdje je otežana priprema spoja. [9]

U slučajevima kada cijena dodatnog materijala nije prevelika te kada nije potrebna precizna priprema spoja MIG može biti ekonomski opravdan postupak za zavarivanje titanija i njegovih legura. Osobito je prikladan kada je zavareni spoj moguće ostvariti jednim prolazom ili manjim brojem prolaza u usporedbi s TIG postupkom. [9]

Mjere opreza koje su za MIG postupak vrlo slične TIG-u izuzetno su bitne u cilju dobivanja što je moguće kvalitetnijeg zavara. Kao što je ranije rečeno potrebno je inertnim plinovima osigurati zaštitu metala zavara i svih dijelova zagrijanih iznad 200 °C. Elektroda je kod ovog postupka spojena na plus pol istosmjernog izvora. Pozitivna elektroda je toplija nego negativni komad što osigurava taljenje žice u zavareni spoj. Dodatni materijal se preko dodavača žice pogoni kroz polikabel koji osim žice provodi i vodič električne energije te zaštitne plinove. [2, 10, 11, 12]

Prednost MIG-a je taljenje više metala u zavar po jedinici vremena uz istu jačinu struje. Za ploče deblje od 12 mm MIG je isplativija tehnika od TIG-a. Međutim, lošija stabilnost električnog luka može uzrokovati prskanje tijekom zavarivanja što smanjuje učinkovitost postupka. [2]

Zaštitni plinovi, u pravilu helij i argon, se na mjesto zavarivanja dovode kroz posebnu sapnicu prikazanu na slici 11, koja se nalazi oko kontakte cjevčice. Helij omogućava više temperature zavarivanja nego argon, a rezultat je bolja penetracija zavara te veće brzine zavarivanja. [2, 11]

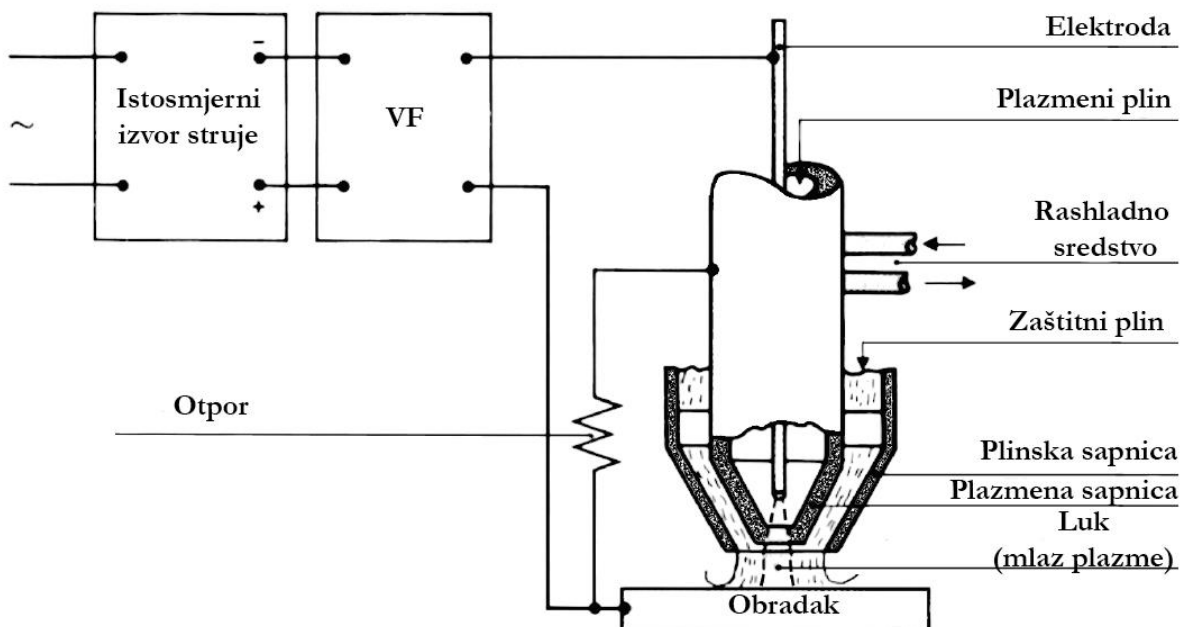


Slika 11: Prikaz procesa taljenja za MIG postupak [13]

2.3.2 Zavarivanje plazmom

Kod zavarivanja plazmom umjesto električnog luka izvor topline je plazma. Postupak je sličan TIG-u, iz kojeg se razvio, samo što je plazmeni luk ograničen mlaznicom koja povećava gustoću energije i temperaturu zavarivanja. Plazmeni mlaz se dobiva tlačenjem određenog plina (obično argon) kroz električni luk. Električni luk se uspostavlja između volframove elektrode koja je spojena na negativni pol izvora struje i radnog komada ili sapnice pištolja samog uređaja. Veća gustoća energije u odnosu na druge postupke omogućuje bolju penetraciju zavara i veće brzine zavarivanja. Iako sličan TIG-u, ovaj postupak je veoma koristan kao alternativa za MIG postupak s obzirom na to da u usporedbi s njime stvara veću zonu metala zavara i zonu utjecaja topline. [9, 11, 13]

Postupak se izvodi uz pomoć plazma pištolja koji nalikuje TIG pištolju, ali je složeniji jer osim kanala za plazmeni plin ima često i kanal za zaštitni plin, te obavezno sistem vodenog hlađenja. Shema sapnice i pištolja kod zavarivanja plazmom prikazana je na slici 12. Zavarivanje plazmom tipično unosi više energije u odnosu na sve elektro-lučne postupke, a osobito u odnosu na zavarivanje elektronskim mlazom. Zbog toga zavarivanje plazmom ima prednost u situacijama kada je potrebna velika penetracija. [9, 11]

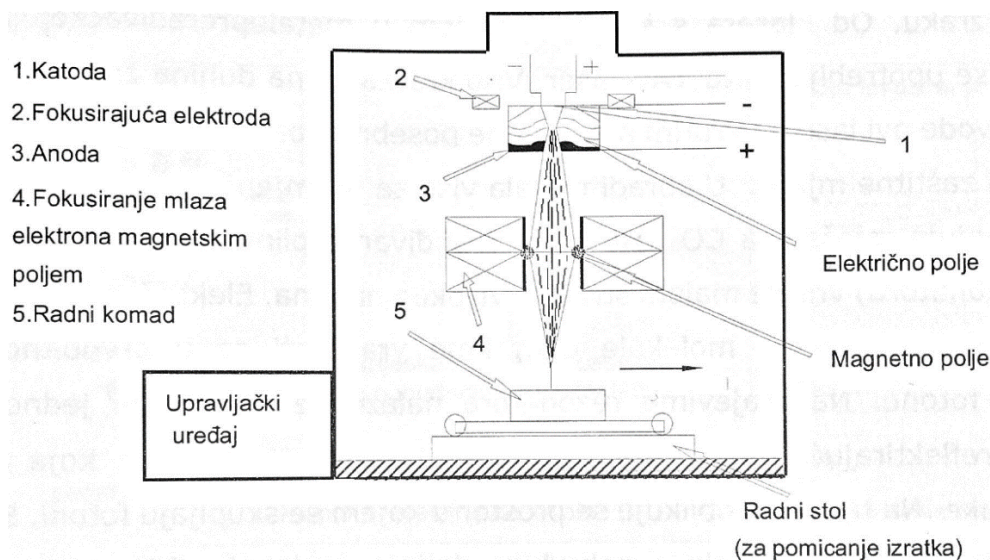


Slika 12: Shema sapnice i pištolja kod plazma zavarivanja [14]

2.3.3 Zavarivanje elektronskim mlazom (EM)

Zavarivanje elektronskim mlazom prikladno je za titanij i njegove legure jer se izvodi u vakuumskim komorama. Postupak rezultira veoma preciznim zavarom te je često korišten za zavarivanje dijelova u industrijama s najvišim zahtjevima za kvalitetu, osobito u zrakoplovnoj industriji. U tom pogledu, bolji je od TIG i MIG postupaka ali je i skuplji zbog ranije spomenute nužnosti izvođenja u vakuumskim komorama te zbog toga što je automatiziran. Još jedan nedostatak je da je veličina dijelova koji se mogu dobiti ovim postupkom ograničena veličinom vakuumskih komora. Zbog velike gustoće energije elektronskog snopa, toplinska penetracija je veoma mala. Rezultat je mala širina zone utjecaja topline u odnosu na penetraciju što znači i manju deformaciju dijela. Brzine zavarivanja su veoma velike, a odlična ponovljivost je zajamčena. [9, 10]

Postupak, prikazan na slici 13, koristi fokusiranu zraku elektrona visoke energije koja omogućuje velike dubine penetracije i zavarivanje debelih komada (do 76,0 mm). Druge prednosti su vrlo uski ZUT, male deformacije i čisti zavar budući da se zavarivanje provodi u vakuumskoj komori. Najveći nedostatak ovog postupka je visoka cijena opreme. [2]



Slika 13: Shema zavarivanja mlazom elektrona [11]

Zbog velike gustoće energije i uskog mlaza moguće je raditi zavare s potpunim provarom na pločama debljine 15 cm. Uski mlaz doduše zahtijeva precizno poravnanje dijelova koji će se zavarivati. Nakon ispravne pripreme spoja moguće je dobiti visokokvalitetne zavare s velikom penetracijom pri visokim brzinama zavarivanja. [9]

2.3.4 Zavarivanje laserom

Lasersko zavarivanje koristi koherentnu usmjerenu zraku svjetlosti visokog intenziteta koja stvara uski ZUT. Međutim, ovaj postupak je ograničen na limove i ploče debljine do 13 mm. Slično kao i zavarivanje elektronskim snopom, zavarivanje laserskim snopom ima prednosti nad konvencionalnim postupcima poput velike brzine zavarivanja, mogućnosti automatizacije, ponovljivosti te mogućnost izvođenja uskih zavara kao i male deformacije radnog komada. Zavarivanje laserskim snopom se može izvoditi u atmosferskim uvjetima i time se omogućuje izvođenje zavara na dijelovima većih dimenzija tj. nema ograničenja na dimenzije koje se javlja zbog nužnosti komore za zavarivanje kod zavarivanja elektronskim snopom. Kao i kod MIG i TIG zavarivanja, metal zavara i zonu utjecaja topline je potrebno zaštititi inertnim plinovima zbog reaktivnosti titanija s elementima iz zraka. Još jedna prednost ovog postupka je da se inače teško dostupna mjesta mogu zavariti primjenom leća, zrcala i optičkih vlakana koja reflektiraju laserski snop. Za ovaj postupak koriste se CO₂ i Nd:YAG laseri. [2, 9]

Dostupnost visokoenergetskih lasera je relativno nova te nije bilo toliko prilika za korištenje postupka na većim radnim komadima do sada. Iako ga se može smatrati zamjenom postupku zavarivanja elektronskim mlazom tek se treba dokazati jednaka moć penetracije kao kod potonjeg postupka. Iako je postupak djelotvoran pri zavarivanju titanija i njegovih legura nije prikladan za sve vrste metala poput aluminijskih s kojim zbog reflektivnosti površine ima problema sa spajanjem zrake. [9]

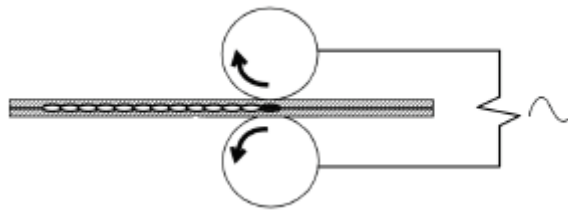
Za zavare na relativno malim dijelovima gdje je izuzetno bitna mala penetracija toplinske energije lasersko zavarivanje je veoma prikladno. Jedan od primjera je zavarivanje kućišta za srčane elektrostimulatore i za zavarivanje njihovih elektroda. U tom slučaju je izuzetno bitno izvesti kvalitetan zavar bez oštećenja unutarnjih dijelova. Razlog zbog kojeg se ovdje preferira lasersko zavarivanje nad zavarivanjem elektronskim snopom je što kod laserskog zavarivanja nema ionizirajućeg polja koje bi moglo oštetiti elektroničke dijelove unutar kućišta. [9]

2.3.5 Zavarivanje trenjem

Kod ovog postupka uslijed trenja između dva dijela koji se zavaruju njihovim intenzivnim trljanjem dolazi do zagrijavanja površina tako da se u konačnici dijelovi spajaju bez taljenja. Zbog toga kod ovog postupka nije potrebno štiti metal inertnim plinovima ili ga izvoditi u vakuumu. Za njegovu upotrebu posebno su pogodni valjkasti dijelovi poput vratila, a u posljednje vrijeme zavarivanje trenjem ima sve širu primjenu u izradi „nazubljenih“ diskova za kompresore plinskih turbina mlaznih motora. [10]

2.3.6 Elektrootporno zavarivanje

U skupinu elektrootpornog zavarivanja spadaju između ostalog točkasto i šavno zavarivanje, prikazano na slici 14, a na titaniju se ovi postupci primjenjuju kao i na drugim tipovima metala. Niska električna i toplinska vodljivost rezultira boljom zavarljivošću titanija ovim postupkom u odnosu na primjerice aluminij i mnoge ugljične i niskolegirane čelike. Jednako kao i kod elektrolučnih postupaka površina koja se zavaruje mora biti očišćena od svih oksida, prljavštine i masnoća. Mala udaljenost zavarenih površina u kombinaciji s veoma kratkim trajanjem ciklusa zavarivanja i pritiska na spoj umanjuju opasnost od kontaminacije zavarenog spoja elementima iz zraka. Radi tog razloga za ovaj postupak nije potrebna zaštita inertnim plinovima. Oprema i parametri zavarivanja su gotovo jednaki onima za austenitni nehrđajući čelik. Kao i kod svih postupaka važna je čistoća materijala. [2, 10]



Slika 14: Princip šavnog zavarivanja [14]

2.4 Pogreške u zavarenim spojevima titanija

2.4.1 Pukotine

Ako je prilikom provođenja postupka zavarivanja zagrijani metal izložen zraku vrlo će lako stupiti u reakciju s kisikom, dušikom, ugljikom i vodikom. Ovi mali intersticijski elementi ulaze u kristalnu strukturu i onemogućavaju plastičnu deformaciju te povećavaju čvrstoću uz znatan pad duktilnosti. Kada onečišćenje prelazi određenu granicu, naprezanja koja nastaju uslijed zavarivanja mogu rezultirati pucanjem materijala. α legure su osobito podložne pucanju uslijed onečišćenja jer intersticijski atomi iskrivljuju HCP rešetku alfa faze. [15]

Pukotine uzrokovane onečišćenjem moguće je izbjeći [15]:

1. Uklanjanjem površinskih onečišćenja s radnog komada četkom nehrđajućeg čelika ili brušenjem korištenjem brusne ploče od aluminijevog oksida ili silicijevog karbida pri čemu se preporučuje nova brusna ploča
2. Temeljito odmašćivanje radnog komada acetonom
3. Dobra zaštita inertnim plinovima i održavanje zaštite po zavarivanju dok se radni komad ne ohladi na temperaturu nižu od 260 °C
4. Korištenje zaštitnog plina s dovoljno niskom točkom rosišta i dovoljno malim udjelom kisika
5. Adekvatna zaštita vrućeg kraja dodatnog materijala kako ne bi stupio u reakciju s atmosferom

2.4.2 Povećanje krhosti uslijed onečišćenja vodikom

Uz prethodno spomenute pojave pukotina uslijed onečišćenja elementima iz atmosfere, vodik može uzrokovati i povećanje krhosti. Jedan od mehanizama koji se javlja je precipitacija titanijevih hidrida u blizini pukotina. Ako je u zavaru prisutna mikropukotina, vodikovi atomi će difundirati u vrh pukotine. Potom se na lokaciji javljaju intersticijska područja unutar kojih se smještaju atomi vodika. Pri prelasku kritične koncentracije vodika, titanijevi hidridi počinju precipitaciju ispred vrha pukotine dok istovremena difuzija vodika unutar pukotine može formirati dvoatomni plin uslijed čega raste koncentracija naprezanja na vrhu pukotine. Nakon nekog vremena hidridi razaraju dio ispred pukotine i posljedično ju šire. Nakon razaranja hidridi se ponovno dijele i difundiraju u novonastali vrh pukotine čime započinje novi proces razaranja. S obzirom na to da proces ovisi o vremenu i temperaturi mogu proći sati, dani, čak i mjeseci nakon zavarivanja prije no što pukotina postane vidljiva. Proces se sprječava minimiziranjem kontakta između vodika i metala zavara. Toplinska obrada po završetku zavarivanja pomaže u smanjenju zaostalih naprezanja i time usporava napredovanje pukotina. [15]

2.4.3 Pore

Pore pri zavarivanju titanijevih legura nastaju na stražnjoj strani metala zavara. Mikropore dvoatomnih plinova poput kisika i vodika su obično veličine od oko 1 μm. Formiraju se kada koncentracija monoatomnog kisika ili vodika dosegne kritičnu koncentraciju. Po formiranju mogu biti zarobljene ili se mogu spojiti s drugim mikroporama tvoreći makropore. Makropore mogu ostati zarobljene u materijalu ili mogu izaći na površinu metala zavara i nestati. [15]

Njihov nastanak se izbjegava adekvatnom zaštitom metala zavara od kisika i vodika tijekom postupka zavarivanja. Pod zaštitom se podrazumijeva čišćenje površine radnog komada prije zavarivanja i zaštita u obliku inertnih plinova prilikom samog postupka. Nastanak pora prisutan je pri manjim razinama onečišćenja od pukotina ali može biti indikator povećanja krhkosti uslijed onečišćenja vodikom. [15]

2.4.4 Pad duktilnosti

Određene legure titanija podložne su pucanju prilikom hlađenja s temperature α/β prekrizalizacije. Osobito su osjetljive $\alpha+\beta$ legure koje sadrže niobij umjesto vanadija kao β -stabilizator. Legura 6Al2Nb1Ta0,8Mo je najosjetljivija na pad duktilnosti te je velika vjerojatnost da će se pri hlađenju nakon zavarivanja u zavaru javiti pukotine. [15]

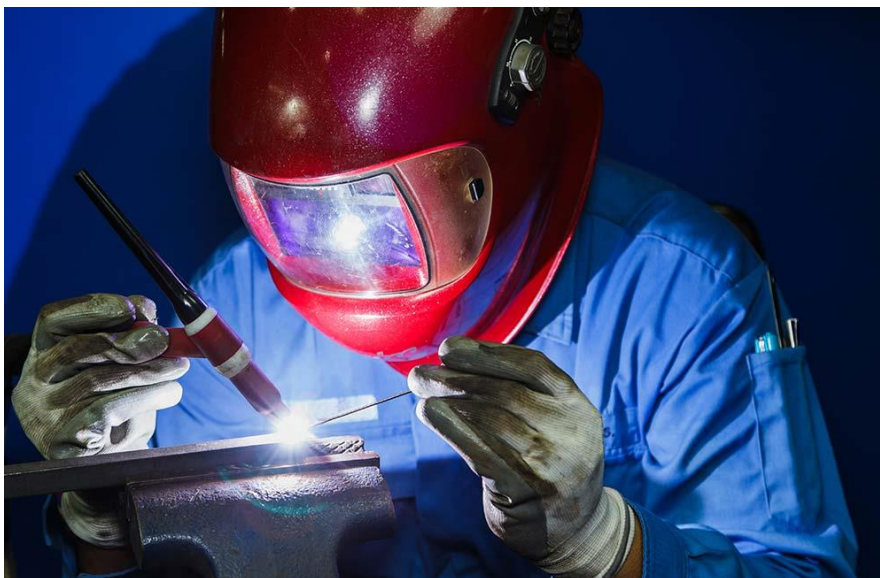
3 TIG ZAVARIVANJE

3.1 Općenito

TIG (engl. *Tungsten Inert Gas*) postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (argon, helij) ili rjeđe smjesi plinova. Moguć je i naziv WIG (engl. *Wolfram Inert Gas*) ili GTAW (engl. *Gas Tungsten Arc Welding*) [16]

Mjesto zavarivanja odnosno rastaljeni osnovni metal, dodatni materijal i zagrijani vrh elektrode štite se od štetnog atmosferskog djelovanja upuhivanjem inertnih plinova kroz sapnicu kroz koju prolazi netaljiva volframova elektroda. Volframova elektroda kod ovog postupka služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. [12]

Iako se spominje nekoliko ljudi koji su u različitim razdobljima radili na razvoju postupka, Russell Meredith prvi je u siječnju 1941. patentirao proizvodni alat koji je bio preteča TIG sustavu. Postupak je razvijen za zavarivanje legura na bazi magnezija za zrakoplovnu industriju. Daljnjim razvojem kroz primjenu različitih tipova gorionika, sapnica i proučavanja strujanja zaštitnog plina razvio se TIG postupak zavarivanja, prikazan na slici 15. Do razvoja zavarivanja trenjem TIG je bio najznačajniji postupak razvijen specifično za zrakoplovnu industriju. [16, 17, 18]



Slika 15: TIG postupak zavarivanja [19]

Neke prednosti korištenja TIG postupka zavarivanja [16, 20]:

1. Omogućava zavare visoke kvalitete, uobičajeno bez grešaka u spoju.
2. Nema prskanja i troske koja je prisutna kod drugih elektrolučnih postupaka.
3. Moguće je zavarivanje bez korištenja dodatnog materijala.
4. Minimalna količina štetnih plinova.
5. Mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima.
6. Izvrsna kontrola pri zavarivanju korijenskog prolaza.
7. Moguća je proizvodnja manje skupih autogenih zavara pri visokim brzinama zavarivanja.
8. Mogućnost zavarivanja radnih komada male debljine.
9. Dopušta preciznu kontrolu parametara zavarivanja.
10. Moguće je njime zavarivati većinu metala, uključujući spajanje raznovrsnih materijala.
11. Dopušta neovisnu kontrolu izvora topline i dodatnog materijala.

Neka ograničenja TIG postupka zavarivanja [16, 20]:

1. Učinak taljenja je niži u odnosu na unose moguće kod npr. MIG postupka.
2. Potrebna je veća vještina i znanje zavarivača u odnosu na neke druge postupke kao što je ručno elektrolučno zavarivanje ili MAG postupak.
3. Za radne komade većih debljina postupak je manje ekonomičan.
4. Otežana zaštita metala zavara na otvorenome.
5. Potencijalno viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova.

Potencijalne poteškoće koje se susreću prilikom TIG zavarivanja [20]:

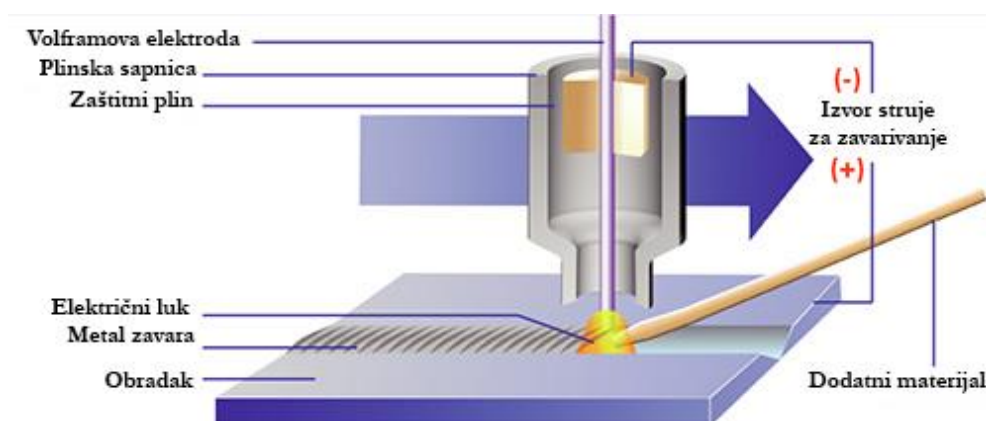
1. Uključci volframa koji su posljedica kontakta volframove elektrode s metalom zavara za vrijeme obavljanja postupka.
2. Kontaminacija metala zavara koja je moguća ako zaštita inertnim plinom nije adekvatno osigurana.
3. Niska tolerancija prema kontaminirajućim elementima kako za osnovni tako i dodatni materijal.
4. Mogućnost kontaminacije i poroziteta kao posljedica istjecanja vode za hlađenje pištolja kod primjene takve opreme.
5. Puhanje električnog luka ili njegovo skretanje, koje je moguće i kod drugih postupaka zavarivanja.

3.2 Princip rada

Kod TIG postupka zavarivanja toplina oslobođena u električnom luku uspostavljenom između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala tali osnovni, a ako je to potrebno i dodatni materijal. Iako se u početku mjesto zavarivanja štiti helijom, danas je češće u upotrebi argon. Inertni plin štiti zavar od štetnog djelovanja kisika i dušika iz okoline te olakšava ionizaciju električnog luka za koju je najbitniji nosilac. Netaljiva elektroda služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Iako se elektroda za vrijeme postupka ne smije taliti, uslijed erozije vrha, te njegovom prljanju u slučaju nehotičnog kontakta s radnim komadom, što se brušenjem mora ukloniti, ona se ipak postupno troši. Također, geometrija elektrode utječe na karakteristiku električnog luka. [12, 13, 16]

Sami električni luk se uspostavlja pritiskom na prekidač na pištolju preko posebnog visokonaponskog visokofrekventnog generatora. Kratak spoj se izbjegava jer oštećuje vrh elektrode čime se smanjuje stabilnost luka i jer time dolazi do uključivanja volframa u metal zavara s nepovoljnim posljedicama po mehanička svojstva spoja. Visoki napon nije opasan za zavarivača jer je frekvencije od nekoliko MHz. [12]

Dodatni materijal, ako je potreban, je obično u obliku šipke duljine oko 1 m, za ručne postupke ili u obliku namotane žice za automatizirane postupke. Tanki obratci (do 3-4 mm) mogu se sučeljeno zavarivati bez dodatnog materijala. Obratci veće debljine zahtijevaju pripremu spoja te korištenje dodatnog materijala. Postupak je prikazan na slici 16. [14]



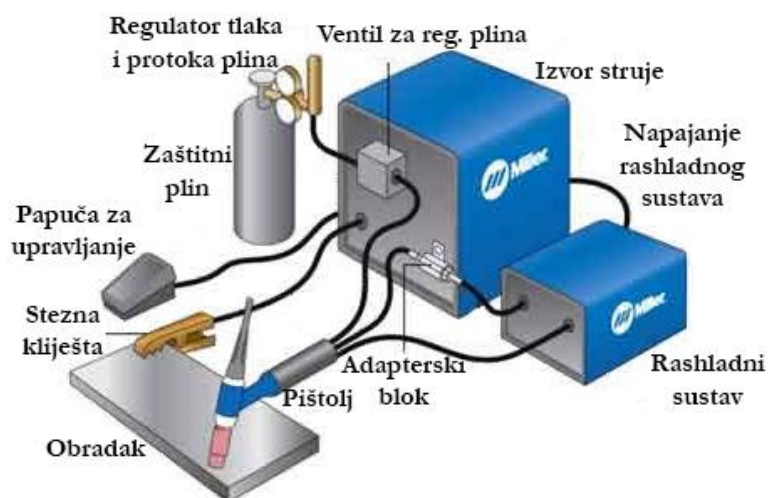
Slika 16: Prikaz elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnih plinova – TIG postupak zavarivanja [21]

3.3 Oprema za TIG postupak

3.3.1 Izvor struje

Jedna od osnovnih komponenata svakog sustava za zavarivanje, pa tako i TIG sustava, prikazanog na slici 17, je izvor struje. Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje, to jest ispravljači, motogeneratori i transformatori. Izbor vrste izvora struje ovisi uglavnom o tome što će se zavarivati. Kada je riječ o ručnom zavarivanju izvor struje treba imati strmo padajuću karakteristiku kako bi osigurao približno konstantnu struju zavarivanja neovisno o promjenama dužine luka uslijed pomicanja ruke zavarivača. Ako je riječ o mehaniziranom TIG zavarivanju koriste se izvori struje s ravnom karakteristikom kako bi se osigurala konstantna dužina luka. U slučaju zavarivanja titanija i njegovih legura koriste se istosmjerni izvori takvog polariteta da je elektroda negativna. Negativna elektroda je hladnija od pozitivnog komada te jaka struja koja njome teče rezultira dubokom penetracijom zavara. Kao što je ranije spomenuto, uz izvor struje bitan je i visokonaponski visokofrekventni generator za uspostavu električnog luka bez kontakta između vrha volframove elektrode i radnog komada. Visokofrekventni generator se spaja paralelno u krug struje zavarivanja te se smješta u sam izvor struje. [2, 12]

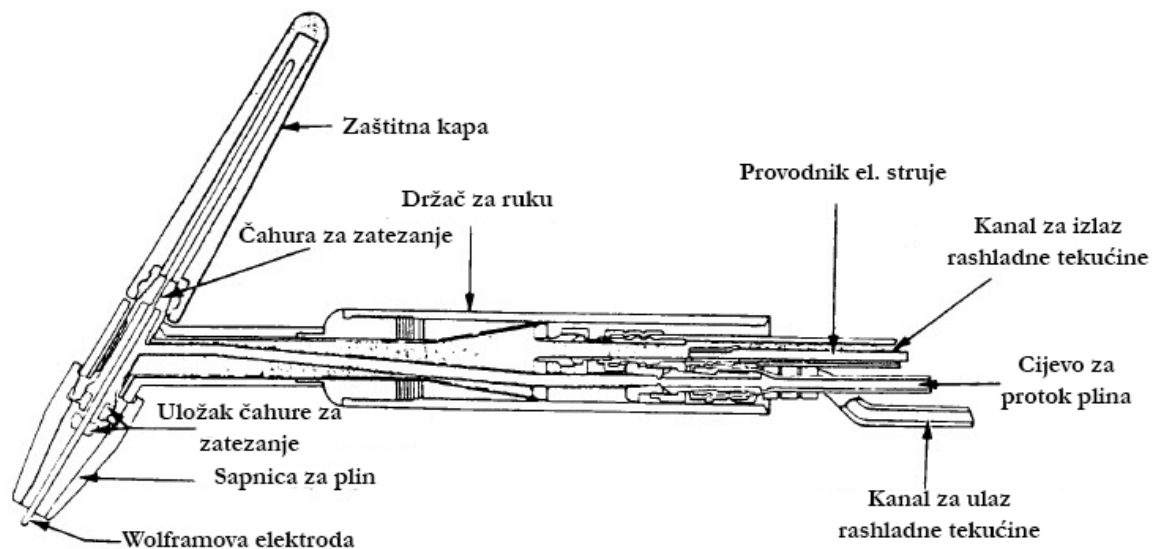
Pri zavarivanju osjetljivih materijala te pri zavarivanju u prisilnim položajima kada postoji opasnost od cijedenja taline koriste se izvori struje za impulsno TIG zavarivanje. U tom slučaju struja zavarivanja varira između dvije vrijednosti, maksimalne pri kojoj se tali materijal i minimalne pri kojoj se još održava stabilnost električnog luka. [12]



Slika 17: Komponente TIG sustava za zavarivanje [22]

3.3.2 Pištolj za zavarivanje

Pištolji za TIG postupak zavarivanja dijele se na dvije skupine: oni s hlađenjem uz pomoć rashladne tekućine (voda ili antifriz) i bez. Pištolji koji se ne hlade rashladnom tekućinom hlade se protokom inertnog plina. Takvi pištolji su obično jeftiniji, koriste se za zavarivanje tankih obradaka, pri maksimalnoj jakosti struje zavarivanja od oko 200 A. Pištolji koji se hlade rashladnom tekućinom mogu kontinuirano raditi pri jakosti struje od 200 A dok su neki konstruirani da rade i do 500 A. Obično su takvi pištolji teži i skuplji od onih bez hlađenja rashladnom tekućinom. Ručni pištolji obično teže od oko 85 grama do 450 grama. Najčešći kut glave pištolja, prikazanog na slici 18, je 120° međutim postoje i izvedbe pod 90° . [23]



Slika 18: Pištolj za TIG postupak zavarivanja hlađen rashladnom tekućinom [24]

Postoji četiri tipa sapnica za pištolje: keramičke, metalne, od kvarcnog stakla te tzv. *dual shield* sapnice. Pravilo je da je unutrašnji promjer sapnice tri puta veći od promjera volframove elektrode. Keramičke sapnice su najčešće korišteni i najjeftiniji tip sapnica, osobito kada je riječ o visokofrekventnim strujama. Najveća mana im je krhkost. Količina i kvaliteta protoka plina ovisni su o obliku sapnice koji može biti konusni, cilindrični ili profilirani. [23]

3.3.3 Volframova elektroda

Netaljiva elektroda služi za uspostavu električnog luka između gorionika i radnog komada, tj. kao provodnik električne struje. S obzirom na to da se ne tali, njeno je trošenje povezano oblikovanjem njezine geometrije brušenjem i/ili eventualnim oštećenjima zbog nepravilne tehnike rada. Prosječni vijek trajanja elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Elektrode se izrađuju od čistog volframa (danas rjeđe) ili volframa legiranog s malim dodacima (1-2 %) torijevog ili cirkonijevog oksida ili nekih drugih elemenata. Ovi dodaci olakšavaju uspostavljanje električnog luka, stabiliziraju ga osobito pri malim strujama, smanjuju eroziju elektrode te povećavaju dozvoljeno strujno opterećenje. Elektrode se proizvode u promjerima od 0,8 do 9,5 mm, te dužinama od 200 mm. Obično je kraj elektrodnog štapića označen kodnim bojama koje označavaju sastav elektrode, kao što je prikazano u tablici 7. [12, 16]

Tablica 7: Kemijski sastav volframovih elektroda [25]

| Oznaka | Primarni oksid | Maseni udio oksida | Udio nečistoća | Boja |
|--------|--------------------------------|--------------------|----------------|--------|
| WP | - | - | 0,5 max | Zelena |
| WC20 | CeO ₂ | 1,8-2,2 | 0,5 max | Siva |
| WLa10 | La ₂ O ₃ | 0,8-1,2 | 0,5 max | Crna |
| WLa15 | La ₂ O ₃ | 1,3-1,7 | 0,5 max | Zlatna |
| WLa20 | La ₂ O ₃ | 1,8-2,2 | 0,5 max | Plava |
| WTh10 | ThO ₂ | 0,8-1,2 | 0,5 max | Žuta |
| WTh20 | ThO ₂ | 1,7-2,2 | 0,5 max | Crvena |

Osim pravog izbora elektrode, bitna je i njena priprema. Ona se sastoji od zaobljenja ili zašiljenja vrha prilikom čega valja imati na umu da geometrija elektrode ima direktan utjecaj na geometriju električnog luka. Zaobljeni vrh elektrode se koristi kod zavarivanja Al, Mg i njihovih legura, odnosno pri korištenju izmjenične struje prilikom zavarivanja. U tom slučaju povisuje se struja zavarivanja te se kao posljedica velikog toplinskog opterećenja trošenjem dobije zaobljeni vrh elektrode. Ostali materijali pri zavarivanju istosmjernom strujom zahtijevaju zašiljeni vrh elektrode. [14, 17]

3.3.4 Zaštitni plinovi

Zadaća zaštitnog plina je osigurati prikladnu atmosferu, koja će se što je moguće lakše ionizirati, te štititi vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. Čak i male količine kisika u zraku oksidiraju legirne elemente te stvaraju uključke. Zaštitni plin također utječe na svojstva zavara kao i na penetraciju te geometriju zavara. Sustavi zaštitnih plinova za TIG postupak ne razlikuju se mnogo od onih za MIG postupak zavarivanja osim što se u slučaju TIG postupka najčešće koriste argon, helij ili mješavine ova dva plina u raznim omjerima. [11, 14, 16]

Zaštitni plin treba poboljšati sljedeće aspekte procesa zavarivanja [14]:

- Lakoća uspostave električnog luka
- Stabilnost luka
- Depozicija materijala
- Ovlaživanje između čvrstog materijala i zone rastaljenog metala
- Dubina i oblik penetracije
- Prskanje
- Emisija zagađivača u zrak

U ranim fazama korištenja TIG postupka zavarivanja češća je bila upotreba helija kao zaštitnog plina dok je danas argon dominantan u primjeni. Oba plina su inertna, a u njihovoj atmosferi ne dolazi do kemijskih reakcija između zaštitnog plina i osnovnog materijala. Izuzev ispunjenja primarne zadaće koja je zaštita rastaljenog materijala od utjecaja atmosfere, zaštitni plin direktno utječe i na stabilnost te kvalitetu električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, estetski izgled zavarenog spoja kao i na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja. [16]

Argon je monoatomni plin atomske mase 40 te kao inertni plin ne stupa u kemijske reakcije s drugim materijalima. Dobiva se iz atmosfere izdvajanjem iz ukapljenog zraka. Prikladan je za sve vrste materijala korištenih u zavarivanju, čak i osjetljivih materijala kao što su aluminij i nehrđajući čelik. U odnosu na helij je jeftiniji ali to nije jedina njegova prednost. Ima i niski ionizacijski potencijal (energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion), 15,7 eV, čime je olakšana uspostava i stabilnost električnog luka. Osim toga je i teži od zraka (1,4 puta) tako da pri izlasku iz sapnice potiskuje zrak što rezultira potrebom za manje vrijednosti protoka plina prilikom zavarivanja. [14, 16, 20]

Argon korišten za zavarivanje minimalne je čistoće od 99,95 %. Ta razina je dostatna za TIG zavarivanje većine materijala izuzev reaktivnih metala za koje je minimalna potrebna čistoća 99,997 %. Nerijetko se takvi materijali zavaruju u komorama iz kojih se prije provedbe postupka uklanja zrak kako ne bi kontaminirao spoj. [20]

Češća upotreba argona kao zaštitnog plina u odnosu na helij je zbog sljedećih razloga [20]:

- Mirniji i tiši rad električnog luka
- Smanjena penetracija
- Efekt čišćenja kada se zavaruju materijali poput aluminijski i magnezija
- Niža cijena i bolja dostupnost
- Smanjene vrijednosti protoka plina potrebne za kvalitetnu zaštitu
- Bolji otpor puhanju električnog luka
- Bolja sposobnost uspostavljanja električnog luka

Smanjena penetracija pri korištenju argona je osobito poželjna ako se ručno zavaruju tanki dijelovi jer se tako smanjuje opasnost od protaljivanja. Ista karakteristika je poželjna pri okomitim položajima zavarivanja kako bi se smanjila opasnost od utonuća zavara. [20]

Kao i argon, helij također spada u skupinu inertnih plinova. Radi se o veoma laganome, monoatomnom plinu atomske mase četiri koji se dobiva izdvajanjem iz zemnog plina. Ima viši ionizacijski potencijal (24,5 eV) što otežava uspostavu električnog luka. Helij korišten kao zaštitni plin u postupcima zavarivanja čistoće je od 99,99 %. Za jednaku vrijednost jakosti struje i duljine električnog luka helij omogućava veći unos topline u obradak u odnosu na argon. Ovo svojstvo je prednost ako je potrebno zavariti materijale s visokom vrijednošću toplinske vodljivosti kao što su aluminij ili bakar. Helij se također češće koristi u slučajevima kada je potrebno zavariti dijelove veće debljine. Mješavine helija i argona su korisne kada postoji zahtjev za dobivanjem pozitivnih svojstava pojedinih plinova, npr. mješavina argona i helija omogućuje veće brzine zavarivanja jer utjecaj helija daje veći unos topline dok argon kompenzira otežanu uspostavu električnog luka u odnosu na čisti helij. Vrijednosti protoka helija moraju biti i do tri puta veće nego što je slučaj s argonom zbog višestruko manje mase helija. [14, 16, 20]

Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava argona odnosno helija, a primjeri karakteristika zavarivanja spomenutim plinovima dana je u tablici 8. [16]

Tablica 8: Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [16]

| Karakteristika | Ar | Mješavina Ar/He | He |
|---------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|
| Brzina zavarivanja | Smanjena | Veća nego 100% Ar | Veća |
| Penetracija | Smanjena | Veća nego 100% Ar | Povećana |
| Čišćenje oksida | Dobro | Sličnije kao do 100% Ar | Loše |
| Uspostava luka | Laka | Bolja nego kod 100% He | Otežana |
| Stabilnost luka | Dobra | Bolja nego kod 100% He | Niža kod manjih struja |
| Oblik luka | Uži, fokusiran | Uži nego kod 100% He | Širi |
| Napon luka | Manji | Srednji | Veći |
| Protok | Manji | Veći nego kod 100% Ar | Povećan |
| Cijena | Niža | Veća nego 100% Ar | Veća nego 100% Ar |

Osim mješavina argon/helij, postoji mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavinu. Povećanje penetracije moguće je dodatkom vodika što je posljedica njegove dobre toplinske vodljivosti. Pri zavarivanju materijala s austenitnom strukturom nerijetko je upotrebljavanje mješavina s dodatkom dušika. TIG postupak zavarivanja se upotrebljava kod nekih zavarenih spojeva gdje je nužna zaštita korijenskog dijela zavarenog spoja. Tada je cilj "odstraniti" zrak s korijenske strane spoja i upuhati zaštitni plin te ga održavati pod niskim pritiskom. Zaštita je moguća i kod sućeonih i kod cijevnih spojeva iz pomoć jednostavnih naprava, a često se upotrebljava i kod polu-automatiziranih sustava. [16]

3.3.4.1 Primjena zaštitnih plinova u ovisnosti o materijalu obratka

1. Čelik

Za TIG zavarivanje nelegiranih, niskolegiranih i nehrđajućih čelika najčešće se kao zaštitni plin koristi argon. Njegova primjena je tipična i za mehanizirane postupke, uz mogućnost miješanja s helijem ili vodikom kako bi se povećao unos topline. Dodatak vodika također pomaže smanjenju stvaranja oksida i formiranju glatkog zavara ali ga je moguće koristiti samo kod austenitnih nehrđajućih čelika. Ova mješavina koristi se i u svrhu zaštite korijenske strane zavara, uz napomenu da je taj zadatak moguće ostvariti i čistim argonom. Dodatak manje količine dušika može se koristiti pri zavarivanju austenitno-feritnih (duplex) čelika kako bi se osigurala feritno-austenitna ravnoteža. [14]

2. Aluminij i njegove legure

Za aluminij i aluminijeve legure tipična je primjena argona, s mogućnošću dodatka helija. Helij omogućava veći unos topline te se koristi pri zavarivanju dijelova većih debljina. Struja zavarivanja je tipično izmjenična ili pri manjim jakostima struje, istosmjerna s elektrodom na pozitivnom polu. U nekim uvjetima moguće je zavarivanje aluminija istosmjernom strujom ako se kao zaštitni plin koristi helij te je elektroda spojena na negativni pol. Nedostatak pri korištenju helija je otežana uspostava električnog luka, osobito pri nižim vrijednostima jakosti struje. Zbog toga se za ručne postupke preporučuje argon dok se helij češće koristi kod mehaniziranih postupaka. [14]

3. Bakar i njegove legure

Argon je prikladan za zavarivanje bakra u svim pozicijama te daje izvrsne rezultate pri debljinama materijala do 6 mm. Zbog velike toplinske vodljivosti materijala potrebno je predgrijavanje materijala. Za debljine materijala veće od 6 mm prikladnije je koristiti helij ili mješavinu helija i argona sa zastupljenošću argona od 35 %. [14]

4. Titaniј

Uspješno zavarivanje titanija zahtijeva visoku čistoću zaštitnog plina, ne manju od 99,99 %. Obično je potrebna veća količina zaštitnog plina. Moguće je koristiti i argon i helij, za materijale do debljine 3 mm se preferira argon zbog veće gustoće plina i dobrih zaštitnih svojstava. Sukladno navedenome helij je prikladan za zavarivanje dijelova većih debljina radi većeg unosa topline. [14]

3.3.5 Dodatni materijal

Dodatni materijali za TIG zavarivanje dolaze u obliku šipki, prikazanih na slici 19, koje se dodaju u metal zavara ručno ili žice koja se dodaje mehanizirano. Šipke za ručno zavarivanje su duljine oko jedan metar. Iako izgledom slične, šipke za ručno zavarivanje TIG postupkom bitno se razlikuju od onih za plinsko zavarivanje i to ponajviše u sastavu. Uobičajeno se dodatni materijal odabire tako da ima jednak sastav osnovnom materijalu, izuzev činjenice da se ponekad za dodatni materijal traži dodatna količina dezoksidacijskih konstituenata kako bi se smanjio rizik od poroziteta u zavarenom spoju. [13, 14]



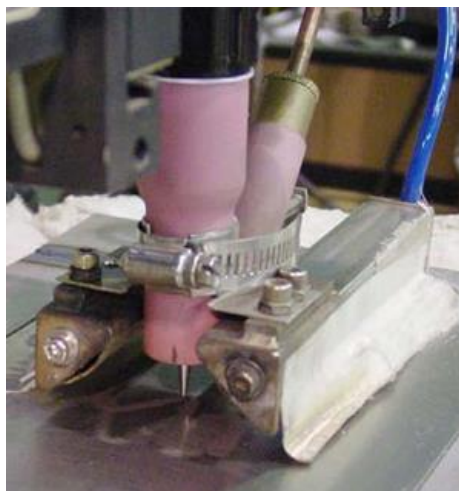
Slika 19: Šipke dodatnog materijala za ručno zavarivanje TIG postupkom [26]

Kod ručnog zavarivanja način dodavanja materijala utječe na broj potrebnih prolaza i završni izgled zavarenog spoja. Kod mehaniziranog i automatiziranog zavarivanja brzina dodavanja žice određuje količinu unesenog dodatnog materijala u ovisnosti o duljini zavarenog spoja. Smanjenje brzine dodavanja dodatnog materijala povećava penetraciju i smanjuje nadvišenje zavara. Premala brzina dodavanja materijala između ostalog može rezultirati pukotinama po sredini zavarenog spoja i nedovoljnom popunom zavara. Povećanje brzine dodavanja materijala smanjuje penetraciju te rezultira većim nadvišenjem zavara. Tanki materijali (do 3 – 4 mm) mogu biti sučeljeno spojeni zavarivanjem s jedne strane bez korištenja dodatnog materijala. Veće debljine zahtijevaju određenu pripremu spoja i korištenje dodatnog materijala. [14, 20]

Dodavači žice se koriste za dodavanje materijala kod automatiziranih i mehaniziranih postupaka. Dodatni materijal može biti na sobnoj temperaturi ili predgrijan prije nego što se dodaje u metal zavara. U pravilu se žica na sobnoj temperaturi dodaje ispred luka, odnosno koristi se lijeva tehnika rada, dok se predgrijana žica dodaje iza luka tj. koristi se desna tehnika rada. [20]

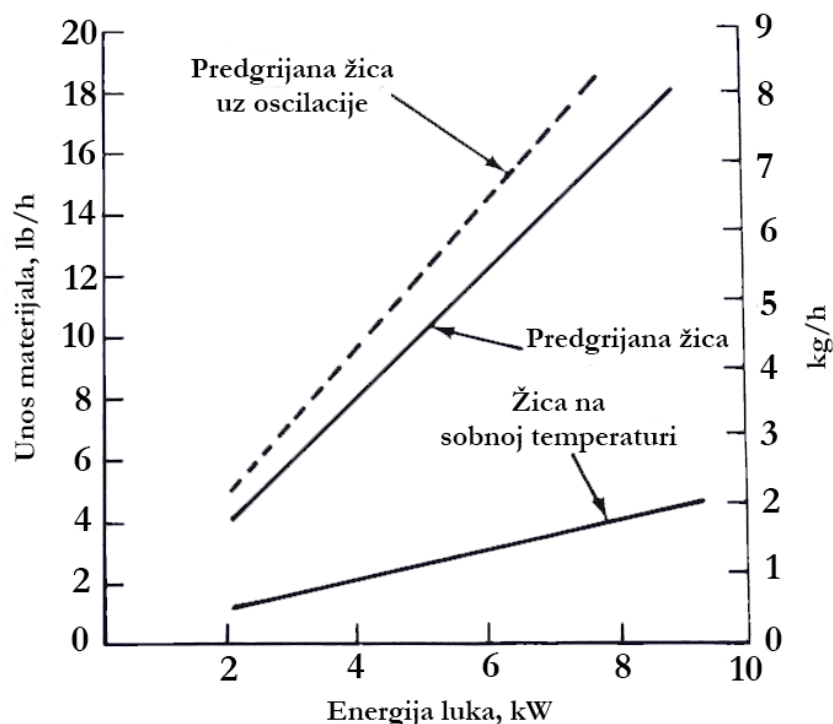
Sustav dodavanja žice na sobnoj temperaturi sastoji se od tri dijela. Mehanizma za dodavanje žice, uređaja za kontrolu brzine dodavanja te vodilice koja dodatni materijal usmjerava u metal zavara. Mehanizam za dodavanje žice sastoji se od motora i zupčanika koji pogone valjke koji guraju žicu. Uređaj za kontrolu brzine dodavanja osigurava konstantnu brzinu dodavanja žice. Žica se navodi u vodilice kroz fleksibilni vodič. Podesivi vodič žice pričvršćen je za držač elektrode te zadržava poziciju pri kojoj žica ulazi u metal zavara pri čemu je kut ulaska relativan u odnosu na elektrodu, površinu obratka te sami spoj. Vodilice mogu biti hladene vodom. Koriste se žice promjera 0,4 – 2,4 mm. Specijalni dodavači žice omogućavaju kontinuirani, pulsirajući ili intermitirani način dodavanja. [20]

Proces dodavanja predgrijane žice sličan je onome za dodavanje žice na sobnoj temperaturi, osim što se žica grije na temperaturu blizu njenog tališta netom prije što se dodaje u metal zavara. Kada se predgrijana žica koristi pri mehaniziranim ili automatiziranim postupcima u položenom položaju zavarivanja žica se mehanički dodaje metalu zavara putem držača kroz koji se upuhuje inertni plin koji štiti metal zavara. TIG sustav za zavarivanje uz pomoć predgrijane žice prikazan je na slici 20. [20]



Slika 20: TIG sustav za zavarivanje uz pomoć predgrijane žice [27]

Žica se dodaje u metal zavara koristeći desnu tehniku pod kutem od 40° do 60° u odnosu na netaljivu elektrodu te se predgrijava izmjeničnom strujom iz izvora s konstantnim naponom. Razlog korištenja izmjenične struje je da se izbjegne puhanje električnog luka. Naime, ako jakost struje korištene za predgrijavanje ne prelazi 60 % jakosti one električnog luka, električni luk oscilira 30° u longitudinalnom smjeru. Oscilacija raste na 120° u slučaju da se jakosti struja predgrijavanja i električnog luka izjednače. Amplituda oscilacije električnog luka može biti kontrolirana ograničavanjem promjera žice na 1,2 mm i smanjenjem jakosti struje predgrijavanja ispod 60 % vrijednosti jakosti struje električnog luka. Brzine dodavanja žice su u pravilu veće koristi li se predgrijana žica, a posljedično je i veći unos dodatnog materijala u danom vremenskom intervalu kao što je prikazano na slici 21. Unos dodatnog materijala u tom je slučaju usporediv s MIG/MAG postupcima. Predgrijavanje žice se ne preporučuje kod materijala kao što su aluminij ili bakar jer mala vrijednost otpora dodatnog materijala zahtijeva velike jakosti struje predgrijavanja koje rezultiraju pretjeranim puhanjem električnog luka. [20]



Slika 21: Unos materijala za mehanizirani TIG postupak zavarivanja s predgrijanom žicom i sa žicom na sobnoj temperaturi [20]

Ako se koriste, dodatni materijali bi trebali biti slični ali ne i nužno identični osnovnom materijalu. Kada se spajaju raznovrsni materijali dodatni će biti različit od jednog ili oba osnovna materijala. Općenito sastav dodatnog materijala odabire se tako da njegova svojstva odgovaraju svojstvima osnovnog materijala u zavarenom stanju. Takvi dodatni materijali proizvode se uz posebnu pažnju na kemijski sastav, čistoću i kvalitetu u usporedbi s osnovnim materijalima. Često se dodaju dezoksidacijski elementi kako bi se osigurala kvaliteta zavara. Unose se i dodatni elementi kako bi se omogućila bolja reakcija na toplinske postupke. Izbor dodatnog materijala za bilo koju primjenu je kompromis između metalurške kompatibilnosti, prikladnosti za danu primjenu i cijene. Vlačna i udarna svojstva, otpornost na koroziju te električna i toplinska vodljivost koje su zahtijevane od određenog zavarenog spoja moraju se uzeti u obzir. Pri zavarivanju titanija i njegovih legura dodatni materijal se u pravilu bira tako da njegov nominalni sastav odgovara sastavu osnovnog materijala. [20, 28]

Zbog visoke čvrstoće i relativno male duktilnosti izrada dodatnog materijala titanija u obliku namotaja žice je u najboljim slučajevima skupa a u najgorim nemoguća. Proizvodnja dodatnog materijala od tehničkog titanija ASTM razreda 1 i 2 te legure Ti3Al2,5V je relativno jednostavna, dok je Ti6Al4V dostupan ali skup. Dostupnost dodatnog materijala izrađenog od drugih legura je veoma ograničena te za to postoje dvije mogućnosti kompenzacije. Prva je zavarivati s dodatnim materijalom od legure koja je mekša ali izraditi zavar tako da presjek spoja kompenzira umanjena mehanička svojstva dodatnog materijala. Drugo rješenje je da priprema spoja bude izvedena dovoljnom preciznošću kako bi omogućila zavarivanje bez dodatnog materijala. [9]

Zavarivanje treba biti izvršeno uz pomoć opreme i postupaka koji onemogućuju kontaminaciju metala zavara ugljikom, kisikom, dušikom i vodikom. Kvaliteta i čistoća dodatnog materijala su izuzetno važne kod zavarivanja titanija. Ako na dodatnom materijalu ima prljavštine ili masnoća postoji velika opasnost od kontaminacije zavara. Fizičke nepravilnosti na dodatnom materijalu poput pukotina mogu biti mjesta na kojima je veća koncentracija nečistoća te je posljedično tome njihovo čišćenje otežano ili čak u potpunosti onemogućeno. Dodatni materijal treba provjeriti prije postupka ne bi li se navedeni nedostaci pravovremeno otkrili i ako je to moguće, otklonili pomoću acetona. Pravilno pakiranje i skladištenje dodatnog materijala u svim fazama životnog vijeka je od velikog značaja kako bi se spriječila daljnja kontaminacija. Rastaljeni kraj žice tijekom postupka zavarivanja ne smije se odmah odmicati od zaštitnog plina već se treba određeno vrijeme pod njime zadržati. [20, 28]

Zavari koji ne koriste dodatni materijal nazivaju se autogeni zavari. Autogeno zavarivanje je češće pri izradi komponenata koje se automatizirano zavaruju. Zavarivanje uz korištenje dodatnog materijala je češće kod ručnog zavarivanja bilo da se radi o novim dijelovima ili reparaturnom zavarivanju. [9]

3.4 Specifičnosti zavarivanja titanija i njegovih legura TIG postupkom

Prilikom zavarivanja titanija i njegovih legura veoma je važna čistoća površine zbog već spomenute velike reaktivnosti titanija prema elementima iz atmosfere poput kisika i dušika, vlazi (vodik), mazivu i drugim metalima kada se formiraju krhki intermetalni spojevi. Prije zavarivanja potrebno je pažljivo ukloniti masnoće, boje i druge strane materijale na široj udaljenosti oko zavarenog spoja i s dodatnog materijala. Za čišćenje su prikladna otapala kao što su aceton, etanol ili toluen. Trikloretilen ili tetraklor ugljik mogu kasnije biti uzročnici korozije uz naprezanje. Za mehaničko čišćenje površine i uklanjanje površinskoga oksidnog sloja treba koristiti četke od titanija ili nehrđajućeg CrNi čelika. Nakon što je obradak očišćen ne smije ga se dirati golim rukama jer masnoće i vlaga s ruku mogu nepovoljno utjecati na zavar. [2, 10]

Zaštita inertnim plinovima je izuzetno važna pri zavarivanju titanija želi li se postići visoka kvaliteta zavara. S obzirom na reaktivnost titanija s elementima iz atmosfere svi dijelovi koji se zagrijavaju iznad 200 °C moraju biti zaštićeni. Zbog toga se prilikom TIG zavarivanja upotrebljavaju argon i helij čistoće 99,99 % s točkom rosišta od oko -45 °C ili niže. Automatizirano zavarivanje pri višim brzinama zahtijeva i zaštitu dijela materijala iza pištolja prilikom izvođenja postupka kako bi se minimizirala izloženost još vrućeg zavara atmosferi. Ako je potrebno ostvariti potpuni provar nužna je i zaštita korijenske strane zavara. To se često ostvaruje upuhivanjem inertnog plina kroz provrte u konstrukciji koja drži obradak. Ove mjere impliciraju da je zavarivanje titana složenije i skuplje od zavarivanja mnogih drugih materijala. U skladu s navedenim potrebna su tri odvojena dovoda plina: primarni koji štiti rastaljeni metal zavara, sekundarni ili prateći koji štiti ostvareni zavareni spoj koji se hladi te zonu utjecaja topline uz zavar i dovod koji štiti donju stranu zavara u slučajevima gdje se zahtijeva potpuni provar. [2, 9, 10]

Kao što je ranije spomenuto helij omogućava više temperature zavarivanja nego argon i time omogućuje bolju penetraciju zavara i veće brzine zavarivanja ali zbog manje stabilnosti luka pri upotrebi helija češće se upotrebljava argon. Za veće serije, jednostavnije i jeftinije je korištenje komora za zavarivanje koje se ispune inertnim plinom. Ove komore, kao ona prikazana na slici 19, su obično izrađene od plastike, oblika polukugle, s utorima za pištolj s

elektrodom i ruke zavarivača. Argon je teži od zraka pa pada na dno komore i istiskuje atmosferski zrak kroz ventil na vrhu komore. Postoje primjeri automatizacije TIG-a ali su češći primjeri gdje zavarivač ručno zavaruje manipulacijom pištolja za zavarivanje oko statičnog obratka. [2, 9, 10]



Slika 22: Izvođenje postupka zavarivanja u komori za zavarivanje [29]

Za debljine materijala do 3 mm TIG postupak se može provoditi ručno ili automatski, bez specijalne pripreme spoja ili dodatnog materijala. Kod debljih materijala zahtijeva se priprema žlijeba i žice punjene posebnim prahom. Obično se koristi dodatni materijal sa svojstvima jednakim ili boljim od onih osnovnog materijala, osim ako je riječ o tehničkom titaniju kada je dopušteno koristiti dodatni materijal nešto manje čvrstoće u odnosu na osnovni materijal jer neizbježno dolazi do otvrdnuća metala zavara uslijed reakcije s različitim plinovima. Primjer parametara zavarivanja za TIG postupak dan je u tablici 9. [2, 9]

Tablica 9: Primjer parametara zavarivanja za TIG zavarivanje titanija [15]

| Debljina radnog komada [mm] | Dodatni materijal | | Zaštitni plin | Napon [V] | Jakost struje [A] | Brzina zavarivanja [mm/s] |
|-----------------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-----------|-------------------|---------------------------|
| | Promjer [mm] | Brzina dodavanja [mm/s] | | | | |
| 0,20 | - | - | He | 14 | 10 | 6,77 |
| 0,76 | - | - | Ar | 10 | 25-30 | 4,23 |
| 1,52 | - | - | Ar | 10 | 90-100 | 4,23 |
| 1,52 | 1,587 | 9,31 | Ar | 10 | 120-130 | 5,08 |
| 2,29 | - | - | Ar | 12 | 190-200 | 4,23 |
| 2,29 | 1,587 | 9,31 | Ar | 12 | 200-210 | 5,08 |
| 3,18 | 1,587 | 8,46 | Ar | 12 | 220-230 | 4,23 |

Bitno je naglasiti kako je već u vizualnoj inspekciji zavara donekle jasno izražena njegova kvaliteta, barem u pogledu kvalitete zaštite. Kao i kod drugih materijala pri vizualnoj inspekciji oblik zavara, veličina, oblik i jednoličnost nadvišenja kao i dubina penetracije pokazatelji su uspješnosti ostvarenog spoja. Olakotna okolnost je ta da je u pogledu najveće osjetljivosti titanija, a to je ona na atmosfersko onečišćenje, već vizualnom inspekcijom moguće interpretirati razinu onečišćenja. Naime, što je zaštita radnog komada lošija to se na površini stvara deblji sloj oksida koji uslijed interferencije svjetlosti poprima različite boje. Uz vizualnu inspekciju testiranje tvrdoće je najbitnija metoda ispitivanja kvalitete zavarenog spoja. Dobar zavar ima samo malo povećanje tvrdoće u odnosu na osnovni materijal. Procjena razine oksidacije u ovisnosti o boji dana je u tablici 10. [10, 30]

Tablica 10: Interpretacija indikacije ovisno o poprmljenoj boji titanija nakon obavljenog postupka zavarivanja [30]

| Boja | Interpretacija indikacije |
|-----------------------|---|
| Srebrna | Ispravna zaštita, zadovoljavajuće |
| Svijetlo žuta | Niska kontaminacija, prihvatljivo |
| Tamno žuta | Niska kontaminacija, prihvatljivo |
| Tamno plava | Srednja kontaminacija, može biti prihvatljivo ovisno o upotrebi |
| Svijetlo plava | Visoka kontaminacija, mala vjerojatnost prihvatljivosti |
| Sivo plava | Veoma visoka kontaminacija, neprihvatljivo |
| Siva | Veoma visoka kontaminacija, neprihvatljivo |
| Bijela | Veoma visoka kontaminacija, neprihvatljivo |

4 EKSPERIMENTALNI RAD

4.1 Opis i ciljevi

Eksperimentalni rad u sklopu diplomskog rada proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Cilj rada je odrediti utjecaj brzine zavarivanja i mješavine zaštitnog plina na dubinu penetracije kod TIG zavarivanja titanija.

U tu svrhu u laboratoriju su rađeni navari mehaniziranim TIG postupkom na uzorcima titanija pri čemu su korištene dvije mješavine zaštitnog plina te dvije različite brzine zavarivanja kako bi se utvrdio njihov utjecaj na dubinu penetracije. Postupak je mehaniziran kako bi se osigurala ponovljivost i preciznost kod izvođenja navara, drugim riječima mehanizacijom postupka se nastoji osigurati varijabilnost samo brzine zavarivanja i mješavine u pojedinim fazama dok ostali parametri ostaju fiksni.

Prije navarivanja na uzorcima je ispitivan kemijski sastav prijenosnim XRF uređajem kako bi se osiguralo da nema razlike između njihovih kemijskih sastava kao posljedica njihovog dolaska iz primjerice različitih šarži, a što bi za posljedicu moglo utjecati na rezultate ispitivanja.

Nakon obavljenog navarivanja obavljena su sljedeća ispitivanja:

- Vizualna kontrola
- Analiza makrostrukture
- Mjerenje dubine penetracije

4.2 Osnovni materijal

Korišteni osnovni materijal je tehnički titanij razreda ASTM 1. Uzorci su u obliku pločica debljine 13,1 mm. Tehnički titanij je otporan na mnoge kiseline (osim HF, H₃PO₄ i koncentriranu H₂SO₄) i lužine te se kao posljedica toga najčešće koristi u primjenama koje zahtijevaju visoku otpornost na koroziju te oblikovljivost, osobito ako se radi o primjeni kada čvrstoća materijala nije presudna. [1]

Analiza kemijskog sastava uzoraka provedena je u Laboratoriju za zaštitu materijala koristeći prijenosni XRF uređaj prikazan na slici 23. Usporedbom izmjerenog sastava uzoraka i unutarnje baze podataka uređaj je pokazao da se radi o tehničkom titaniju razreda ASTM 1.



Slika 23: Sustav za XRF analizu kemijskog sastava materijala

U tablici 8 su prikazana mehanička svojstva navedenog materijala.

Tablica 8: Mehanička svojstva tehničkog titana razreda ASTM 1 [30]

| | |
|---|---------|
| Granica tečenja, R_e [MPa] | 170-310 |
| Vlačna čvrstoća, R_m [MPa] | 240 |
| Istezljivost, A [%] | 24 |
| Suženje poprečnog presjeka, Z [%] | 35 |
| Tvrdoća [HV] | 122 |
| Modul elastičnosti [GPa] | 105 |

Rezultati dobiveni XRF analizom prikazani su u tablici 9.

Tablica 9: Kemijski sastav uzoraka dobiven XRF analizom

| Element | Sadržaj |
|---------|------------------|
| Ti | 99,68 (+/- 0,49) |
| Si | 0,23 (+/- 0,03) |
| Fe | 0,09 (+/- 0,02) |

Prosječno odstupanje ostalih uzoraka od sastava navedenog u analizi je za svaki pojedini element redom: Ti = +/- 0,08, Si = +/- 0,03, Fe = +/- 0,09.

4.3 Oprema za zavarivanje

4.3.1 Izvor struje za zavarivanje

Korišteni izvor struje za TIG zavarivanje je uređaj „MagicWawe 2200 Job G/F“, marke Fronius prikazan na slici 24. Uređaj omogućava TIG zavarivanje istosmjernom ili izmjeničnom strujom te REL postupak zavarivanja. Ako se zavaruje TIG postupkom moguće je i zavarivanje impulsnom strujom. Uređaj je relativno lako prenosiv jer teži 17.4 kg pa omogućava reparaturno zavarivanje na terenu te prijenos unutar radionice. Najveća struja zavarivanja je 220 A pri intermitenciji od 35 %. Uređaj je moguće i dodatno opremiti hladnjakom te TIG gorionikom s vodenim hlađenjem. Tehničke karakteristike uređaja prikazane su u tablici 10.

**Slika 24: Fronius MagicWave 2200 Job G/F korišten u eksperimentu**

Tablica 10: Tehničke karakteristike uređaja MagicWave 2200 Job G/F [32]

| | |
|---|-----------------|
| Napajanje, 50-60 Hz [V] | 230 |
| Tolerancija napajanja [%] | -20/+15 |
| Strujni opseg REL [A] | 10-180 |
| Strujni opseg TIG [A] | 3-220 |
| Napon praznog hoda [V] | 88 |
| Struja zavarivanja 10 min/40 °C, 35% intermitencije [A] | 220 |
| Struja zavarivanja 10 min/40 °C, 60% intermitencije [A] | 170 |
| Struja zavarivanja 10 min/40 °C, 100% intermitencije [A] | 150 |
| Stupanj zaštite | IP 23 |
| Dimenzije (dužina/širina/visina) [mm] | 485 x 180 x 390 |
| Težina [kg] | 17,4 |

4.3.2 Oprema za mehanizirani postupak zavarivanja

Mehanizacija postupka je nužna za izvođenje eksperimentalnog rada kako bi se eliminirao ljudski faktor, dok između ostalih, parametri poput nagiba pištolja, udaljenosti elektrode od radnog komada te jednolike brzine zavarivanja ostaju nepromijenjeni u različitim fazama eksperimenta. Uz to nužno je osigurati ponovljivost i preciznost za što je logično rješenje mehanizacija postupka.

Postupak je mehaniziran pričvršćivanjem pištolja za TIG zavarivanje na držač spojen na sustav za mehanizirano zavarivanje „BUGO Systems“. Na slici 25 prikazan je automat na koji je pričvršćen pištolj za MIG/MAG postupak. Uređaj ima mogućnost gibanja konstantnom brzinom po pripadajućem nosaču paralelno uz radno mjesto.



Slika 25: „BUGO Systems“ sustav za mehanizaciju postupka zavarivanja

4.3.3 Komora za zavarivanje

Kao što je ranije spomenuto, titanij zagrijan iznad 200 °C postaje izrazito reaktivan s elementima iz atmosfere kao što su kisik, dušik, ugljik i vodik. Kako bi se minimiziralo onečišćenje zavara i zone utjecaja topline nužno je postupak provoditi u vakuumskoj komori. Da bi se osigurala što je moguće bolja kvaliteta navara za potrebe ovog eksperimenta postupak je izveden u komori za zavarivanje, prikazanoj na slici 26, koja štiti navar od reakcija s elementima iz atmosfere. Komora je bila ispunjena inertnim plinom koji je iz nje istisnuo zrak kroz ventil na njenom vrhu.



Slika 26: Komora za zavarivanje

4.3.4 Zaštitni plin

Izbor zaštitnog plina utječe na dubinu penetracije. S obzirom na to da je jedan od ciljeva diplomskog rada utvrditi utjecaj zaštitnog plina izabrana su dva različita plina koja će štiti električni luk i metal zavara. Treći plin koristi se za ispunjenje komore za zavarivanje kako bi uzorci bili zaštićeni od vanjske atmosfere za vrijeme zavarivanja i u procesu hlađenja po završavanju procesa zavarivanja.

Prvi korišteni zaštitni plin bio je 100 % argon, naziva Argon 5,0 proizvođača Messer. Prema normi HRN EN ISO 14175:2008 navedeni plin spada u skupinu I1 te nosi oznaku ISO 14175 - I1 – Ar. Čistoća ovog plina je 99,999 %, a najčešća primjena u pogledu zavarivanja je pri zavarivanju osjetljivih metala poput titanija, niobija, volframa i slično. Argon je teži od zraka pa će unutar komore tijekom punjenja pasti na dno i postepeno istiskivati atmosferski zrak dok ne ispuni cijeli volumen komore. [33, 34]

Drugi korišteni plin je mješavina 50 % helija u argonu. Klasifikacija prema normi HRN EN ISO 14175:2008 smješta mješavinu u skupinu I3, a oznaka je ISO 14175 – I3 – ArHe – 50. [34]

Kako je već ranije rečeno, helij omogućava veće temperature zavarivanja i njime je moguće uz jednake parametre zavarivanja ostvariti veću penetraciju.

Komora je ispunjena Argonom 4,8. Čistoća ovog plina je 99,998 %. Iako je manje čistoće od Argona 5,0 uz zaštitu zavara iz sapnice kroz koju struji plin veće čistoće očekuje se da je Argon 4,8 dovoljan kako bi se koristio kao zaštita unutar komore. Kao što je ranije navedeno minimalna potrebna čistoća plina pri zavarivanju titanija je 99,99 %. Slika 27 prikazuje boce argona (zeleno označene boce) od kojih je ona na koju je priključen manometar i crijevo korištena za ispunjavanje komore. [34, 35]



Slika 27: Boce korištenih zaštitnih plinova

4.3.5 Netaljiva elektroda

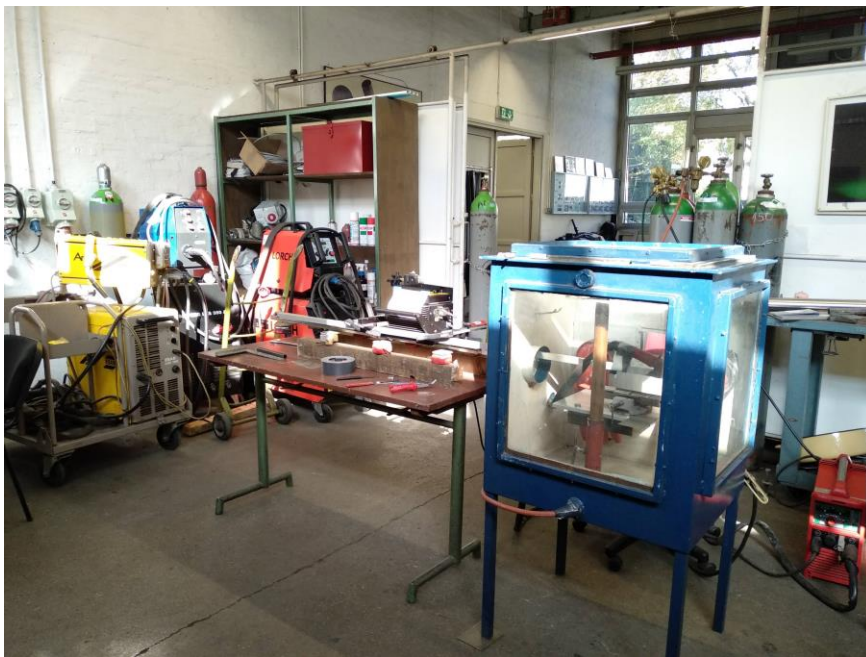
Odabrana je volframova elektroda legirana torijevim oksidima. Promjer elektrode iznosi 2,4 mm. Ova elektroda podnosi veće vrijednosti jakosti struje u usporedbi s elektrodama od čistog volframa, dulji vjek trajanja te veću otpornost na onečišćenje. Uspostava luka u odnosu na elektrode od čistog volframa je olakšana te je električni luk stabilniji. [23]

4.4 Postupak navarivanja

Navarivanje je provedeno na četiri uzorka dimenzija 57 x 33 x 13,1 mm. Postupak je proveden u dvije faze.

U prvoj je zaštitni plin u sapnici pištolja bio ISO 14175 - I1 – Ar dok je u drugoj zaštitni plin bila mješavina ISO 14175 – I3 – ArHe – 50. Uzorci iz prve faze označeni su slovom A dok su oni iz druge faze označeni slovom B. Objekti su grupe uzoraka prije procesa navarivanja očišćeni etanolom.

Navarivanje je bilo izvedeno u komori volumena 251 l koja je bila ispunjena Argonom 4,8. Korištena je neutralna tehnika, drugim riječima nagib pištolja je bio 90°. Pištolj je preko nosivog elementa bio pričvršćen na sustav za mehanizaciju naveden ranije u radu (prikazano na slici 28).



Slika 28: Mehanizirani TIG postupak i korištena komora

Udaljenost elektrode od radnog komada bila je 4 mm te je bila spojena na (-) pol. Uzorci su bili pričvršćeni u stegu te postavljeni na stol kojemu se mogla podešavati visina. Podešavanjem visine stola uzorci su pozicionirani kako bi se dobila željena udaljenost od elektrode. Radni prostor unutar komore prikazan je na slici 29.



Slika 29: Izgled unutrašnjosti komore prije izvođenja jedne od faza navarivanja

4.4.1 Parametri navarivanja

Kako bi se odredio utjecaj zaštitnih plinova i brzine navarivanja na dubinu penetracije kod zavarivanja titanija TIG postupkom bilo je potrebno ostale parametre držati konstantnima te kao što je ranije rečeno, eliminirati ljudski faktor mehanizacijom postupka.

Konstantni parametri:

- Protok plina: 10 l/min
- Jakost struje: 150 A
- Promjer elektrode: $d = 2,4$ mm
- Odmak elektrode od radnog komada: $l = 4$ mm
- Broj prolaza: 1
- Polaritet i vrsta struje: DC (-)
- Neutralna tehnika rada

Promjenjivi parametri:

- Brzina navarivanja – korištene su dvije brzine navarivanja, 9 i 15 cm/min. Njihova vrijednost podešena je preko sustava za mehanizaciju postupka „BUGO Systems“
- Vrsta zaštitnog plina u pištolju – kao što je ranije navedeno, korištena su dva različita zaštitna plina. 100 % Ar i mješavina 50 % Ar/50 % He.

U tablici 13 navedeni su parametri korišteni tijekom izvođenja obje faze navarivanja. Istaknut je stupac napona koji se mijenjao u ovisnosti o korištenoj mješavini i brzini navarivanja.

Tablica 11: Promjenjivi i konstantni parametri prilikom provedenog navarivanja

| Uzorak | Vrsta plina | Protok plina [l/min] | Jakost struje [A] | Napon [V] | Brzina navarivanja [cm/min] | Odmak elektrode [mm] |
|-----------|-------------------|-------------------------|----------------------|--------------|--------------------------------|-------------------------|
| A1 | 100 % Ar | 10 | 150 | 12,9 | 9 | 4 |
| A2 | 100 % Ar | 10 | 150 | 13,5 | 15 | 4 |
| B1 | 50 % Ar + 50 % He | 10 | 150 | 15,6 | 9 | 4 |
| B2 | 50 % Ar + 50 % He | 10 | 150 | 16,1 | 15 | 4 |

4.5 Provedena ispitivanja

4.5.1 Vizualna kontrola

Vizualna kontrola je nerazorna metoda ispitivanja čija je svrha procijeniti kvalitetu zavara s ili bez optičkih pomagala. Uočavanjem određenih grešaka u zavarima moguće je eliminirati spojeve bez potrebe za daljnjom kontrolom. U slučaju zavara titanija, izuzev uočavanja pogrešaka poput primjerice nepotpunog provara, prevelikog nadvišenja, pukotina u licu zavarenog spoja i slično, već je ranije spomenuto da je moguće procijeniti stupanj onečišćenja u ovisnosti o boji koju je zavareni spoj poprimio. Iako se očekuje da stupanj oksidacije nema veliki utjecaj na postignutu penetraciju nastoji se zavareni spoj izvesti što je moguće kvalitetnije kako bi rezultati bili što je moguće pouzdaniji. Vizualna kontrola u stvarnoj primjeni pri zavarivanju titanija može ostvariti uštede u smislu odbacivanja već u startu nekvalitetno odrađenih spojeva zbog stupnja onečišćenja uzrokovanog primjerice potencijalno loše izvedenom zaštitom tijekom ili po završetku zavarivanja ili eventualno loše odrađenim čišćenjem radnih komada. Vizualna kontrola primjenjuje se u svim fazama zavarivanja kako bi se osigurala najviša moguća kvaliteta zavara te kako bi se već u najranijoj fazi uočile i otklonile moguće greške u postupku. [30, 35]

4.5.2 Makroanaliza

Kako bi se dobio uvid u geometrijske značajke navara bilo je potrebno napraviti makroizbruske iz uzoraka koristeći sljedeće postupke:

1. Uzorci su prvo izrezani na mjere na tračnoj pili, prikazanoj na slici 30, pazeći pri tome da se izdvoji početnih i završnih 25 mm uzorka.

Razlog tome je da se izbjegnu eventualne pogreške na početku i kraju uspostave električnog luka. Uzorci su izrezani na dimenziju 10 x 33 x 13,1 mm.



Slika 30: Tračna pila *IMET GBS 185 Eco AutoCut*

2. Uzorci su potom predani u Laboratorij za materijalografiju gdje su brušeni i ispolirani pri čemu su se postupci odvijali prema sljedećim koracima:
 - a) Brušenje brusnim papirom gradijenta P320, korišteni lubrikant je voda, pri 300 okretaja u minuti. Primjenjena sila je bila 15 N.
 - b) Poliranje dijamentnom pastom pri čemu je veličina abraziva bila 9 μm pri 150 okretaja u minuti i primjenjenom silom od 20 N. Vrijeme trajanja je 5 min.
 - c) Završno poliranje pri čemu je veličina abraziva bila 0,04 μm pri 150 okretaja u minuti i primjenjenom silom od 20 N. Vrijeme trajanja je minimalno 25 min.
3. Nakon obavljenog poliranja uzorci su u Laboratoriju za zaštitu materijala nagrizani Krollom otopinom čiji je sastav dan u tablici 14. Trajanje nagrizanja je bilo 2 min nakon čega su isprani toplom vodom.

Tablica 12: Sastav korištene otopine za nagrizanje uzoraka te vrijeme držanja [37]

| Otopina | Sastav | Vrijeme držanja |
|------------------------|--------------------------|-----------------|
| Krollov reagent | 2 ml HF 10 ml HNO_3 | 2 min |

Nakon nagrizanja istaknuta je makrostruktura uzoraka te ju je moguće analizirati pod mikroskopom. Analiza je obavljena u Laboratoriju za zaštitu materijala pod mikroskopom *Leica MZ6*. Izmjerena je vrijednost ostvarene dubine penetracije uz pomoć popratnog programskog paketa *Leica Application suite*.

4.6 Analiza rezultata ispitivanja

4.6.1 Rezultati vizualne kontrole

Vizualnom kontrolom prije zavarivanja provjeravana je čistoća uzoraka. Potrebno je uvjeriti se da je etanol korišten pri čišćenju ispario s uzoraka. Potrebno je također provjeriti udaljenost svakog pojedinog uzorka u stegi od elektrode kao i putanju pištolja kako bi električni luk bio centriran.

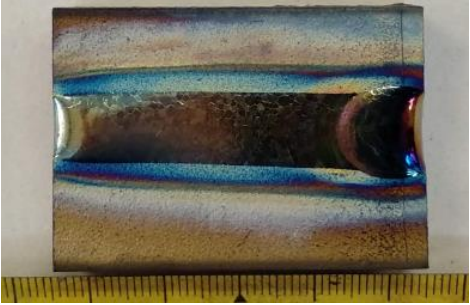
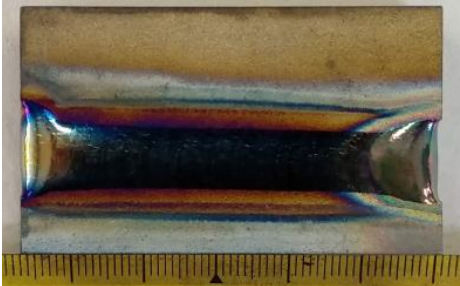
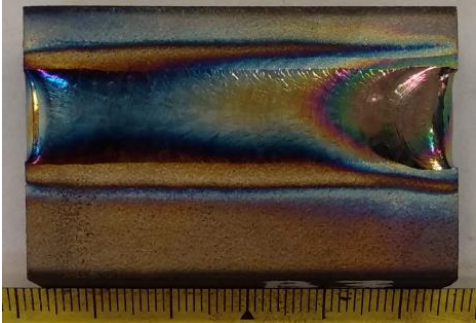
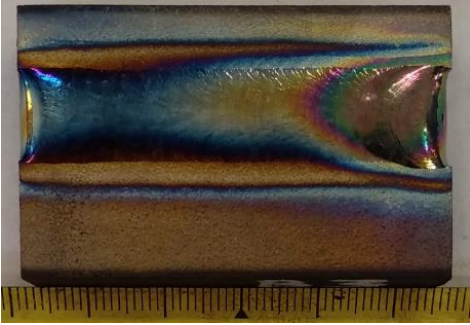
Tijekom zavarivanja za svaki se uzorak prati napon koji se mijenja s promjenom brzine zavarivanja kao i pri promjeni zaštitnog plina. Također se prati ponašanje taline u svim fazama procesa. Ponašanje taline je bilo mirno u skladu s teorijskim razmatranjima za TIG postupak zavarivanja.

Po završetku zavarivanja uzorci ostaju u komori kako bi do hlađenja ispod temperature od 200 °C bili u zaštitnoj atmosferi koju ona pruža. Nakon hlađenja uzorke je dopušteno izvaditi iz komore te pristupiti vizualnoj kontroli navara.

Na svakom od uzoraka je do određene mjere došlo do onečišćenja. Vidljivo je da je stupanj oksidacije zone utjecaja topline za svaki uzorak veći od stupnja oksidacije zavara što sugerira da zaštitna atmosfera unutar komore nije bila na dovoljno visokoj razini.

Estetski navari izgledaju zadovoljavajuće izuzev ulegnuća pri početku i kraju što neće biti od utjecaja na analizu dubine penetracije s obzirom na to da se ti dijelovi izuzimaju iz analize. S obzirom na to da se pri navarivanju nije koristio dodatni materijal nadvišenje je očekivano izuzetno malo. Širina navara je veća kod uzoraka s manjom brzinom zavarivanja, te postoji značajnija razlika u širini navara ako se uspoređuju različite mješavine. Vidljivo je da je za mješavinu argona i helija širi navar nego kod upotrebe čistog argona. Širina navara na uzorku A1 iznosi 14,4 mm, za A2 iznosi 13,7 mm, za B1 iznosi 18,4 mm, za B2 iznosi 15,3 mm. Tablica 15 prikazuje izgled lica navara nakon izvršenog postupka.


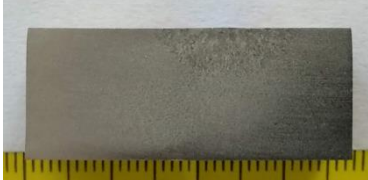
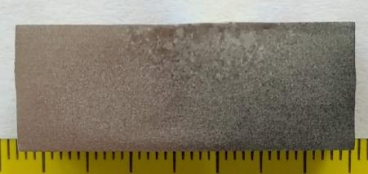
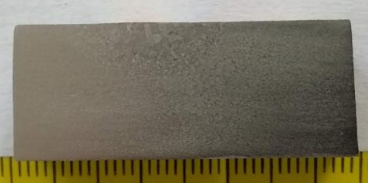
Tablica 13: Izgled lica zavara uzoraka nakon provedenog navarivanja

| Uzorak | Slika |
|--------|--|
| A1 |  A photograph of a welded joint labeled A1. The weld is a dark, horizontal line with a central dark spot. The surrounding metal shows a rainbow-like iridescence. A yellow ruler is visible at the bottom for scale. |
| A2 |  A photograph of a welded joint labeled A2. The weld is a dark, horizontal line with a central dark spot. The surrounding metal shows a rainbow-like iridescence. A yellow ruler is visible at the bottom for scale. |
| B1 |  A photograph of a welded joint labeled B1. The weld is a dark, horizontal line with a central dark spot. The surrounding metal shows a rainbow-like iridescence. A yellow ruler is visible at the bottom for scale. |
| B2 |  A photograph of a welded joint labeled B2. The weld is a dark, horizontal line with a central dark spot. The surrounding metal shows a rainbow-like iridescence. A yellow ruler is visible at the bottom for scale. |

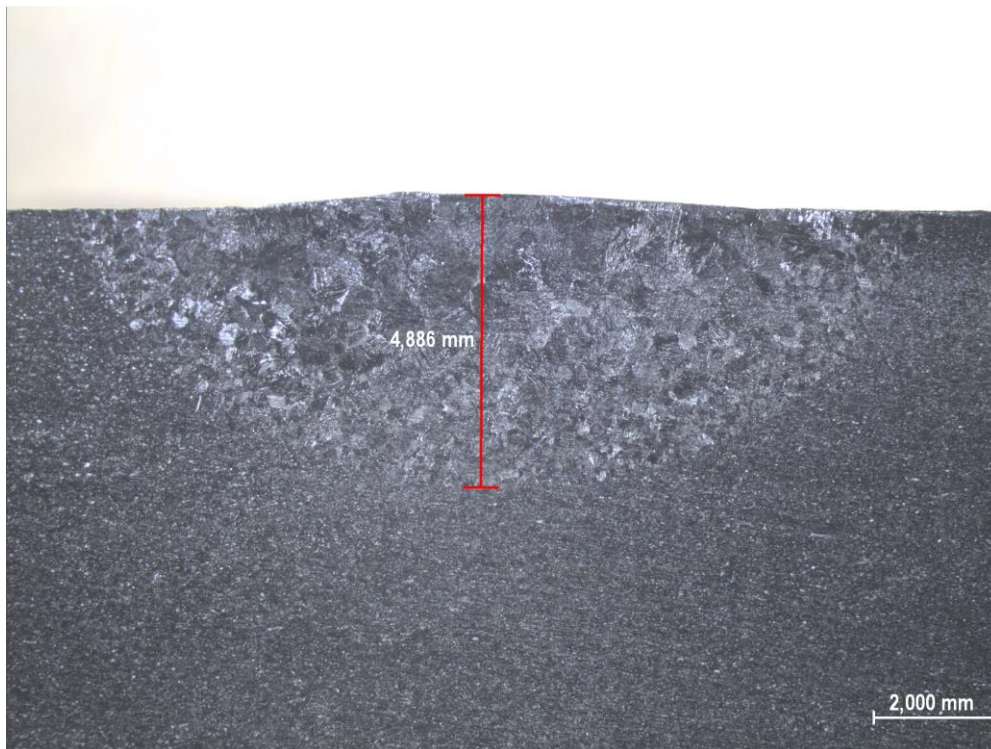
4.6.2 Rezultati makroanalize

Nakon obavljenog rezanja, brušenja, poliranja i nagrizanja pripremljeni uzorci, prikazani u tablici 16, analizirani su ispod mikroskopa kako bi se dobio uvid u dubinu penetracije u ovisnosti o brzini zavarivanja i korištenom zaštitnom plinu.

Tablica 14: Uzorci pripremljeni za makroanalizu

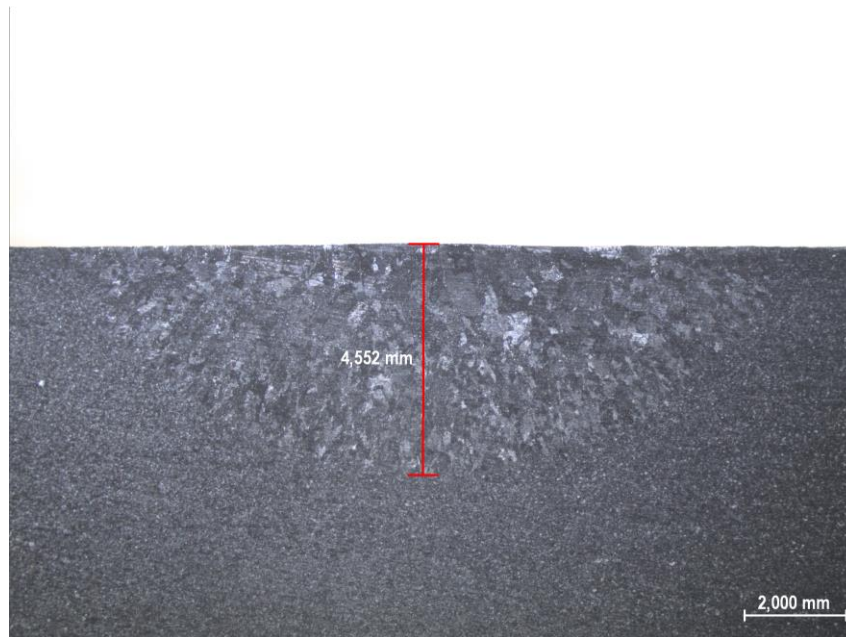
| Uzorak | Slika |
|--------|--|
| A1 |  |
| A2 |  |
| B1 |  |
| B2 |  |

Na slici 31 je prikazan uzorak A1 na kojem je navar izveden brzinom od 9 cm/min pod zaštitom 100 % Ar. Postignuta dubina penetracije iznosi 4,9 mm. Nadvišenje je veoma malo, gotovo nezatno s obzirom na to da je navar rađen bez upotrebe dodatnog materijala. Vidljiva je i razlika u mikrostrukturi utoliko što je blizu središnje osi navara pogrubljenje veće te se ono postupno smanjuje prema rubnim dijelovima navara.



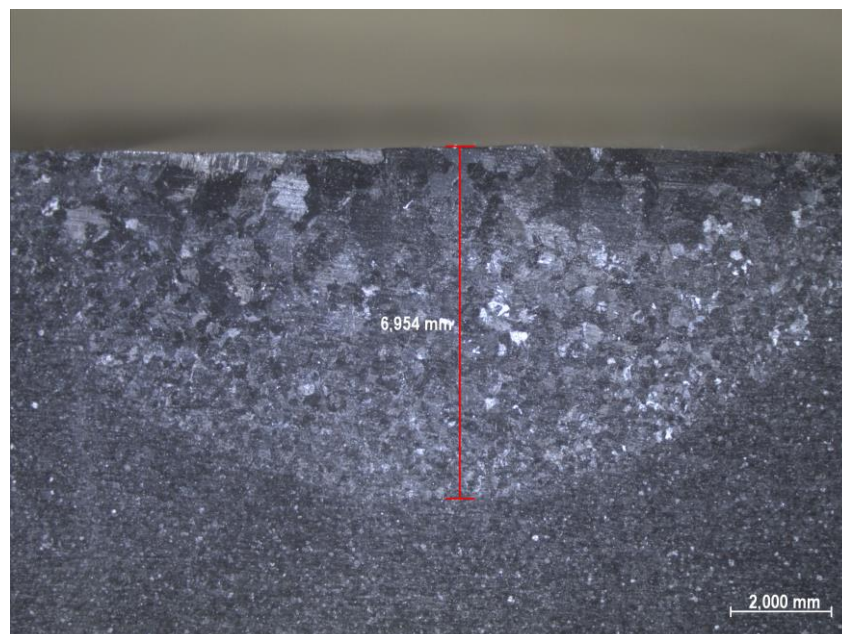
Slika 31: Profil navara i izmjerena dubina penetracije na uzorku A1

Slika 32 prikazuje uzorak A2 na kojem je navar također izveden pod zaštitom 100 % Ar 5,0 ali pri brzini navarivanja od 15 cm/min. Postignuta dubina iznosi 4,6 mm. Kao i u slučaju uzorka A1 vidljivo je pogrubljenje mikrostrukture s jednakom tendencijom njegovog smanjenja od centralne osi navara prema rubnim dijelovima navara. Nadvišenje na uzorku A2 je još manje u usporedbi s uzorkom A1.



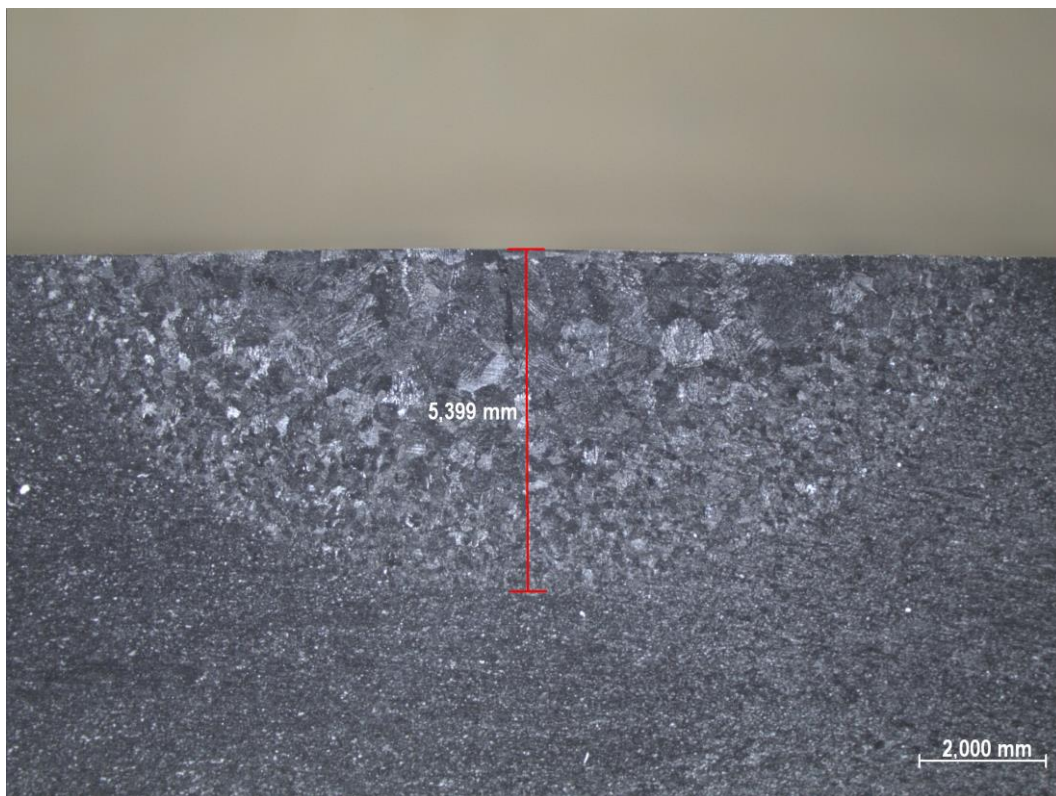
Slika 32: Profil navara i izmjerena dubina penetracije na uzorku A2

Na uzorku B1, prikazanom na slici 33, izmjerena je znatno veća dubina penetracije od uzoraka A1 i A2 te iznosi 7,0 mm. Navar je izveden izveden brzinom od 9 cm/min pod zaštitom mješavine 50 % Ar/50 % He. Kao i kod uzoraka A1 i A3 vidljivo je pogrubljenje mikrostrukture koje opada prema rubnim dijelovima navara.



Slika 33: Profil navara i izmjerena dubina penetracije na uzorku B1

Na uzorku B2, prikazanom na slici 34, izmjerena je dubina penetracije u iznosu od 5,4 mm što je istovremeno veća dubina u odnosu na uzorke A1 i A2, a manja u odnosu na uzorak B1. U slučaju uzorka B2 brzina navarivanja bila je 15 cm/min pod zaštitom mješavine 50 % Ar/50 % He.. Kao i kod prethodnih uzoraka u pogledu mikrostrukture se primjećuje pogrubljenje koje je najizraženije u centralnoj osi navara s tendencijom pada grubosti zrna prema rubnim dijelovima navara.



Slika 34: Profil navara i izmjerena dubina penetracije na uzorku B2

4.7 Rasprava

Vizualnom kontrolom je ustanovljeno da je došlo do oksidacije metala zavara te zone utjecaja topline. Cilj rada je odrediti utjecaj brzine zavarivanja i korištenog zaštitnog plina na dubinu penetracije. Pretpostavlja se da iako je oksidacija metala nepoželjna, osobito kada se radi o stvarnoj primjeni, ona nije od značajnog utjecaja na ostvarenu dubinu penetracije. U stvarnoj primjeni, razina oksidacije u zoni utjecaja topline bi bila prevelika i trebalo bi eliminirati izvore onečišćenja. Bolju zaštitu bi bilo moguće ostvariti zadržavanjem pištolja iznad netom napravljenog zavara kako bi još vrući metal što dulje bio pod zaštitom plina s time da je ovo rješenje ograničeno duljinom zavara. Naime, što je zavar duži to će manji dio njegove površine biti moguće štititi na ovaj način.

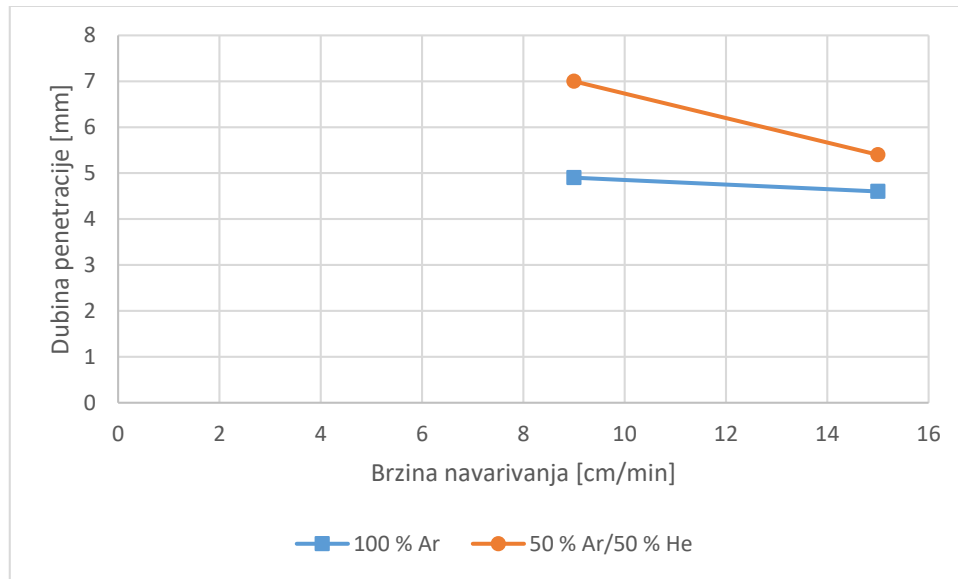
Moguće je i povećati protok zaštitnog plina u pištolju s time da treba biti oprezan da protok ne dosegne previsoku vrijednost na kojoj može doći do turbulencija koje utječu na ponašanje taline i električnog luka. Naposljetku je moguće obaviti provjeru komore i osigurati da nigdje nema pukotina kroz koje komora pušta plin.

Analizom profila potvrđena su teorijska razmatranja. U pogledu postignute dubine penetracije ustanovljeno je da je dubina penetracije opadala povećanjem brzine zavarivanja u obje faze te da su postignute dubine penetracije općenito veće u slučaju mješavine 50 % Ar/50 % He u odnosu na čisti 100 % Ar.

Izmjerene dubine penetracije i širine navara za svaki od uzoraka kao i uočene vrijednosti napona pri navarivanju dane su pregledno u tablici 15. Smanjenje izmjerene dubine penetracije na uzorcima A1 i A2, pri prelasku brzine navarivanja s 9 cm/min na 15 cm/min iznosi 6,12 %. Smanjenje izmjerene dubine penetracije na uzorcima B1 i B2, pri prelasku s brzine navarivanja u iznosu od 9 cm/min na 15 cm/min iznosi 22,86 %. Za istu brzinu zavarivanja od 9 cm/min povećanje izmjerene dubine penetracije u slučaju mješavine ISO 14175 – I3 ArHe – 50 u odnosu na ISO 14175 – I1 - Ar iznosi 42,86 % dok za brzinu zavarivanja od 15 cm/min ono iznosi 17,39 %. Grafički prikaz izmjerenih dubina penetracije u ovisnosti o brzini navarivanja i korištenom zaštitnom plinu prikazan je na slici 35. Iz dobivenih mjerenja, a što je vidljivo i u grafu može se primjetiti veći pad dubine penetracije pri povećanju brzine navarivanja za mješavinu ISO 14175 – I3 – ArHe – 50.

Tablica 15: Pregled izmjerenih vrijednosti pri provedbi eksperimenta

| Uzorak | Vrsta plina | Brzina navarivanja [cm/min] | Napon [V] | Dubina penetracije [mm] | Širina navara [mm] |
|-----------|-------------|-----------------------------|-----------|-------------------------|--------------------|
| A1 | 100 % Ar | 9 | 12,9 | 4,9 | 14,4 |
| A2 | | 15 | 13,5 | 4,6 | 13,7 |
| B1 | 50 % Ar + | 9 | 15,6 | 7,0 | 18,4 |
| B2 | 50 % He | 15 | 16,1 | 5,4 | 15,3 |



Slika 35: Graf ovisnosti dubine penetracije i brzine navarivanja o korištenoj mješavini zaštitnog plina

5 ZAKLJUČAK

Titanij i njegove legure sve su zastupljeniji konstrukcijski materijali zahvaljujući visokoj čvrstoći, niskoj gustoći i visokoj otpornosti na koroziju. Cilj rada je odrediti utjecaj brzine zavarivanja i mješavine zaštitnog plina kod TIG zavarivanja titanija na dubinu penetracije. [2]

U tu svrhu u laboratoriju su rađeni navari mehaniziranim TIG postupkom na uzorcima titanija pri čemu su korištene dvije mješavine zaštitnog plina te dvije različite brzine zavarivanja kako bi se utvrdio njihov utjecaj na dubinu penetracije. Postupak je mehaniziran kako bi se osigurala ponovljivost i preciznost kod izvođenja navara. Korišteni osnovni materijal je tehnički titanij razreda ASTM 1. Prvi korišteni zaštitni plin bio je 100 % argon, naziva Argon 5,0, oznake ISO 14175 - I1 – Ar prema normi HRN EN ISO 14175:2008. Drugi korišteni plin je mješavina 50 % helija u argonu oznake ISO 14175 – I3 – ArHe – 50 prema ranije navedenoj normi. Postupak je proveden u komori za zavarivanje koja je bila ispunjena Argonom 4,8 u obje faze zavarivanja.

Nakon provedenog zavarivanja temeljem vizualne kontrole moguće je zaključiti da je došlo do oksidacije na uzorcima ali je pretpostavka da ona slabo utječe na postignutu dubinu penetracije. Za osiguranje dobre zaštite od atmosferskih utjecaja od velike je važnosti provjera komore za zavarivanje, a preporuka je postavljanje oksimetra u nju kako bi postojao uvid u prisutnost kisika. Moguće je i povećanje protoka zaštitnog plina iz pištolja pazeći pri tome na ponašanje taline ne bi li se izbjegle moguće turbulencije. Uz navedeno, moguće je postići bolju zaštitu i zadržavanjem pištolja iznad netom završenog zavarenog spoja kako bi se, dok je njegova temperatura još vrlo visoka i metal reaktivan, spriječilo onečišćenje zavarenog spoja i zone utjecaja topline uz napomenu da je ovo rješenje manje efektivno ako se radi o dužem zavarenom spoju.

Temeljem rezultata analize profila navara potvrđena su teorijska razmatranja vezana uz utjecaj brzine zavarivanja i korištenog zaštitnog plina na dubinu penetracije. Smanjenje izmjerene dubine penetracije pri povećanju brzine navarivanja s 9 cm/min na 15 cm/min za uzorke A1 i A2 iznosi 6,12 %.. U slučaju uzoraka B1 i B2 za jednaku promjenu brzine navarivanja smanjenje penetracije iznosi 22,86 %. Temeljem rezultata analize profila navara izmjerena je veća dubina penetracije kod uzoraka kod kojih se koristila mješavina ISO 14175 – I3 – ArHe – 50 kao zaštitni plin u odnosu na ISO 14175 - I1 – Ar.

Za jednaku vrijednost brzine navarivanja od 9 cm/min, usporedbom penetracije pod zaštitom dviju mješavina, povećanje penetracije je u slučaju mješavine ISO 14175 – I3 – ArHe – 50 u iznosu od 42,86 %, dok je povećanje penetracije u slučaju brzine od 15 cm/min, za istu mješavinu, u iznosu od 17,39 %.

U pogledu daljnjih istraživanja preporučuje se ispitivanje utjecaja plinske mješavine ISO 14175 – I3 – ArHe – 50 na mehanička svojstva zavarenog spoja.

LITERATURA

- [1] Čorić, D.: Posebni metalni materijali – III Dio, (digitalni udžbenik), Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [2] Čorić, D.: Titan i njegove legure – svojstva i primjena, Poseban prilog časopisa „Zavarivanje“ br. 3/4 2017.
- [3] Filetin, T., Kovačićek, F., Indolf, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojарstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [4] ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Volume 2, 1990.
- [5] Veiga, C., Davim, J.P., Loureiro, A.J.R.: Properties and Applications of Titanium Alloys: A Brief Review, Reviews on advanced materials science, 2012.
- [6] Leyens, C., Peters, M.: Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Njemačka, 2003.
- [7] Yassin, M. A., Khairul, S. M. S., Ishak, M.: Welding of titanium (Ti-6Al-4V) Alloys: A Review, Proceedings National Graduate Conference 2012.
- [8] <https://static.thefabricator.com> (preuzeto 8.10.2018.)
- [9] Lütjering, G., Williams, J.C.: Engineering Materials and Processes: Titanium, 2nd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Njemačka 2007.
- [10] Leyens, C., Peters, M.: Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Njemačka, 2003
- [11] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Priručnik: Zavarivački i srodni postupci, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Fakultet strojарstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [12] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojарstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [13] Storer, J., Haynes, J.H.: The Haynes Welding Manual, Haynes publishing group, SAD, 1994.
- [14] Weman, K.: Welding processes handbook, 2nd edition, Woodhead publishing, Velika Britanija, 2012.

- [15] Oates, W., Saitta, A., .; Welding handbook – Volume 4: Materials and applications part 2, 8th edition, American Welding Society, SAD
- [16] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Technical journal 8, 4(2014), 425-432
- [17] <http://www.weldinghistory.org> (preuzeto 14.10.2018)
- [18] <http://www.netwelding.com> (preuzeto 14.10.2018.)
- [19] <https://www.walter.com> (preuzeto 14.10.2018.)
- [20] O'Brien, R. L.; Welding handbook – Volume 2: Welding processes, American Welding Society, SAD
- [21] <https://www.messergroup.com> (preuzeto 14.10.2018.)
- [22] <https://www.millerwelds.com> (preuzeto 15.10.2018.)
- [23] <http://navybmr.com> (preuzeto 15.10.2018.)
- [24] <http://welding-information.tokenools.com.au> (preuzeto 17.10.2018)
- [25] ISO 6848:2015 - Arc welding and cutting - Nonconsumable tungsten electrodes – Classification
- [26] <https://www.hampdon.com.au> (preuzeto: 18.10.2018.)
- [27] <http://www.arcmachines.com/news/case-studies> (preuzeto: 20.10.2018.)
- [28] Oates, W. R., Saitta, A.; Welding handbook – Volume 4: Materials and applications part 2, American Welding Society, SAD
- [29] <http://www.ckworldwide.com> (preuzeto 20.10.2018.)
- [30] Smith, S. L., Threadgill, P., Gittos, M.; Welding Titanium, A Designers and Users Handbook, World centre for materials joining technology, 1999, Velika Britanija
- [31] <http://asm.matweb.com> (preuzeto: 30.10.2018.)
- [32] [https://www.fronius.com/~downloads/](https://www.fronius.com/~/downloads/) (preuzeto: 30.10.2018.)
- [33] http://old.messergroup.com/de/Produkte_und_Loesungen (preuzeto: 31.10.2018.)

- [34] HRN EN ISO 14175:2008: Welding consumables - Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes
- [35] <http://hiq.linde-gas.com/en> (preuzeto: 31.10.2018.)
- [36] Halmshaw, R.: Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints, 2nd edition, Abington Publishing. 1996. Velika Britanija
- [37] Samuels, L. E.: Metallographic polishing by mechanical methods, 3rd edition, American Society for Metals, 1982. SAD