

Karakterizacija zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija

Kušeković, Stjepan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:502841>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Stjepan Kušeković

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Stjepan Kušeković

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na pruženoj pomoći i savjetima tijekom pisanja ovog rada te asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. na svim savjetima i trudu. Također, zahvaljujem tehničkom suradniku Ivanu Vovku na izdvojenom vremenu i pomoći pri provedbi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem i djelatnicima Zavoda za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju (ZIT d.o.o.) na ustupljenim uzorcima i pomoći pri provedbi ispitivanja mehaničkih svojstava.

Posebno bih želio zahvaliti svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na pruženoj podršci i motivaciji tijekom cjelokupnog studiranja.

Stjepan Kušeković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Stjepan Kušeković**

JMBAG: 0035219862

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of the welded joint on unalloyed titanium pipe**

Opis zadatka:

Titanij i njegove legure primjenjuju se u mnogim granama industrije zbog vrlo dobrih svojstava koja uključuju visoku specifičnu čvrstoću, izvrsnu korozivnu otpornost, otpornost na umor i puzanje te općenitu otpornost na povišene temperature. Kao visokovrijedan konstrukcijski materijal koriste se za dijelove zrakoplova, raketa, brodova i podmornica te u kemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Zbog svojstva biokompatibilnosti primjenjuju se kao ugradbeni materijal u ortopediji i kirurgiji.

Zavarljivost titanija i njegovih legura je primarni zahtjev pri njihovoj konstrukcijskoj primjeni. Iako se mogu uspješno zavarivati nizom zavarivačkih postupaka, u zavarenim spojevima često nastaju pore i grubozrnata mikrostruktura te velika zaostala naprezanja, što može dovesti do znatnog smanjenja duktilnosti i pojave pukotina.

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati mikrostrukturne promjene koje nastaju pri zavarivanju titanija i titanijevih legura te objasniti kako nastale promjene utječu na mehanička, korozivna i ostala svojstva zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti karakterizaciju mikrostrukture i ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija. Dobivene rezultate analizirati i donijeti odgovarajuće zaključke o kvaliteti zavarenog spoja.

Potrebno je navesti eventualno dobivenu pomoć pri izradi rada i u popisu literature svu korištenu literaturu.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

4. svibnja 2023.

6. srpnja 2023.

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadala:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Rede

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. TITANIJ I TITANIJEVE LEGURE	2
2.1. Povijest titanija i njegovih legura	3
2.2. Proizvodnja titanija.....	3
2.3. Nelegirani (tehnički) titanij	6
2.4. Podjela titanijevih legura	9
2.4.1. α -legure i približno α -legure	9
2.4.2. $(\alpha+\beta)$ -legure	10
2.4.3. β -legure	10
2.5. Primjena titanija i njegovih legura.....	11
3. ZAVARIVANJE TITANIJA	13
3.1. Zavarivanje titanija snopom elektrona	14
3.2. MIG zavarivanje titanija.....	16
3.3. TIG zavarivanje titanija	17
3.3.1. Princip TIG zavarivanja.....	18
3.3.2. Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja	19
4. PROMJENE U ZAVARU TITANIJA I NJEGOVIH LEGURA.....	20

4.1. Mikrostrukturne promjene u zavarenom spoju titanija.....	20
4.2. Mehanička svojstva zavarenog spoja titanija	24
5. EKSPERIMENTALNI DIO.....	26
5.1. Cilj eksperimentalnog dijela i provođenje ispitivanja	26
5.2. Ispitni materijal.....	26
5.3. Ispitivanje vlačne i savojne čvrstoće	29
5.3.1. Savojno ispitivanje.....	29
5.3.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće	32
5.4. Analiza makrostrukture zavarenog spoja	35
5.5. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja	36
6. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA	46
6.1. Osvrt na ispitivanje savijanjem.....	46
6.2. Osvrt na ispitivanje vlačne čvrstoće	46
6.3. Osvrt na analizu makrostrukture.....	47
6.4. Osvrt na analizu mikrostrukture	47
7. ZAKLJUČAK	48
LITERATURA.....	49

POPIS SLIKA

Slika 1.	Titanijeva spužva i profili od titanijeve legure [3].....	2
Slika 2.	Rudače ilmenita (lijevo) i rutila (desno) [6], [7].....	4
Slika 3.	Titanijeva spužva [9].....	5
Slika 4.	Ingoti titanija [10]	6
Slika 5.	Utjecaj intersticijskih elemenata na vlačnu čvrstoću tehničkog titanija [11]	7
Slika 6.	Kristalne rešetke titanija [11].....	8
Slika 7.	Lopaticice plinske turbine izrađene od titanijeve legure [19].....	12
Slika 8.	Spojevi zavareni TIG postupkom s onečišćenim zaštitnim plinom [20]	13
Slika 9.	Tehnološka odstupanja pri montaži zavarenog spoja: a) smicanje, b) razmicanje, c) otvaranje rubova [22].....	15
Slika 10.	Prikaz opreme za zavarivanje MIG metodom [24].....	16
Slika 11.	Princip zavarivanja TIG metodom [28]	19
Slika 12.	Temperaturna područja zavarenog spoja TiAl6V4 legure [30]	21
Slika 13.	Mikrostruktura TIG zavarenog spoja titanijeve legure [27]	22
Slika 14.	Mikrostruktura ZUT-a zavarenog spoja titanijeve legure [27]	22
Slika 15.	Mikrostruktura dijela ZUT-a koji nije zagrijan iznad temperature α/β prekrizacije [27]	23
Slika 16.	Mikrostruktura u osnovnom materijalu zavarenog spoja titanijeve legure [27]	24
Slika 17.	Ovisnost $R_{p0,2}$ i istezljivosti o brzini hlađenja ($\alpha+\beta$)-legura [30].....	25
Slika 18.	Zavareni spoj na cijevi od nelegiranog titanija ASTM B265 GR 2.....	27
Slika 19.	Detalj zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija	27
Slika 20.	Shematski prikaz zavarivanja cijevi s redosljedom prolaza	28
Slika 21.	Kidalica prilagođena za savojno ispitivanje	29
Slika 22.	Pripremljeni uzorci za savojno ispitivanje.....	30
Slika 23.	Savojno opterećen uzorak na kidalici	31
Slika 24.	Ispitni uzorak nakon završenog savojnog ispitivanja	31
Slika 25.	Mikropukotine na licu zavara ispitnog uzorka ispitivanog savijanjem	32
Slika 26.	Ispitni uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće	33
Slika 27.	Statičko vlačno ispitivanje	33
Slika 28.	Slomljeni ispitni uzorak nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	34
Slika 29.	Makrostruktura zavarenog spoja prije procesa nagrizanja.....	35

Slika 30.	Makrostruktura zavarenog spoja u nagrizenom stanju	36
Slika 31.	Uređaj Mecatech 250 SPI	37
Slika 32.	Postupak brušenja uzorka na uređaju Mecatech 250 SPI	37
Slika 33.	Uzorak zavarenog spoja u poliranom stanju	38
Slika 34.	Mikrostruktura osnovnog materijala u poliranom stanju, pri povećanju 50×	39
Slika 35.	Mikrostruktura metala zavara u poliranom stanju, snimljeno pri povećanju 50× .	39
Slika 36.	Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavara, polirano stanje, pri povećanju 50×	40
Slika 37.	Mikrostruktura osnovnog materijala u nagrizenom stanju, pri povećanju 50×	41
Slika 38.	Mikrostruktura osnovnog materijala u nagrizenom stanju, pri povećanju 200× ...	41
Slika 39.	Mikrostruktura niskotemperaturnog ZUT-a u sredini zavara, snimljeno pri povećanju 50×	42
Slika 40.	Mikrostruktura niskotemperaturnog ZUT-a u sredini zavara, snimljeno pri povećanju 200×	42
Slika 41.	Mikrostruktura ZUT-a uz tjeme i u sredini zavara, pri povećanju 50×	43
Slika 42.	Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavara, lijevo, snimljeno pri povećanju 200×	43
Slika 43.	Mikrostruktura metala zavara u tjemenu, snimljeno pri povećanju 50×	44
Slika 44.	Mikrostruktura metala zavara u sredini zavara, snimljeno pri povećanju 50×	44
Slika 45.	Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljeno pri povećanju 50×	45
Slika 46.	Mikrostruktura metala zavara u sredini, nagrizeno stanje, pri povećanju 200×	45

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Sastav i mehanička svojstva nelegiranog titanija [11]	7
Tablica 2.	Kemijski sastav i mehanička svojstva α -legura [13].....	9
Tablica 3.	Kemijski sastav i čvrstoća nekih ($\alpha+\beta$)-titanijevih legura [15].....	10
Tablica 4.	Kemijski sastav osnovnog materijala ASTM B265 GR 2.....	26
Tablica 5.	Mehanička svojstva osnovnog materijala ASTM B265 GR 2	26
Tablica 6.	Parametri zavarivanja cijevi	28
Tablica 7.	Vrijednosti vlačne čvrstoće ispitivanih uzoraka.....	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost
f	Hz	Frekvencija
F_{\max}	N	Maksimalna sila
I	A	Jakost električne struje
R_e	MPa	Granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
T_L	K	Temperatura likvidusa
T_S	K	Temperatura solidifikacije
T_β	K	β prijelazna temperatura
U	V	Električni napon

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
BCC	kubična prostorno centrirana rešetka
ELI	Extra-Low Interstitial
HCP	heksagonska gusto slagana rešetka
MIG	Metal Inert Gas
MZ	metal zavara
OM	osnovni materijal
TIG	Tungsten Inert Gas
ZT	zona taljenja
ZUT	zona utjecaja topline

SAŽETAK

U ovom radu provedena je karakterizacija zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija oznake ASTM B265 GR2.

U teorijskom dijelu rada opisan je titanij i njegove legure, a posebna pozornost posvećena je zavarivanju titanija te utjecaju zavarivanja na mikrostrukturu i mehanička svojstva.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je savojno ispitivanje, statičko vlačno ispitivanje te analiza makrostrukture i mikrostrukture u području zavarenog spoja izvedenog TIG postupkom.

Pri savojnom ispitivanju pod kutom od 180° pojavile su se sitne pukotine u metalu zavara, ali nije došlo do loma ispitnih uzoraka.

Pri statičkom vlačnom ispitivanju dobivene su znatno više vrijednosti vlačne čvrstoće od tražene vrijednosti koja iznosi 345 MPa.

Zavar ima pravilnu geometriju, zona utjecaja topline je relativno široka, a linija staljivanja nije izražena kao ni granica između pojedinih prolaza.

Mikrostruktura osnovnog materijala je relativno sitnozrnata, a sastoji se od α -kristala i vrlo male količine β -faze koja je prisutna i u zoni utjecaja topline te metalu zavara. U relativno širokoj zoni utjecaja topline kristalna zrna α -faze su puno krupnija, a njihova veličina raste prema liniji staljivanja. Metal zavara ima tipičnu ljevačku mikrostrukturu, podjednaku u tjemenu, sredini i korijenu zavara.

Na temelju analize dobivenih rezultata utvrđena je zadovoljavajuća kvaliteta zavarenog spoja.

Ključne riječi: titanij, zavareni spoj, mikrostruktura, mehanička svojstva

SUMMARY

In this thesis, the characterization of the welded joint on a pipe made of unalloyed titanium mark ASTM B265 GR2 was carried out.

In the theoretical part of the work, titanium, and its alloys are described, and special attention is paid to the welding of titanium and the influence of welding on the microstructure and mechanical properties.

In the experimental part of the work, flexural testing, tensile testing, and analysis of the macrostructure and microstructure of the TIG welded joint were performed.

During the bending test at an angle of 180°, small cracks appeared in the weld metal, but the test specimens did not break.

During the tensile test, significantly higher tensile strength values than the required value of 345 MPa were obtained.

The weld has a regular geometry, the heat-affected zone is relatively wide, the melting line is not observed, nor is the boundary between individual passes.

The microstructure of the base material is relatively fine-grained, consisting of α -crystals and a very small amount of β -phase, which is also present in the heat-affected zone and the weld metal. In the relatively wide heat-affected zone, the crystal grains of the α -phase are much larger, and their size increases towards the melting line. The weld metal has a typical foundry microstructure, equal in the face, middle, and root of the weld.

Based on the analysis of the obtained results, the satisfactory quality of the welded joint was determined.

Keywords: titanium, welded joint, microstructure, mechanical properties

1. UVOD

Visoka specifična čvrstoća, mala gustoća i izvrsna otpornost na koroziju glavna su svojstva koja čine titanij i njegove legure pogodnim za različite primjene. U današnje se vrijeme titanij koristi za izradu dijelova zrakoplova, brodova i podmornica, ali i za komponente u kemijskoj i farmaceutskoj industriji. Također, široku primjenu pronalazi i u medicini gdje se koristi za izradu implantata zbog odlične biokompatibilnosti. S druge strane, relativno visoki troškovi titanija ograničavaju njegovu širu upotrebu, primjerice u automobilske industriji. Da bi se opravdali visoki troškovi uzrokovani primjenom titanija, moraju se iskoristiti njegova specifična svojstva kojima se izdvaja od drugih jeftinijih materijala [1].

Općenito, s obzirom na legirajuće elemente i mikrostrukturu, titanijeve se legure dijele u četiri glavne skupine: nelegirani ili tehnički titanij, α - i približno α -legure, $(\alpha+\beta)$ -legure i β -legure. Mikrostrukturno stanje utječe na mnoga svojstva pa tako i na zavarljivost legura. Zbog velikog unosa topline pri zavarivanju osnovna mikrostruktura se mijenja pa mehanička i druga svojstva mogu biti narušena u usporedbi s osnovnim materijalom. Osim toga treba uzeti u obzir i svojstvo polimorfnosti titanija čija heksagonska gusto slagana (HCP) rešetka na 885 °C prelazi u kubičnu prostorno centriranu (BCC) rešetku, koju zadržava do tališta. U ovom radu posebna pažnja posvećena je promjenama u mikrostrukтури koje nastaju tijekom procesa zavarivanja titanija i njegovih legura. Titanijeve legure mogu se spojiti korištenjem različitih tehnika zavarivanja kao što su elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. *Tungsten Inert Gas* - TIG), elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (engl. *Metal Inert Gas* - MIG), zavarivanje elektronskim mlazom, elektrootporno zavarivanje, zavarivanje laserom i druge tehnike [1].

Budući da je TIG metoda najčešće korištena metoda zavarivanja titanija i titanijevih legura, upravo je zavareni spoj nelegiranog titanija izveden TIG metodom uzet kao uzorak za ispitivanje u eksperimentalnom dijelu ovog rada. Provedena je karakterizacija mikrostrukture u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara te ispitivanje mehaničkih svojstava kako bi se analizirala kvaliteta zavarenog spoja.

2. TITANIJ I TITANIJEVE LEGURE

Titanij (Ti) je kemijski element s atomskim brojem 22. To je metal srebrne boje koji se ističe po svojoj visokoj čvrstoći i iznimnoj otpornosti na koroziju. Jedna od ključnih karakteristika titanija je njegova visoka biokompatibilnost, što ga čini pogodnim materijalom za medicinske implantate. Titanijeve su legure uglavnom kombinacije titanija s drugim metalima poput aluminijske, vanadijske ili nikla. Ove legure objedinjuju prednosti titanija s dodatnim svojstvima drugih metala, tvoreći materijale s poboljšanom čvrstoćom, otpornošću na visoke temperature ili drugim specifičnim svojstvima. U Zemljinoj kori sadržano je tek oko 0,7 % titanija, što ga čini tek četvrtim najzastupljenijim strukturnim metalom. Titanij i njegove legure teško se obrađuju odvajanjem čestica zbog žilavosti, a može se dogoditi i zapaljenje strugotine. Njihova kristalna struktura ograničava mogućnost hladnog oblikovanja pa je uobičajeno da se oblikuju u toplom stanju. Troškovi proizvodnje, a posebno troškovi obrade, još uvijek su iznimno visoki, što uvelike utječe na njihovu primjenu. Sve titanijeve legure mogu se dobro zavarivati u inertnoj atmosferi ili vakuumu, ali kod zavarivanja titanija postoji mogućnost pojavljivanja grešaka koje mogu utjecati na svojstva i strukturu zavarenog spoja [2].

Na slici 1 prikazan je titanij u obliku titanijske spužve iz koje se dobivaju poluproizvodi titanijskih legura.



Slika 1. Titanijeva spužva i profili od titanijske legure [3]

2.1. Povijest titanija i njegovih legura

Prvu spoznaju o novom, nepoznatom elementu prisutnom u tamnom, magnetskom željeznom pijesku (ilmenitu) iznio je 1791. godine William Gregor, engleski svećenik i mineralog. Godine 1795., M.H. Klaproth, njemački kemičar, analizirao je rutil, mineral koji je stigao iz Mađarske i identificirao oksid nepoznatog elementa, istog onog koji je uočio i Gregor. Klaproth je nazvao taj element titanijem prema Titanima, moćnim sinovima Zemlje u grčkoj mitologiji. U međuvremenu je u više navrata pokušavao izolirati metal iz titanijeve rudače koristeći titanijev tetraklorid (TiCl_4). Proizvodnja duktilnog, visokokvalitetnog titanija i dalje je bila vrlo zahtjevna zbog snažne tendencije ovog metala da reagira s kisikom i dušikom iz zraka. Raniji pokušaji redukcije TiCl_4 upotrebom natrija ili magnezija rezultirale su tek malim količinama lomljivog metala titanija. Tek sredinom 20. stoljeća William J. Kroll razvio je komercijalno prihvatljiv postupak dobivanja titanija. Taj je postupak uključivao redukciju titanijevog tetraklorida magnezijem u atmosferi inertnog plina. Dobiveni titanij nazvan je „titanijeva spužva“ zbog svog poroznog i spužvastog oblika. Taj poznati Krollov proces ostao je uglavnom nepromijenjen pa je i danas dominantni proces za proizvodnju titanija. Važno je napomenuti da je kapacitet proizvodnje TiCl_4 postojao i prije interesa za proizvodnju titanija kao metalnog materijala zbog toga što je TiCl_4 osnovni materijal za sintetički, visokokvalitetni TiO_2 koji se koristi za izradu boja i pigmenta. Čak i danas, samo 5 % proizvodnje TiCl_4 koristi se za proizvodnju titanija u obliku metala [4].

2.2. Proizvodnja titanija

Titanij se obično pojavljuje u mineralnom pijesku koji sadrži ilmenit (FeTiO_3), mineral koji se nalazi u planinama Ilmen u Rusiji, a može sadržavati i rutil (TiO_2), mineral koji se uglavnom može pronaći u pijesku na obalama Australije, Indije i Meksika. Titanijev dioksid je bijeli pigment koji se koristi za izradu boja, papira i plastike te zauzima većinu svjetske proizvodnje titanija. Osim Rusije, Australije, Indije i Meksika, nalazišta ovih minerala uključuju područja SAD-a, Kanade, Južne Afrike, Sijera Leone, Ukrajine, Norveške i Malezije [5].

Na slici 2 prikazane su rudače ilmenita i rutila iz kojih se dobiva titanij.



Slika 2. Rudače ilmenita (lijevo) i rutila (desno) [6], [7]

Titanij se dobiva Krollovim postupkom. Taj postupak uključuje ekstrakciju, pročišćavanje, proizvodnju spužvaste mase, stvaranje legure pretaljivanjem te oblikovanje u poluproizvode [8].

- Ekstrakcija

Dok se rutil može koristiti u svom prirodnom obliku, ilmenit se obrađuje kako bi se uklonilo željezo tako da sadrži najmanje 85 % titanijevog dioksida. Ovi se materijali stavljaju u reaktor s fluidiziranim slojem zajedno s plinovitim klorom i ugljikom. Materijal se zatim zagrijava do 900 °C, a naknadna kemijska reakcija rezultira stvaranjem nedovoljno čistog titanijevog tetraklorida (TiCl_4) i ugljikovog monoksida. Nečistoće su rezultat činjenice da se na početku ne koristi čisti titanijev dioksid. Stoga se različiti neželjeni metalni kloridi dobiveni ekstrakcijom moraju ukloniti [8].

- Pročišćavanje

Produkti ekstrakcije stavljaju se u velike destilacijske spremnike i zagrijavaju. Tijekom ovog koraka, nečistoće se odvajaju pomoću frakcijske destilacije i taloženja. Ovaj postupak uklanja metalne kloride uključujući kloride željeza, vanadija, cirkonija, silicija i magnezija [8].

- Proizvodnja spužvastog titanija

Nakon pročišćavanja, dobiveni čisti titanijev tetraklorid prenosi se kao tekućina u reaktorsku posudu od nehrđajućeg čelika. Zatim se dodaje magnezij i spremnik se zagrijava na oko 1100 °C. U spremnik se upumpava argon kako bi se uklonio zrak i spriječila kontaminacija kisikom ili dušikom. Magnezij reagira s klorom stvarajući tekući magnezijev klorid, što ostavlja čisti titanij u krutom stanju budući da je talište titanija više od temperature na kojoj se odvija ova reakcija. Kruti titanij uklanja se iz reaktora i zatim se tretira vodom i klorovodičnom kiselinom kako bi se uklonio višak magnezija i magnezijevog klorida. Dobivena je krutina porozni metal koji se naziva titanijeva spužva, prikazana na slici 3 [8].

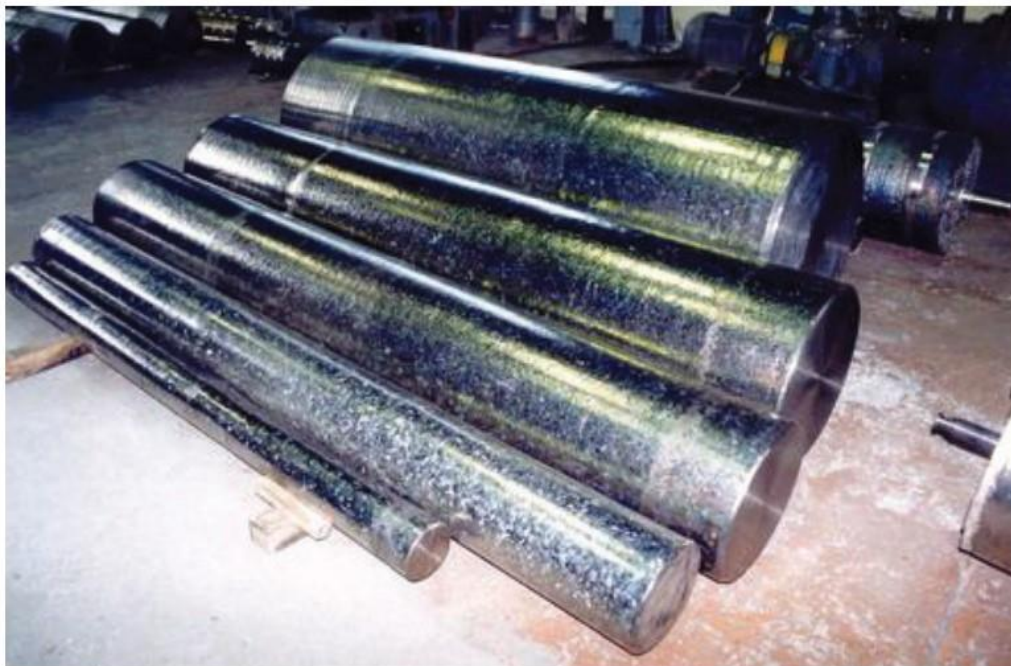


Slika 3. Titanijeva spužva [9]

- Stvaranje legure

Dobivena titanijeva spužva može se pretvoriti u različite titanijeve legure pomoću elektrolučne peći s potrošnim elektrodama. U ovom koraku titanijeva spužva miješa se s raznim legirnim elementima i metalnim otpadom. Točan omjer spužve i legirnih elemenata određuje se prije proizvodnje ovisno o namjeni. Ta se masa zatim preša i zavaruje zajedno, tvoreći spužvastu elektrodu. Spužvasta elektroda potom se stavlja u vakuumsku peć kako bi se rastalila. U bakrenom spremniku, koji se hladi vodom, za

taljenje spužvaste elektrode koristi se električni luk kako bi se u konačnici formirao ingot. Sav zrak u spremniku se ili uklanja kako bi se stvorio vakuum ili se spremnik puni argonom kako bi se spriječila kontaminacija. Uobičajeno je da se ingot pretapa dva do tri puta kako bi se proizveo komercijalno prihvatljiv materijal. Nakon što je dobiven ingot zadovoljavajuće kvalitete, on se uklanja iz peći i pregledava kako bi se uočili eventualni nedostaci. Ingot se zatim šalje na daljnju preradu i oblikovanje u krajnji proizvod. Na slici 4 mogu se vidjeti dobiveni ingoti titanija [8].

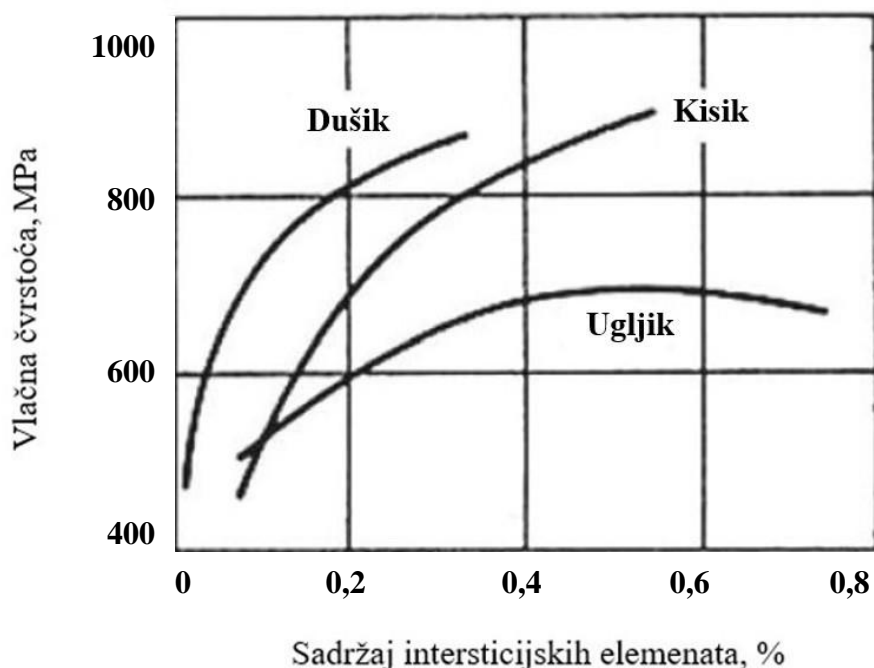


Slika 4. Ingoti titanija [10]

2.3. Nelegirani (tehnički) titanij

Nelegirani (tehnički) titanij je tvrd metal srebrno-bijele boje. On ima izvrsnu korozivsku otpornost zbog tankog sloja oksida koji se formira na njegovoj površini. Nelegirani titanij otporan je na razne kiseline, osim fluorovodične (HF), fosforne kiseline (H_3PO_4) te koncentrirane sumporne kiseline (H_2SO_4). Ovaj se metal često primjenjuje tamo gdje je potrebna visoka korozivska otpornost, a posebno kada čvrstoća nije ključna. Granica razvlačenja tehničkog titanija varira od 170 MPa do 480 MPa, a ta varijacija proizlazi iz prisustva intersticijskih elemenata, pri čemu udjeli kisika, dušika i ugljika imaju vrlo važnu ulogu.

Na slici 5 prikazan je utjecaj udjela ovih triju intersticijskih elemenata na vlačnu čvrstoću nelegiranog titanija [11].



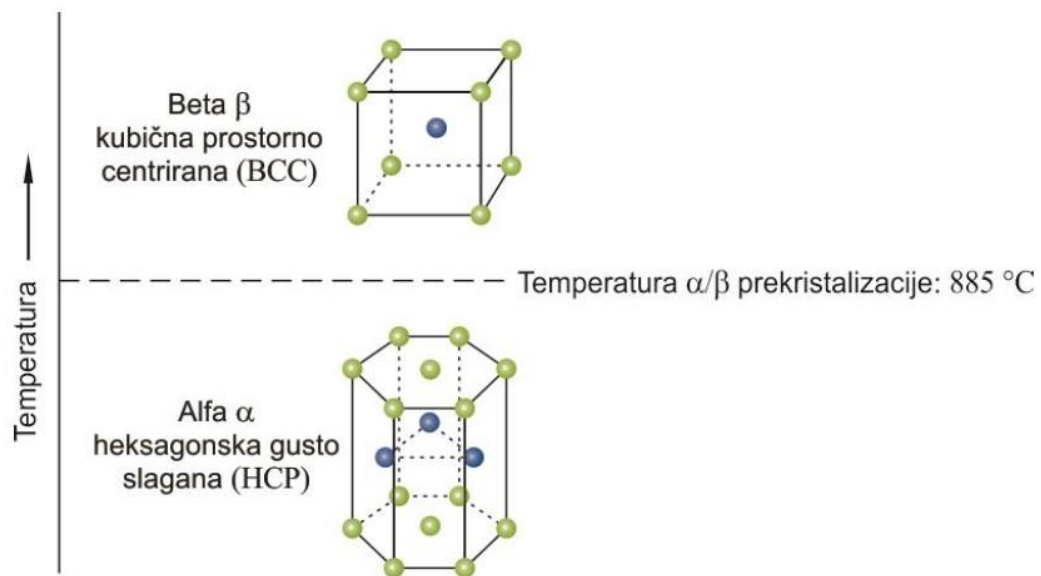
Slika 5. Utjecaj intersticijskih elemenata na vlačnu čvrstoću tehničkog titanija [11]

Nelegirani titanij uglavnom sadrži između 98,9 % i 99,5 % titanija (Ti), dok preostali udio čine nečistoće. Glavne nečistoće su kisik i željezo, kako je i prikazano u tablici 1 [11]. U navedenoj tablici prikazan je tehnički titanij različitih razreda čistoće te granice razvlačenja i vlačne čvrstoće.

Tablica 1. Sastav i mehanička svojstva nelegiranog titanija [11]

Oznaka	R_e , MPa	R_m , MPa	Maksimalni sadržaj nečistoća, %				
			N	C	H	Fe	O
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	0,40
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

Različite kristalne strukture titanija, koje se javljaju zbog njegove polimorfne prirode, imaju značajan utjecaj na njegova svojstva. Na sobnoj temperaturi, atomi titanija složeni su u heksagonsku gusto slaganu kristalnu rešetku (HCP). Ovakva struktura poznata je kao α -titanij, a prikazana je na slici 6. Kada se temperatura poveća na 885 °C, HCP rešetka transformira se u kubičnu prostorno centriranu (BCC) kristalnu rešetku. Ovakva mikrostruktura poznata je pod nazivom β -titanij i također je prikazana na slici 6. Ova kubična struktura zadržava se sve do temperature tališta [11].



Slika 6. Kristalne rešetke titanija [11]

Legirni elementi utječu na temperaturu fazne transformacije. Elementi kao što su O, Al, N i C su α -stabilizatori i povisuju temperaturu α/β prekrystalizacije. Elementi koji stabiliziraju β -fazu i time snižavaju temperaturu prekrystalizacije, razvrstavaju se u dvije skupine. Prva skupina, poznata kao β -eutektoidni tvorci, uključuje elemente kao što su Cu, Cr, W i Fe. Druga skupina, poznata kao β -izomorfni elementi, uključuje elemente poput V, Mo, Nb i Ta. Na temelju količine legirnih elemenata dodanih titaniju, dobivena legura bit će klasificirana kao α - ili približno α -legura, $(\alpha+\beta)$ -legura ili β -legura [12].

2.4. Podjela titanijevih legura

2.4.1. α -legure i približno α -legure

α -fazni stabilizirajući elementi i mala količina β -stabilizatora kao što su Fe i V sačinjavaju ove legure. Glavni dio mikrostrukture je α -faza, a eventualno može biti prisutna i mala količina β -faze koja se izlučuje po granicama kristalnih zrna α -faze. α -legure, u odnosu na druge legure, imaju povećanu otpornost na koroziju. Ove legure pokazuju vrlo dobru zavarljivost i dobre su za kriogene primjene jer nemaju izražen prijelaz iz duktilnog u krhko stanje. Mogućnost kovanja α - i približno α -legura nije dobra zbog heksagonske kristalne rešetke. Osim toga, α -legure općenito su otpornije na puzanje pri povišenoj temperaturi od ($\alpha+\beta$)- i β -legura. U tablici 2 prikazani su neki razredi α -legura i njihov kemijski sastav te mehanička svojstva [13].

Tablica 2. Kemijski sastav i mehanička svojstva α -legura [13]

Oznaka	R_m , MPa	Maks. sadržaj, %		Drugi dodaci, %
		O	Fe	
Ti-0,3Mo-0,9Ni (Razred 12)	345	0,25	0,30	0,2 - 0,4 Mo, 0,6 - 0,9 Ni
Ti-3Al-2,5V (Razred 9)	485	0,15	0,25	2,5 - 3,5 Al, 2,0 - 3,0 V
Ti-3Al-2,5V-0,05Pd (Razred 18)	485	0,15	0,25	2,5 - 3,5 Al, 2,0 - 3,0 V + Pd
Ti-3Al-2,5V-0,1Ru (Razred 28)	485	0,15	0,25	2,5 - 3,5 Al, 2,0 - 3,0 V + Ru
Ti-5Al-2,5Sn (Razred 6)	795	0,20	0,50	4,0 - 6,0 Al, 2,0 - 3,0 Sn

Detaljnija podjela razlikuje α -legure od približno α -legura. Prema ovoj podjeli, približno α -legure sadrže maksimalno 10 % β -faze koja je prisutna na granicama zrna, dok u α -legurama β -faza nije prisutna. Taj postotak β -faze potječe od prisutnosti β -stabilizatora u količini od 1 do 2 %. α -legure uglavnom se koriste u kemijskoj i procesno-energetskoj industriji zbog već spomenute izvrsne otpornosti na koroziju. S druge strane, približno α -legure imaju široku primjenu u uvjetima u kojima vladaju visoke temperature, posebno u zrakoplovstvu. Koriste se za izradu nekih dijelova plinskih turbina, poput lopatica [14].

2.4.2. ($\alpha+\beta$)-legure

($\alpha+\beta$)-legure titanija su najčešće korištene legure, uglavnom za komercijalnu upotrebu. One čine više od polovice ukupne potrošnje titanijevih legura. Od ovih legura najčešće se koristi legura oznake Ti6Al4V. Prema nekim izvorima ova legura čini oko 56 % mase svih ($\alpha+\beta$)-legura. U ovim legurama određena količina β -faze prisutna je i na sobnoj temperaturi, obično od 10 do 20 %, a moguća je i prisutnost do 50 % β -faze. Udjeli α - i β -faze, osim kemijskim sastavom, mogu se regulirati podešavanjem temperature i vremena ugrijavanja, kao i brzinama hlađenja iznad temperature α/β transformacije. Ove legure odlikuje poboljšana čvrstoća, duktilnost i otpornost na umor materijala. Čvrstoća ove skupine legura ovisi o udjelu α - i β -faze, kao i o elementima koji su otopljeni u njima. Također, važnu ulogu imaju efekti toplinske obrade, koja se temelji na svojstvima metastabilne β -faze i njenom raspadu. Ove se legure koriste za izradu diskova i lopatica u plinskim turbinama mlaznih motora, kao i za elemente okvira zrakoplova. U tablici 3 navedeno je nekoliko ($\alpha+\beta$)-legura, njihov kemijski sastav i vlačna čvrstoća [15].

Tablica 3. Kemijski sastav i čvrstoća nekih ($\alpha+\beta$)-titanijevih legura [15]

Oznaka legure	R_m , MPa	Kemijski sastav
Ti-811	1040	Ti-8Al-1V-1Mo
IMI 685	1020	Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si
IMI 550	975	Ti-4Al-2Sn-4Mo-0,5Si
Ti-6242	995	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0,1Si
Ti-6-4	995	Ti-6Al-4V

2.4.3. β -legure

β -legure zadržavaju β -fazu i nakon naglog hlađenja na sobnu temperaturu, pri čemu se ne odvija transformacija u α -fazu. Neka od svojstava ovih legura su visoka vlačna čvrstoća i dinamička izdržljivost, ali one imaju nižu otpornost na puzanje i oksidaciju na visokim temperaturama, osim u slučaju β -21S legure [16].

U nekim slučajevima njihova korozijska otpornost veća je od korozijske postojanosti ($\alpha+\beta$)-legura. β -legure podvrgavaju se toplinskoj obradi, pri čemu se uz β -fazu stvara mala količina

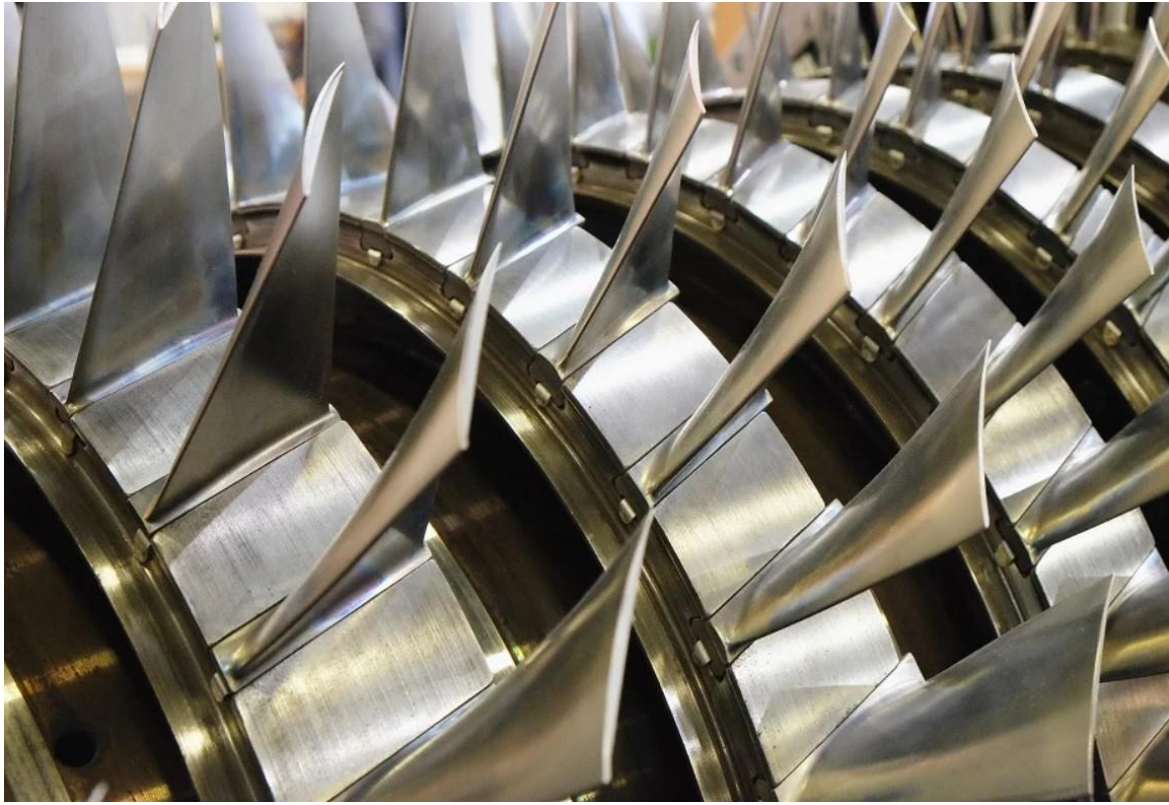
sitnozrnate α -faze. U osnovi, toplinska se obrada primjenjuje kako bi se postigla očvrtnuta β -legura. Ove legure nude prihvatljivu alternativu ($\alpha+\beta$)-legurama zbog jednostavnije toplinske obrade i duktilnosti, a to proizlazi iz njihove prostorno centrirane kubične kristalne rešetke. Dodavanjem teških metala s visokom gustoćom, poput kroma i vanadija, gustoća ovih legura se povećava. Ovi elementi dodaju se radi stabilizacije β -faze. β -legure uglavnom se koriste za ispušne sustave automobila, a posebno kada je potrebno znatno smanjiti masu komponenata, što je iznimno važno u slučaju sportskih automobila ili motocikala [17].

2.5. Primjena titanija i njegovih legura

Rotirajuće komponente poput lopatica mlaznih motora ili dijelova plinskih turbina zahtijevaju izradu od titanijevih legura koje pokazuju svojstvo visoke čvrstoće i metaluršku stabilnost pri visokim temperaturama. Ove legure također moraju imati visoku otpornost na puzanje, kao i dobru dinamičku izdržljivost. Da bi se postigla sva ova svojstva, postavljaju se strogi zahtjevi vezani uz kemijski sastav, kako bi se osigurala kontrolirana mikrostruktura te potpuna odsutnost nesavršenosti, poput nečistoća ili poroznosti u samom ingotu. Posljedično, što je veća razina te kontrole, to su veći i troškovi materijala [18].

Za neke dijelove zrakoplova koji su izloženi visokom tlaku i niskim temperaturama traži se optimalna čvrstoća materijala. Također je važno da materijal ima dobru zavarljivost i visoku lomnu žilavost u području od kriogenih do umjereno povišenih temperatura. Kako bi se osigurala ova kombinacija svojstava, potrebno je strogo kontrolirati mikrostrukturu i odsustvo nesavršenosti koje se mogu javiti prilikom taljenja. Za kriogene primjene, intersticijski elementi (kisik, dušik i ugljik) pažljivo se kontroliraju kako bi se poboljšala duktilnost i lomna žilavost. Legure s takvim kontroliranim razinama intersticijskih elemenata nazivaju se ELI (engl. *Extra-Low Interstitial*), na primjer legura oznake Ti6Al4V-ELI. Kod primjene u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, ali i u brodogradnji, također se zahtijeva visoka čvrstoća materijala, što se obično postiže pažljivim odabirom legure u kombinaciji s pažljivom kontrolom postupaka obrade. Postoje i primjeri u kojima se javljaju manja opterećenja, a pritom se svejedno odabiru titanijeve legure jer nude veću otpornost na temperaturne utjecaje od aluminijske ili veću korozijsku otpornost od mjedi, bronce ili nehrđajućeg čelika. U takvim slučajevima, komercijalna dostupnost potrebnih proizvoda i jednostavnost izrade obično diktiraju odabir materijala [18].

Na slici 7 prikazana je jedna plinska turbina čije su lopatice izrađene od titanijeve legure.

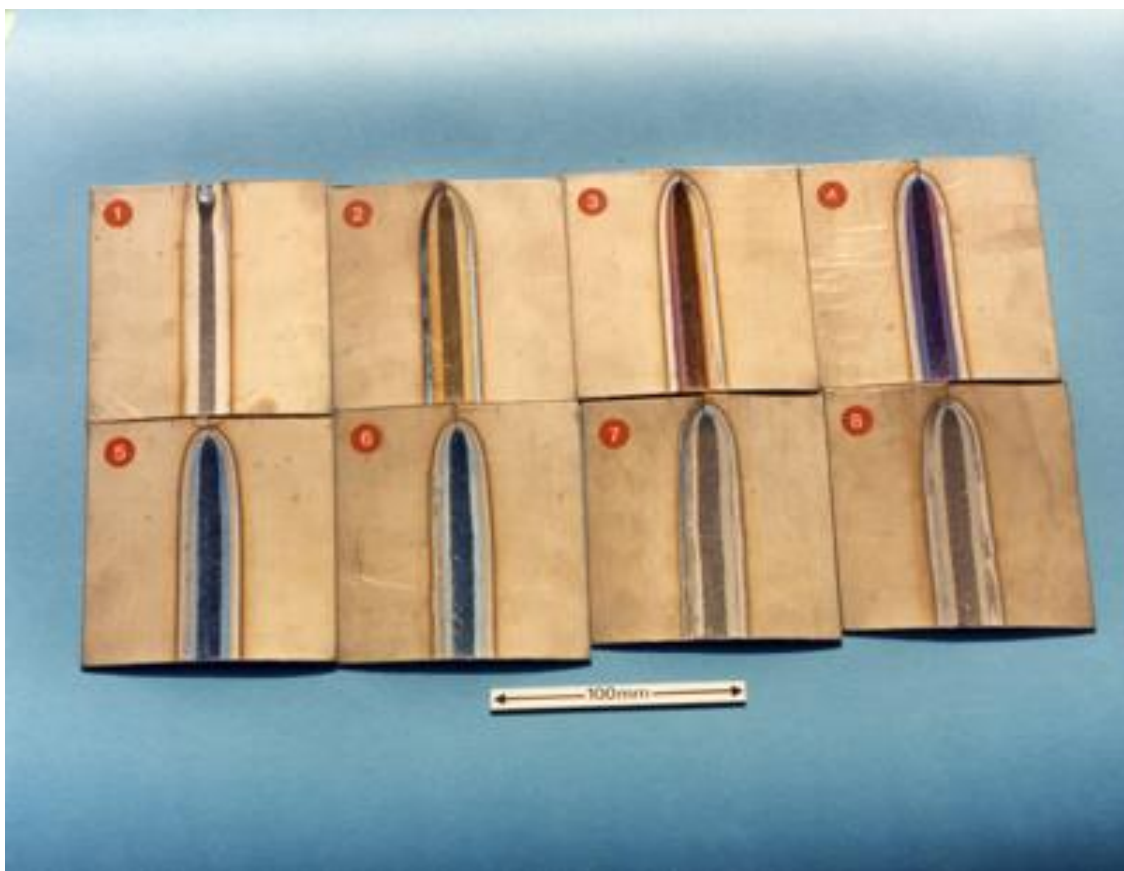


Slika 7. Lopatice plinske turbine izrađene od titanijeve legure [19]

3. ZAVARIVANJE TITANIJA

Zbog afiniteta titanija i njegovih legura prema kisiku, dušiku i vodiku te potencijalne krhkosti koja proizlazi iz toga, postupci zavarivanja titanija električnim lukom ograničeni su na postupke s plinskom zaštitnom atmosferom (TIG i MIG), iako se koristi i zavarivanje snopom elektrona te elektrootporno zavarivanje. Općenito gledano, zavarljivost titanijevih legura vrlo je dobra, osim u nekim slučajevima ($\alpha+\beta$)-legura i β -legura koje nisu tako dobro zavarljive. Glavni problem kod zavarivanja titanijevih legura je uklanjanje onečišćenja iz zaštitne atmosfere. Onečišćenje metala zavara i okolne zone utjecaja topline (ZUT) povećat će vlačnu čvrstoću i tvrdoću, ali može dovesti do smanjenja duktilnosti na neprihvatljivo niske vrijednosti. Najčešće nečistoće zavara javljaju se zbog kisika i dušika iz zraka koji je ušao u plinsku zaštitnu atmosferu te zbog vodika iz vlage ili površinskog onečišćenja [20].

Na slici 8 mogu se vidjeti različiti zavareni spojevi nelegiranog titanija koji su zavareni TIG metodom s onečišćenom zaštitnom plinskom atmosferom.



Slika 8. Spojevi zavareni TIG postupkom s onečišćenim zaštitnim plinom [20]

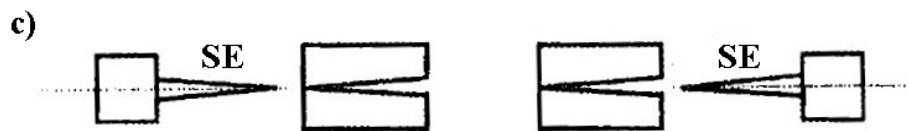
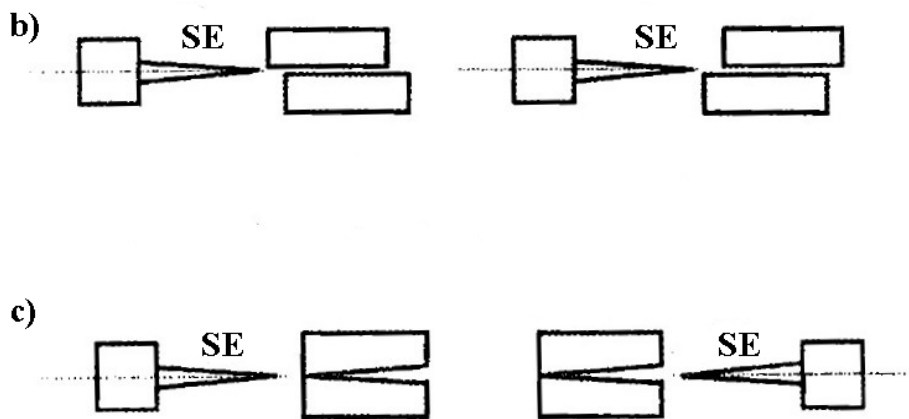
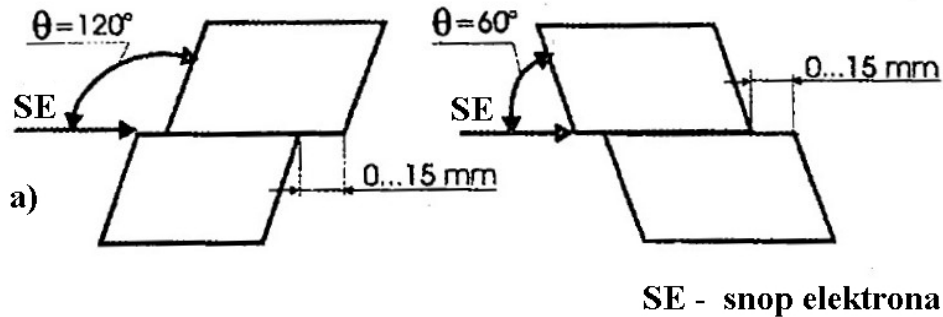
Tijekom zavarivanja, dijelovi osnovnog materijala oko zavara koji su izloženi temperaturama iznad 520 °C apsorbirat će kisik i dušik te stoga moraju biti zaštićeni sve dok se ne ohlade ispod te kritične temperature. Zbog relativno niske toplinske vodljivosti titanija to područje nije veliko. Rastaljeni metal zavara zaštićen je plinskim omotačem, ali za zavar koji se hladi i za okolnu zonu utjecaja topline potrebna je dodatna zaštita upotrebom atmosfere s vlastitim dovodom zaštitnog plina koji slijedi iza zavarivačkog pištolja. Na stražnjoj površini zavara također je potrebna slična zaštita osiguravanjem učinkovitog protoka plina [20].

3.1. Zavarivanje titanija snopom elektrona

Zavarivanje snopom elektrona prikladno je za upotrebu kod materijala osjetljivih na oksidaciju, poput titanija, jer se postupak zavarivanja mora odvijati u vakuumu. Elektronski snop može osigurati prodor zavara i do 40 mm, što je znatno dublje od onoga koji se može postići kod drugih zavarivačkih postupaka. Ovaj postupak zavarivanja zahtijeva računalnu kontrolu, kako elektronskog snopa, tako i okoline za zavarivanje i pozicioniranja dijelova za zavarivanje, što rezultira visokom pouzdanošću i produktivnošću. Dijelovi od titanija općenito se mogu zavarivati bez dodatne obrade, pod uvjetom da su pravilno očišćeni, a postupak zavarivanja snopom elektrona može biti vrlo ekonomičan zbog automatizacije [21].

Prije postupka zavarivanja, područja zavara moraju biti temeljito očišćena od svih oksida i bilo kakvih drugih onečišćenja kako bi se osigurala zadovoljavajuća kvaliteta zavara. To se može postići mehaničkim putem, odnosno brušenjem, piljenjem ili najčešće četkanjem žičanim četkama od nehrđajućeg čelika radi uklanjanja oksida. Postoje i kemijske metode čišćenja, poput uranjanja u lužnate otopine i naknadnog ispiranja vodom, koje također mogu biti učinkovite. Odabir metode čišćenja uglavnom ovisi o materijalu koji se zavaruje i položaju zavarenih područja. Otapala s klorom mogu stvarati otrovne plinove prilikom zagrijavanja i ne bi se trebala koristiti za čišćenje zavarenih područja. Ovaj postupak zavarivanja također zahtijeva i određenu preciznost kako bi se održao prihvatljiv razmak dijelova koji se zavaruju. To je potrebno zato što je ovo postupak spajanja taljenjem i ne koristi se dodatni materijal te će bilo kakav međuprostor ili praznina u spoju smanjiti količinu energije koja se prenosi na zavar, čime će se negativno utjecati na kvalitetu zavara. Upravo zato potrebno je precizno pozicioniranje zavara kako bi se snop točno postavio [21].

Na slici 9 prikazani su primjeri kako tehnološka odstupanja mogu utjecati na kvalitetu zavora pri zavarivanju snopom elektrona.



Slika 9. Tehnološka odstupanja pri montaži zavarenog spoja: a) smicanje, b) razmicanje, c) otvaranje rubova [22]

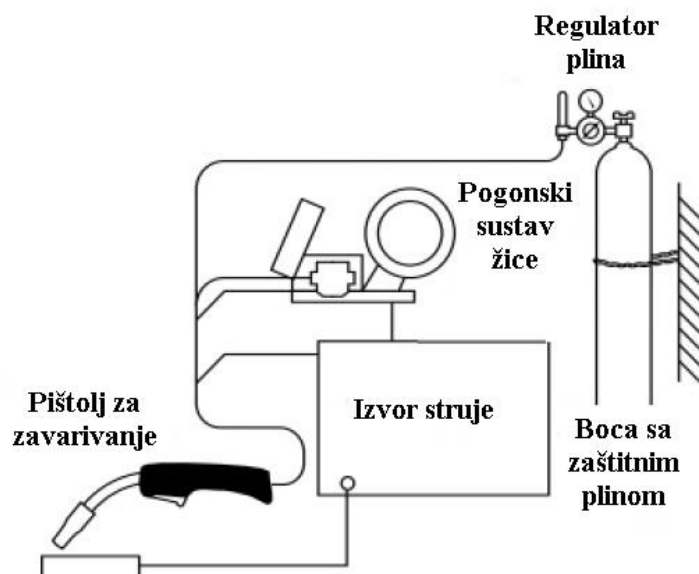
Tijekom jednog istraživanja utvrđeno je da se zavarivanjem snopom elektrona mogu dobiti zavareni spojevi dobre kvalitete uz sljedeća tehnička odstupanja: povećanjem razmaka između dijelova od 1 do 1,5 mm; smicanjem rubova do 15 mm i otvaranjem rubova dijelova s prednje i stražnje strane zavarenog spoja od 1,5 do 1,7 mm [22].

Korištenje postupka zavarivanja snopom elektrona omogućilo je znatno smanjenje troškova radne snage u postupcima zavarivanja te smanjenje potrošnje materijala i energije za zavarivanje [22].

3.2. MIG zavarivanje titanija

MIG postupak zavarivanja, engl. *Metal Inert Gas* ili *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), tehnika je zavarivanja koja koristi kontinuirano napajanje žice i zaštitni plin kako bi se stvorio zavareni spoj. Za zavarivanje se koristi električni luk koji se stvara između neprekidno napajane žice i radnog komada. Električna struja prolazi kroz žicu i stvara toplinu koja topi metalne površine i stvara zavareni spoj. Zaštitni plin koji se koristi sprječava kontaminaciju zavarenog spoja. Najčešće korišteni plinovi su argon i helij ili mješavine tih plinova. Zaštitni plin stvara atmosferu koja sprječava oksidaciju metala tijekom procesa zavarivanja. MIG zavarivanje može se izvoditi ručno ili pomoću automatiziranih sustava. Automatizirani MIG zavarivački strojevi koriste robotske ili strojne sustave za precizno izvršavanje zavarivanja, što omogućuje visoku produktivnost i ponovljivost. Ova postupak zavarivanja je široko korišten u raznim industrijama, a posebno u automobilskoj industriji, proizvodnji metalnih konstrukcija, cjevovoda, spremnika i drugih metalnih komponenti. MIG postupak prikladan je za zavarivanje različitih metala poput čelika, aluminija i titanija, a postupak je brz, efikasan i relativno jednostavan za izvođenje. Omogućuje visoku stopu unaprjeđenja zavarivanja, dobru kvalitetu zavarenih spojeva i manje naknadnih operacija. Također pruža veću kontrolu nad postupkom zavarivanja u usporedbi s drugim metodama [23].

Na slici 10 prikazana je oprema koja se koristi za MIG zavarivanje.



Slika 10. Prikaz opreme za zavarivanje MIG metodom [24]

Prilikom zavarivanja titanija MIG tehnikom prskanje kapljica nije poželjno iz nekoliko razloga. Glavni razlog je mogućnost stvaranja lokalizirane kontaminacije zbog vrućih kapljica dodanog materijala koje dolaze u dodir s titanijem, kao i kapljica koje se otapaju u zavaru. Korištenje metoda prijenosa metala kratkim spojevima te mješovitim lukom nije preporučljivo za zavarivanje titanija zbog prskanja tih kapljica. Metoda prijenosa metala štrcajućim lukom može pružiti dovoljno energije za spajanje titanija, no prijenos metala pulsirajućim lukom najpoželjnija je metoda za zavarivanje titanija. Također, korištenjem zaštitne smjese plinova koja se sastoji od 75 % helija i 25 % argona mogu se postići najkvalitetniji zavareni spojevi titanija [25].

Tijekom MIG zavarivanja s gornje i s donje strane zavara može nastati crna čađa. Ta se čađa obavezno mora ukloniti prije sljedećeg sloja zavara kako se ne bi javile neželjene nečistoće unutar zavarenog spoja. Jedna od glavnih prednosti MIG metode zavarivanja titanija je ta što se njome mogu spajati dijelovi titanija debljih poprečnih presjeka, a brzina postupka znatno je veća u odnosu na TIG zavarivanje. Također, MIG postupkom moguće je kontinuirano spajati korijen zavara, a smanjuje se i unos topline u zavareno područje [25].

3.3. TIG zavarivanje titanija

TIG zavarivanje (engl. *Tungsten Inert Gas Welding*) zavarivački je postupak s netaljivom elektrodom, a električni se luk stvara između radnog komada i netaljive volframove elektrode. Pri zavarivanju se koristi dodatni materijal koji se ručno dodaje ili napaja putem sistema za dodavanje metala. Tijekom postupka zavarivanja, elektroda, luk i rastaljeni materijal okruženi su zaštitnim inertnim plinom. Za zaštitnu atmosferu najčešće se koriste argon i helij ili kombinacija tih dvaju plinova. Svrha primjene zaštitnog plina je sprječavanje oksidacije zavara i nužna je za dobivanje kvalitetnog i čistog zavara. Volfram ima visoku temperaturu taljenja koja iznosi 3422 °C, što je otprilike dvostruko više od temperature tališta metala koji se zavaruju i zato se stvara električni luk bez taljenja elektrode. TIG postupak zavarivanja uglavnom se koristi u zrakoplovnoj industriji, a razvijen je krajem 30-ih godina prošlog stoljeća. TIG zavarivanje posebno je doprinijelo zavarivanju magnezija i aluminijsa, jer je prije toga bilo teško postići zavar s visokom otpornošću na koroziju i bez pora [26].

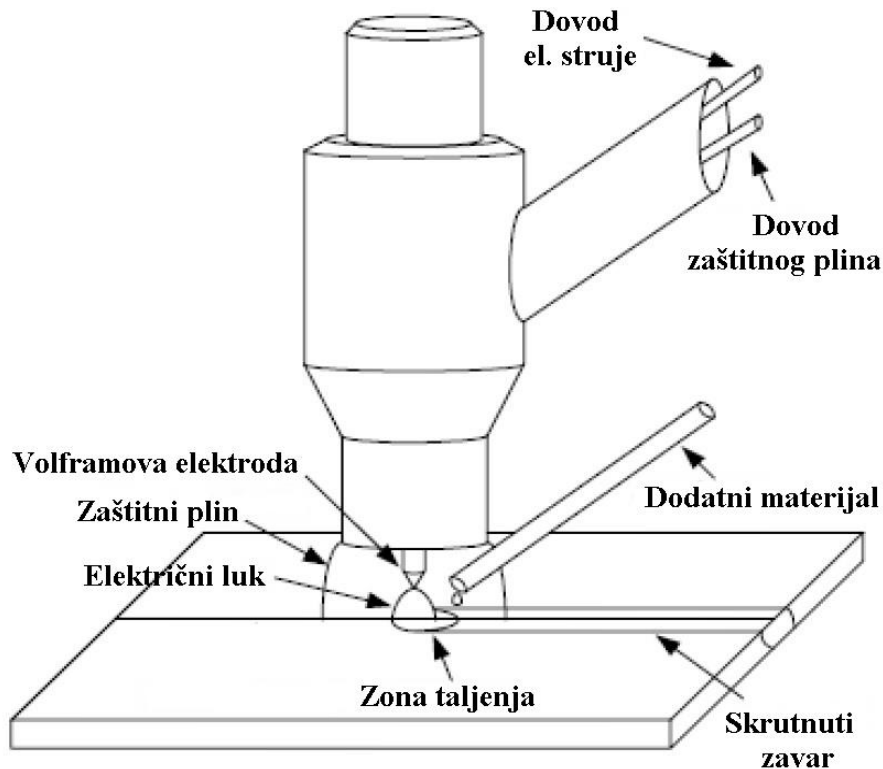
Kod zavarivanja titanija TIG postupkom izuzetno je važno da površina bude čista jer je titanij vrlo reaktivan prema elementima poput kisika i dušika te prema vlazi i drugim metalima koji

moгу uzrokovati krhke intermetalne spojeve. Za čišćenje se mogu koristiti otapala poput acetona, etanola ili toluena. Važno je izbjeđavati upotrebu trikloretilena ili tetraklormetana jer oni kasnije mogu uzrokovati napetosnu koroziju. Za mehaničku dekontaminaciju površine i uklanjanje oksidnog sloja preporučuje se koristiti žičane četke izrađene od titanija ili nehrđajućeg čelika [5].

Kada se koristi automatizirano TIG zavarivanje pri većim brzinama, važno je zaštititi dio materijala iza pištolja kako bi se smanjila izloženost vrućeg zavara atmosferi. Ako je potreban potpuni provar, također je potrebno zaštititi i korijen zavara. Ovo se često postiže upuhivanjem zaštitnog plina kroz rupe u postolju na kojem je obradak fiksiran. Svi ovi naknadni koraci ukazuju na to da je zavarivanje titanija kompliciranje i skuplje u uspoređbi s drugim materijalima. Zbog toga je potrebno dovoditi zaštitni plin kroz tri dovoda: primarni za rastaljeni metal u zavaru, sekundarni koji štiti ohlađeni zavareni spoj i zonu utjecaja topline uz zavar te dovod koji štiti korijen zavara kada je potreban provar. Za materijale debljine do 3 mm, TIG postupak zavarivanja može se izvoditi ručno ili automatski, bez posebne pripreme spoja ili korištenja dodatnog materijala. Međutim, kod debljih materijala potrebna je priprema materijala i upotreba žice napunjene posebnim prahom. Kao dodatni materijal uobičajeno se koristi materijal koji ima ista ili bolja svojstva od osnovnog materijala. Izuzetak je tehnički (nelegirani) titanij u kojem se dopušta korištenje dodatnog materijala koji ima nešto manju čvrstoću, a to je zato što reakcija metala zavara s različitim plinovima uzrokuje njegovo otvrdnuće [27].

3.3.1. Princip TIG zavarivanja

Prilikom ovog postupka zavarivanja, između vrha elektrode i radnog komada koji se zavaruje stvara se plazma luk pomoću izvora električne energije. Impuls se proizvodi visokofrekventnim generatorom izvora električne energije koji može biti frekvencije i do nekoliko MHz. Ta frekvencija i napon generiraju snažne električne interferencije oko područja zavarivanja. Električna energija pretvara se u toplinsku energiju koja omogućuje topljenje osnovnog metala i dodatnog materijala. Ovisno o materijalu, temperatura površine osnovnog metala kreće se od 1430 °C do 2230 °C. Zbog tih visokih temperatura u zoni taljenja osnovni metal sklon je reagirati s kisikom i tako stvoriti okside na površini. Kako bi se spriječila ta oksidacija, primjenjuje se zaštitna plinska atmosfera. Zaštitni plin dovodi se u mlaznicu s određenom brzinom protoka, a on također pomaže i u sprječavanju pregrijavanja pištolja za zavarivanje. Na slici 11 može se vidjeti princip zavarivanja TIG metodom [26].



Slika 11. Princip zavarivanja TIG metodom [28]

3.3.2. Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja

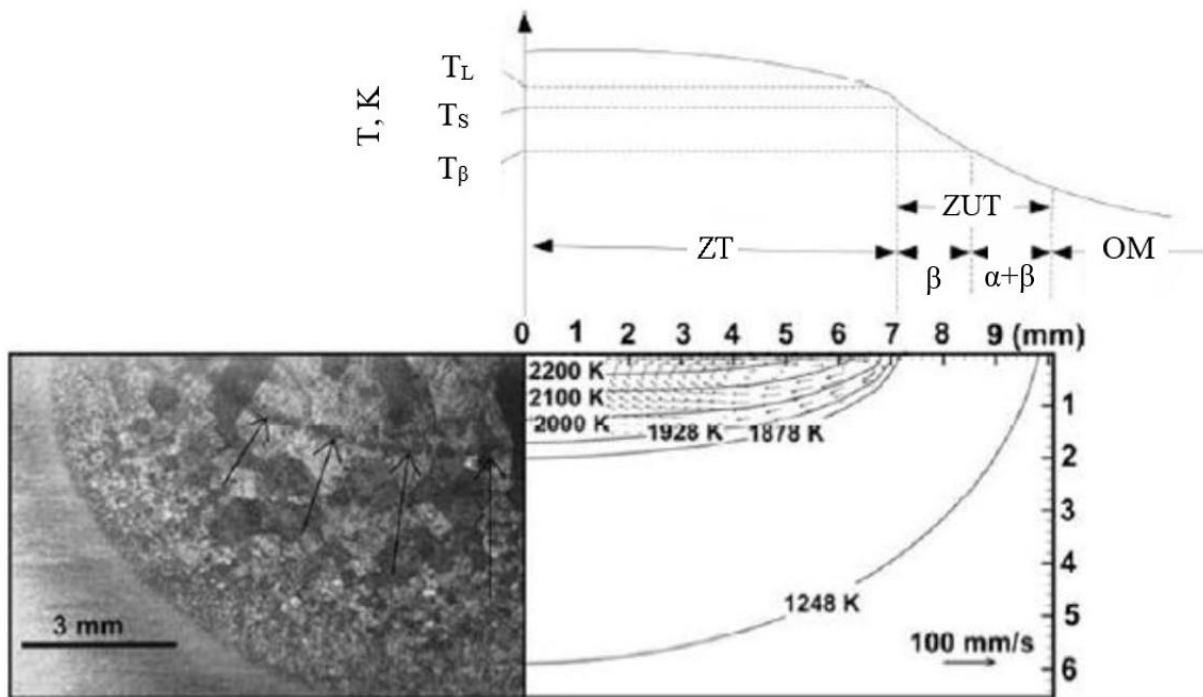
Ograničeni unos topline kod TIG postupka zavarivanja omogućuje spajanje vrlo tankih dijelova. Budući da je postupak TIG zavarivanja čist, pogodan je za zavarivanje reaktivnih metala poput titanija, magnezija i aluminija. Brzina dodavanja dodatnog metala donekle je neovisna o zavarivačkoj električnoj struji, što omogućuje variranje količine taljenja osnovnog i dodatnog metala te se stoga kontrola udjela i unosa energije u zavar može postići bez promjene veličine zavara. Međutim, stopa unosa dodatnog materijala u TIG postupku relativno je niska. Prekomjerne zavarivačke struje mogu uzrokovati topljenje volframove elektrode i rezultirati lomljivim uključcima volframa u metalu zavara. Upotrebom predgrijanih dodatnih metala može se poboljšati stopa unosa dodatnog materijala. U TIG postupku s ugrijanom žicom, žica se dovodi u kontakt sa zonom taljenja kako bi se postiglo otporno zagrijavanje prolaskom električne struje kroz žicu. TIG zavarivački električni luk omogućuje preciznu kontrolu unosa topline u radni komad što rezultira relativno uskom zonom utjecaja topline. Još jedan od nedostataka ove metode je da zavarivač treba imati specijalne vještine, kako bi se postigao kvalitetan zavar, a koje nisu toliko značajne kod drugih metoda zavarivanja [29].

4. PROMJENE U ZAVARU TITANIJA I NJEGOVIH LEGURA

Sastav i struktura legura određuju koliko se titanij i njegove legure mogu lako zavarivati. Općenito, zavarljivost titanija i njegovih legura veća je što je veći udio α -faze, dok je obrnuto proporcionalna povećanju čvrstoće legure. To se javlja zato što se svojstva zavara visokočvrstih legura znatno razlikuju od osnovnog materijala, a neki legirni elementi, poput željeza ili kroma, koji se nalaze u takvim legurama, mogu utjecati na proces zavarivanja i mehanička svojstva zavara. Nelegirani titanij i neke približno α - ili $(\alpha+\beta)$ -legure imaju dobru zavarljivost. Međutim, neke visokočvrste $(\alpha+\beta)$ -legure, kao što je TiAl6V6Sn2, sklonije su pukotinama i stoga nisu zavarljive kao, na primjer, legura TiAl6V4. β -legure ograničeno su zavarljive jer zavar i zona utjecaja topline mogu postati krhki uslijed faznih transformacija koje se događaju tijekom zavarivanja i hlađenja nakon zavarivanja [1].

4.1. Mikrostrukturne promjene u zavarenom spoju titanija

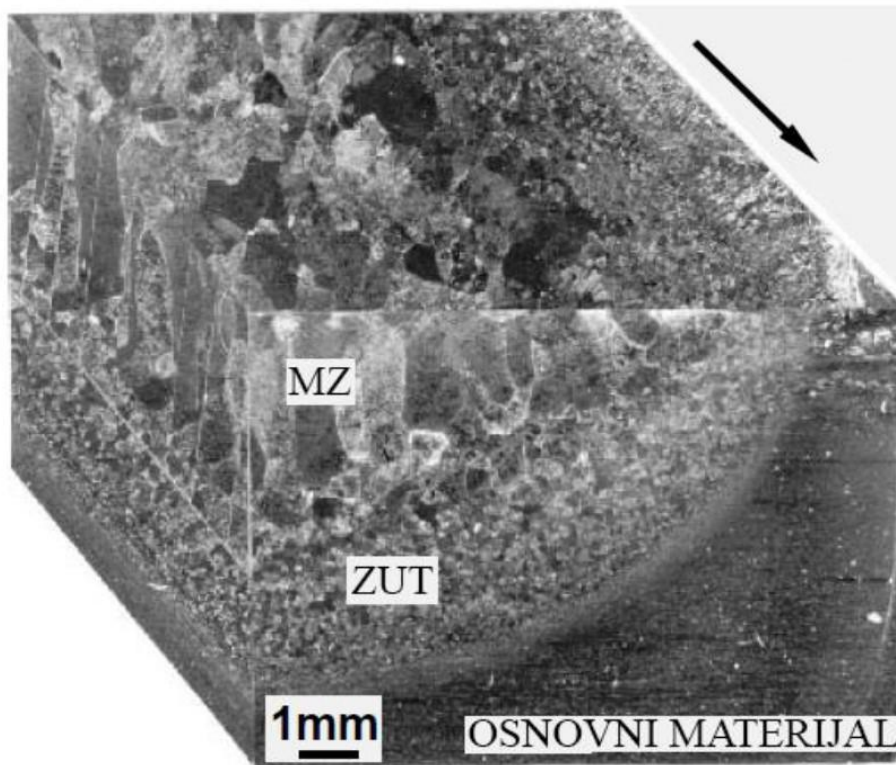
Budući da su solidifikacija zavara i transformacije u zoni utjecaja topline direktno povezane s brzinom grijanja i hlađenja tijekom zavarivanja, zavarivačka metalurgija ima važnu ulogu. Temperatura i brzina grijanja i hlađenja na određenom mjestu zavarivanja ovise o postupku i parametrima zavarivanja kao i o dubini zavarivanja ispod središnje linije zavara. Veličina β -zrna prije fazne transformacije i brzina hlađenja ključni su faktori, a ove karakteristike najviše utječu na mehanička svojstva zavara. Zona taljenja (ZT) definirana je kao područje u kojem temperatura prelazi efektivnu temperaturu likvidusa (T_L). Granica zavara ili linija protaljivanja razdvaja zonu taljenja od zone utjecaja topline. Kod titanija i njegovih legura, zavarenih elektrolučnim postupkom, tu je granicu uglavnom teško odrediti zbog velikih β -zrna u tom području. Zato se ZUT određuje kao područje u kojem je maksimalna temperatura veća od β -prijelazne temperature (T_β) i manja od T_L , dok je udaljena zona utjecaja topline područje na koje i dalje utječe postupak zavarivanja, a maksimalna temperatura joj je manja od T_β , ali veća od minimalne temperature potrebne za mikrostrukturne promjene. Na slici 12 prikazana je raspodjela tih temperatura i područja na zavarenom spoju titanijeve legure TiAl6V4 [30].



Slika 12. Temperaturna područja zavarenog spoja TiAl6V4 legure [30]

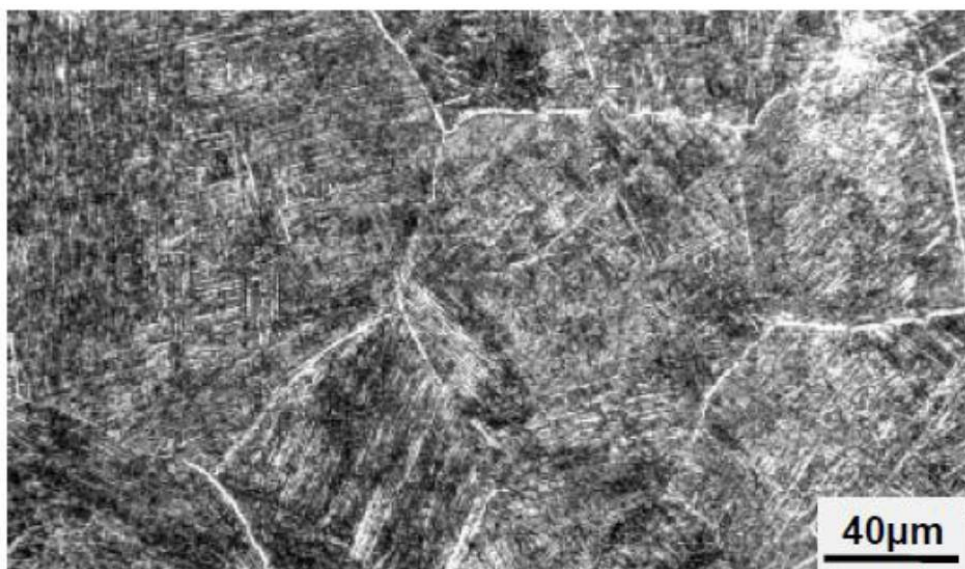
Veličina β -zrna u zoni taljenja raste s povećanjem specifičnog unosa topline. Međutim, mikrostruktura osnovnog materijala također značajno utječe na veličinu β -zrna u zoni taljenja, jer β -zrna u zoni taljenja epitaksijalno rastu iz β -zrna osnovnog materijala. Veličina zrna u zoni utjecaja topline određuje se vršnom temperaturom, mehanizmima difuzije u čvrstom stanju i rastom zrna. Pri niskim brzinama hlađenja, α -zrna rastu iz granice zrna i mogu se usmjeriti zajedno kako bi formirale α -koloniju. Veličina kolonije i pojedinačnih zrna smanjuje se s povećanjem brzine hlađenja i povećanjem udjela β -stabilizatora, stvarajući α' -martenzit. Martenzit je prezasićena nestabilna heksagonska α -faza koja se formira bezdifuzijskom transformacijom β -faze. Tvrdoća α' -martenzita raste povećanjem udjela β -stabilizatora [30].

Na sljedećim slikama prikazana je mikrostruktura zavarenog spoja ($\alpha+\beta$)-legure u kojemu se vide svi ranije opisani dijelovi zvara. Na slici 13 vidljiva je lamelarna grubozrnata mikrostruktura metala zvara u kojoj je došlo do povećanja β -zrna i njihovog preoblikovanja [27].



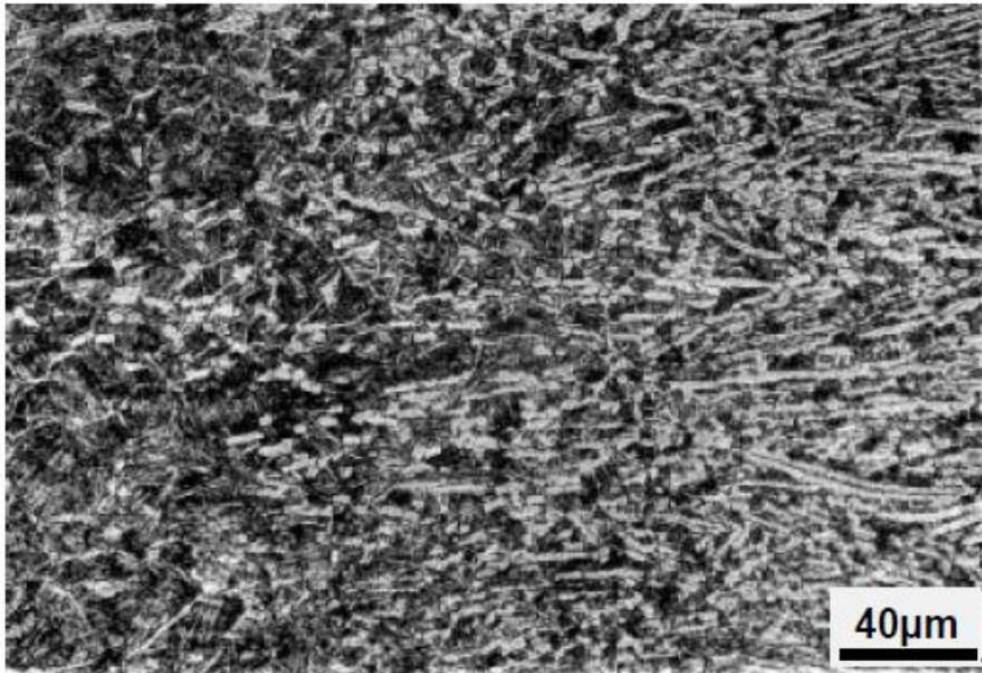
Slika 13. Mikrostruktura TIG zavarenog spoja titanijeve legure [27]

Na slici 14 prikazan je isti taj zavareni spoj, ali snimljen pod većim povećanjem. Prikazana je zona utjecaja topline koja je bila ugrijana na temperaturu višu od temperature α/β prekrystalizacije. U toj zoni pojavila se lamelarna mikrostruktura, ali su β -zrna nešto manja u odnosu na zrna u metalu zavara [27].



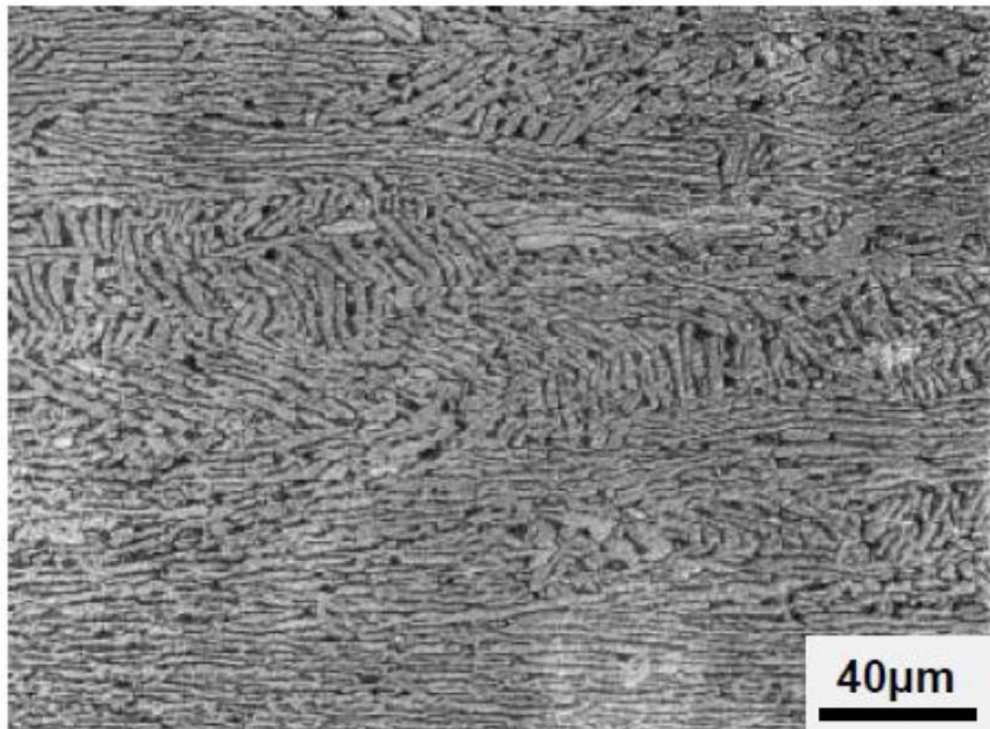
Slika 14. Mikrostruktura ZUT-a zavarenog spoja titanijeve legure [27]

Na slici 15 vidljivi su dijelovi ZUT-a kod kojih je temperatura ugrijavanja bila niža od temperature prekrystalizacije. Zrna su nešto sitnija od onih prikazanih na prethodnim slikama, ali uočljivo je kako se svejedno javila lamelarna mikrostruktura iako je temperatura bila niža od temperature prekrystalizacije [27].



Slika 15. Mikrostruktura dijela ZUT-a koji nije zagrijan iznad temperature α/β prekrystalizacije [27]

Na slici 16 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala zavarenog spoja titanijeve legure čije su slike prethodno bile prikazane. Može se vidjeti kako se radi o toplo valjanoj ploči čija je mikrostruktura prethodno bila žarena. Kod tanjih dijelova, brzina hlađenja može biti viša, što rezultira visokočvrstom mikrostrukturuom kod legura s $(\alpha+\beta)$ -fazom ili zadržavanjem β -strukture kod β -legura. Obično se zaostala naprezanja reduciraju na temperaturi od oko 700 °C. Međutim, kada se provodi reduciranje zaostalih naprezanja na dijelu čija je površina već bila završno obrađena, granica temperature obično se drži na 550 °C kako bi se izbjeglo onečišćenje površine pri većim temperaturama, čak i ako se reduciranje izvodi u vakuumu [27].



Slika 16. Mikrostruktura u osnovnom materijalu zavarenog spoja titanijeve legure [27]

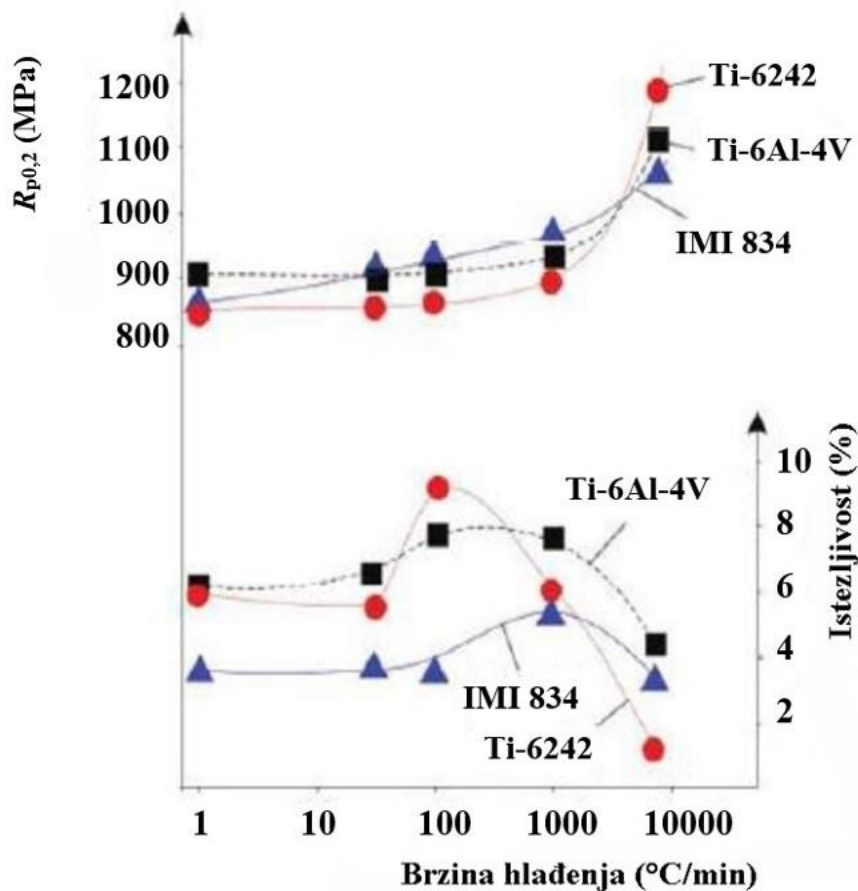
4.2. Mehanička svojstva zavarenog spoja titanija

Mehanička svojstva zavora titanija i njegovih legura obično ne dosežu vrijednosti osnovnog materijala i često su slična svojstvima lamelarnih mikrostruktura koje se obično dobivaju lijevanjem. Uobičajeno, vlačna čvrstoća, duktilnost, granica tečenja i dinamička čvrstoća zavora su niže u usporedbi s osnovnim materijalom. Međutim, pojava lamelarne strukture u ZUT-u poboljšava određena svojstva, poput otpornosti na rast pukotine uzrokovane umorom materijala i otpornosti na puzanje. Ključni faktor za postizanje tih svojstava je osiguravanje kvalitetnog zavarivanja.

Smanjenje vrijednosti čvrstoće uzrokovano upijanjem dušika i opadanje duktilnosti uzrokovano kisikom, može se izbjeći korištenjem odgovarajuće zaštitne atmosfere. Međutim, zbog porasta čvrstoće legura znatno je teže zadržati svojstva osnovnog materijala, osobito duktilnost. Ovi se rizici najčešće zanemaruju kod zavarivanja nelegiranog titanija ili legura s nižom čvrstoćom poput Ti3Al2,5V. Prilikom hlađenja mogu se pojaviti toplinska naprezanja, a nepovoljna krhka struktura koja nastaje zbog upijanja plinova može uzrokovati hladne pukotine. Ako se sadržaj vodika u području zavarivanja reducira na manje od 0,01 %, moguće je izbjeći hladne pukotine.

Dakle, čistoća inertnog plina koji stvara zaštitnu atmosferu mora iznositi najmanje 99,99 %. Iako je kod većine legura poslije zavarivanja potrebno naknadno reducirati zaostala naprezanja, osobito zbog smanjenja opasnosti od umora materijala, nelegirani titanij razreda ASTM 1, ASTM 2 i ASTM 3, ne zahtijeva reduciranje zaostalih naprezanja, osim ako je riječ o visoko napregnutim dijelovima u reducirajućim atmosferama [27].

Na slici 17 prikazan je dijagram ovisnosti konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ i istezljivosti A o brzini hlađenja nakon zavarivanja određenih $(\alpha+\beta)$ -legura.



Slika 17. Ovisnost $R_{p0,2}$ i istezljivosti o brzini hlađenja $(\alpha+\beta)$ -legura [30]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj eksperimentalnog dijela i provođenje ispitivanja

Cilj ovog dijela rada je karakterizacija mikrostrukture zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija te ispitivanje mehaničkih svojstava tog zavarenog spoja. U okviru ispitivanja mehaničkih svojstava, provedeno je ispitivanje savijanjem te ispitivanje vlačne čvrstoće. Karakterizacija mikrostrukture zavarenog spoja provedena je na svjetlosnom mikroskopu, u poliranom i nagrizenom stanju. Analizirana je mikrostruktura:

- osnovnog materijala
- zone utjecaja topline
- metala zavara.

5.2. Ispitni materijal

Planirana ispitivanja provedena su na zavarenom spoju na cijevi od nelegiranog titanija oznake ASTM B265 GR 2. Kemijski sastav osnovnog materijala, zajamčen od strane proizvođača, prikazan je u tablici 4. U tablici 5 navedena su mehanička svojstva osnovnog materijala koja su deklarirana od strane proizvođača.

Tablica 4. Kemijski sastav osnovnog materijala ASTM B265 GR 2

Kemijski sastav, %						
Fe	C	N	H	O	ukupno nečistoća	Ti
0,04	0,02	< 0,01	< 0,001	0,12	< 0,40	ostatak

Tablica 5. Mehanička svojstva osnovnog materijala ASTM B265 GR 2

Mehanička svojstva			
R_m , MPa	R_e , MPa	Istezljivost, %	HRB
435	327	27	< 100

Na slikama 18 i 19 prikazan je zavareni spoj na cijevi nelegiranog titanija oznake ASTM B265 GR 2 iz koje su izrezani uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava i karakterizaciju mikrostrukture.

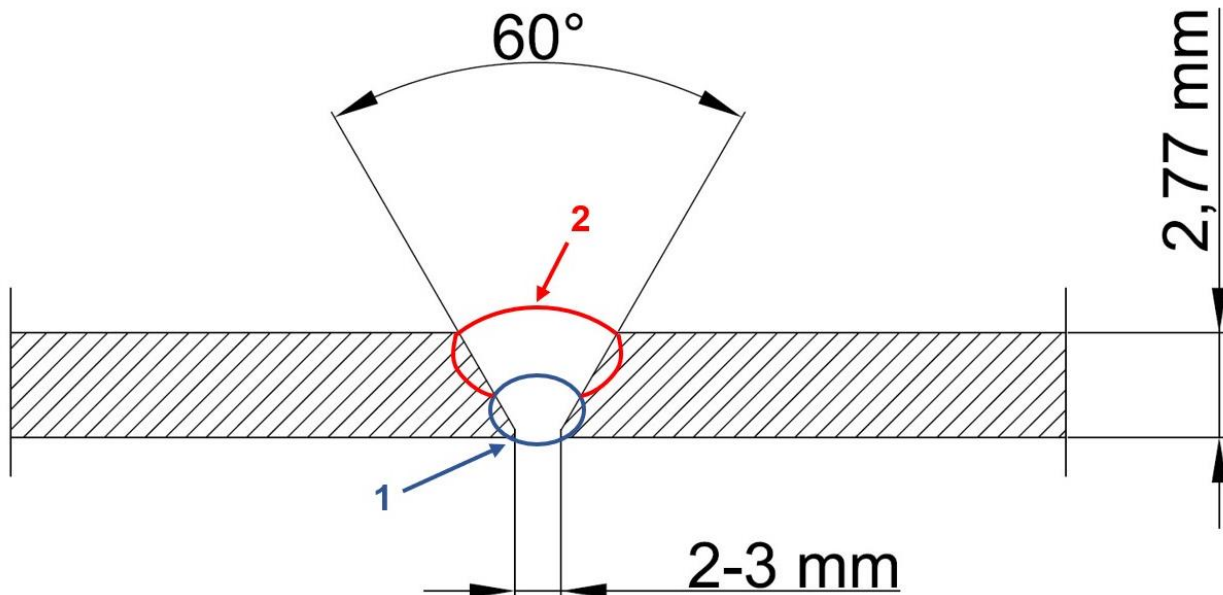


Slika 18. Zavareni spoj na cijevi od nelegiranog titanija ASTM B265 GR 2



Slika 19. Detalj zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija

Zavarivanje je izvedeno u dva prolaza TIG postupkom, koji se označava oznakom 141 po normi HRN EN ISO 4063:2012. Shematski prikaz geometrije zavarenog spoja i redosljed polaganja prolaza prikazan je na slici 20.



Slika 20. Shematski prikaz zavarivanja cijevi s redosljedom prolaza

Parametri postupka zavarivanja vidljivi su u tablici 6.

Tablica 6. Parametri zavarivanja cijevi

Prolaz	Promjer elektrode, mm	Metoda	El. struja, A	El. napon, V	Vrsta struje	Brzina zavarivanja, cm/min	Protok plina, l/min	Unos topline, kJ/min
1.	Ø 2,0	TIG	70 – 75	9 – 11	DC	3,7 – 5	18 – 20	0,59 – 0,61
2.	Ø 2,0	TIG	75 – 80	9 – 11	DC	4,5 – 6,9	18 – 20	0,46 – 0,54

5.3. Ispitivanje vlačne i savojne čvrstoće

5.3.1. Savojno ispitivanje

Kako bi se utvrdila kvaliteta zavarenog spoja, provedeno je ispitivanje savojne i vlačne čvrstoće te naknadna vizualna inspekcija zavara. Savojno ispitivanje kvalitativna je metoda u kojoj se provjerava hoće li doći do pojave pukotina ili loma unutar zavara i kakva mu je sposobnost savojne deformacije. Ispitivanje se provodilo na kidalici prikazanoj na slici 21, dok su uzorci za ispitivanje prikazani na slici 22. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 7438. Savojni trn ima radijus zaobljenosti od 5 mm, a razmak između oslonaca iznosi 18 mm. Također, kut savijanja ispitnog uzorka prema toj normi iznosi 180° .

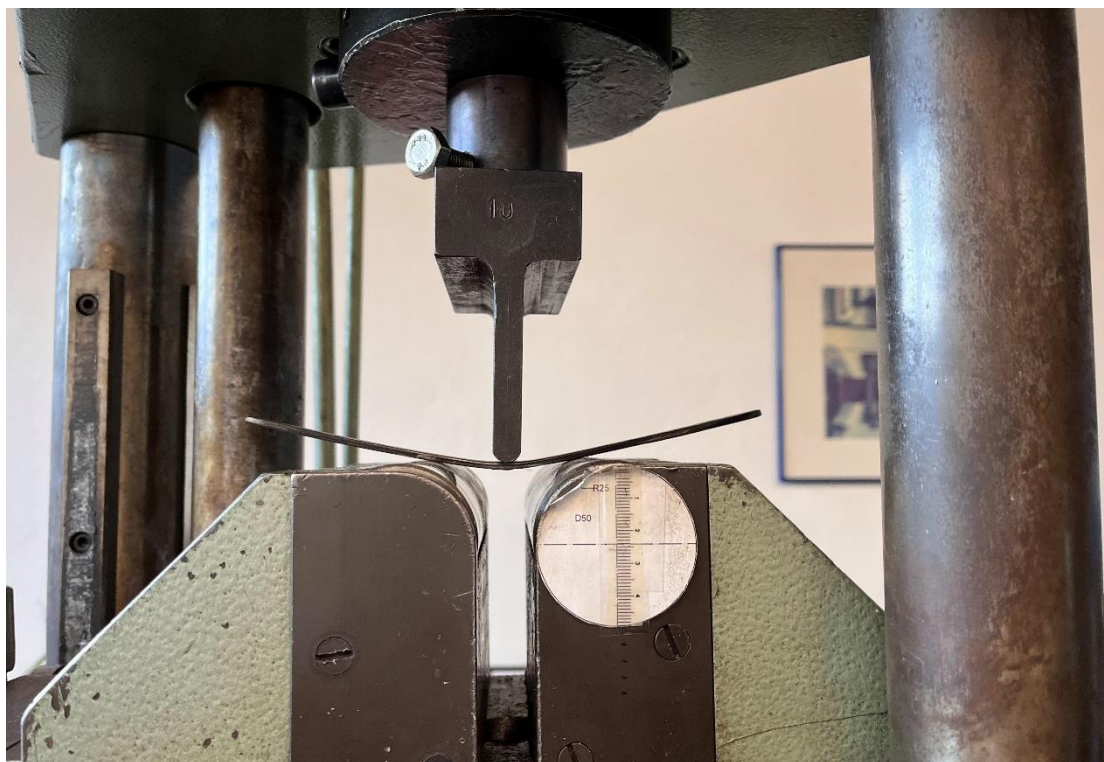


Slika 21. Kidalica prilagođena za savojno ispitivanje



Slika 22. Pripremljeni uzorci za savojno ispitivanje

Savojno je ispitivanje provedeno tri puta: dvaput se savijalo na tjeme zavara, a jedanput na korijen zavara. Strana ispitnog uzorka na koju dolazi savojni trn pobrušena je kako bi se opterećenje moglo ravnomjerno rasporediti po površini. Na slici 23 prikazan je savojno opterećen uzorak na kidalici pri ispitivanju, a na slici 24 prikazan je ispitni uzorak nakon provedenog ispitivanja.



Slika 23. Savojno opterećen uzorak na kidalici



Slika 24. Ispitni uzorak nakon završenog savojnog ispitivanja

Vizualnom kontrolom zavara nakon savojnog ispitivanja na svakom od ispitnih uzoraka uočene su sitne mikropukotine u metalu zavara, ali zavareni su spojevi izdržali opterećenje i nije došlo do loma. Na slici 25 prikazane su mikropukotine na jednom od ispitnih uzoraka koji je bio opterećen na korijen zavara.



Slika 25. Mikropukotine na licu zavara ispitnog uzorka ispitivanog savijanjem

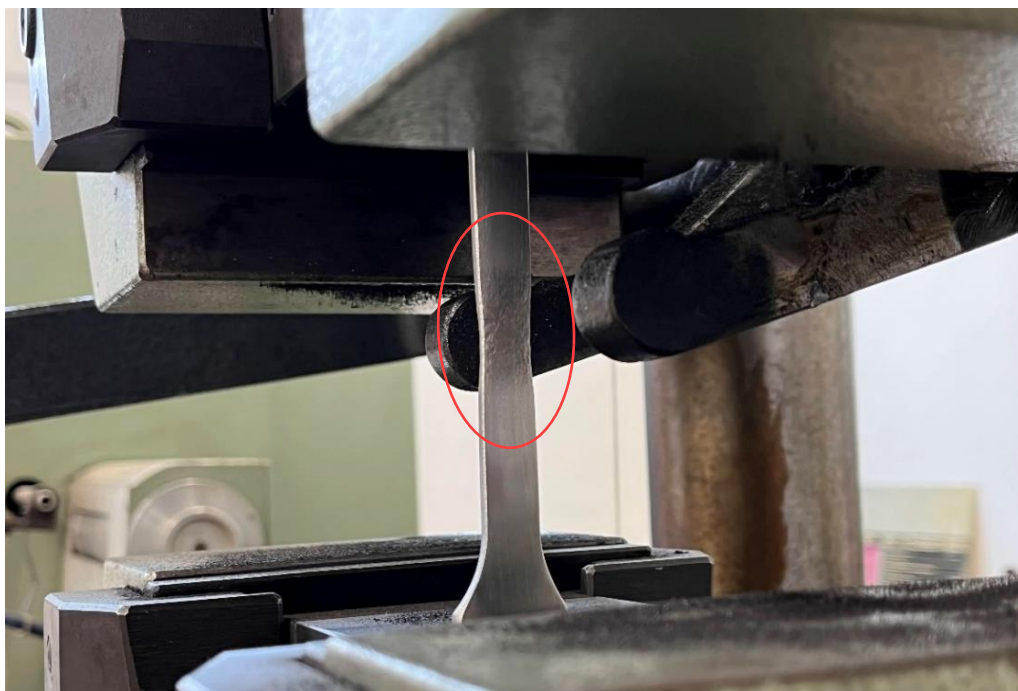
5.3.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće

Ispitivanje vlačne čvrstoće zavarenog spoja kvantitativna je metoda koja se provodi da bi se analizirala kvaliteta zavarenog spoja uspoređujući dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće R_m s unaprijed definiranim vrijednostima osnovnog materijala. Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN ISO 6892-1:2019. Na slici 26 prikazana su dva ispitna uzorka pripremljena za ispitivanje vlačne čvrstoće zajedno s cijevi iz koje su izrezani. Izrezivanje ispitnih uzoraka provedeno je vodenim mlazom.



Slika 26. Ispitni uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće

Na slici 27 može se vidjeti ispitni uzorak tijekom ispitivanja vlačne čvrstoće, u trenutku kad se poprečni presjek počeo intenzivno smanjivati na mjestu na kojem je kasnije došlo do loma.



Slika 27. Statičko vlačno ispitivanje

Na slici 28 prikazan je ispitni uzorak nakon provedenog statičkog vlačnog pokusa.



Slika 28. Slomljeni ispitni uzorak nakon statičkog vlačnog ispitivanja

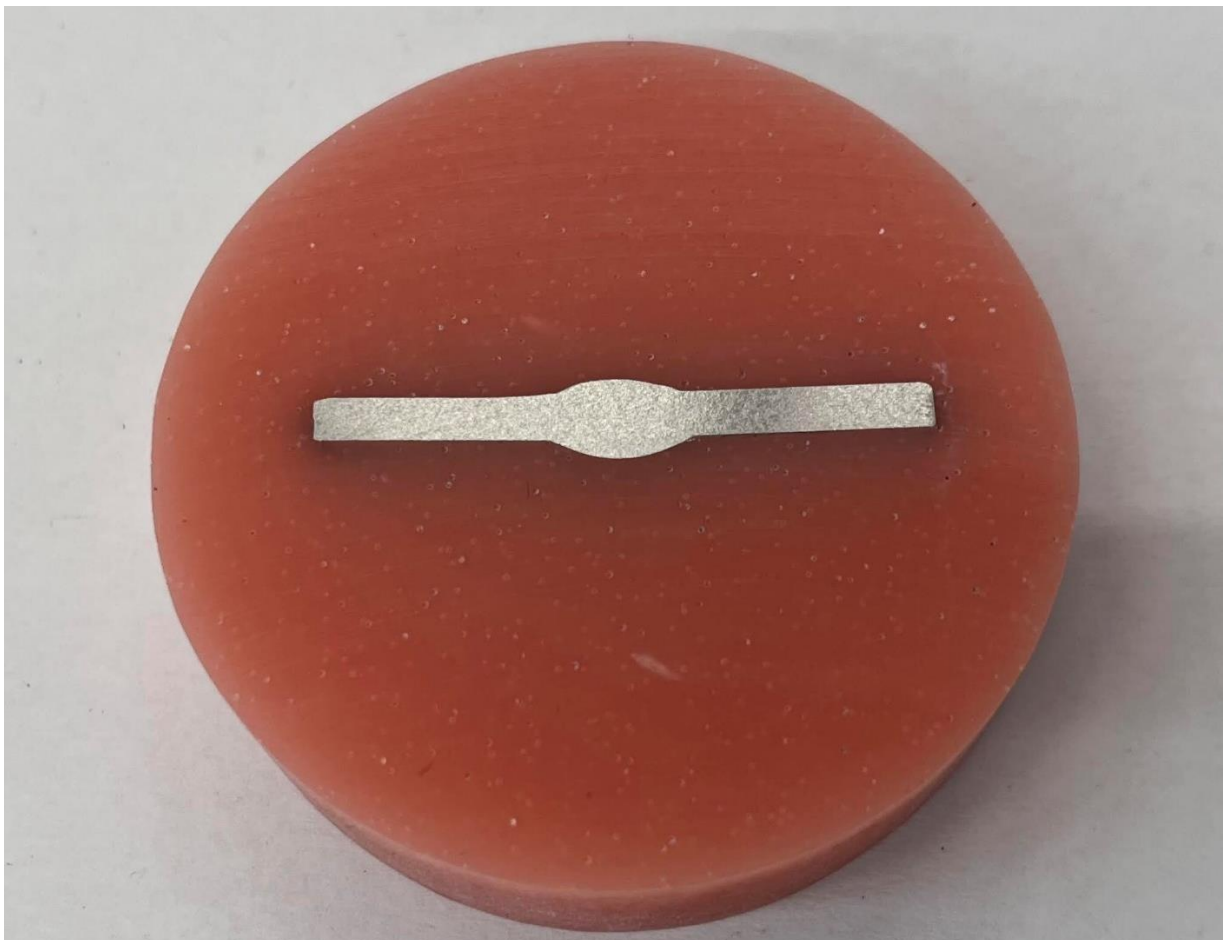
Nakon očitavanja maksimalne sile kojom su ispitni uzorci bili opterećeni, izračunata je vlačna čvrstoća te je ona uspoređena sa zahtijevanom vlačnom čvrstoćom osnovnog materijala. Ti su rezultati prikazani u tablici 7 i može se zaključiti kako zavareni spoj zadovoljava tražene vrijednosti vlačne čvrstoće.

Tablica 7. Vrijednosti vlačne čvrstoće ispitivanih uzoraka

Broj ispitnog uzorka	Presjek (a × b), mm	Površina presjeka, mm ²	F_{max} , N	R_m , MPa
1	11,43 × 2,64	30,17	12050	399
2	11,71 × 2,61	30,56	12300	402
zahtijevana vrijednost vlačne čvrstoće:				345

5.4. Analiza makrostrukture zavarenog spoja

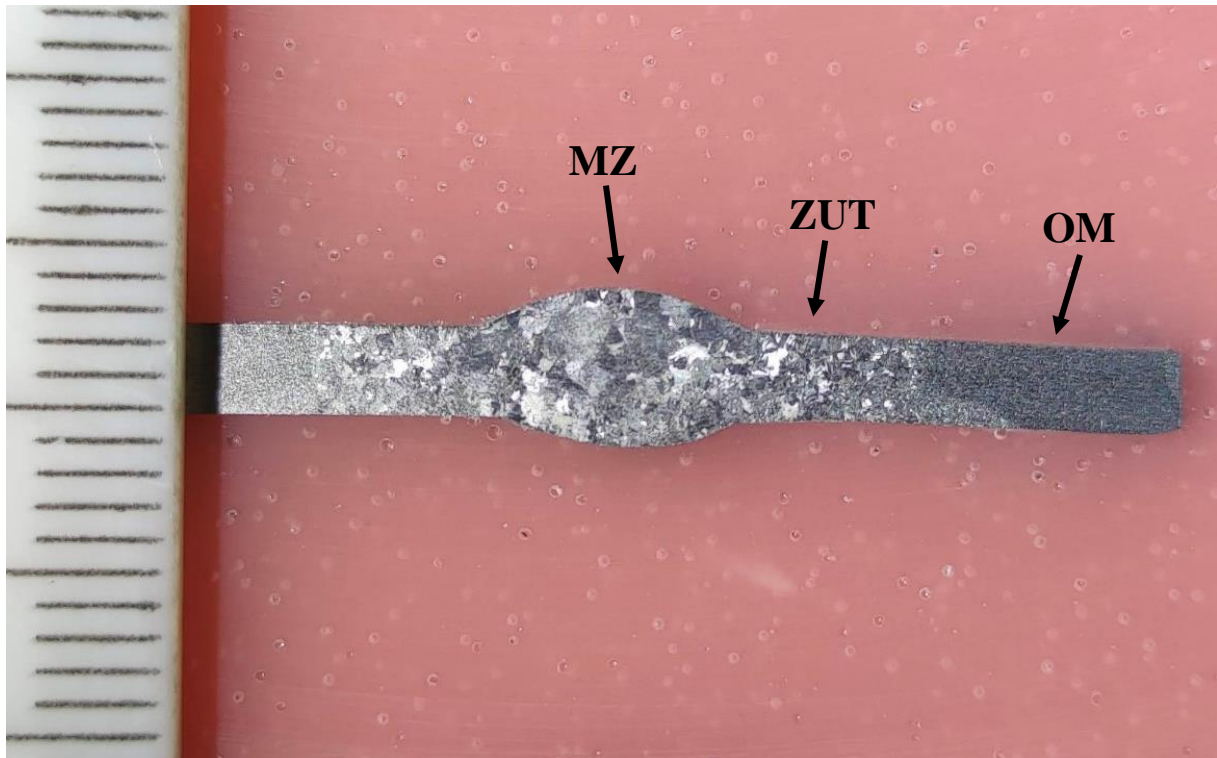
Analiza makrostrukture provodi se na uzorku zavarenog spoja u nenagrizenom i nagrizenom stanju. Uzorak za analizu makrostrukture izrezan je vodenim mlazom, zaliven je u polimernu masu zbog lakšeg rukovanja, brušen i poliran. Površina uzorka analizirana je u poliranom i nagrizenom stanju. Nagrivanje uzorka provodi se vodenom otopinom dušične (HNO_3) i fluorovodične (HF) kiseline. Uzorak se u navedenoj otopini ostavi nekoliko sekundi, a zatim se ispire etanolom. Na slici 29 prikazan je uzorak prije nagrizanja, u poliranom stanju.



Slika 29. Makrostruktura zavarenog spoja prije procesa nagrizanja

Nakon što se provelo nagrivanje uzorka, jasno su postale vidljive granice dijelova zavara, a to su metal zavara (MZ), zona utjecaja topline (ZUT) i osnovni materijal (OM). Na slici 30 prikazan je uzorak u nagrizenom stanju. Pregledom zavara nisu uočene nikakve nepravilnosti, a geometrija zavara je pravilna. Linija staljivanja nije jasno izražena kao ni granica između

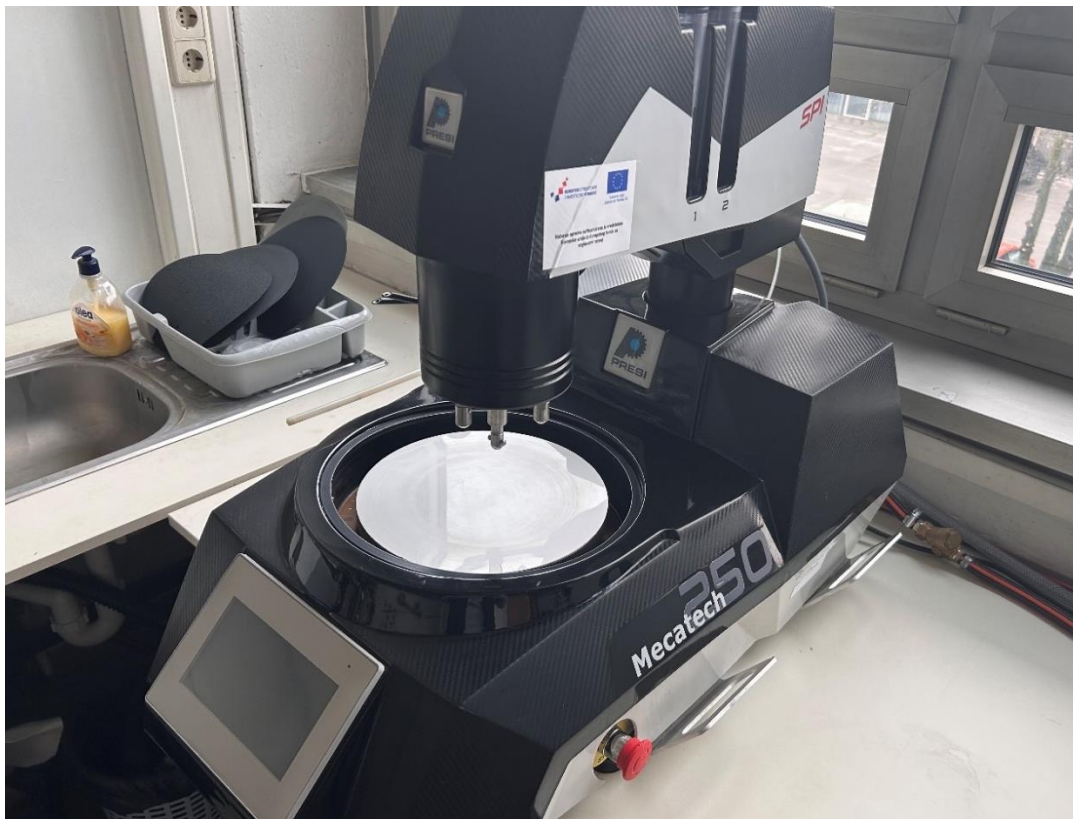
prvog i drugog prolaza. Jasno se vidi porast kristalnih zrna od osnovnog materijala preko niskotemperaturnog do visokotemperaturnog ZUT-a i metala zavara.



Slika 30. Makrostruktura zavarenog spoja u nagrizenom stanju

5.5. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja

Analiza mikrostrukture zavarenog spoja provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za analizu mikrostrukture također je vodenim mlazom izrezan reprezentativni uzorak zavarenog spoja. Uzorak je zatim zaliven u polimernu masu nakon čega je provedeno brušenje i poliranje površine uzorka kako bi se jasno mogla analizirati mikrostruktura na svjetlosnom mikroskopu. Brušenje i poliranje izvedeno je na uređaju Mecatech 250 SPI, koji je prikazan na slikama 31 i 32, a na slici 33 može se vidjeti uzorak zavarenog spoja u poliranom stanju.



Slika 31. Uređaj Mecatech 250 SPI



Slika 32. Postupak brušenja uzorka na uređaju Mecatech 250 SPI



Slika 33. Uzorak zavarenog spoja u poliranom stanju

Nakon što je uzorak pripremljen za analizu mikrostrukture, postavljen je na svjetlosni mikroskop i detaljno su promatrani dijelovi zavara (metal zavara, zona utjecaja topline i osnovni materijal) na tjemenu, u sredini i u korijenu zavara. Zavareni spoj prvo se analizirao u poliranom, a nakon toga u nagrizenom stanju, pri povećanjima od $50\times$ i od $200\times$. Dobivene fotografije mikrostrukture u karakterističnim dijelovima zavarenog spoja prikazane su u nastavku.

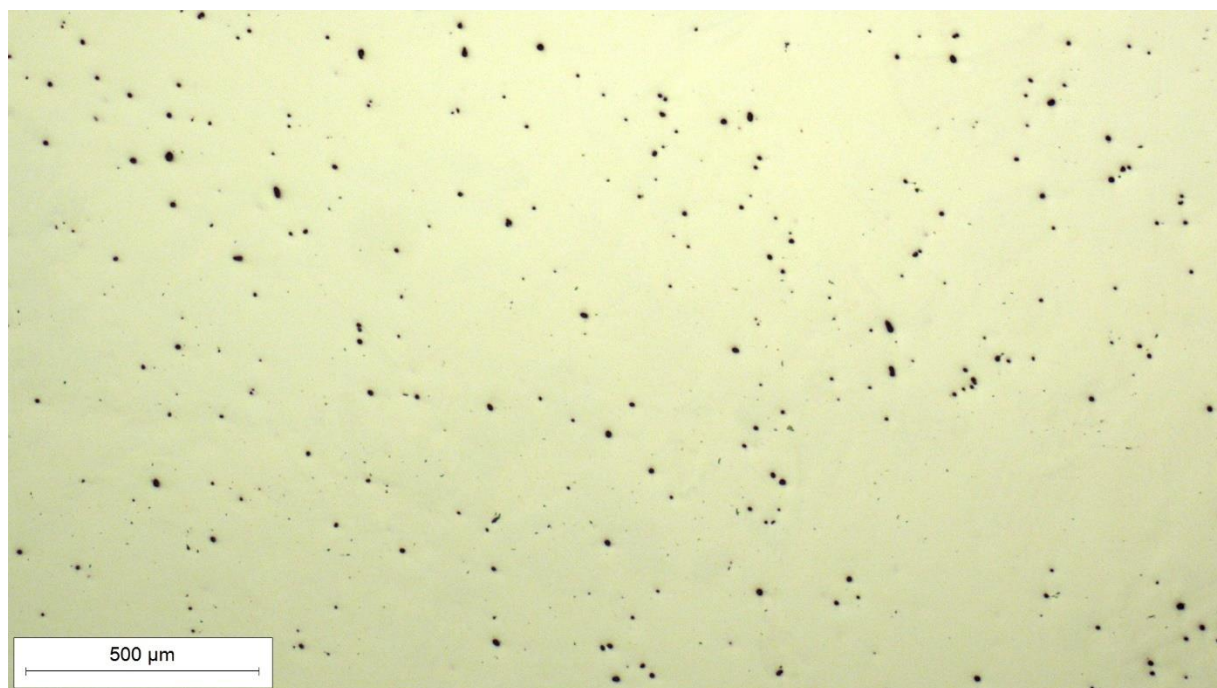
Sastav sredstva za nagrivanje je sljedeći:

- 100 ml dušične kiseline
- 20 ml fluorovodične kiseline
- 880 ml destilirane vode.

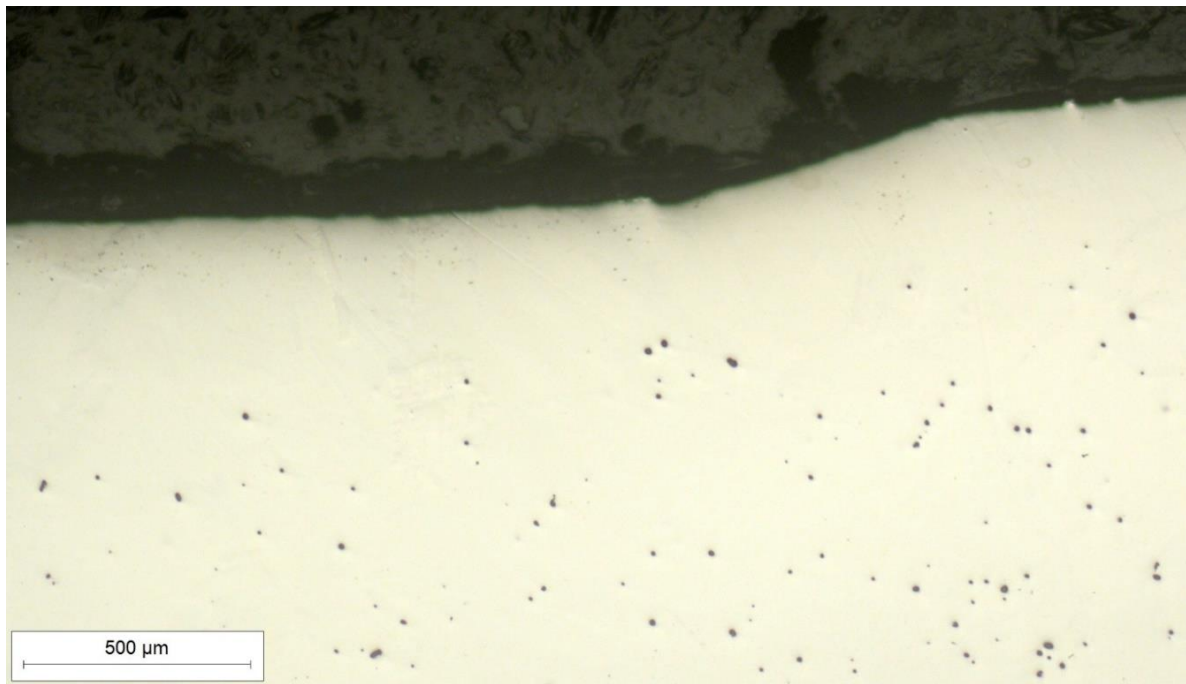
Na Sliku 34 prikazana je polirana površina metalografskog uzorka u području osnovnog materijala, a na slikama Slika 35 i Slika 36 polirana površina u području metala zavara i zone utjecaja topline. Sve tri fotografije snimljene su pri povećanju $50\times$.



Slika 34. Mikrostruktura osnovnog materijala u poliranom stanju, snimljeno pri povećanju 50×



Slika 35. Mikrostruktura metala zavora u poliranom stanju, snimljeno pri povećanju 50×



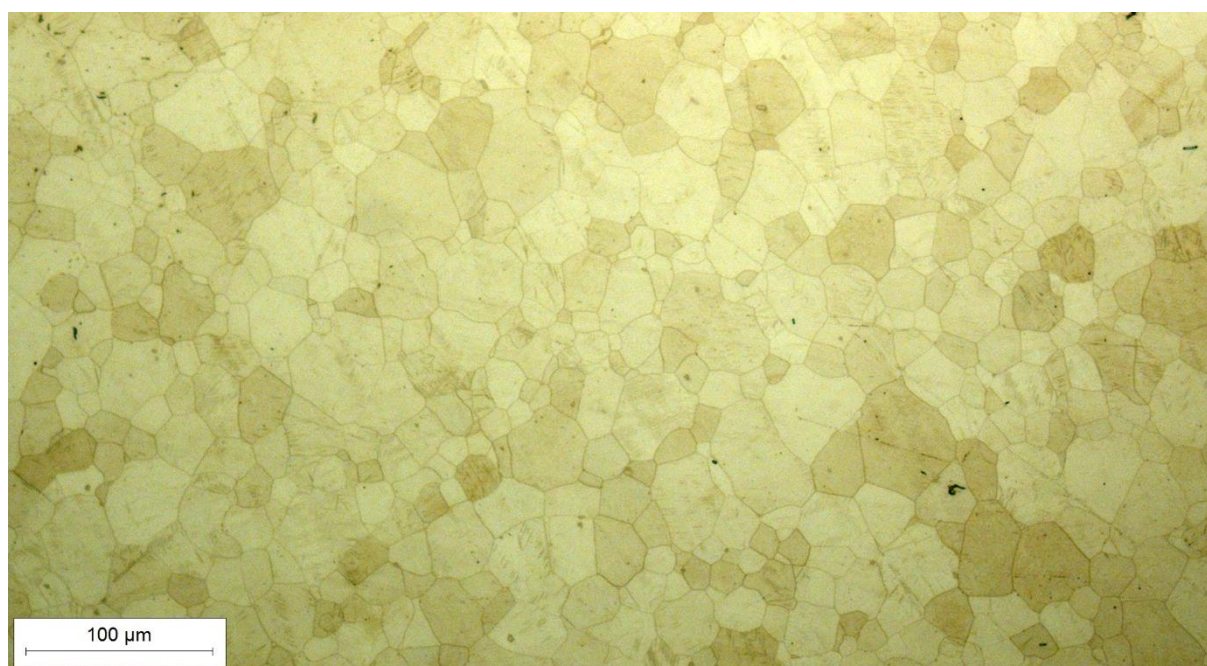
Slika 36. Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavara u poliranom stanju, snimljeno pri povećanju 50×

U poliranom stanju mjestimice se vide sitne crne nakupine, što su vrlo vjerojatno sitne izlučevine β -faze. β -faza je najzastupljenija u mikrostrukturi metala zavara, a prisutna je i u zoni utjecaja topline te u osnovnom materijalu, ali u znatno manjoj količini. Formacije β -faze nisu homogeno raspoređene ni u jednom od tri navedena područja.

Na Slika 37 i Slika 38 prikazane su mikrostrukture osnovnog materijala u nagrizenom stanju, snimljene pri povećanjima 50× i 200×. U mikrostrukturi su jasno uočljiva sitna kristalna zrna α -faze, relativno pravilnog oblika. Zrna se međusobno razlikuju po intenzitetu sivila zbog različite usmjerenosti. Mikrostruktura je relativno sitnozrnata, a srednji promjer zrna iznosi oko 18 μm . U fotografiranom području ne vide se formacije β -faze.

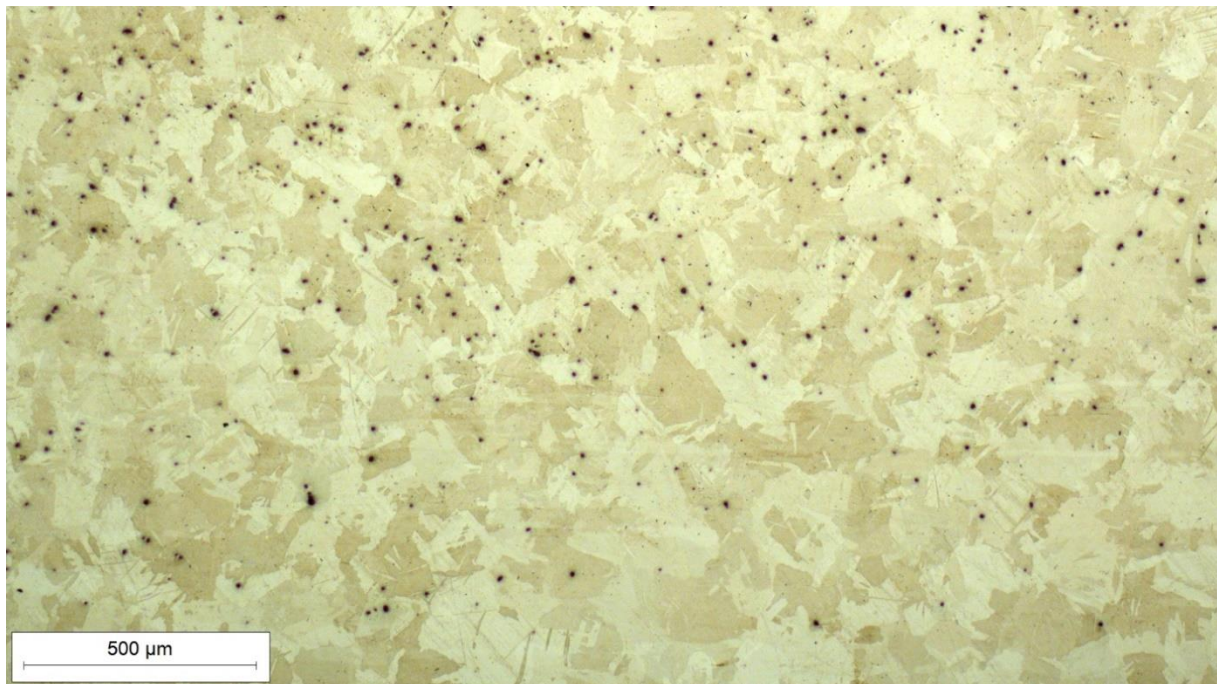


Slika 37. Mikrostruktura osnovnog materijala u nagriženom stanju, snimljeno pri povećanju 50×



Slika 38. Mikrostruktura osnovnog materijala u nagriženom stanju, snimljeno pri povećanju 200×

Na Slika 39 i Slika 40 prikazana je mikrostruktura niskotemperaturnog ZUT-a u sredini zavora, snimljena pri manjem povećanju od 50 \times i većem povećanju od 200 \times . U odnosu na osnovni materijal, kristalna zrna α -faze su puno krupnija i nepravilnijeg oblika. Na obje slike vide se izlučene sitne nakupine β -faze koja nije homogeno raspoređena po presjeku.



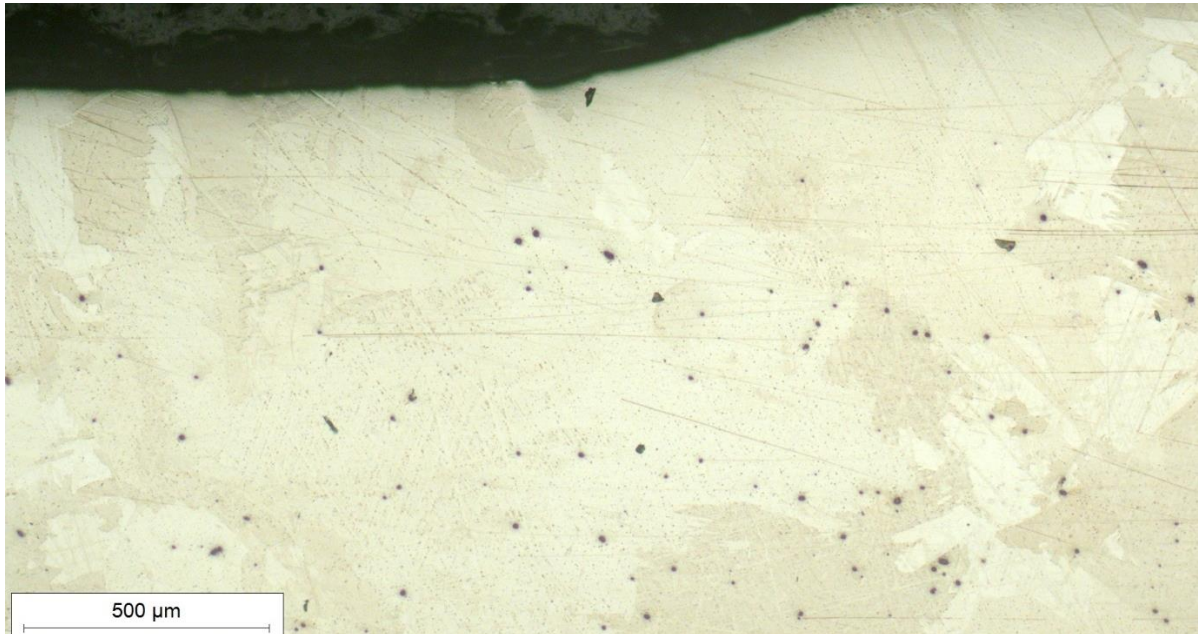
Slika 39. Mikrostruktura niskotemperaturnog ZUT-a u sredini zavara, snimljeno pri povećanju 50×



Slika 40. Mikrostruktura niskotemperaturnog ZUT-a u sredini zavara, snimljeno pri povećanju 200×

Na Slika 41 prikazana je mikrostruktura visokotemperaturnog ZUT-a uz tjeme i u sredini zavara, snimljena pri povećanju od 50×, a na Slika 42 mikrostruktura ZUT-a u sredini zavara,

snimljena pri povećanju od 200×. U odnosu na područje niskotemperaturnog ZUT-a, kristalna zrna α -faze su puno krupnija. I u ovom području vide se izlučene sitne nakupine β -faze. Mikrostruktura ZUT-a u korijenu, sredini i tjemenu, lijevo i desno od zavara, vrlo je slična.

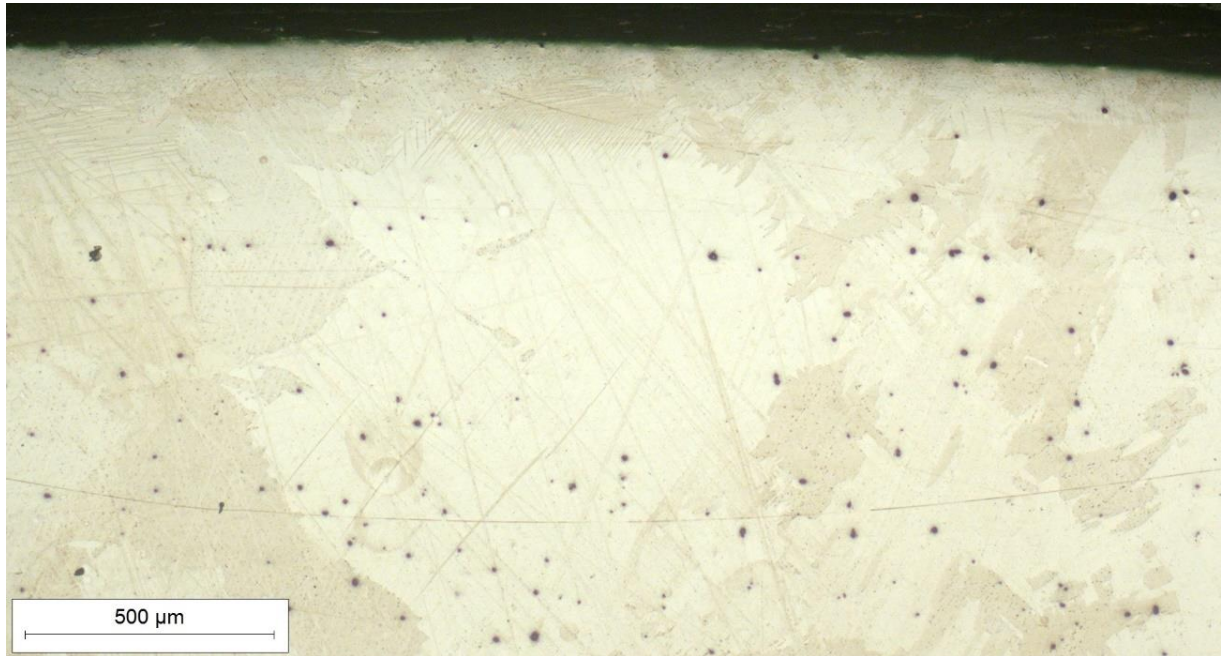


Slika 41. Mikrostruktura ZUT-a uz tjeme i u sredini zavara, lijevo, snimljeno pri povećanju 50×

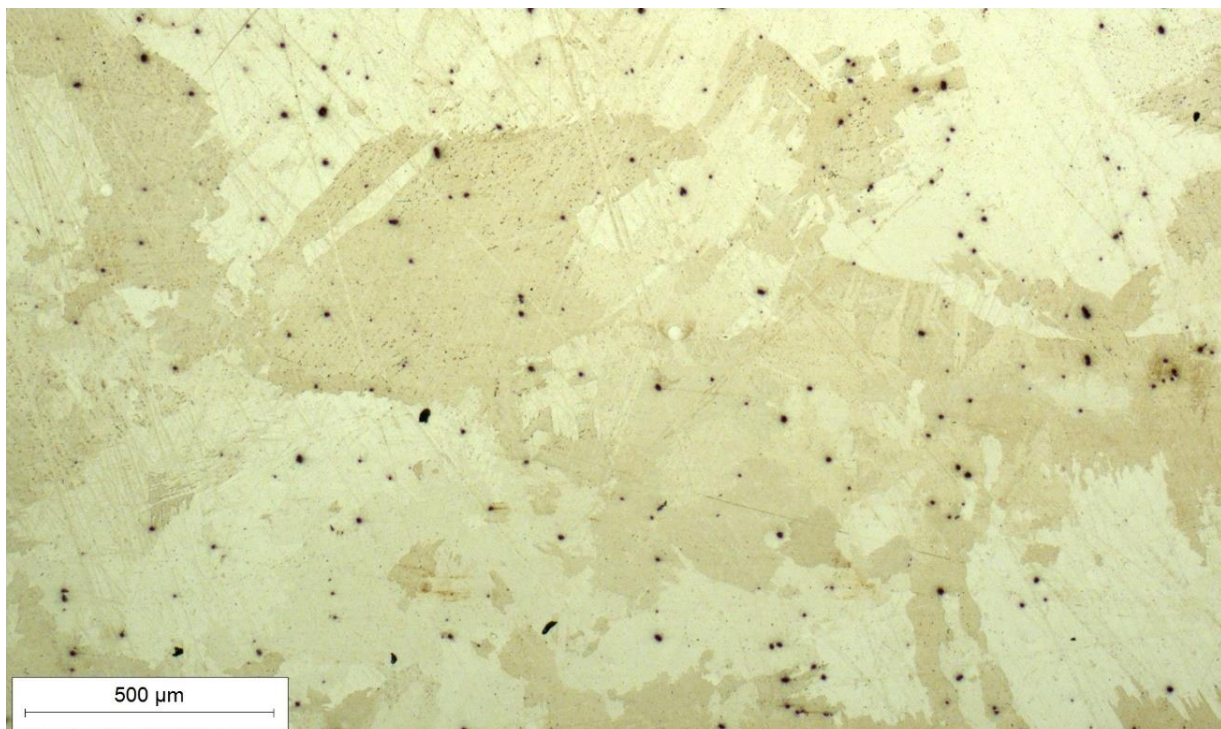


Slika 42. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavara, lijevo, snimljeno pri povećanju 200×

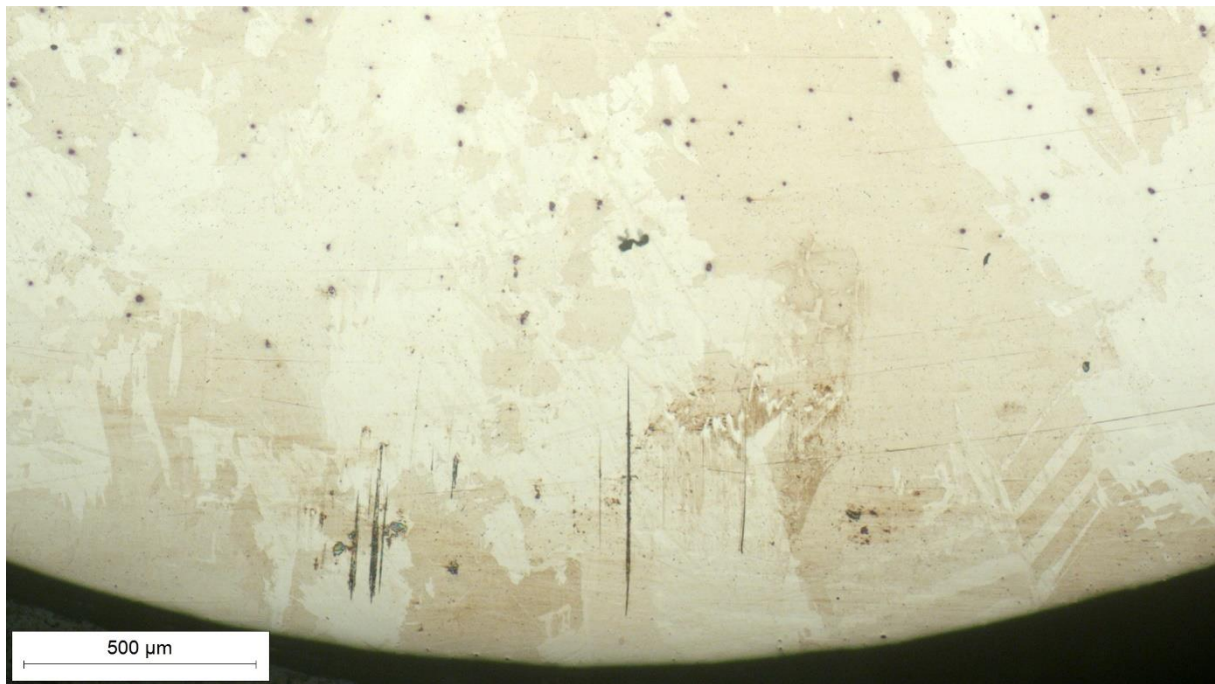
Na Slika 43, Slika 44 i Slika 45 prikazana je mikrostruktura metala zavara u tjemenu, sredini i korijenu zavara, snimljena pri povećanju od 50 \times . Mikrostruktura je ljevačka, a sastoji se uglavnom od α -faze i vrlo malo sitnih izlučevina β -faze.



Slika 43. Mikrostruktura metala zavara u tjemenu, snimljeno pri povećanju 50 \times

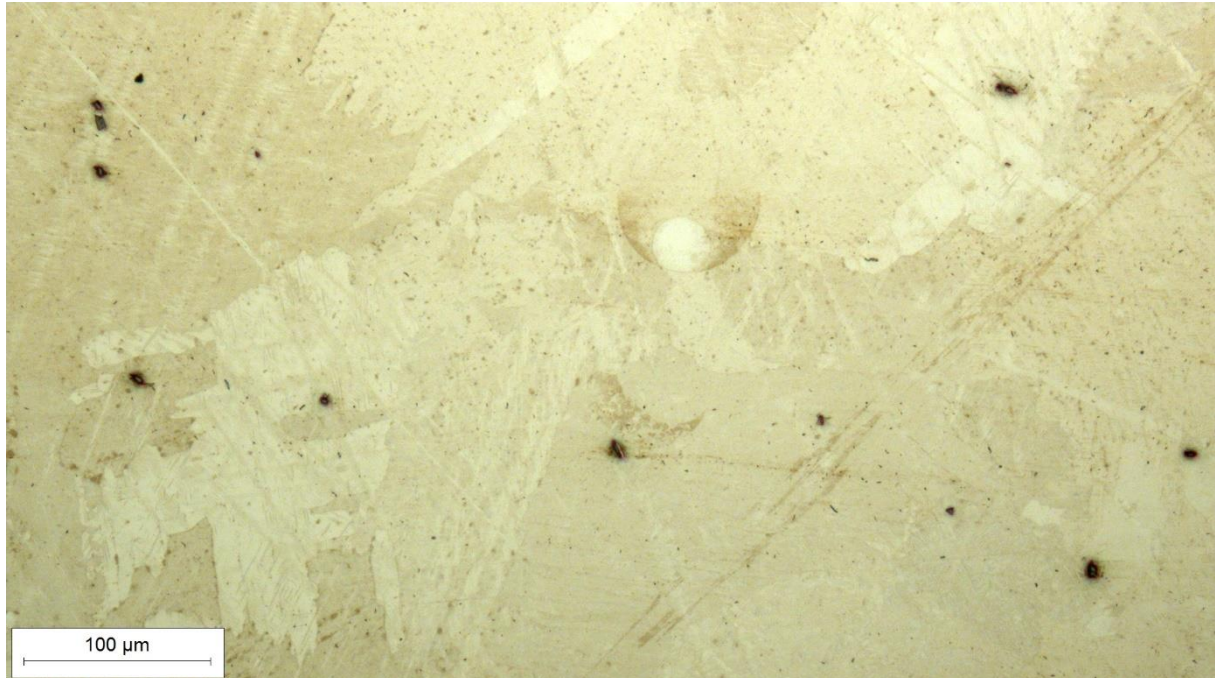


Slika 44. Mikrostruktura metala zavara u sredini zavara, snimljeno pri povećanju 50 \times



Slika 45. Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljeno pri povećanju 50×

Na Slika 46 prikazana je mikrostruktura metala zavara u sredini zavara, snimljena pri povećanju 200×, na kojoj se jasnije vidi tipična ljevačka mikrostruktura nelegiranog titanija.



Slika 46. Mikrostruktura metala zavara u sredini zavara, nagrizenno stanje, snimljeno pri povećanju 200×

6. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

6.1. Osvrt na ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem provedeno prema normi HRN EN ISO 7438 pokazalo je sljedeće:

- Prilikom savijanja ispitnih uzoraka izrezanih iz zavarenog spoja pod kutom od 180° , za radijus trna od 5 mm i razmak između oslonaca od 18 mm, nije došlo do loma ni kod jednog od tri ispitana uzorka. Dva uzorka su savijana tako da im je vlačno opterećena strana bila u tjemenu, a kod jednog je bila u korijenu zavara.
- Na svim uzorcima u području metala zavara uočene su sitne pukotine. Najviše pukotina uočeno je kod jednog uzorka s vlačno opterećenim tjemonom zavara.
- S obzirom na malu veličinu pukotina, kvaliteta zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija je zadovoljavajuća.

6.2. Osvrt na ispitivanje vlačne čvrstoće

Ispitivanje vlačne čvrstoće provedeno prema normi HRN EN ISO 6892-1:2019 pokazalo je sljedeće:

- Ispitivanje vlačne čvrstoće provedeno je na dva uzorka koji su izrezani u području zavarenog spoja. Zavareni spoj na oba ispitna uzorka nalazio se na polovici početne duljine uzorka.
- Oba ispitna uzorka pukla su u području metala zavara.
- Maksimalna vlačna sila za prvi ispitni uzorak iznosila je 12050 N, a 12300 N za drugi.
- Kod prvog uzorka izmjerena je vlačna čvrstoća od 399 MPa, a kod drugog 402 MPa. Obje vrijednosti su znatno više od vrijednosti zahtijevane vlačne čvrstoće koja iznosi 345 MPa.
- S obzirom na dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće, kvaliteta zavarenog spoja je zadovoljavajuća.

6.3. Osvrt na analizu makrostrukture

Analizom makrostrukture zavarenog spoja nelegiranog titanija može se zaključiti sljedeće:

- Geometrija zavora V-spoja pravilnog je i simetričnog oblika.
- Linija staljivanja nije jasno izražena.
- Granicu između prvog i drugog prolaza nije moguće razlučiti.
- Vrlo jasno se vidi veliki porast kristalnih zrna u zoni utjecaja topline i metalu zavora u odnosu na osnovni materijal.
- Nisu uočene nepravilnosti unutar zavarenog spoja.

6.4. Osvrt na analizu mikrostrukture

Pri analizi mikrostrukture zavarenog spoja na svjetlosnom mikroskopu, pri povećanjima od 50 do 1000 \times , u poliranom i nagriženom stanju, uočeno je sljedeće:

- Mikrostruktura osnovnog materijala sastoji se uglavnom od α -kristala mješanaca i vrlo male količine sitnih izlučevina β -faze. Mikrostruktura je relativno sitnozrnata, a srednji promjer kristalnih zrna α -faze iznosi oko 18 μm .
- Zona utjecaja topline je dosta široka, preko 5 mm. U odnosu na osnovni materijal, kristalna zrna su puno krupnija, a njihova veličina raste s približavanjem liniji staljivanja. Nije uočena značajnija razlika između mikrostrukture zone utjecaja topline u tjemenu, sredini i korijenu zavora. U zoni utjecaja topline također se mogu vidjeti sitne izlučevine β -faze.
- Mikrostruktura metala zavora je tipična ljevačka struktura. Sastoji se uglavnom od α -faze i vrlo malo sitnih izlučevina β -faze. Mikrostruktura u tjemenu, sredini i korijenu zavora je vrlo slična. β -faze ima najviše u sredini metala zavora.

7. ZAKLJUČAK

Titanij i njegove legure sve su češće korišteni materijali za izradu dijelova zrakoplova, u svemirskoj industriji i brodogradnji, ali i u farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Ti materijali pokazuju vrlo dobra mehanička svojstva, poput visoke specifične čvrstoće, korozijske postojanosti, ali i odlične zavarljivosti.

U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada ispitana je kvaliteta zavarenog spoja na cijevi od nelegiranog titanija pri čemu je provedeno savojno ispitivanje, statičko vlačno ispitivanje te analiza makrostrukture i mikrostrukture zavarenog spoja.

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Pri savojnom ispitivanju pod kutom od 180° nije došlo do loma. U metalu zavara pojavile su se sitne pukotine koje su u granicama dopuštenog.
- Pri statičkom vlačnom ispitivanju dobivene su vrijednosti vlačne čvrstoće od 399 MPa i 402 MPa, što je više od tražene vrijednosti od 345 MPa.
- Analizom makrostrukture u zavarenom spoju nisu uočene nepravilnosti. Zavar ima pravilnu geometriju, zona utjecaja topline je relativno široka, a linija staljivanja nije izražena kao ni granica između pojedinih prolaza.
- Mikrostruktura osnovnog materijala je relativno sitnozrnata, a sastoji se od α -kristala mješanaca s vrlo malim udjelom sitnih izlučevina β -faze.
- Zbog velikog unosa topline pri zavarivanju, u zoni utjecaja topline kristalna zrna su puno krupnija, a njihova veličina raste s približavanjem liniji staljivanja. Mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu, sredini i korijenu zavara vrlo je slična.
- Metal zavara ima tipičnu ljevačku mikrostrukturu sastavljenu od α -faze i vrlo malo sitnih izlučevina β -faze.

S obzirom na sve navedeno, kvaliteta zavarenog spoja je zadovoljavajuća.

LITERATURA

- [1] Lutjering G, Williams J. Titanium (Engineering Materials and Processes). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2010.
- [2] Ćorić D. Posebni metalni materijali – III Dio, (digitalni udžbenik). Zagreb: Fakultet Strojarsva i Brodogradnje; 2017.
- [3] Titanium – metal of the future. Dostupno na: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1803-titanium-metal-of-the-future>, pristupljeno: 3.6.2023.
- [4] Boyer R, Welsch G, Collings EW. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, 2nd ed. Hawthorne: ASM International; 1994.
- [5] Leyens C, Peters M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.; 2003.
- [6] Ilmenite – A black iron titanium oxide mineral. Dostupno na: <https://geology.com/minerals/ilmenite.shtml>, pristupljeno 5.6.2023.
- [7] Rutile. Dostupno na: <https://www.sandatlas.org/rutile/>, pristupljeno 5.6.2023.
- [8] Made How – Volume 7: Titanium. Dostupno na: <http://www.madehow.com/Volume-7/Titanium.html>, pristupljeno 5.6.2023.
- [9] Titanium Sponge & Its Production Processes. Dostupno na: <https://www.refractorymetal.org/titanium-sponge-production-processes/>, pristupljeno 8.6.2023.
- [10] Paton BE, Akhonin SV, Berezos VA. Production of Titanium Alloys Ingots by Ebchm Technology. Kiev: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society); 2016.
- [11] Ćorić D. Titan i njegove legure - svojstva i primjena. Zavarivanje 59 5/6, 125 -131; 2016.
- [12] Welk BA. Microstructural and Property Relationships in Titanium Alloy Ti5553 [thesis]. The Ohio State University; 2010.

- [13] Beriş B. Effects Of Gas Shielding Flow Rate On Weld Quality Of Tig Welding In Ti6Al4V Alloy [thesis]. Istanbul: Istanbul Technical University; 2012.
- [14] Veiga C, Davim JP, Loureiro AJR. Properties and Applications of Titanium Alloys: A Brief Review. Coimbra: Coimbra Institute of Engineering; 2012.
- [15] Semiatin SL, Knisley SL, Fagin PN, Zhang F, Barker DR. Microstructure Evolution during Alpha-Beta Heat Treatment of Ti-6Al-4V. vol. 34A, pp. 2377-2386. Madison: Metallurgical And Materials Transactions; 2003.
- [16] Boyer RR, Briggs RD. The Use of Titanium Alloys in the Aerospace Industry. Seattle, WA: Journal of Materials Engineering and Performance; 2005.
- [17] Semiatin SL, Weiss I. Thermo mechanical Processing of Beta Titanium Alloys - an Overview, Materials Science and Engineering, vol. A243. New York; 1998. doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00783-1
- [18] Donachie MJ. Titanium A Technical Guide. ASM International; 2000. ISBN: 978-0-87170-686-7
- [19] Advanced Materials for Gas Turbine Engines - Fan Blades. Dostupno na: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=110>, pristupljeno 10.6.2023.
- [20] Welding of titanium and its alloys - Part 1. Dostupno na: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-titanium-and-its-alloys-part-1-109>, pristupljeno 12.6.2023.
- [21] Electron Beam Welding Titanium. Dostupno na: <https://ebindustries.com/electron-beam-welding-titanium/>, pristupljeno 13.6.2023.
- [22] Avvakumov J, Boykov L, Mikhailov V, Nazarenko O, Zamkov V, Prometey C, i ostali. Electron-beam welding of joints made of titanium alloys. St. Peterburg: Titanium 99: Science And Technology; 1999.

- [23] Oates W, Saitta A. Welding handbook – Volume 4: Materials and applications part 2, 8th edition. SAD: American Welding Society; 2021.
- [24] Nadzam J. Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection. Cleveland, OH: The Lincoln Electric Company; 2014.
- [25] American Welding Society. Committee on Joining Metals and Alloys, Technical Activities Committee, American National Standards Institute: Guide For The Fusion Welding Of Titanium And Titanium Alloys. 54 str. 2021.
- [26] Jeffus L. The Essential Welder: Gas Tungsten Metal Arc Welding, 1st edition. Cengage Learning; 1999.
- [27] Vukoja M. Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju titana [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [28] Ericsson M. Simulation of robotic TIG-welding [dissertation]. Uddevalla: University of Trollhättan, Department of Technology; 2003.
- [29] Kou S. Welding Metallurgy, 2nd edition. New Jersey: John Willey and Sons; 2002.
- [30] Short AB. Gas Tungsten arc welding alpha + beta titanium alloys, Literature Review. Minerals and Mining, Taylor and Francis; 2009.