

# Određivanje svojstava zavarenog spoja titanijeve legure

---

Ladavac, Andrea

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:984535>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Andrea Ladavac**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Željko Alar, izv.prof.

Student:

Andrea Ladavac

Zagreb, 2018

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Željko Alar, dipl. ing. na ukazanom razumijevanju, odvojenom vremenu i strpljenju prilikom pomoći kod izrade ovog rada.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Vesni Alar, dipl. ing. i djelatnicima Katedre za zaštitu materijala na pomoći oko ispitivanja uzoraka.

Zahvaljujem se tehničkom suradniku Katedre za zavarene konstrukcije Krešimiru Sukobljeviću na pomoći kod pripreme i izrade uzoraka.

Također se zahvaljujem tvrtki Zrinski AG d.o.o. iz Varaždina na ustupljenim uzorcima.

Posebno se zahvaljujem obitelji i prijateljima na bezuvjetnoj podršci tijekom mog studiranja.

Andrea Ladavac



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: **ANDREA LADAVAC** Mat. br.: **0035191444**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje svojstava zavarenog spoja titanijeve legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of weld properties for titanium alloy**

Opis zadatka:

Zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava titanij se danas sve više koristi u zrakoplovnoj i svemirskoj tehnici. Zavarivanje titanija i titanijevih legura je vrlo osjetljiv postupak te zahtijeva točno određene uvjete.

U radu je potrebno napraviti sljedeće:

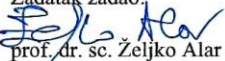
1. opisati svojstva titanija, a posebno se osvrnuti na mehanička svojstva te dati pregled primjene titanija i titanijevih legura
2. opisati problematiku zavarivanja titanija
3. eksperimentalno provesti zavarivanje ploča od titanija te odrediti svojstva zavarenog spoja
4. analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

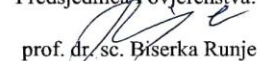
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

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. Željko Alar

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS KRATICA I OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. TITANIJ (Ti) .....	3
2.1. Povijest titanija.....	3
2.2. Titanijeva rudača.....	4
2.3. Dobivanje titanija .....	5
2.3.1. Titanijev tetraklorid .....	6
2.3.2. Titanijeva spužva .....	7
2.3.3. Titanijev ingot.....	8
2.4. Alfa i beta faze titanija .....	9
2.5. Legure titanija .....	10
2.6. Primjena titanija .....	12
2.6.1. Avionska industrija .....	12
2.6.2. Ostale industrije .....	13
3. ZAVARIVANJE.....	16
3.1. Vrste zavarivanja.....	16
3.1.1. Postupci zavarivanja taljenjem.....	17
3.1.2. Postupci zavarivanje pritiskom .....	17
3.1.3. TIG zavarivanje.....	18
4. ZAVARIVANJE TITANIJA.....	23
4.1. Priprema zavara.....	24
4.2. Zavarljivost titanija [28].....	24
4.3. Oksidacija titanija .....	24
5. ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA .....	26
5.1. Nerazorna ispitivanje zavarenog spoja .....	27
5.1.1. Vizualna kontrola.....	27
5.2. Razorna ispitivanja zavarenog spoja.....	28
5.2.1. Mjerenje tvrdoće .....	29
5.2.2. Ispitivanje do loma zavarenog spoja.....	30
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	32
6.1. Plan eksperimentalnih ispitivanja .....	32
6.2. Uzorci.....	33
6.3. Priprema uzoraka prije postupka zavarivanja .....	37
6.3.1. Priprema uzoraka .....	37
6.3.2. Priprema komore za zavarivanje.....	39
6.4. Zavarivanje uzoraka .....	41
6.5. Naknadna obrada.....	47
6.5.1. Obrada odvajanjem čestica .....	47

---

6.5.2. Brušenje .....	48
6.6. Makro ispitivanje zavara .....	50
6.7. Ispitivanje tvrdoće .....	54
6.8. Ispitivanje do loma zavara .....	57
7. ANALIZA REZULTATA .....	64
7.1. Analiza rezultata makro ispitivanja .....	64
7.2. Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće .....	65
7.3. Analiza podataka sila lomljenje .....	66
8. ZAKLJUČAK .....	67
9. LITERATURA .....	68

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Titanij [3] .....	3
Slika 2.2. Rudača ilmenita [7] .....	5
Slika 2.3. Titanijeve ploče [9] .....	6
Slika 2.4. Titanijev tetraklorid i uređaj za proizvodnju [10] .....	6
Slika 2.5. Titanijeva spužva [12] .....	7
Slika 2.6. Titanijev ingot [13] .....	9
Slika 2.7. Kristalne strukture titanija [15] .....	9
Slika 2.8. Ti-Al legura [17] .....	11
Slika 2.9. Ratni zrakoplov izrađen od titanija zbog smanjenja mase [19] .....	12
Slika 2.10. Titanijski dijelovi u komercijalnom zrakoplovu [20] .....	13
Slika 2.11. Titanijev izmjenjivač topline [21] .....	14
Slika 3.1. TIG postupak zavarivanja [25] .....	19
Slika 3.2. DC direktnog polariteta [24] .....	19
Slika 3.3. DC obrnutog polariteta [24] .....	20
Slika 3.4. Pulsirajući DC [24] .....	20
Slika 3.5. Uporaba zaštitnog plina [26] .....	21
Slika 4.1. Zavarivanje titanijevog ispušnog sustava [27] .....	23
Slika 4.2. Prikaz spektra boja oksidacije titanija [30] .....	25
Slika 5.1. Vizualna kontrola zavara [35] .....	28
Slika 5.2. Identor i otisak prilikom mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom [37] .....	30
Slika 5.3. Ispitivanje do loma zavarenog spoja [38] .....	31
Slika 6.1. Spajanje uzoraka dodatnim materijalom .....	32
Slika 6.2. Certifikat materijala uzoraka .....	34
Slika 6.3. Dobiveni uzorci .....	35
Slika 6.4. XRF uređajem .....	36
Slika 6.5. Postupak ispitivanja XRF uređajem .....	36
Slika 6.6. Uzorak nakon četkanja .....	38
Slika 6.7. Uzorci nakon čišćenja .....	38
Slika 6.8. Komora za zavarivanje .....	39
Slika 6.9. Unutrašnjost komore za zavarivanje .....	40
Slika 6.10. Zavarivanje u inertoj atmosferi .....	41
Slika 6.11. TIG uređaj Magic Wave 2000 .....	42
Slika 6.12. Spremnici sa zaštitnim plinovima .....	43
Slika 6.13. Postupak spajanja uzoraka .....	44
Slika 6.14. Uzorci prije zavarivanja u zaštitnoj komori .....	44
Slika 6.15. Postupak zavarivanja u zaštitnoj komori .....	46
Slika 6.16. Uzorak 8 nakon postupka zavarivanja .....	46
Slika 6.17. Tračna pila za obrada odvajanjem čestica rezanjem .....	47
Slika 6.18. Uzorci nakon obrade odvajanjem čestica .....	48
Slika 6.19. Uzorak prije brušenja .....	49
Slika 6.20. Postupak brušenja .....	49
Slika 6.21. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće zavarenog spoja [39] .....	54
Slika 6.22. Postupak ispitivanja tvrdoće uzoraka .....	55
Slika 6.23. Postupak ispitivanja razaranjem .....	57
Slika 6.24. Prikaz ispitivanja na računalu .....	58



---

Slika 6.25. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 1 .....	59
Slika 6.26. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 2 .....	59
Slika 6.27. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 3 .....	60
Slika 6.28. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 4 .....	60
Slika 6.29. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 5 .....	61
Slika 6.30. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 6 .....	61
Slika 6.31. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 7 .....	62
Slika 6.32. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 8 .....	62
Slika 6.33. Prikaz uzorka 8 nakon tlačnog ispitivanja razaranjem.....	63
Slika 7.1. Naljepljivanje zavara na uzorku 8.....	64
Slika 7.2. Pogreška zavarenog spoja 3 .....	65
Slika 7.3. Srednja vrijednost ispitane tvrdoće uzoraka .....	65
Slika 7.4. Grafički prikaz maksimalnih sila nastalih tijekom lomljenja zavarenog spoja .....	66

**POPIS TABLICA**

Tablica 6.1 Maseni udio elemenata u ispitivanim uzorcima .....	37
Tablica 6.2 Parametri zavarivanja uzoraka .....	45
Tablica 6.3. Uzorci prije i poslije nagrizanja .....	50
Tablica 6.4. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV5 .....	55
Tablica 6.5. Srednje vrijednosti tvrdoće.....	56
Tablica 6.6. Prikaz sila ispitivanja .....	58

**POPIS KRATICA I OZNAKA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis oznake</b>	<b>Mjerna jedinica</b>
TIG	Tungsten inert gas	
MIG	Metal inert gas	
MAG	Metal active gas	
XRF	X-ray fluorescence	
NDT	Non-destructive testing	
HV	Hardness Vickers	
DT	Destructive testing	
<i>F</i>	Sila	N
<i>I</i>	Jakost struje	A
DC	Direct current	
AC	Alternating current	
$\Delta l$	produljenje	mm

## SAŽETAK

Zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava titanij se danas sve više koristi u zrakoplovnoj i svemirskoj tehnici. Zavarivanje titanija i titanijevih legura je vrlo osjetljiv postupak te zahtjeva točno određene uvjete.

Diplomski rad *Određivanje svojstava zavarenog spoja titanijeve legure* bavi se ispitivanjem mehaničkih svojstava zavarenih spojeva titanija. Rad se sastoji od teorijskog dijela i eksperimentalnog dijela.

Teorijski dio bavi se opisom metala titanija, procesa zavarivanja i metodama ispitivanja zavarenih spojeva.

U eksperimentalnome dijelu prikazani su procesi pripreme, zavarivanja, naknadne obrade te ispitivanje uzoraka.

Analizom rezultata ispitivanja dovode do zaključaka o pripremi i parametrima prilikom zavarivanja titanijeve legure.

Ključne riječi: titanij, zavarivanje, TIG, mehanička ispitivanja, materijali

## SUMMARY

Due to its good mechanical properties, titanium is increasingly used in aerospace and space technology today. Welding of titanium and titanium alloys is a very delicate procedure and requires exact conditions.

Graduate thesis *The determination of the properties of welded titanium alloy* involves the examination of the mechanical properties of welded titanium compounds. The work consists of a research part and an experimental part.

The theoretical part deals with the description of titanium metal, welding processes and welding test methods.

In the experimental section, the processes of preparation, welding, subsequent processing and sample testing are presented.

The test results lead to conclusions on the preparation and parameters for welding titanium alloys.

Key words: titanium, welding, TIG, mechanical properties, materials

## 1. UVOD

Titanijski je lagan i snažan metal, otporan na koroziju. U elementarnom stanju je crn ili siv metalni prah ili masivan metal sličan čeliku, obično zbog onečišćenja krhak, u čistom stanju rastezljiv. Pojavljuje se u mnogim mineralima, od koji su dva najznačajnija izvora rutil i ilmenit, koji su široko rasprostranjeni u Zemljinoj kori. Jedna od najznačajnijih titanijskih karakteristika je da ima čvrstoću kao čelik, no u isto vrijeme je dvostruko lakši od njega. Po svojstvima je najbliži cirkoniju. Ime je dobio po titanima iz grčke mitologije.

Od titanijskih legura se izrađuju lopatice kompresora, mlaznice, glavine, kućišta motora i dr., ali i visokooterećeni dijelovi drugih letjelica primjerice helikoptera. Upotrebljavaju se za dijelove motora i elemente konstrukcija izložene povišenim eksploatacijskim temperaturama do maksimalno 550 °C.

Materijali na bazi titanija teško su obradljivi odvajanjem čestica, jer su vrlo žilavi, a javlja se i opasnost od zapaljenja strugotine. Zbog kristalne se građe ograničeno mogu hladno oblikovati, a bolje se mogu toplo oblikovati. Sve vrste legura su dobro zavarljive u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumu. Proizvodni troškovi i naročito troškovi prerade danas su još uvijek vrlo visoki, što u velikoj mjeri određuje primjenu. Prilikom zavarivanja titanija postoji mogućnost nastajanja pogreške koje se odlikuju na sama svojstva spojeva. Materijali se odlikuju raznovrsnim fizikalno-kemijskim svojstvima, od gustoće, tališta, kemijske postojanosti otpornosti na koroziju, otpornosti na trošenje, električne i toplinske vodljivosti, magnetske permeabilnosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinskog rastezanja sve do prozirnosti ili boje. Ovisno o svojim fizikalno-kemijskim svojstvima materijali posjeduju i raznovrsna tehnološka svojstva, koja daju uvid u njihovo ponašanje pri raznim postupcima obrade i spajanja, poput lijevkosti, kovkosti, rezljivosti, zakaljivosti, zavarljivosti ili lemljivosti. Mehaničko ponašanje materijala, kao i mnoga tehnološka svojstva, u prvom su redu određeni mehaničkim svojstvima materijala. Jedno od njih je i već spomenuta gustoća, definirana kao omjer mase i obujma ili kao masa jediničnog obujma materijala.[1]

Otpornost materijala općenito se može definirati kao skupina zahtjeva koji se postavljaju na materijal s gledišta eksploatacijskih karakteristika proizvoda. Pored otpornosti materijala tu su još i neki drugi zahtjevi[1]:

- funkcionalnost
- pouzdanost
- trajnost i sl.

Pod otpornošću materijala podrazumijeva se otpornost mehaničkom opterećenju ili mehanička otpornost, otpornost vanjskim utjecajima (otpornost koroziji, visokoj ili niskoj temperaturi), te otpornost trošenju ili tribološka otpornost. Ovakvu podijelu ne treba uzimati strogo budući da se sve tri vrste otpornosti u većoj ili manjoj mjeri prekrivaju.[1]

Mehanička otpornost materijala određena je njegovim mehaničkim svojstvima. Mehanička svojstva zauzimaju istaknuto mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima jer se temeljem njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i elementi konstrukcija. Prilikom dimenzioniranja potrebno je sagledati intenzitet, način te trajanje svih mogućih mehaničkih opterećenja koja će se pojaviti tijekom eksploatacije. Stoga se strojni dijelovi odnosno dijelovi konstrukcija dimenzioniraju na osnovu onih mehaničkih svojstava koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala za određene eksploatacijske uvjete. Osnovni je cilj da se tijekom eksploatacije ne pojavi lom odnosno plastična ili trajna deformacija što bi funkcionalno onemogućilo rad strojnog dijela ili čitave konstrukcije.[1]

Mehanička svojstva materijala, kao i sva ostala svojstva, posljedica su strukturnog stanja materijala. Strukturno stanje nekog materijala dobiva se obradom materijala određenog (kemijskog) sastava određenim tehnološkim postupkom. Tako se izborom materijala i odgovarajućeg tehnološkog postupka postiže ciljano (mikro)strukturno stanje koje će dati željena (mehanička) svojstva. Poznavanjem korelacije mikrostruktura – mehanička svojstva moguće je unaprijed proračunati mehanička svojstva koristeći određene (mikro)strukturne parametre. [1]

Potreba za mehaničkim ispitivanjima zavarenih spojeva u potrebi za dobivanjem parametara i prihvatljivosti spojeva. Te samim time osiguravanjem kvalitete konstrukcija.

## 2. TITANIJ (Ti)

Titanijski (Ti) je mekan srebrno sivi metal s točkom taljenja pri temperaturi od 1 675 ° C. U većini prirodnih atmosfera formira površinski film oksida koji je kemijski relativno inertan, te samim time ima veliku otpornost na koroziju. Titanijski je vrlo lagan materijal s gustoćom od 4,51 grama po kubičnom centimetru. Titanijska niža gustoća i temperaturna postojanost na povišene temperature omogućuju njegovu široku primjenu u raznim granama industrije. [2]

Titanijski atomski promjer sličan je mnogim metalima poput aluminija, željeza, kositra i vanadija. Titanijski se lako legira te se time poboljšavaju njegova svojstva. Titanijski možemo naći u dvije kristalne strukture pri određenim temperaturama: heksagonalno kristalna struktura (HCP) ispod 883 ° C i kubično centrirano (BCC) na temperaturama višim od svoje točke taljenja. Alotropnost i sposobnost leguriranja s mnogim elementima rezultira mnogim titanijskim legurama s širokim rasponom mehaničkih i anti-korozivskih svojstava. [2]



Slika 2.1. Titanijski [3]

### 2.1. Povijest titanijskog

Svećenik William Gregor u Engleskoj 1791. godine prvi put otkriva titanijsku rudu. Stvarna identifikacija rudače napravljena je nekoliko godina kasnije od strane njemačkog kemičara M.H. Klaproth. Klaproth je metalnim sastojkom rudače nazvao titanijski, po divovima iz grčke mitologije. [4]

Čisti metalni titanijski prvi put je proizveden 1906. od strane M.A. Hunter na Polytechnic Institutu Rensselaer (Troy, New York, SAD) u suradnji s General Electric Company. Vjerovali su da je titanijski imao točku taljenja od 6000 ° C i stoga je bio kandidat za žarulje sa žarnom niti. Ali



kada je Hunter proizveo metal s točkom taljenja bliže 1800 ° C pokazalo se da metal ima veliku duktilnost. Njegova metoda za proizvodnju reakcijom titanijevog tetraklorida ( $\text{TiCl}_4$ ) s natrijem, pod vakuumom kasnije je komercijalizirana te sada se naziva Hunterov proces.[4]

William J. Kroll iz Luksemburga 1932. godine proizveo je znatne količine duktilnog titanija, kombinacijom  $\text{TiCl}_4$  s kalcijem. Kroll je 1938. godine proizveo 20 kilograma titanija i bio uvjeren da posjeduje izvrsna anti-korozivna svojstva i visoku čvrstoću. Početkom Drugog svjetskog rata Kroll razvija moderniji postupak proizvodnje titanija promjenom redukcijskog sredstva iz kalcija u magnezij. Promjenom redukcijskog sredstva započinje masovna proizvodnja titanija što Krollu dodjeljuje naziv oca moderne industrije titanija. [4]

Studija američkog ratnog zrakoplovstva koja je provedena 1946. godine dolazi do zaključka da su legure na bazi titanija potencijalno velike važnosti u budućoj proizvodnji. Budući da se javlja potreba za većim omjerima čvrstoće i težine u strukturama i motorima mlaznog zrakoplova koje nije moguće učinkovito zadovoljiti čelikom ili aluminijem. [5]

Ministarstvo obrane SAD - a 1950. godine pružilo je poticaje za pokretanje titanijeve industrije. Slični razvoji industrije se javljaju u Japanu i Ujedinjenom Kraljevstvu. Nakon što je zrakoplovna industrija osigurala poticaj primjene titanija, omogućuje se daljnja primjena u ostalim industrijama poput kemijskih, farmaceutskih, energetskih i otpadnih.[4]

## 2.2. Titanijeva rudača

Titanij je četvrti strukturni metal po rasprostranjenosti na Zemlji, prije njega su samo aluminij, željezo i magnezij. Mineralne rudnike titanija moguće je pronaći u cijelome svijetu od kojih su najveća nalazišta u Australiji, Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi, Južnoj Africi, Sierra Leoneu, Ukrajini, Rusiji, Norveškoj, Maleziji i nekoliko drugih zemalja. [6]

Tri glavna minerala za proizvodnju titanija su rutil, ilmenit i leukoksin. Rutil čini oko 95 % titanijevog dioksida ( $\text{TiO}_2$ ) dok ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ) (slika 2.2) sadrži 50 do 65 % titanij dioksida ( $\text{TiO}_2$ ). Leukoksin je promjena ilmenita iz kojeg je dio željeza prirodno ispran te nema specifičan sadržaj titanija. Titanijevi minerali se javljaju u aluvijalnim i vulkanskim oblicima. Depoziti obično sadrže između 3 do 12 % teških minerala, koji se sastoje od ilmenita, rutila, leucoksena, cirkona i monazita.[4]

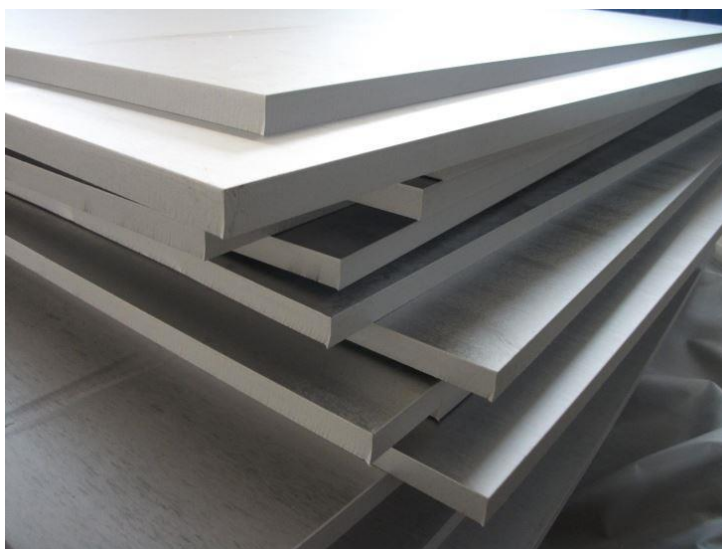
Tipično rudarstvo je otvoreno. Usisna crpka pomoću plutajućeg bagera opskrbljuje pijesak bogatim mineralima na skup filtera koji uklanjaju neželjene materijale. Minerali se zatim odvajaju od otpadnog materijala, gravitacijskim postupkom u mokrom spiralnom koncentratoru. Rezultirajući koncentri se razdvajaju prolazeći kroz složenu seriju elektrostatičke, magnetske i gravitacijske opreme. [6]



Slika 2.2. Rudača ilmenita [7]

### 2.3. Dobivanje titanija

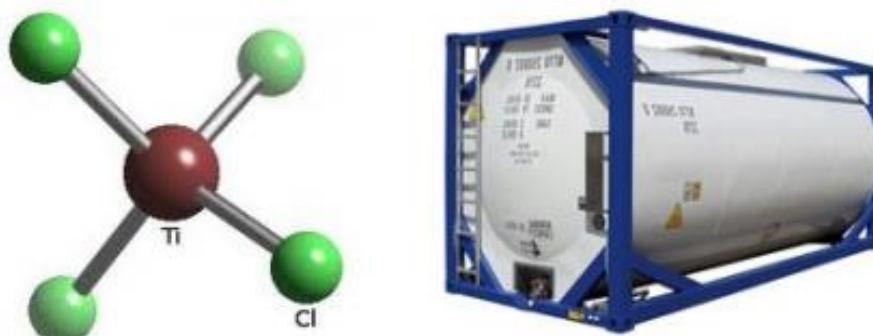
Proizvodnja metala titanija čini 5 posto godišnje mineralne titanijeve potrošnje dok se ostatak troši na industriju titaniji pigmentata. Pigmenti se proizvode pomoću procesa sulfata ili procesa karbo-kloriranja koji pretvara titandioksid u titanijev tetraklorid ( $\text{TiCl}_4$ ) te je ekološki prihvatljiviji. Slika 2.3. prikazuje titaniji u obliku ploča.[8]



Slika 2.3. Titanijeve ploče [9]

### 2.3.1. Titanijev tetraklorid

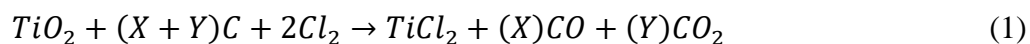
Prilikom proizvodnje titanijeve rudače dobija se titanijev tetraklorid ( $\text{TiCl}_4$ ) koji je potreban za proizvodnju titanijevog metala. Ekološkim ograničenjima kontrolira se proizvodnja karbo-kloridiranja koji sadrži 90% titanij dioksida radi onečišćenja koje može prouzročiti. [4]



Slika 2.4. Titanijev tetraklorid i uređaj za proizvodnju [10]

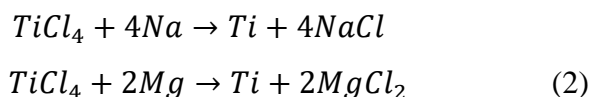
Prirodni rutil je jedini koji ispunjava ovaj zahtjev dok se ilmenit može nadograditi kombinacijom pirometalurških i hidrometalurških tehnika za proizvodnju sintetičkog rutila od 90 do 93 % titanijevog dioksida. Titanofornu magnetitnu rudaču moguće je razoriti kako bi se proizvelo sirovo željezo i troske bogate titanom. Rutil, leucoksen, sintetički rutil i troska mogu se zatim miješati kako bi se omogućilo lijevanje više od 90 % titanijevog dioksida za

proces kloriranja. U prvom koraku ovog postupka, oksidne rude reagiraju s klorom u fluidiziranom sloju naftnog koksa. Kisik se kombinira s ugljikom (C) u koksu kako bi se proizveo ugljični monoksid (CO) i ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), dok titanij i klor reagiraju te tvore plinoviti TiCl<sub>4</sub>, kao u sljedećoj reakciji (1) [4]:



### 2.3.2. Titanijeva spužva

U proizvodnji titanijskih pigmenata TiCl<sub>4</sub> moguće je reoksidirati na TiO<sub>2</sub>, ali se u proizvodnji titanijevog metala reducira natrij (Na) kroz Hunter proces ili magnezijem (Mg) u Krollovom procesu (2) [11]:



Ove se reakcije odvijaju u velikim, zatvorenim čeličnim posudama na približno 800 do 1000 °C u inertnoj atmosferi argona kako bi se izbjegla kontaminacija gotovog proizvoda zrakom ili vlagom. Oba procesa proizvode titanij u obliku visoko poroznog materijala nazvanog spužva, sa solima NaCl ili MgCl<sub>2</sub> zarobljenim u porama. [4]



Slika 2.5. Titanijeva spužva[12]

Spužva se slomi, a metal i soli se odvajaju ili s razrijeđenom kiselim otopinom ili s visoko temperaturnom vakuumskom destilacijom. Soli se recikliraju elektrolitskim ćelijama kako bi se dobilo natrij ili magnezij za ponovnu upotrebu u redukciji metala i klora.[4]

Drugi proces koji nudi nadu za poboljšanom i pojednostavljenom metodom proizvodnje titanijevog metala je izravno elektroliziranje titanija iz  $TiCl_4$  u kloridno-solnim kupkama. U tom slučaju, titanijska spužva se skuplja na čeličnoj katodi, a klorni plin se ispušta na ugljičnoj anodi. Potrebna uporaba u ovom postupku soli s visokim talištem, zajedno s potrebom za održavanje inertnog okoliša, predstavljaju glavne tehničke i ekonomske prepreke koje treba prevladati kako bi se postigao komercijalni status.[4]

### 2.3.3. *Titanijev ingot*

Pretvorba pročišćene titanijske spužve u oblik pogodan za strukturne svrhe uključuje nekoliko koraka. Konsolidacija titanijevog ingota vrši se u vakuumskom ili argonskom okolišu pomoću procesa taljenja kalcijevih elektroda. Spužva, legirajući elementi, a u nekim slučajevima reciklirani otpad prvo su mehanički zbijeni a zatim zavareni u dugu, cilindričnu elektrodu. Elektroda se rastopi okomito u vodeno hlađenom bakrenom loncu kroz koji prolazi električna struja. Kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela elemenata u legurama, ovaj se osnovni ingot prerađuje najmanje još jednom na sličan način. Ingoti proizvedeni ovim procesom teže između 4 i 10 tona te imaju do 1050 milimetara promjera. [4]

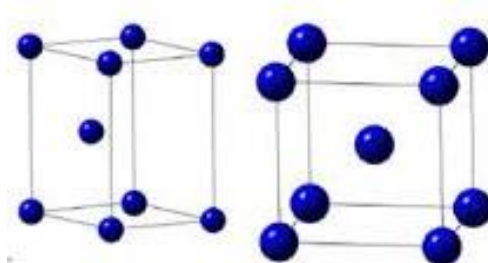
Topljenje taloga u hladnjaku je alternativni proces konsolidacije koji se provodi unutar argonske ili vakuumske komore koja sadrži vodeno hlađeno vodonepropusni bakreni lonac. Grijanje se postiže višestrukim elektronskim snopom ili plamenicima argon/helijske plazme. Rastaljeni metal teče vodoravno preko ruba lonca u prikladno oblikovan, vodom hlađeni bakreni kalup. Procesom hladnog taljenja moguće je dobiti visoku odvojenost od onečišćenih dijelova visoke gustoće, koji se talože na dnu. Zbog toga se prvenstveno koristi za recikliranje titanskih otpadaka, koji mogu sadržavati nečistoće koje su preostale od proizvodnje. Konsolidirani ingoti se prerađuju u proizvode, kao što su šipke, žice, cijevi, ploče i folije. Primjer titanijevog ingota prikazan je na slici 2.6.[4]



Slika 2.6. Titanijev ingot [13]

#### 2.4. Alfa i beta faze titanija

Atomi čistog titanija poravnavaju se u krutom stanju u bilo kojoj heksagonalnoj, zatvorenoj kristalnoj strukturi, nazvanoj alfa faza ( $\alpha$ ) ili kubičnu strukturu, nazvanu beta ( $\beta$ ) fazom. U čistom metalu, transformacija od alfa do beta faze nastaje nakon zagrijavanja iznad  $883\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ali većina legirajućih elemenata ili stabilizira alfa fazu do viših temperatura ili stabilizira beta fazu na niže temperature. Aluminij (Al) i kisik su tipični alfa-stabilizirajući elementi, a tipični beta stabilizirajući elementi su vanadij (V), željezo (Fe), molibden (Mo), nikal (Ni), paladij (Pd), niobi (Nb) silicij (Si) i krom (Cr). Nekoliko drugih elemenata za legiranje, kao što su kositar (Sn) i cikonij (Zr), imaju mali utjecaja na faznu stabilizaciju. Najvažniji element slitine je aluminij, koji se u legiranju može dodati kao pojačivač bez oštećenja duktilnosti. [14]



Slika 2.7. Kristalne strukture titanija [15]

Najniža temperatura na kojoj 100-posto beta faza može postojati naziva se beta transus; to može biti od  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ovisno o sastavu legure. Završna mehanička obrada i toplinska

obrada titanijskih legura obično se provode ispod temperature beta transusa kako bi se postigla pravilna distribucija mikrostrukturne faze i veličina zrna. [14]

Koristeći zajedničke faze prisutne na sobnoj temperaturi, titanijske legure su podijeljene u četiri klase: komercijalno čiste, alfa, alfa-beta i beta. Svaka klasa ima prepoznatljive osobine. Čisti titanij, premda vrlo duktilna, ima nisku tvrdoću i stoga se koristi kada tvrdoća nije najbitnije svojstvo a poželjna je korozijska otpornost. [14]

Alfa legure su zavarljive i imaju dobra svojstva pri povišenim temperaturama. Alfa-beta legure su široko korištene zbog dobrih kombinacija čvrstoće, otpornosti i formabilnosti. Beta legure su korisne pri čemu su potrebne vrlo visoke čvrstoće na vlak. Postoje tri važna tržišta za metalni titanij: zrakoplovni, automobilska industrija i industrija za izradu legura. Zrakoplovna i industrijska tržišta koriste čiste proizvode, dok tržište aditiva na leguranje troši manje vrijedne titanijske proizvode kao što su otpad i spužva. Male dodatke titanija (manje od 1%) dodaju se drugim metalima kao što su nikel, aluminij i željezo kako bi se poboljšala formabilnost i mehanička svojstva.[14]

## 2.5. Legure titanija

Legure titanija su metalni materijali koji sadrže titanij pomiješan s drugim metalima u manjoj količini, a najčešće su to: paladij (Pd), vanadij (V), aluminij (Al) (slika 2.8.) , kositar (Sn), nikel (Ni), molibden (Mo) i željezo (Fe). Legiranjem se poboljšavaju svojstva čistog titanija, čineći ga još otpornijim na koroziju, lakšim za kovanje i obradu, stabilnijim i otpornijim na visoke temperature. Odlična korozijska otpornost postojana je u različitim agresivnim medijima zahvaljujući vrlo stabilnoj oksidnoj prevlaci koja se formira na površini materijala. Ukoliko dođe do oštećenja oksidnog sloja, on se iznova obnavlja. Karakteristika titanijskih materijala reverzibilna je transformacija kristalne strukture iz  $\alpha$ -faze (heksagonska prostorna rešetka) u  $\beta$ -fazu (kubično centrirana prostorna rešetka), kada se prekorače određene temperaturne granice. Alotropna modifikacija koja ovisi o sadržaju i tipu legiranih elemenata, omogućava kompleksne varijacije u mikrostrukтури i raznolike mogućnosti ojačavanja. [16]

Legure titanija dijele se prema mikrostrukтури koja je stabilna na sobnoj temperaturi. Postoje  $\alpha$ -,  $\beta$ -, i ( $\alpha+\beta$ )-legure. Stabilizatori (legirni elementi)  $\alpha$ -faze su: ugljik, kisik, dušik, aluminij i kositar. Aluminij djeluje tako što pomiče prekrystalizaciju prema višim temperaturama i stabilizira  $\alpha$ -fazu.  $\beta$ -stabilizatori su: krom, nikel, molibden, željezo, tantal i vanadij te oni

snižavaju temperaturu prekrystalizacije prema nižim temperaturama i stabiliziraju  $\beta$ -fazu. Dvofazne ( $\alpha+\beta$ )-legure predstavljaju kompromis između monofaznih  $\alpha$ - i  $\beta$ -legura. Glavna obilježja  $\alpha$ -legura su: zavarljivost, žilavost, čvrstoća i stabilnost pri povišenim temperaturama. Sadrže aluminij, kositar i cirkonij te se preferiraju za upotrebu na višim temperaturama od 375 °C do 550 °C. Manje su osjetljive na djelovanje kisika, ugljika i dušika koji uzrokuju krhkost. Otpornost na koroziju i oksidaciju jednaka im je kao i  $\beta$ -i ( $\alpha+\beta$ )- legurama. Najčešća  $\alpha$ -legura je TiAl5Sn2,5 koja se koristi u kovanom ili lijevanom stanju, uglavnom za dijelove zrakoplova i svemirskih letjelica. Sposobnost hladnog oblikovanja deformiranjem glavna je prednost  $\beta$ -legura. Za razliku od  $\alpha$ -legura,  $\beta$ -legure mogu postići visoku čvrstoću toplinskom obradom, osobito u hladno očvrnutom stanju. Imaju veliku duktilnost, visoki omjer čvrstoća/gustoća na sobnoj temperaturi te su zavarljive. Dodatakom kroma i vanadija, teških metala velike gustoće, povećava se gustoća  $\beta$ -legure i postaje stabilnija na sobnoj temperaturi. ( $\alpha+\beta$ )-legure predstavljaju glavni dio proizvodnje titanijevih legura. Mikrostruktura tih legura toplinskom se obradom može mijenjati tako da se ostvare željena svojstva. Najvažnija ( $\alpha+\beta$ )-legura je TiAl16V4 i koristi se u jednakoj količini kao svi ostali titanijski materijali. [16]



**Slika 2.8. Ti-Al legura [17]**



## 2.6. Primjena titanija

### 2.6.1. Avionska industrija

Avionska industrija je najvažnije područje primjene titanija i njegovih legura koje se koriste u komercijalnim i vojnim zrakoplovima. Plinske turbine čine gotovo polovicu godišnje proizvodnje titanija. Titanijske legure se uglavnom koriste u ventilatorskim i kompresorskim sekcijama na temperaturama koje sežu do  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tipični dijelovi uključuju vrata, kompresorske lopatice, diskove i čvorišta, kao i razmaknice i brtve. [18]



**Slika 2.9. Ratni zrakoplov izrađen od titanija zbog smanjenja mase [19]**

Titanijske legure također se koriste u zračnim lukama zbog velikih omjera čvrstoće i težine, otpornosti na trošenje te otpornosti na koroziju. Sadržaj titanija u zrakoplovima može se kretati od 2 - 30 %. Komercijalni zrakoplovi sadrže 4 do 8 % titanija, dok vojni zrakoplovi sadrže veće količine (slika 2.9). Najčešća primjena titanija je na dijelovima za pričvršćivanje, podupiračima za slijetanje, oprugama, sigurnosnim trakama i brojnim unutarnjim dijelovima krila. [18]



materijal za medicinske proteze kao što je umjetni kuk, zbog svoje velike čvrstoće i otpornosti na tjelesne tekućine. Još jača legura Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr ima odličnu otpornost na

kiselinski plin visoke temperature, prirodni plin koji sadrži vodikov sulfid, te se stoga koristi za instrumente pri radu s kemikalijama.[4]

Titanij je poboljšao nekolicinu industrijskih procesa. Početkom uporabe titanija za proizvodnju papira omogućilo je proširenje proizvodne i izrade strojeva do 35 tona. Tipični dijelovi napravljeni od titanija uključuju difuzore, središnje osovine, strugala, pumpe, izmjenjivače topline, kutije za pakiranje i ventile. Početkom 1960-ih otkriveno je da je titaniji s premazom metalne skupine od platina ili metalnim oksidom proizveo anodu (negativno nabijenu elektrodu) koja je polako korodirala u elektrolitskim otopinama. Prevučene anode titanija ubrzo su zamijenile anode grafita u industriji klora, što rezultira nižim troškovima i proizvodima veće čistoće. Proširenja ove tehnologije sada se primjenjuje na elektrogalvanizaciju i proizvodnju premaza. Slika 2.11. prikazuje uporabu titanija u kemijskoj industriji.[4]



**Slika 2.11. Titanijev izmjenjivač topline [21]**

Kemijsko-procesne industrije koriste titanijeve izmjenjivače topline (slika 2.11.) kako bi se otklonili problemi korozije uzrokovani rashladnim vodama koje sadrže klorid i sulfid, a nekoliko dobitaka može se pripisati korištenju titanija na procesnoj strani izmjenjivača topline. Budući da je metal otporan na erozijsku koroziju, titanijeve posude mogu se podvrgnuti

procesnim tekućinama koje teku velikom brzinom. Također, titanij je jedini metal za koji se zna da je potpuno otporan na sve oblike biološke korozije. Ove prednosti, zajedno s smanjenom težinom, čine metal poželjnim za izmjenjivače topline na brodovima i naftnim platformama na moru. Primjena titanija vidljiva je velikom broju predmeta poput okvira za naočale, satova, sportske opreme, nakita, visokokvalitetnih dijelova u automobilske industriji te krovova. Ostale moguće primjene uključuju ventile, uređaje za pražnjenje za odsumporavanje dimnih plinova na naftnim platformama, te spremnike za skladištenje i transport nuklearnog otpada.[4]

### 3. ZAVARIVANJE

Zavaravanje je spajanje ili prevlačenje osnovnog materijala primjenom topline, pritiska ili kombinacijom, uz dodatni materijal ili bez njega.[21]

Zona spoja za vrijeme zavarivanja dovedena je u tekuće ili plastično stanje. Svojstva spoja ovise o vrsti osnovnog i dodatnog materijala, te o samome postupku zavarivanja.

Različiti izvori energije se mogu koristiti za zavarivanje, tako imamo mlaz vrućih plinova (plinski plamen ili mlaz plazme), električni luk, tok nabijenih čestica (mlaz elektrona ili iona u vakuumu), tokovi zračenja (laser), električna struja (elektrootporno zavarivanje), trenje, ultrazvuk i sl. Zavarivanje se može obavljati u radionici, na otvorenom prostoru, u vodi ili u svemiru.[23]

Prilikom samoga zavarivanja potrebno je razmatrati značajke postupaka spajanja, te da li zadovoljavaju sve značajke potrebne da bi spoj bio uspješno izrađen.

Značajke su:

- funkcija
- oblikovanje, projektiranje
- sigurnost, ergonomija
- izvođenje, montaža i kontrola
- upotreba
- održavanje
- troškovi.

#### 3.1. Vrste zavarivanja

Uobičajena osnovna podjela postupaka zavarivanja je na postupke zavarivanja uz djelovanje pritiska i postupke zavarivanja taljenjem. Zavarivanje uz djelovanje pritiska je spajanje metalnih dijelova pritiskom, bez ili uz lokalno ograničeno zagrijavanje, uglavnom bez korištenja dodatnog materijala. Zavarivanje taljenjem je spajanje metalnih dijelova u rastaljenom stanju na mjestu spajanja, s korištenjem ili bez dodatnog materijala, bez djelovanja pritiska ili udarca.[23]

### **3.1.1. Postupci zavarivanja taljenjem**

U postupke zavarivanja taljenjem spadaju [23]:

- ljevačko zavarivanje
- zavarivanje plinskim plamenom ili plinsko zavarivanje
- zavarivanje pod troskom
- Zavarivanje električnim lukom ili elektrolučno zavarivanje, ručno elektrolučno zavarivanje
- zavarivanje MIG postupkom
- zavarivanje MAG postupkom
- zavarivanje pod praškom
- zavarivanje TIG postupkom
- zavarivanje s obloženim elektrodama
- magnetsko zavarivanje ili zavarivanje magnetski pokretanim električnim lukom
- zavarivanje plazma lukom ili zavarivanje plazmom
- zavarivanje elektronskim snopom
- zavarivanje laserskim snopom
- ultrazvučno zavarivanje
- zavarivanje snopom svjetlosnog zračenja i drugo.

### **3.1.2. Postupci zavarivanje pritiskom**

Zavarivanje pritiskom je spajanje metalnih dijelova pritiskom, bez ili uz lokalno ograničeno zagrijavanje, uglavnom bez korištenja dodatnog materijala. [23]

U tu grupu spadaju:

- kovačko zavarivanje
- elektrootporno zavarivanje
- točkasto elektrootporno zavarivanje
- bradavičasto elektrootporno zavarivanje
- šavno elektrootporno zavarivanje
- sučeljeno vodootporno zavarivanje

- elektrootporno zavarivanje ogorijevanjem ili iskrenjem
- elektroindukcijsko zavarivanje
- eksplozijsko zavarivanje
- difuzijsko zavarivanje
- zavarivanje trenjem
- hladno zavarivanje pritiskom.

### 3.1.3. *TIG zavarivanje*

Većina oblika električnog zavarivanja koristi se činjenicom da kratki spoj i zatim odvajanje vodiča povezanih s pozitivnim i negativnim polovima izvora električnog strujanja stvara luk, a time i područje koncentrirane topline. Ako se ovaj luk pojavi u zraku, metali koji se zavaruju mogu se oksidirati, a u određenoj mjeri isparavati nekontroliranom intenzivnom toplinom. Ovaj neželjeni učinak može se smanjiti upotrebom protoka ili, u slučaju TIG-a, inertnog plinskog štitnika. Izvor napajanja kontrolira kratki spoj, usmjerava luk i dopušta rastaljenom metalu ravnomjerno strujanje bez oksidacije.[24]

TIG zavarivanje je čisto, troškovno učinkovito, premda je sam proces malo sporiji u usporedbi s MIG i MAG zavarivanjem, može se koristiti ručno ili automatizirano te je moguće njime zavariti širok spektar metala i debljina u nekoliko različitih programa. Bez obzira na način kojim se koristi, postupak ostaje isti. Električni luk pri zavarivanju TIG-om je lokaliziran i visoke temperature, te samim time osigurava lokaliziranje maksimalne količine energije u malom prostoru. Ovo omogućava iskusnom zavarivaču da proizvede uredne i kompaktne zavare s izvrsnom penetracijom i snagom. Na slici 3.1. prikazan je postupak zavarivanja TIG uređajem.[24]



Slika 3.1. TIG postupak zavarivanja [25]

Proces je poznat po raznim imenima poput:

TIG – tungsten inert gas, najpoznatiji naziv u Europi, ali općenito razumljiv širom svijeta

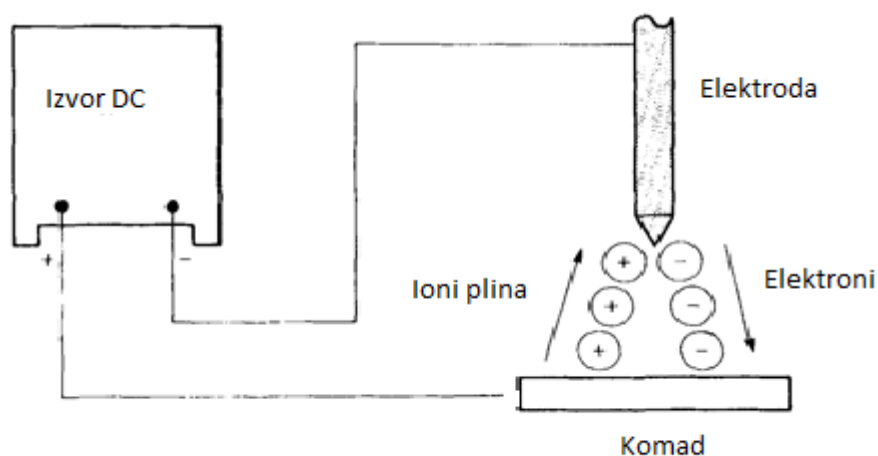
CTAW - Zavarivanje plinom od tungstena, uglavnom u SAD-u

WIG - Wolfram (tungsten) inertni plin, njemačka definicija.

Prilikom uporabe TIG-a moguće je koristiti različiti modele zavarivanja koji ovise o struji i nabojima korištenim prilikom rada. [24]

Modeli su:

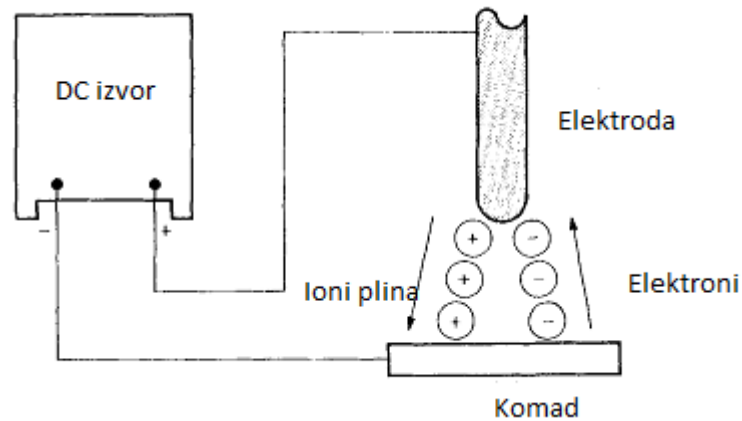
- DC direktnog polariteta (prikazan na slici 3.2.) kod kojega je elektroda negativno nabijena, dok je radni komad pozitivno nabijen.



Slika 3.2. DC direktnog polariteta [24]

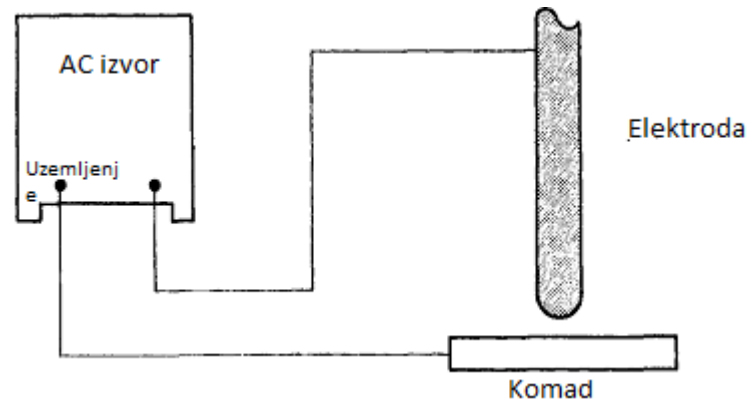


- DC obrnutog polariteta (prikazan na slici 3.3.) kod kojega je elektroda pozitivno nabijena, dok je radni komad negativno nabijen.



Slika 3.3. DC obrnutog polariteta [24]

- Pulsirajući DC (prikazan na slici 3.4.) je model zavarivanja pri kojemu luk pulsira pri različitim frekvencijama, te samim time omogućava bolju kontrolu unosa topline.



Slika 3.4. Pulsirajući DC [24]

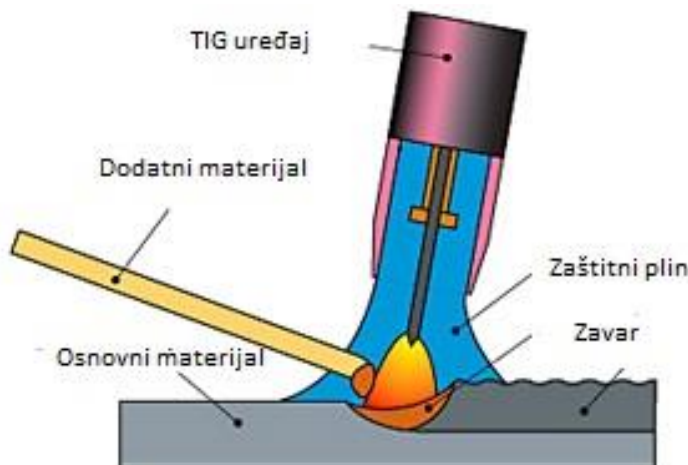
## Zaštitni plinovi

Zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu koja omogućava što bolju ionizaciju, te zaštitu vrha elektrode i taline od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. U svrhu zaštite se koriste inertni plinovi kao što su argon (Ar) ili heliji (He). [21]

Dostupna je široka paleta inertnih plinova i mješavina plinova, bilo u tlačnim cilindrima ili kao tekućine sadržane u posebnim izoliranim spremnicima. Ako se koriste velike količine plina,

skupni spremnik je najučinkovitija metoda, ali, naravno, takvi spremnici služe za statičku montažu i nisu prijenosni.[21]

Ovi tekući plinovi se održavaju na vrlo niskim temperaturama, u slučaju argona na  $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Slika 3.5. prikazuje uporabu zaštitnog plina pri zavarivanju.



Slika 3.5. Uporaba zaštitnog plina [26]

## Argon

Argon je najčešći i ekonomičniji plin koji se koristi u TIG zavarivanju i dobiva se kao nusprodukt prilikom proizvodnje kisika; argon je prisutan u zraku na oko 0,9%. Prednosti argona su njegov mali ionizacijski potencijal i toplinska vodljivost. Također oko 1,5 puta je gušći od zraka, te samim time održava dobru pokrivenost pokrova na lica zavora (dulje od helija). Ionizacijski potencijal argona je oko 15,5 volti elektrona. Ostatak plina za zaštitu oko luka isključuje aktivne komponente okolnog zraka i sprječava, ili barem minimizira, metalnu oksidaciju.[24]

## Helij

Helij je idealan zaštitni plin, ali je skuplji u Velikoj Britaniji i Europi te stoga nije široko rasprostranjen u primjeni. Njegov ionizirajući potencijal iznosi 24,5 volti elektrona, s izvrsnom toplinskom vodljivošću i daje dublji prodor nego argon. [24]

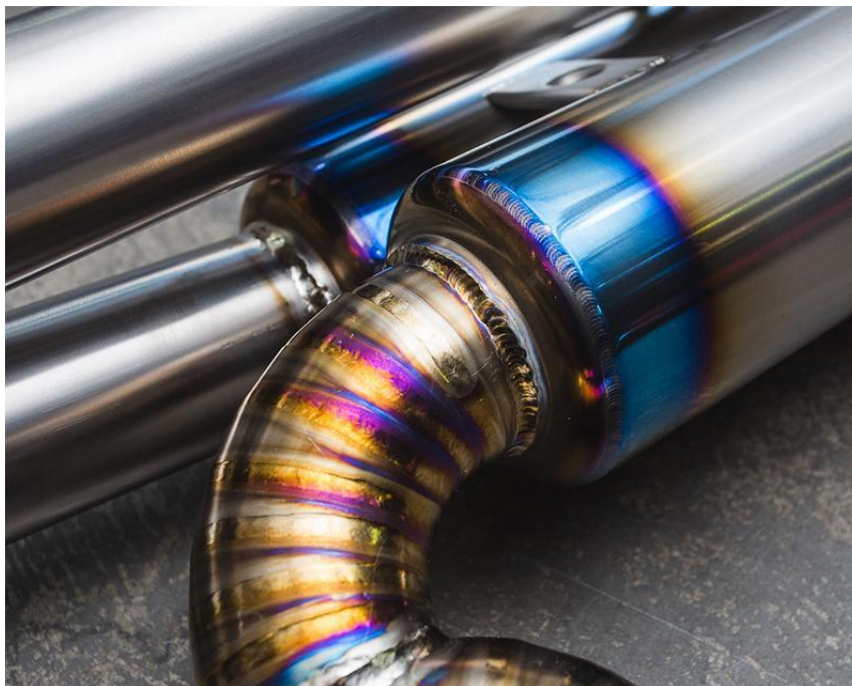
S jednakom duljinom luka, helij ima viši napon od argona. Odnos (pojačala X volti X vrijeme = joula) pokazuje da povećanje napona znatno povećava ulaz topline na zavarivanje, tako da helij ili smjese argona i helija postižu smanjenu poroznost kada zavaruju guste metale ili koriste velike brzine kretanja.

Međutim, duljine luka moraju se držati vrlo blizu tolerancije pri korištenju helija i to znači da je prikladnije za strojno zavarivanje, rijetko se koristi za ručno zavarivanje osim ako se radi o visoko kvalificiranom operativcu. Drugi nedostaci helija su potreba za velikim protoka, uz prateći porast troškova. Iznad 150 A ima neke različite prednosti kod debljih metala. Heliji - argonske mješavine dostupne su s postotkom argona u rasponu od 50-75 % su idealni za većinu metala i legura, osobito bakra i aluminija. [24]

#### 4. ZAVARIVANJE TITANIJA

Titanij i legure titanija mogu se zavariti postupcima kao što su TIG, plinskim metalnim lukom, plazma lukom i procesima zavarivanja elektronskim snopom. Titanij je reaktivni metal i osjetljiv je na krhkost kisikom, dušikom i vodikom pri povišenim temperaturama. Prema tome, metal mora biti zaštićen od atmosferskog onečišćenja. To se može osigurati zaštitom metala inertnim plinom za zavarivanje. Zavarivanje se također može obaviti na daljinu u komori. Ove komore mogu biti pročišćene od zraka i ponovno ispunjene inertnim plinom. [24]

Tijekom elektrolučnog zavarivanja, titanij bi trebao biti zaštićen od atmosferskog zraka sve dok se ne ohladi ispod 430 °C. Za zavarivanje se izvodi odgovarajuća zaštita pomoću pomoćnog inertnog plinskog zavarivanja u atmosferi okolnog zraka. Ventilacija i ispušni plinovi na luku moraju biti izvedeni na takav način da zaštita zaštitnog inertnog plina (okretanje luka, zaštita na traci ili zaštita korijena) nije oštećena. Slika 4.1 prikazuje zavareni proizvod od titanija. [24]



Slika 4.1. Zavarivanje titanijevog ispušnog sustava [27]

#### 4.1. Priprema zavara

Metalni titanij treba biti slobodan od debelog oksida i mora biti kemijski čist prije zavarivanja, jer će kontaminacija oksidom, vodom, mazivom ili prljavštinom također izazvati pogreške u zavaru. Dodatni materijal za zavarivanje titanija bi trebale biti kemijski čiste i bez teških oksida, apsorbirane vlage, masti i prljavštine. Dodatni materijal potrebno je dodavati tehnikom koja zadržava vrući kraj unutar poklopca plamenika. Ako vrh dodatnog materijala postaje kontaminiran, obojeni kraj treba odrezati prije ponovnog korištenja.[24]

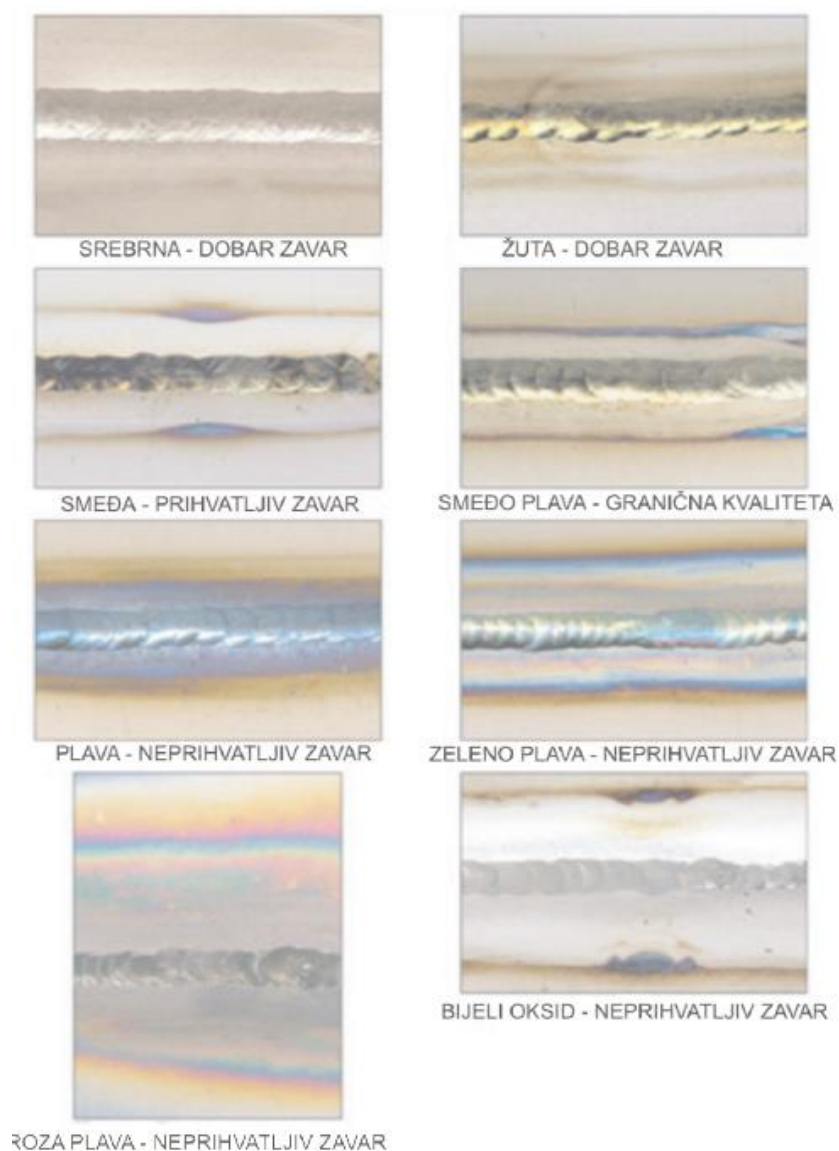
#### 4.2. Zavarljivost titanija [28]

Titaniji se može uspješno spojiti tantalom, niobijem i vanadijem, iako će metalni zavareni spojevi biti jači i smanjene duktilnosti od osnovnih metala. Titanij se ne bi trebalo spajati na zavarene metale poput bakra, željeza, nikla i aluminijski zbog formiranja lomljivih titanskih legura koje proizvode izuzetno krhke zavarene spojeve.

#### 4.3. Oksidacija titanija

Oksidacija prolazi kroz poprečni presjek komponente. Za razliku od ostalih materijala ili čelika gdje je oksidacija ograničena na nekoliko mikrona u dubini, kisik kod titanija reagira s reaktivnim baznim metalima te utječe na mehanička svojstva cijelog poprečnog presjeka. Četkanjem površine četkom dolazi do odstranjivanja obojenosti zavara titanija te on dobija sjaj što ostavlja lažni dojam da nije došlo do oštećenja ili oksidacije. Sredstvo za popravak oštećenja uzrokovanih reakcijom zrakom ne postoji, jedini način je uklanjanje svih utjecaja metala, tj. zavarenog taloga i susjednog osnovnog metala. [29]

Zavar se mora u potpunosti štititi prilikom samog postupka zavarivanja dok se ne ohladi ispod temperature na kojoj se provodi reakcija oksidacije. Specifikacije navode da se zaštita plina mora održavati sve dok temperatura ne padne ispod 230 °C. Spektri boja nastali oksidacijom prikazani su na slici 4.2., te prilikom koje obojenosti dolazi do odbacivanja ili prihvaćanja zavara.



**Slika 4.2. Prikaz spektra boja oksidacije titanija [30]**

Bitna stavka je da vizualno ispitivanje zavora mora biti napravljeno na posebnom osvjetljenju kako bi se bolje razlučile nijanse. Specifikacija zavarivanja treba navoditi maksimalnu količinu dopuštenog obojenja, svijetlo žuto, tamno žuto, plavo i sl. [31]

## 5. ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA

Zavareni spoj mora zadovoljiti propisane uvjete kvalitete koji su unaprijed određeni različitim zahtjevima i uvjetima eksploatacije zavarenog spoja. Zavareni spoj mora zadovoljavati minimalne propisane uvjete koji se mogu postići ako se zavarivanje provodi na unaprijed definirane korake pripreme, izbora materijala i postupaka zavarivanja te na kraju kontrole dobivenog zavarenog spoja. Sustavom normi HRN EN ISO 3834: 2007 propisani su zahtjevi koji se moraju ispuniti kako bi se mogli primijeniti određeni postupci zavarivanja. [32]

Pogreške u zavarenim spojevima koje mogu nastati tijekom procesa zavarivanja i mogu se podijeliti u nekoliko skupina:

1. Uzrok nastajanja pogreške: konstrukcijske pogreške, metalurške pogreške i tehnološke pogreške.
2. Vrstu pogreške: plinski uključci, uključci u čvrstom stanju, naljepljivanje, nedostatak provara, pukotine i pogreške oblika i dimenzija.
3. Pogreške položaja: unutrašnje pogreške, površinske i ispodpovršinske pogreške, pogreške po cijelom presjeku.
4. Pogreške oblika: kompaktne pogreške, izdužene pogreške, oštre pogreške (izraženo zarezno djelovanje), zaobljene pogreške (manje izraženo zarezno djelovanje), ravninske pogreške i prostorne pogreške.
5. Pogreške veličine: male pogreške, pogreške srednje i velike veličine.
6. Pogreške po brojnosti: pojedinačne, učestale i gnijezdo grešaka.

Postoje 3 specifične faze kontrole zavarenog spoja:[32]

1. Kontrola prije početka zavarivanja – odnosi se na kontrolu osnovnog i dodatnog materijala, tehnološki proces zavarivanja, izbor postupaka i parametara zavarivanja, testiranje zavarivača, strojeva i opreme itd.
2. Kontrola tijekom procesa zavarivanja – treba obratiti pažnju na pridržavanje redoslijeda i pravila izvršavanja zavarivanja jer kvaliteta zavara u velikoj mjeri ovisi o izvršenom zavarivanju. U ovoj fazi se provodi ne razorna međufazna kontrola za potvrdu kvalitete provedenog zavarivanja, a među koje spadaju: pripajanje, proces zavarivanja, kontrola parametara itd.

3. Kontrola nakon procesa zavarivanja – provode se zbog ispitivanja i dokazivanja kvalitete zavarenog spoja, a to su slijedeće kontrole: vizualne, ne razorne kontrole,

razorne kontrole itd. Kontrola kvalitete zavara se dijeli na metode bez razaranja i metode sa razaranjem zavara.

### **5.1. Nerazorna ispitivanje zavarenog spoja**

Nerazorna ispitivanja zavarenog spoja (*eng. Non-destructive testing – NDT*) svojim djelovanjem ne utječe na svojstva ispitivanog zavarenog spoja s obzirom da služi za otkrivanje i određivanje ispodpovršinskih pogrešaka u zavarenom spoju prema HRN EN 26520:2007, a svrstane su u šest osnovnih grupa: pukotine, poroznost, uključine, nedovoljno protaljivanje, nepravilnost oblika i ostale pogreške. NDT služi za otkrivanje grešaka, a ne može se koristiti za sprječavanje nastanka grešaka. Nerazorna ispitivanja zavarenog spoja su podijeljena prema metodama kontrole: [33]

1. Vizualna kontrola
2. Dimenzionalna kontrola
3. Penetrantska kontrola
4. Magnetska kontrola
5. Ultrazvučna kontrola
6. Radiografska kontrola
7. Akustična kontrola
8. Ostale metode.

#### **5.1.1. Vizualna kontrola**

Vizualna kontrola se provodi kod otkrivanja površinskih grešaka npr.: korozija, porozitet, završna obrada, otkrivanje grešaka spojeva itd. Vizualna kontrola je preventivne naravi, a veoma je bitno imati određenu količinu znanja o zavarima kako bi mogli ocijeniti kvalitetu zavara. Vizualna kontrola spada u najbitnije faktore uz sami proces zavarivanja kod nastajanja



zavarenih spojeva. Detaljna vizualna kontrola je obavezna prije provedbe ostalih nerazornih metoda ispitivanja i u pravilu se sve vrste zavara podvrgavaju vizualnoj kontroli. Preventivna

uloga vizualne kontrole je omogućiti utjecaj na provođenje procesa zavarivanja u odnosu na ostale tehnike nerazornog ispitivanja.

Pri vizualnoj kontroli nositelj signala (informacija) je svjetlost i moguća je provedba s ili bez pomagala. Pomagala mogu biti lupe, povećala, ogledala, endoskopi (boroskopi, fibroskopi, videoskopi). U slučaju dvojbe oko stanja zavarenog spoja, vizualna kontrola se nadopunjuje nekom drugom nerazornom metodom ispitivanja.[34] Na slici 5.1 prikaza je vizualna kontrola zavara pomoću povećala.



**Slika 5.1. Vizualna kontrola zavara [35]**

## **5.2. Razorna ispitivanja zavarenog spoja**

Metode razornog ispitivanja zavarenog spoja (eng. *Destructive testing – DT*) se koriste kod ispitivanja mehaničkih svojstava zavara, tvrdoće, kemijskog sastava i strukture, a imaju za cilj osiguravanje pouzdanog rada zavarenog spoja. Metode kontrole zavara razornim ispitivanjima su: [36]

1. Vlačno ispitivanje
2. Mjerenje tvrdoće
3. Ispitivanje udarne žilavosti

4. Korozijska ispitivanja
5. Dinamička ispitivanja
6. Tlačna ispitivanja s razaranjem
7. Radioničke probe i probe zavarljivosti
8. Kemijska ispitivanja

### 5.2.1. Mjerenje tvrdoće

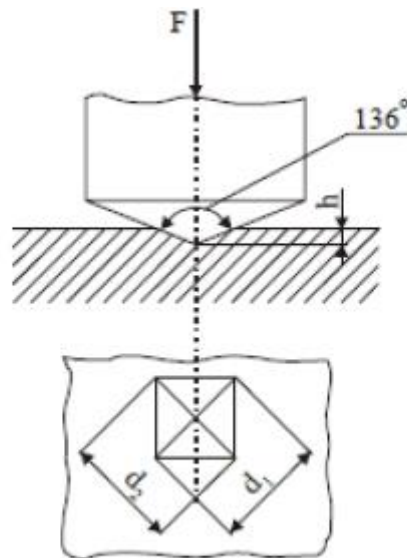
Tvrdoća se opisuje kao otpornost materijalu prema prodiranju ili zarezivanju drugog znatno tvrdog materijala pri čemu indenter može biti dijamant (najtvrđi materijal) ili neki tvrdi materijal (kaljeni čelik, tvrdi metal). Tvrdoća nije fizikalno definirano svojstvo, ali se lako ispituje, brzo i bez većeg oštećenja površine. Rezultati tvrdoće se mogu povezati u korelaciju s nekim mehaničkim svojstvima (npr.  $R_m$ ). Cilj ispitivanja zavarenih spojeva je određivanje tvrdoće dodatnog materijala zavara, zone utjecaja topline i osnovnog materijala zbog njihovog međusobnog uspoređivanja. Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 1043-1/2 : 1996 (ISO 9015 : 2016). Površine ispitivanog zavara moraju biti obrađene – brušene ili polirane. Za ispitivanje tvrdoće se najčešće koristi Vickersova metoda (HV). Ovom metodom je moguće ispitivati tvrdoću svi mehaničkih materijala, a tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili. Metoda se temelji na prodiranju dijamantnog indentora (slika 5.2) u obliku četverostrane prizme s kutom između stranica od  $136^\circ$ . Utiskivanjem indentora u materijalu ostaje otisak piramide. Tvrdoća se određuje prema izrazu:[36]

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F \times 0,189}{d^2} \quad (3)$$

$F$  – primjenjena sila (N)

$S$  – površina šuplje piramide otisnute u materijal ( $\text{mm}^2$ )

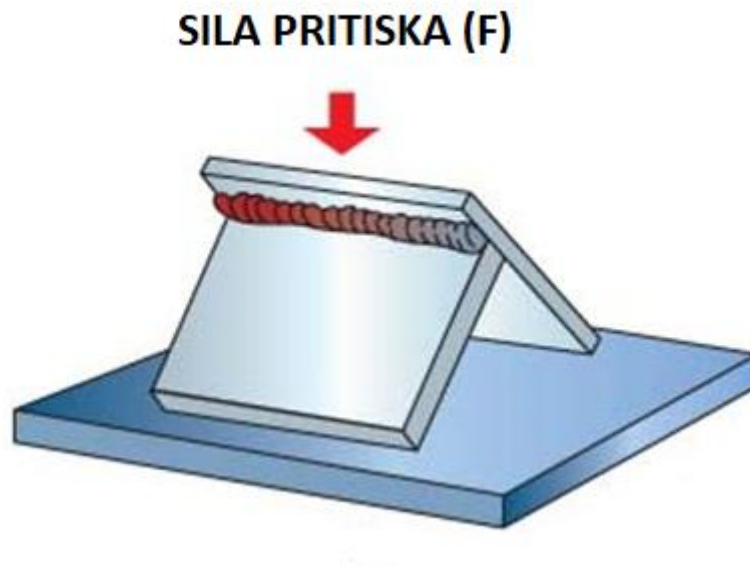
$d$  – srednja vrijednost dijagonala baze piramide (mm),  $d=(d_1+d_2)/2$  (mm)



Slika 5.2. Identor i otisak prilikom mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom [37]

### 5.2.2. Ispitivanje do loma zavarenog spoja

Pomoću tlačnog ispitivanja razaranjem se utvrđuju mehanička svojstva pri tlačnom naprezanju te se ovim postupkom određuje čvrstoća na tlak i sposobnost deformiranja zavarenog spoja. Ispitivanje se provodi prešama. Oblik uzorka je prikazan na slici 5.3. Postupak tlačnog ispitivanja se sastoji od pripreme uzoraka, postavljanju, deformiranju i lomljenju ispitnih uzoraka. Pripremljeni uzorak (slika 5.3.) se postavlja na kidalicu ili prešu među tlačne ploče i postepeno hidrauličnom silom deformira do trenutka pojave pukotine, lomljenja, postizanja određenog opterećenja ili određenog skraćenja.



Slika 5.3. Ispitivanje do loma zavarenog spoja [38]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U današnje vrijeme potreba za visoko kvalitetnim materijalima postaje sve veća. Samim time moguće je uvidjeti sve veću uporabu nekonvencionalnih materijala u različite svrhe. Jedan od takvih materijala je i titanij koji svojom nezastupljenošću u Hrvatskoj industriji omogućava veliki broj istraživanja na samu temu.

Cilj eksperimentalnog dijela je ispitati mehanička svojstva zavara na titaniju kako bi se prikazalo najbolje uvijete i parametre pri zavarivanju. Prilikom zavarivanja dolazi do promjena u materijalu radi unosa velike količine topline. Potrebno je ispitati kako zavarivanje utječe na sam materijal. Na slici 6.1. prikazan je postupak spajanja uzoraka prije samoga zavarivanja.



Slika 6.1. Spajanje uzoraka dodatnim materijalom

### 6.1. Plan eksperimentalnih ispitivanja

#### 1. Odabir i nabava titanija

Prilikom odabira uzoraka za potrebe diplomskog rada odabrane su pločice manjih dimenzija istog sastava ( grade 2 titaniji ). Odabrano je 20 uzoraka za potrebe ispitivanja zavarenih spojeva titanijevih legura. Dobiveno je 10 zavarenih uzoraka od kojih 8 (oznake 1-8) otpada na kutne spojeve, a 2 uzorka na sučeljene zavare (oznake 1X i 2X).

## 2. Odabir postupka zavarivanja i pojedinih parametara

Za potrebe zavarivanja uzoraka odabran je postupak zavarivanja TIG-om. Za zavarivanje potreban je dodatni materijal istoga sastava kao i osnovni materijal, te samim time odabrane su žice promjera 1.6 mm ( Grade 2 ).

## 3. Provedba ispitivanja

Zbog malih dimenzija i malog broja ispitnih uzoraka izabrana su ispitivanja koja nisu limitirani dimenzijama kao što su makro ispitivanje, ispitivanje tvrdoće i tlačno ispitivanje zavarenih spojeva. Ispitivanja su u potpunosti izrađena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

## **6.2. Uzorci**

Uzorke za izradu diplomskog rada ustupila nam je tvrtka iz Varaždina. Tvrtka se bavi izradom titanijevih implantata za umjetne kukove. Ustupljeni uzorci su bile pločice širine 40 mm , duljine 50 mm i debljine 6 mm. S uzorcima su poslana su specifikacije dobivenog materijala prikazanim u slici 6.2.



**REGISTERED ISO 9001 / AS9100 FACILITY**  
 3045 Commercial Ave. Northbrook, IL 60062 U.S.A.  
 Phone: 847-498-3111 Fax: 847-498-3392  
**Certificate of Compliance**

<b>Customer Name:</b>	
<b>Purchase order #</b>	
<b>VMI Job #</b>	250061
<b>Material:</b>	4.76mm & 6.35mm CP TITANIUM GRADE 2 PLATE
<b>Specification(s):</b>	ASTM F-67-06 GR.2 ; ISO 5832-2 ; EN 10204:2004 Type 3.1
<b>Heat Number / Melt Source :</b>	HN0798 / TIMET - 4.76mm HN0797 / TIMET - 6.35mm
<b>Size:</b>	4.76 x 19 x 2743mm (GD) - 117 EA 4.76 x 19 x 2602mm (GD) - 60 EA 4.76 x 19 x 3048mm (GD) - 7 EA 6.35 x 22 x 2886mm (GD) - 33 EA 6.35 x 22 x 2374mm (GD) - 81 EA 6.35 x 22 x 2870mm (GD) - 60 EA 6.35 x 22 x 3048mm (GD) - 7 EA 6.35 x 22 x 2355mm (GD) - 81 EA
<b>Date Shipped:</b>	JULY 18, 2013

*Visual and Dimensional Examinations Acceptable*

**Mercury Exclusion:** At no time during the handling or storage of this material at Vulcanium Metals Incorporated was it near, or in contact with mercury. There is no mercury in the facility.

**LIMITED WARRANTY AND DISCLAIMER:** Vulcanium will pass through to customer all warranties available to Vulcanium from its suppliers, and will assist customer in obtaining replacement materials from Vulcanium's suppliers. Vulcanium warrants that it has good title to the materials and that the foregoing specifications match the specifications of customer's order. Vulcanium provides the materials "as is" and disclaims all other warranties, express or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, or against defects in material or workmanship.

Date: 7/18/2013

INSPECTED BY: (initials)

Chris Kehr - QA Administrator

Slika 6.2. Certifikat materijala uzoraka

U certifikatu prikazano je da se radi o pločica grade 2 titanija za komercijalne svrhe. Prilikom vizualne inspekcije uzoraka vidljiva je bitna razlika u boji. Razlika je prikazana na slici 6.3.



**Slika 6.3. Dobiveni uzorci**

Kako bi se ispitao kemijski sastav uzoraka korišten je XRF uređaj na Katedri za zaštitu materijala. XRF uređajem se ispituje sastav materijala korištenjem rendgenskih zraka te prikazuje postotak elemenata u materijalu. Postupak ispitivanja je postavljanje uzoraka na kalibriranu površinu poznatog sastava. Prisanjanjem uređaja na uzorak dobivaju se rezultati sa postotkom udjela elemenata u materijalu. Ispitani uzorci i postupak ispitivanja prikazani su na slikama 6.4. i 6.5.





**Slika 6.4. XRF uređajem**



**Slika 6.5. Postupak ispitivanja XRF uređajem**

Ispitivanjem dobiveni su rezultati prikazani u tablici 1. za uzorke prikazane na slici 6.3.

**Tablica 6.1 Maseni udio elemenata u ispitivanim uzorcima**

Elementi (%)	Uzorak A	Uzorak B
Zr	0.0168	/
Al	18.32	/
Si	0.60	0.15
Fe	0.49	0.17
Ti	ostatak	ostatak

Za potrebe daljnjeg istraživanja mehaničkih svojstava zavara na titaniju korišteni su uzorci sa istim sastavom elemenata kao i uzorak B prikazan u tablici 1.

### **6.3. Priprema uzoraka prije postupka zavarivanja**

Kako bi eksperiment bio uspješno obavljen potrebno je planski pripremiti uzorke i procese. Planskom i temeljnom pripremom ispitivanja postoji manja vjerojatnost nastajanja pogreške.

#### **6.3.1. Priprema uzoraka**

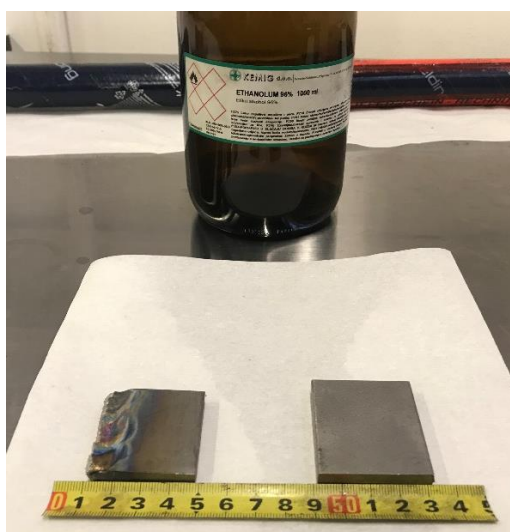
Priprema uzoraka za zavarivanje obavljeno je u Laboratoriju za zavarene konstrukcije. Uzorke je potrebno temeljito očistiti od nečistoća na površini koji mogu utjecati na svojstva zavarenoga spoja. Čišćenje uzoraka obavljeno je u dva koraka.

Prvi korak pri uklanjanju nečistoća s uzoraka je četkanje čeličnom četkom, prilikom kojeg je korištena nova četka radi onemogućavanja kontaminiranja uzoraka drugim elementima. Na slici 6.6. prikazan je uzorak nakon čišćenja.



**Slika 6.6. Uzorak nakon četkanja**

Drugi korak pri odstranjivanju nečistoća je temeljito čišćenje 96% etanolom radi uklanjanja masnoća i nečistoća nastalih rukovanjem uzrocima. Korišten je etanol radi velike brzine isparavanja te samim time ne utječe na proces zavarivanja. Na slici 6.7. prikazani su uzorci nakon čišćenja etanolom.



**Slika 6.7. Uzorci nakon čišćenja**

Nakon temeljnog uklanjanja nečistoća sa uzoraka moguće je započeti postupak zavarivanja.

### 6.3.2. Priprema komore za zavarivanje

Prije samog zavarivanja bilo je potrebno prepraviti komoru za zavarivanje u inertnoj atmosferi. Komora za zavarivanje je volumena 253 L. Na slikama 6.8. i 6.9. prikazana je zaštitna komora i preinake koje omogućavaju funkcionalnost i nepropusnost samoga inertnoga plina korištenog prilikom zavarivanja.



Slika 6.8. Komora za zavarivanje



**Slika 6.9. Unutrašnjost komore za zavarivanje**

Komora se sastoji od nepropusnih zidova, uzvišene konstrukcije od nehrđajućeg čelika, vatrootpornih rukavica i svijeće koju koristimo kao indikator kisika u komori. Prilikom preinaka komore svi su otvori hermetički zatvoreni nakon fiksiranja cijevi za dovod inertnog plina i uređaja za zavarivanje. Komora omogućava zaštitnu atmosferu koja štiti uzorke od nastajanja oksida unutar zavara i samim time sprečava kontaminaciju. Slika 6.10. prikazuje postupak zavarivanja unutar zaštitne komore.



**Slika 6.10. Zavarivanje u inertnoj atmosferi**

#### **6.4. Zavarivanje uzoraka**

Nakon temeljite pripreme uzoraka i radnog okruženja bilo je moguće započeti postupak zavarivanja. Uzorci su izrađeni u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u uz pomoć tehničkog suradnika. Prilikom zavarivanja uzoraka korišten je TIG uređaj *Magic Wave 2000* marke *Fronius* prikazan na slici 6.11.



**Slika 6.11. TIG uređaj Magic Wave 2000**

Prilikom postupka zavarivanja titanija TIG-om potrebno je koristiti dodatni materijal istih specifikacija kao i osnovni materijal. Dodatni materijal (grade 2 titanij – 99 % titanij) nabavljen je u tvrtki iz Graza. Uzimajući u obzir potrebu za zaštitnim plinovima korišteni su argon 4.8 niže čistoće, argon 5.0 više čistoće, te mješavina argona i helija. Na slici 6.12. prikazani spremnici zaštitnih plinova.



**Slika 6.12. Spremnici sa zaštitnim plinovima**

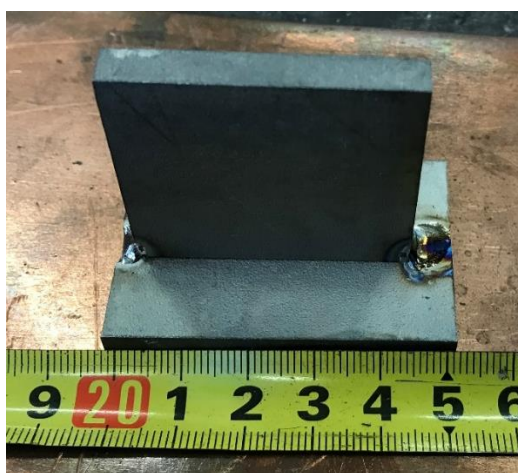
Prije samoga postavljanja uzoraka u zaštitnu komoru bilo je potrebno spojiti same uzorke radi lakšeg rukovanja tijekom procesa zavarivanja. Postupak spajanja uzoraka izrađen je TIG uređajem pri jakosti struje 120 A i naponu 10 V. Prilikom procesa spajanja korišten je dodatni materijal titanij grade 2 debljine 1.6 mm i inertni plin argon 5.0 protoka 15 l/min Na slici 6.13. prikazan je postupak spajanja uzoraka.





**Slika 6.13. Postupak spajanja uzoraka**

Nakon spajanja uzorci su postavljeni u zaštitnu komoru koja je hermetički zatvorena i popunjena zaštitnim plinom. Protok zaštitnog plina je bio 20 l u minuti, dok je vrijeme punjenja bilo 15 minuta radi uklanjanja zraka iz komore. Potreba za inertnom atmosferom onemogućava kontaminaciju uzoraka prilikom zavarivanja te samim time poboljšava svojstva materijala. Slika 6.14. prikazuje uzorke prije postavljanja u zaštitnu komoru.



**Slika 6.14. Uzorci prije zavarivanja u zaštitnoj komori**

Sveukupno je izrađeno deset uzoraka od kojih je osam kutnih spojeva i dva sučeljena spoja. Kutni spojevi su zavareni samo sa jedne strane dok su sučeljeni spojevi obostrano zavareni. Osam uzoraka zavareno je unutar komore dok su uzorci 7 i 8 zavareni bez zaštitne atmosfere kako bi se uvidio utjecaj oksidacije za zavarene spojeve. Prilikom zavarivanja svih uzoraka korišten je dodatni materijal (Grade 2 Titanij ). Promjena zaštitne atmosfere komore obavljena je dvaput radi varijacije ispitanih uzoraka.

Postupak zavarivanja uzoraka izrađen je promjenom parametara zavarivanja i promjenom zaštitnih plinova i zaštitne atmosfere. Tablica 2. prikazuje parametre zavarivanja i plinove korištene prilikom izrade uzoraka.

**Tablica 6.2 Parametri zavarivanja uzoraka**

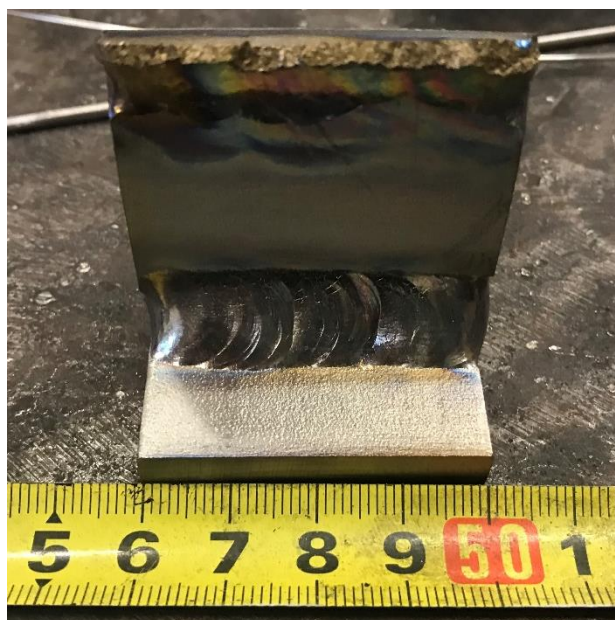
Uzorak	Jakost struje, A	Napon, V	Atmosfera	Inertni plin TIG-a
1	120	11	Ar 4.8	Ar 5.0
2	100	10	Ar 4.8	Ar 5.0
3	100	11	Ar 4.8	Ar/He
4	120	11	Ar 5.0	Ar 4.8
5	100	10	Ar 5.0	Ar 4.8
6	100	11	Ar 5.0	Ar/He
7	120	11	/	Ar 5.0
8	150	11.7	/	Ar 5.0
1X	90	10	Ar 5.0	Ar 4.8
2X	90	10	Ar 4.8	Ar 5.0

Kako je postupak zavarivanja bio ručno izveden brzinu nije moguće prikazati jer ovisi o zavarivaču i tehnici zavarivanja. Uzorke su zavarivali stručno osposobljeni tehničari u Laboratoriju za zavarivanje s višegodišnjim iskustvom i certifikatom zavarivanja. Slika 6.15. prikazuje postupak zavarivanja uzoraka unutar komore.



**Slika 6.15. Postupak zavarivanja u zaštitnoj komori**

Nakon postupka zavarivanja uzorci su temeljito vizualno pregledani u svrhu utvrđivanja osidacije na zavaru. Slika 6.16. prikazuje uzorak 8 nakon zavarivanja.



**Slika 6.16. Uzorak 8 nakon postupka zavarivanja**

Bitno je naznačiti da je prilikom izrade uzorka 8 upotrijebljeno više dodatnog materijal i načinjen je postupak navarivanja čime nastaje deblji zavar.

## 6.5. Naknadna obrada

U ovom poglavlju biti će opisani postupci naknadne obrade na zavarenim uzorcima kako bi se moglo izraditi što vjerodostojnija ispitivanja. Uzorci su obrađeni postupkom rezanja na manje dijelove radi dobivanja vidljivog presjeka zvara, te naknadno postupkom brušenja površine radi dobivanja potrebne kvalitete površine za ispitivanje makroskopskih slika i tvrdoće uzoraka.

### 6.5.1. Obrada odvajanjem čestica

Postupak obrade odvajanjem čestica uzoraka izrađeno je u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Prilikom obrade korištena je tračna pila za obradu metala prikazana na slici 6.17. Uzorci su prepiljeni na dva dijela kako bi se mogao ispitati poprečni presjek zvara. Slika 6.18. prikazuje uzorak br.1 nakon obrade.



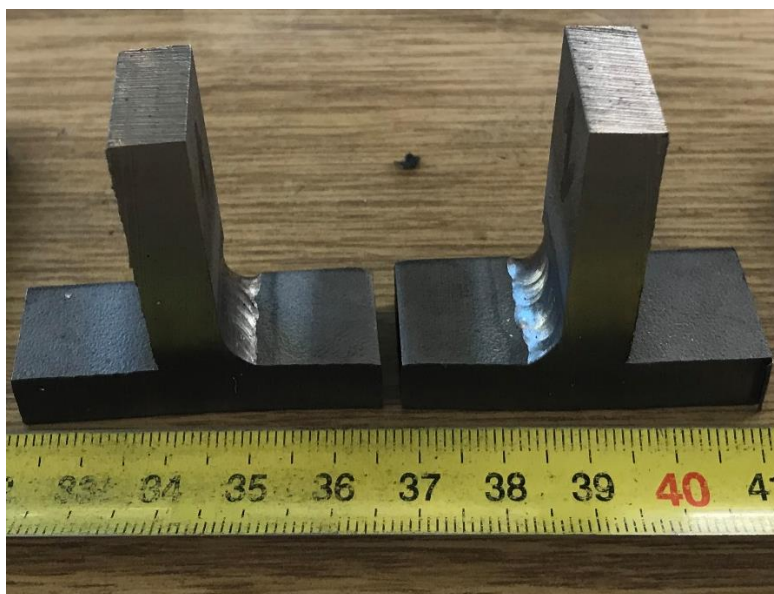
Slika 6.17. Tračna pila za obrada odvajanjem čestica rezanjem



Slika 6.18. Uzorci nakon obrade odvajanjem čestica

### 6.5.2. Brušenje

Nakon obrade odvajanjem česticama površine uzoraka nisu prihvatljive kvalitete za daljnja ispitivanja te ih je potrebno dodatno obraditi brušenjem. Brušenje je potrebno provesti radi dobivanja što manje hrapavosti površine zbog makro ispitivanja zavara. Na slici 6.19. prikazana je površina neizbrušenog uzorka.



**Slika 6.19. Uzorak prije brušenja**

Postupak brušenja uzoraka izveden je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Brušenje je izrađeno sa brusnim papirima različite hrapavosti i to redom: P 80, P 120, P 320, P 500, P 1000, P 2400, P 400.

Obrada uzoraka izrađena je na stroju za brušenje pri vrtnjama od 300 okretaja u minuti te korištenjem vode za podmazivanje i hlađenje uzoraka. Prilikom rada nije poznata sila pritiska jer su uzorci ručno obrađeni. Slika 6.20. prikazuje postupak i opremu za brušenja.



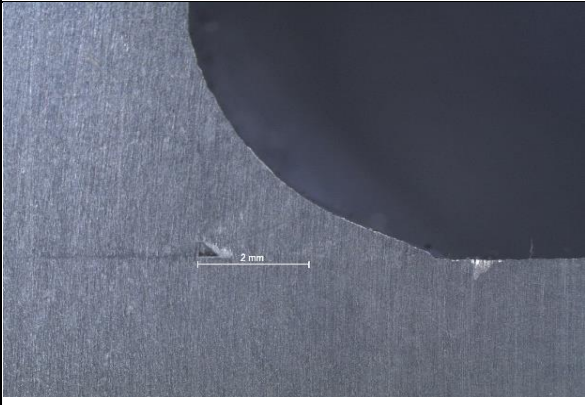
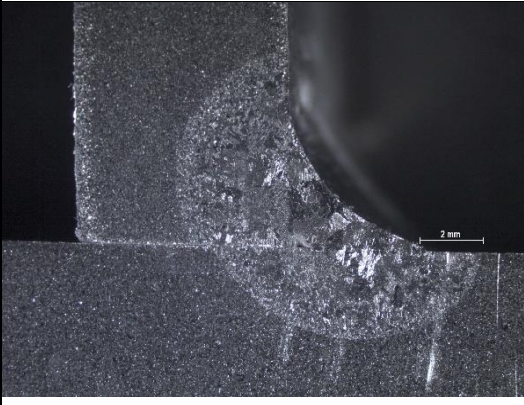

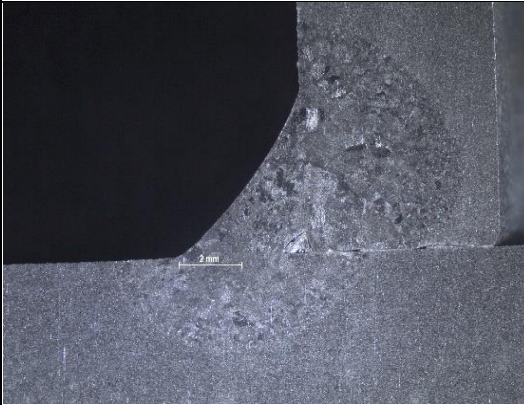
**Slika 6.20. Postupak brušenja**

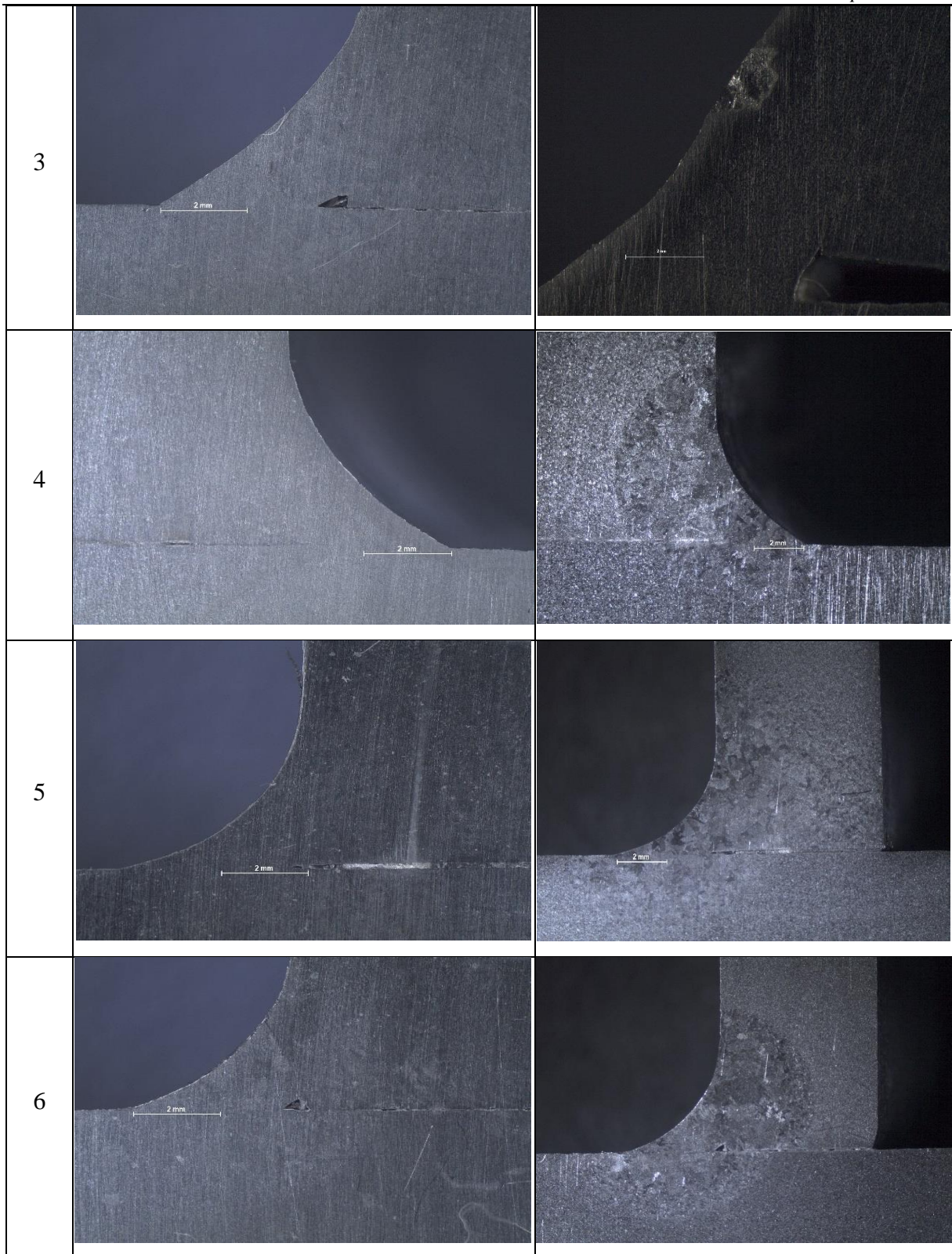
## 6.6. Makro ispitivanje zavora

Nakon dobivanja željene kvalitete površine titanijevih uzoraka moguće je nastaviti sa daljnjim ispitivanjima. Prilikom vizualnog ispitivanja uzoraka bilo je potrebno nagristi uzorke kako bi se dobio kontrast zavora i osnovnog materijala. Nagrizanje i makro ispitivanja napravljena su u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

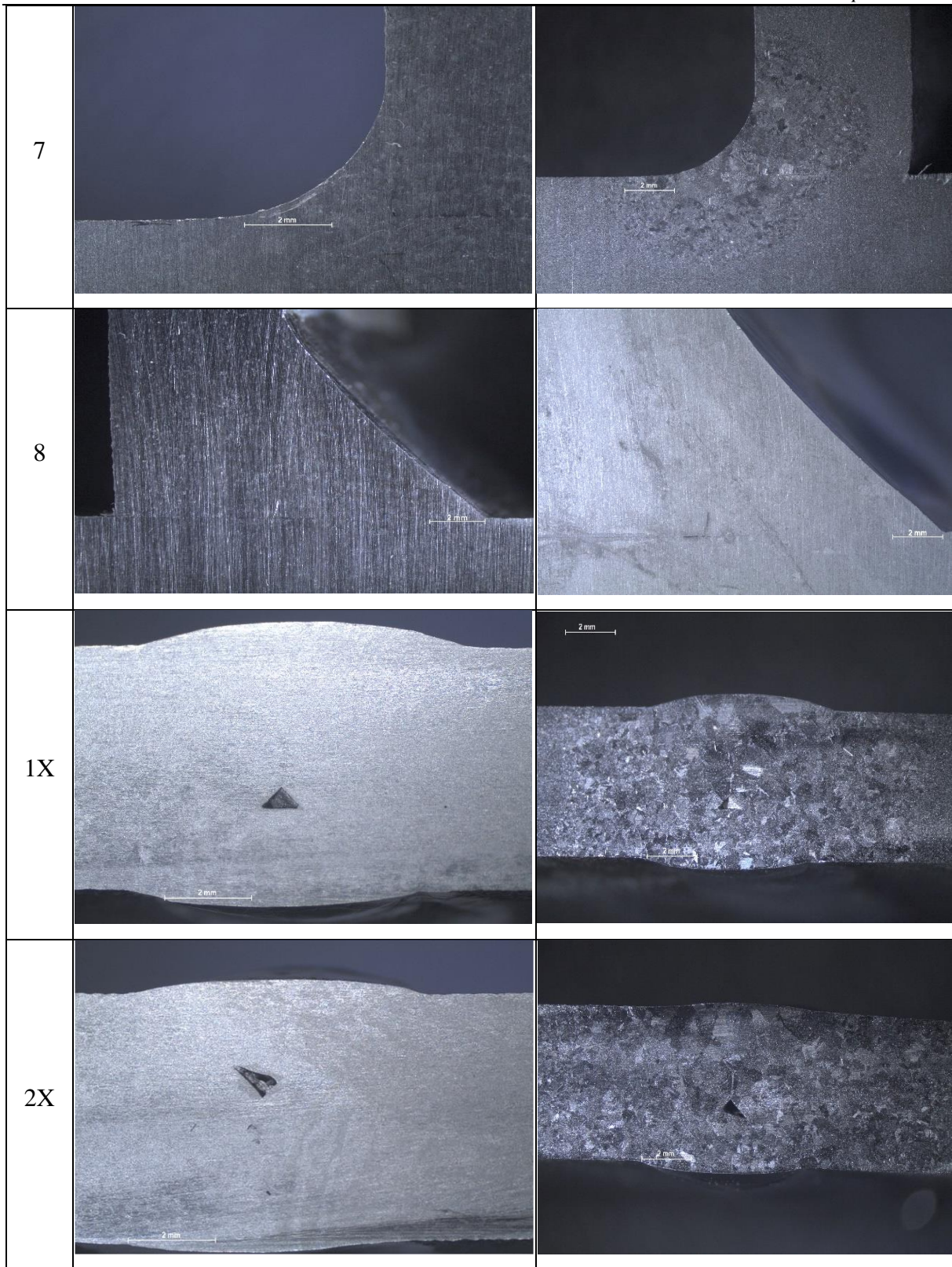
Zavareni spojevi titanija tretirani su otopinom za nagrivanje čiji sastav čine: Kroll-ov reagens, 2ml HF i 5 ml dušične kiseline. Tretiranje uzoraka u otopini trajalo je tri minute po uzorku. U tablici 3. prikazani su uzorci prije i poslije nagrivanja.

**Tablica 6.3. Uzorci prije i poslije nagrivanja**

Uzorak	Prije nagrivanja	Nakon nagrivanja
1		
2		





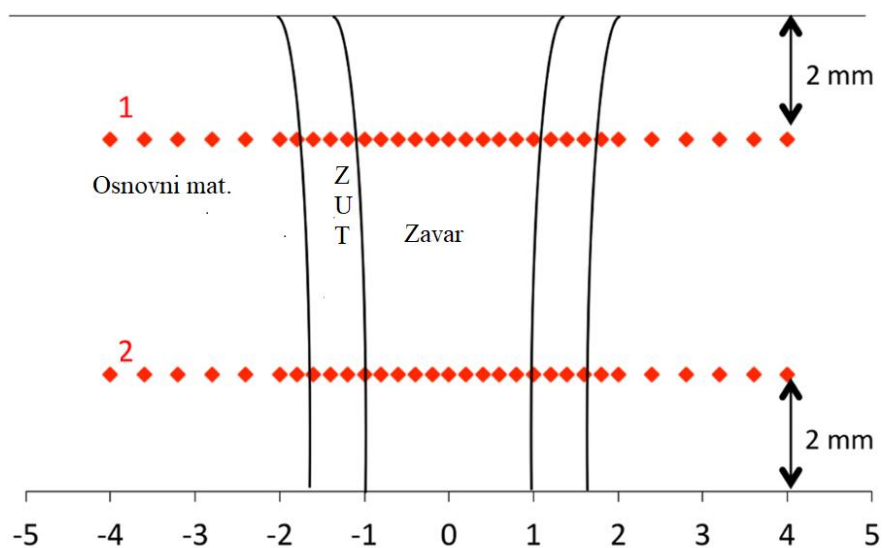


Prilikom analize slika prikazanih u tablici 3. moguće je uočiti nastajanje pogrešaka prilikom postupka zavarivanja. Primarna pogreška vidljiva u većini slučajeva sučeljenih spojeva a to jest nedovoljna penetracija dodatnog materijala u zavar. Takva pogreška upućuje na nedostatak unosa energije prilikom zavarivanja, te samim time dovodi do nastajanja nalijepljenog spoja. Daljnjom analizom uzoraka 1, 2, 3, 6, 1X i 2X vidljivo je da nije došlo do ispunjavanja dodatnim materijalom tijekom zavarivanja te samim time dolazi do nastajanja nepopunjenog prostora koji bitno utječe na mehanička svojstva titanijevog spoja. Na uzorcima 7 i 8 vidljiv je bitan utjecaj aktivne atmosfere na uzorak. Uzorci 7 i 8 prikazuju jasne znakove oksidacije nastale tijekom zavarivanja spojeva u obliku mrlja i crta. Samim prikazom oksidacije prilikom zavarivanja vidljivo je koliko duboko u materijal mogu utjecati oksidi i nečistoće.

## 6.7. Ispitivanje tvrdoće

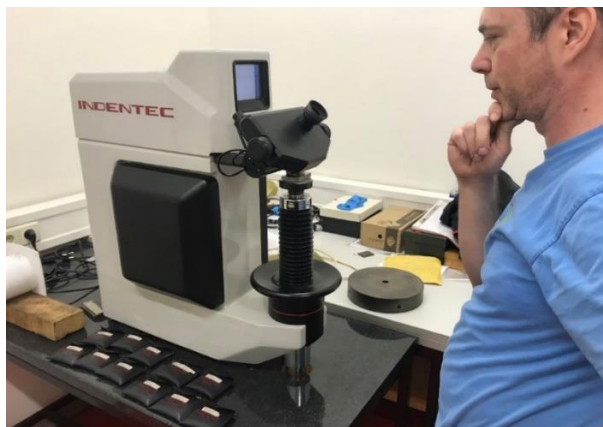
Ispitivanje tvrdoće uzoraka obrađeno je u Laboratoriju za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Prilikom ispitivanja korištena je metoda ispitivanja tvrdoće po Vickers-u pri kojemu je korišteno opterećenje HV5 (primijenjena sila je 49.033 N). Mjerenjem tvrdoće ispitani su svi uzorci kako bi se uvidio utjecaja parametara zavarivanja i zaštitnih atmosfera na promjenu mehaničkih svojstava zavarenih konstrukcija. Korišten je tvrdomjer sljedećih karakteristika:

- Proizvođač: Indentec
- tip: 50.30TKV
- opterećenje: 49,033 N
- mjerna sposobnost:  $\pm 1$  %



Slika 6.21. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće zavarenog spoja [39]

Slika 6.22 prikazuje postupak ispitivanja tvrdoće titanovih uzoraka.



**Slika 6.22. Postupak ispitivanja tvrdoće uzoraka**

Tvrdoća uzoraka ispitana je u zavaru, zoni utjecaja topline i osnovnom materijalu. Za svaki određeni uzorak napravljena su tri mjerenja ( tablica 6.4 ) te uzimanjem aritmetičke sredine dobiveni su rezultati prikazani u tablici 6.5 .

**Tablica 6.4. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV5**

HV5									
Uzorci	Zavar			Osnovni materijal			ZUT		
Ispitivanja	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
1	170	171	172	164	168	172	170	176	182
2	163	165	167	180	184	188	174	172	170
3	155	154	156	170	175	180	195	185	190
4	182	184	186	170	172	174	179	191	185
5	160	164	168	179	176	173	182	183	181
6	187	190	193	170	180	190	187	189	188
7	150	147	144	158	162	166	170	176	173
8	153	156	150	167	164	161	179	173	176
1X	154	162	158	158	164	170	169	171	170
2X	152	156	148	160	165	170	162	166	164

Tablica 6.5. Srednje vrijednosti tvrdoće

HV5			
Uzorci	Zavar	Osnovni materijal	ZUT
1	171	168	176
2	165	184	172
3	154	175	190
4	184	172	185
5	164	176	181
6	190	180	188
7	147	162	173
8	153	164	176
1X	158	164	170
2X	152	165	164

Analizom ispitanih tvrdoća moguće je uvidjeti utjecaj topline na zavarene spojeve. Uzimajući u obzir da tvrdoća grade 2 titanija iznosi približno 145 HV5 vidljivo je da se zavarivanjem postiže povećanje tvrdoće uzoraka.

Prilikom analize rezultata uzoraka 7 i 8 vidljivo je da utjecajem oksidacija i nečistoća dolazi do pada tvrdoće samog zavara. Što ukazuje na potrebu uporabe zaštitnih inertnih plinova tijekom postupka zavarivanja titanija.

Uzimajući u obzir inertne plinove vidljivo je da kod uzoraka zavarenim argonom nema velikih promjena tvrdoće te da nema bitnih razlika između argona 5.0 i 4.8. No prilikom analize uzoraka zavarenim mješavinom argona i helija ( uzorci 3, 6 ) vidljivo je bitno povećanje tvrdoće što ukazuje na bolju penetraciju zaštitnog plina te samim time rast tvrdoće.

## 6.8. Ispitivanje do loma zavara

Tlačno ispitivanje se izvodi razaranjem uzorka do loma te se utvrđuje kolika je potrebna sila razanja. Ispitivanje je izvedeno u Laboratoriju za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Prilikom ispitivanja uzorci su postavljeni na kidalicu nakon čega postepenim povećanjem opterećenja dolazi do pucanja zavarenog spoja. Prikazi u obliku grafova i vrijednosti sila prikazani su na računalu. Slike 6.23. i 6.24. prikazuju postupak tlačnog ispitivanja.



**Slika 6.23. Postupak ispitivanja razaranjem**



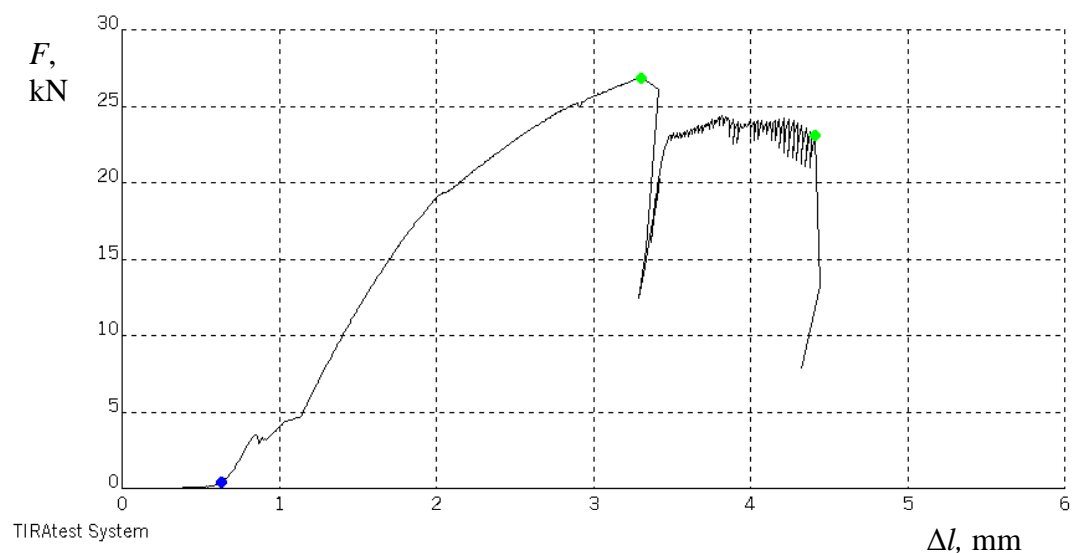
Slika 6.24. Prikaz ispitivanja na računalu

Rezultati ispitivanja prikazani su grafički za svaki uzorak posebno. Tablica 5. prikazuje maksimalne sile i sile loma ispitanih uzoraka. Sila  $F_{\max}$  označava maksimalnu postignutu silu, a  $F_b$  prikazuje silu pucanja.

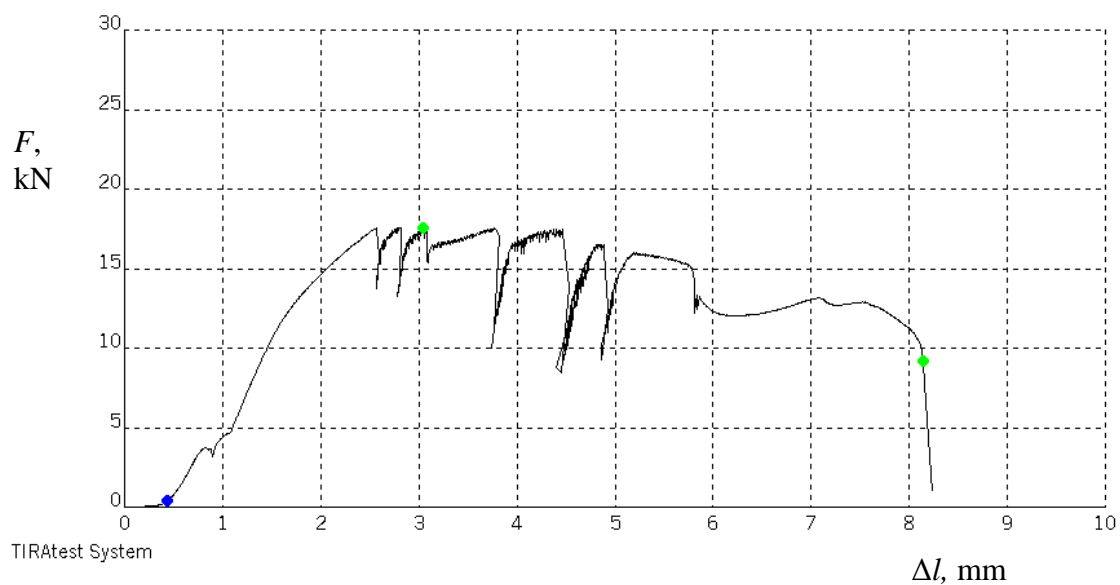
Tablica 6.6. Prikaz sila ispitivanja

Uzorak	$F_{\max}$ , kN	$F_b$ , kN
1	26.83	23.10
2	17.54	9.22
3	38.49	38.09
4	24.71	22.62
5	36.07	24.51
6	32.01	24.25
7	27.00	10.56
8	20.07	0.00

U nastavku prikazani su grafovi uzoraka, prilikom čega je vidljiv rast sila do maksimalnih vrijednosti te sila pucanja zavora. Na grafovima prikaz početne sile je obojan plavom bojom te su  $F_{\max}$  i  $F_b$  prikazane zelenom bojom. Grafovi su prikazani u slikama 6.25. do 6.32.

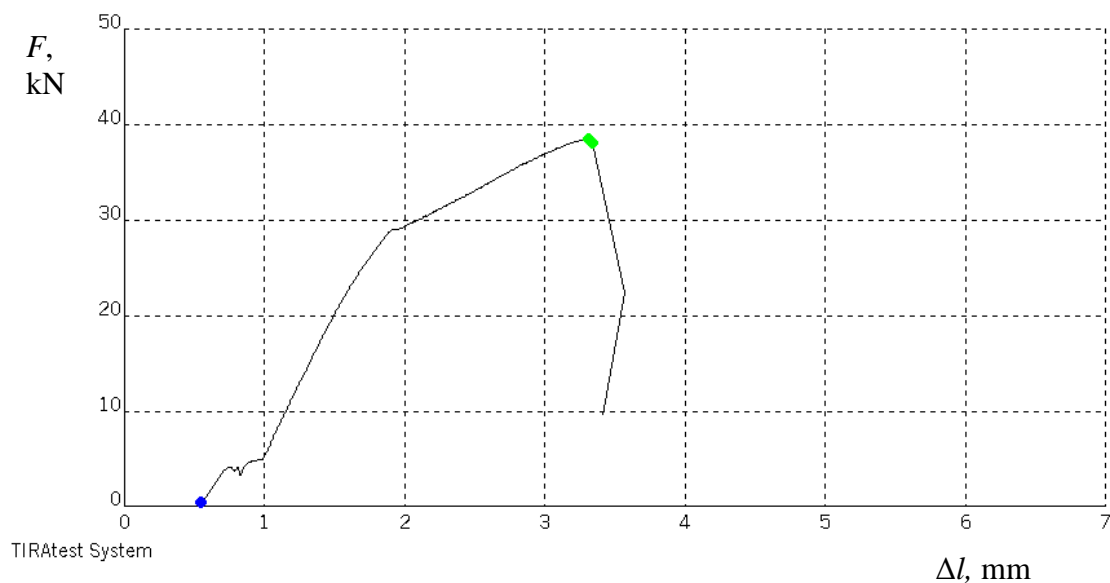


Slika 6.25. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 1

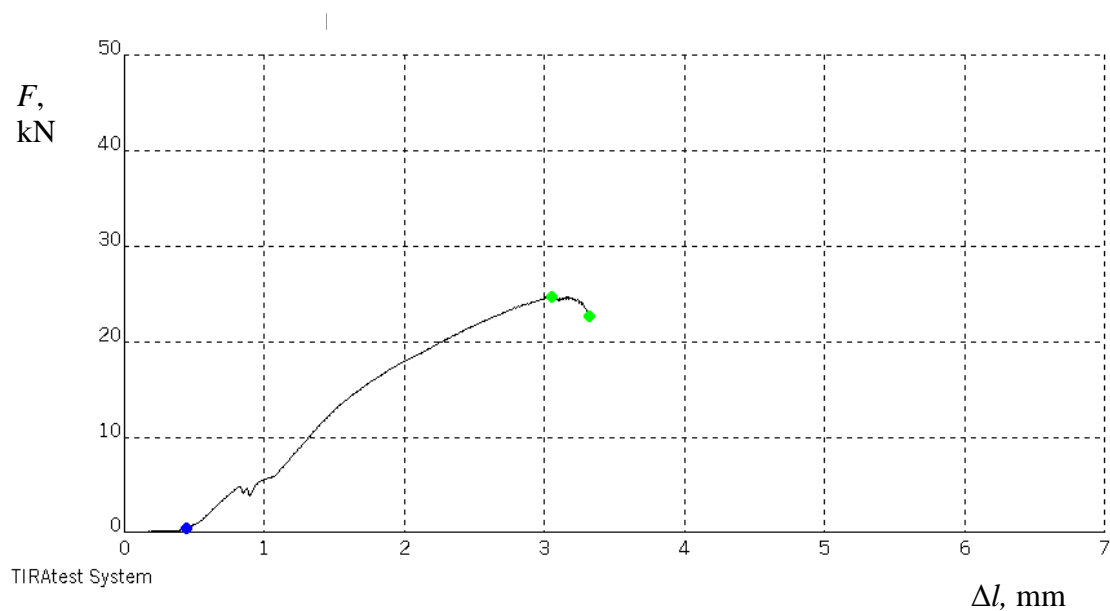


Slika 6.26. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 2

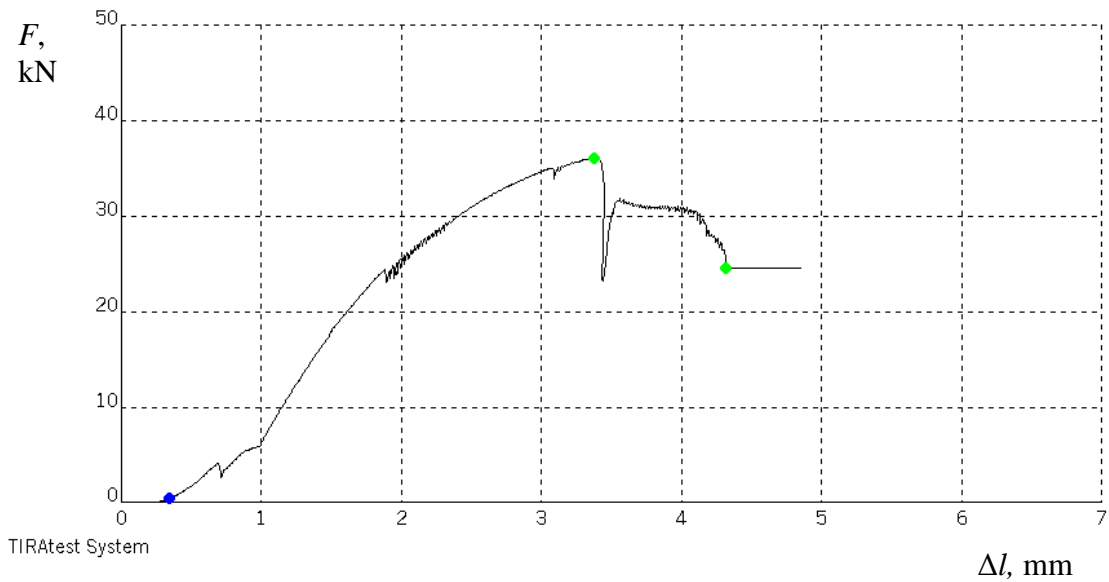




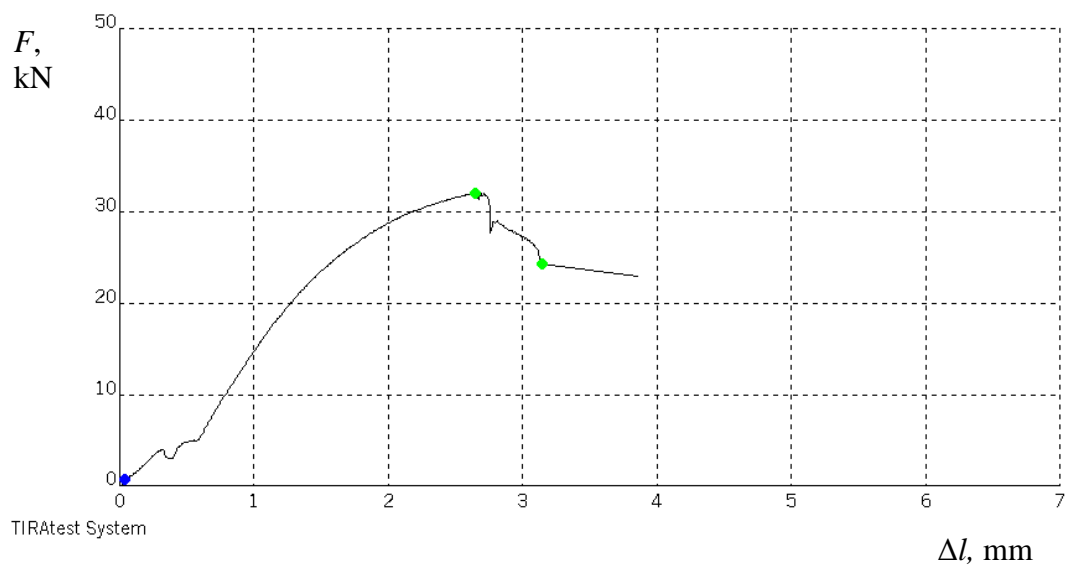
Slika 6.27. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 3



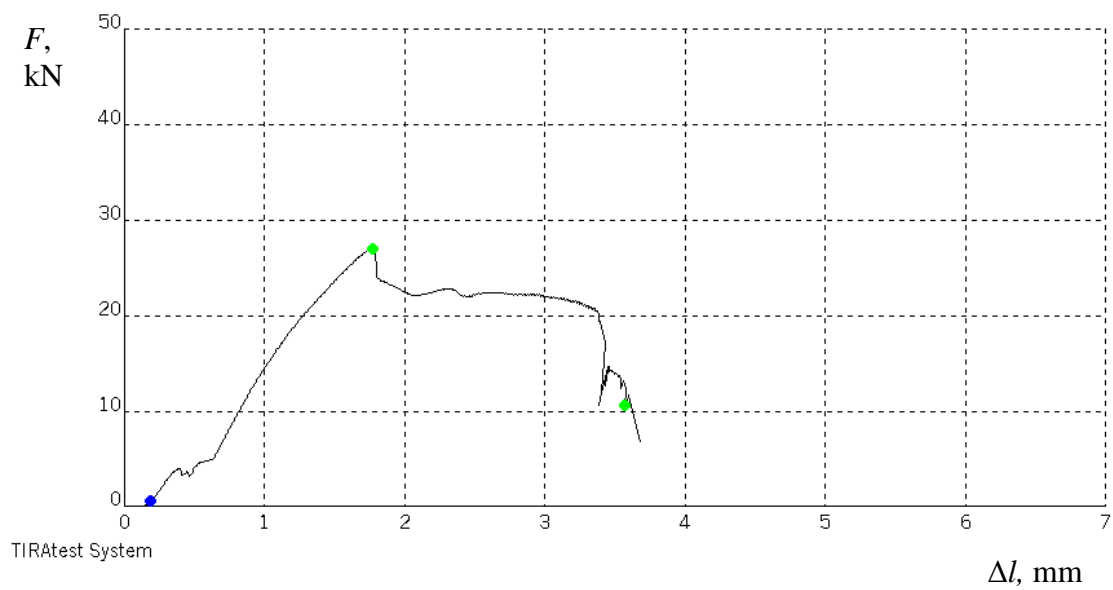
Slika 6.28. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 4



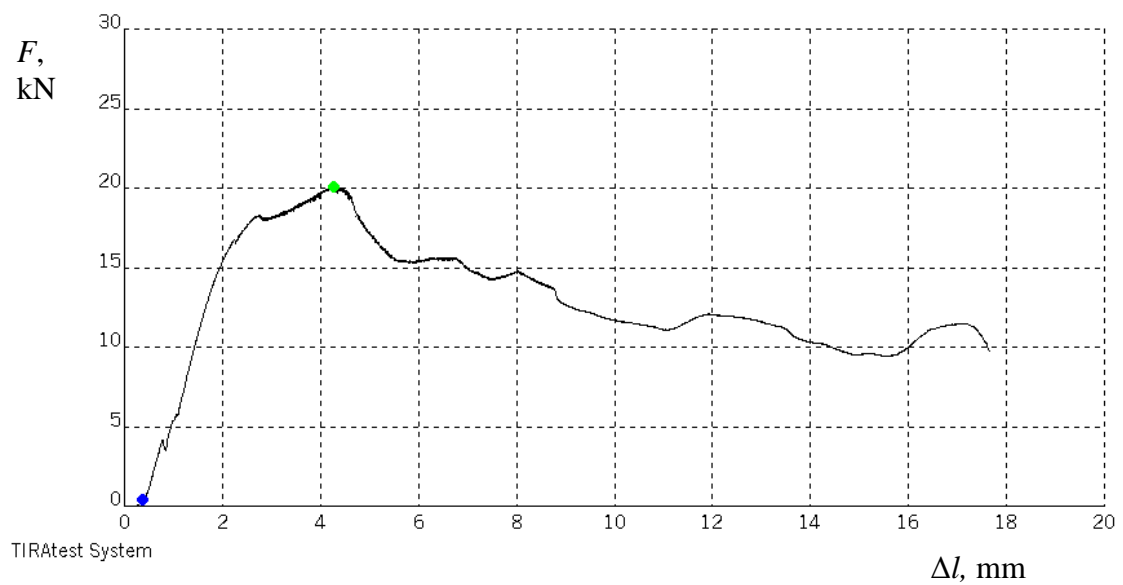
Slika 6.29. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 5



Slika 6.30. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 6



Slika 6.31. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 7



Slika 6.32. Grafički prikaz rezultata ispitivanja razaranjem uzorka 8

Analizom podataka prikazanih u grafovima tlačnog ispitivanja razaranjem moguće je uvidjeti bitni utjecaj parametara na mehanička svojstva zavara. Ispitivanjem uzoraka vidljivo je da se povećanjem snage prilikom zavarivanja dobiva veća postojanost na lom i samim time povećane vrijednosti sila. Bitno je ukazati na uzorke 3 i 6 zavarene uporabom mješavine inertnih plinova argona i helija dobivene su više sile. Samim time moguće je zaključiti da boljom penetracijom plina dobivaju se i bolja mehanička svojstva zavarenoga spoja.

Ispitivanjem uzoraka 7 i 8 zavarenih na zraku vidljiv je bitni utjecaj oksidacije na zavarenu konstrukciju. Uzorci prikazuju bitno lošija svojstva nego uzorci zavareni u zaštitnoj atmosferi, te samim time ukazuju na važnost uporabe adekvatne zaštite tijekom izrade.

Analizom grafa uzorka 8 vidljivo je da nije došlo do pucanja samoga zavara, zbog postupka navarivanja koji daje zavaru dodatnu čvrstoću. Slika 6.33. prikazuje uzorak 8 nakon tlačnog ispitivanja razaranjem. Pregledom uzoraka nakon ispitivanja vidljivo je da je došlo do deformacije osnovnog materijala te samim time ukazuje na potrebu za debljim zavarima prilikom izrade dijelova od debljih materijala.



**Slika 6.33. Prikaz uzorka 8 nakon tlačnog ispitivanja razaranjem**

## 7. ANALIZA REZULTATA

Analizom podataka dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima dobiveni su rezultati prikazani u 6. poglavlju. Analiza podataka bit će provedena na rezultatima makro ispitivanja, ispitivanje tvrdoće i ispitivanja do loma zavara.

### 7.1. Analiza rezultata makro ispitivanja

Rezultati makro ispitivanja ukazali su na značajan utjecaj parametara zavarivanja na ispitanim uzorcima, a to su:

1. Jakost struje
2. Zaštitna atmosfera
3. Vrsta inertnog plina.

Na ispitanim uzorcima 1 i 4 (tablica 6.3) vidljivo je povećanje zone utjecaja topline pri povećanim vrijednostima jakosti struje. Na uzorcima 2, 3, 5-7 (tablica 6.3) vidljivo je da se smanjenjem jakosti struje smanjuje zona utjecaja topline i samim time ne dolazi do potpune zavarljivosti. Uzorci zavareni tim parametrima ukazuju na pogreške naljepljivanja dodatnog materijala na osnovni materijal. Uzorak 8 (slika 7.1) korištena je struja jačine  $I=150$  A i postupak navarivanja prikazuje zadovoljavajući sloj visine zavara, ali zbog nedovoljne jačine struje nije došlo do potpunog zavarivanja. Uzorci zavareni u zaštitnoj atmosferi prikazuju odličnu postojanost na oksidaciju prilikom postupka zavarivanja. Neovisno o vrsti zaštitnog plina (argona – 4.8 i 5.0) nema značajnih odstupanja u kvaliteti zavara. Korištenjem inertnog plina u stroju za zavarivanje vidljiva je povećana penetracija prilikom upotrebe mješavine inertnih plinova argona i helija (tablica 6.3) kod uzoraka 3 (slika 7.2) i 6.



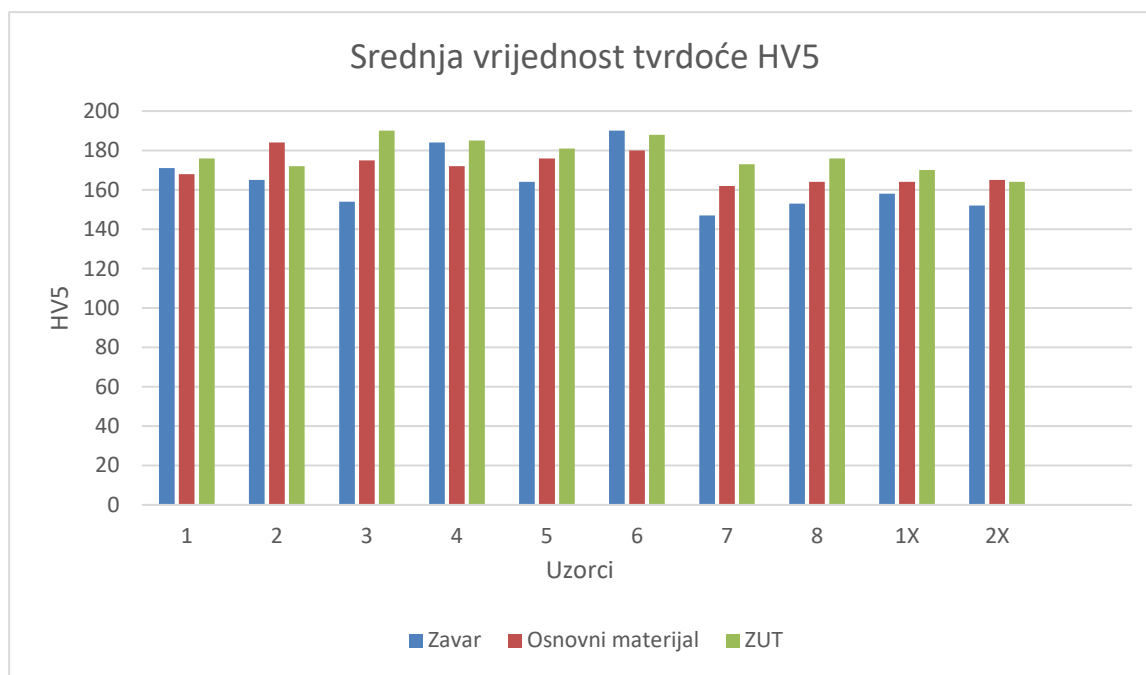
Slika 7.1. Naljepljivanje zavara na uzorku 8



Slika 7.2. Pogreška zavarenog spoja 3

## 7.2. Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće

Rezultati ispitivanja tvrdoće u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i zavaru grafički prikazani su na slici 7.1. srednje vrijednosti



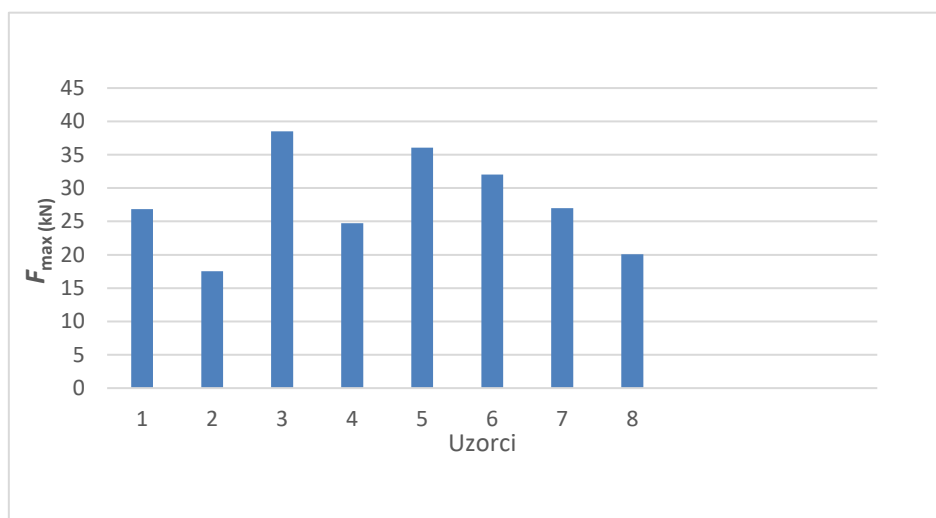
Slika 7.3. Srednja vrijednost ispitane tvrdoće uzoraka

Vidljiva je minimalna promjena tvrdoće u ovisnosti s parametrom jakosti struje zavarivanja. Na uzorcima 7 i 8 došlo je do vidljivog smanjenja tvrdoće prilikom nekorištenja zaštitne

atmosfera prilikom zavarivanja. Prilikom zavarivanja u zaštitnim atmosfera nisu vidljiva bitna odstupanja među dobivenim vrijednostima tvrdoće uzoraka. Vidljiva je razlika u vrijednostima tvrdoće (HV5) između uzoraka zavarenih u zaštitnoj atmosferi (uzorci 1-6) i uzoraka zavarenih bez zaštitne atmosfere (uzorci 7 i 8) prikazanih na slici 7.3.

### 7.3. Analiza podataka sila lomljenje

Analizom rezultata dobivenih razornim ispitivanjem uzoraka dobiveni su rezultati maksimalne sile  $F_{\max}$  kojom se može djelovati na zavareni spoj a da ne dođe do loma prikazani su na slici 7.4.



Slika 7.4. Grafički prikaz maksimalnih sila nastalih tijekom lomljenja zavarenog spoja

Vidljivo je da promjenom parametara zavarivanja dolazi do promjene maksimalne sile  $F_{\max}$  zavarenih spojeva. Korištenjem većih struja prilikom zavarivanja dobivene su veće maksimalne sile prikazane na uzorcima 1 i 4 dok pri smanjenim jačinama vrijednosti struje dolazi do smanjenje maksimalne sile  $F_{\max}$ . Primjenom zaštitne atmosfere dolazi do povećanja izdržljivosti zavarenog spoja na tlačno ispitivanje prikazano na uzorcima 1-6 dok bez zaštitne atmosfere uzorci 7 i 8 imaju smanjenju čvrstoću. Korištenjem mješavine inertnih plinova Ar/He dobivena je najbolja čvrstoća uzoraka (uzorci 3 i 6). Potrebno je uzeti u obzir različite duljine zavora te da se male razlike unutar zaštitne atmosfere mogu pridodati veličini uzorka.

## 8. ZAKLJUČAK

U radu je eksperimentom provedeno ispitivanje utjecaja promjene parametara na pojedinačnim mehaničkim svojstvima pri zavarivanju titanija. Na temelju dobivenih rezultata i provedene analize dobiveni su sljedeći zaključci:

1. Jakost struje  $I$  ima važan utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja, a najviše kod dijelova s debljim stjenkama. Manjim jakostima struje  $I$  moguće je nastajanje pogreške kao što je nepotpuna provarenost te naljepljivanja dodatnog materijala. Zavarivanjem uzoraka debljih od 5mm potrebno je koristiti jakosti struje veće od 200 A. Prilikom ispitivanja uzoraka debljine stjenke debljih od 6 mm primijećeno je da smanjenjem jakosti struje  $I$  manjih od 200 A dolazi do nastajanja prikazanih pogrešaka te samim time potrebno je ponovo pripremiti spoj za postupak zavarivanja. Utjecaj pogrešaka nastalih zbog nedostatka unosa topline rezultira neprihvatljivim mehaničkim svojstvima.
2. Titanij je vrlo reaktivan materijal koji pri povišenim temperaturama na zraku stvara okside koji mogu negativno utjecati na mehanička svojstva i sam izgled zavara. Zavarivanjem uzoraka u zaštitnoj atmosferi i na zraku primijećene su bitne razlike između spojeva. Bitna razlika je u nastajanju oksida u zavaru što rezultira bitnim smanjenjem mehaničkih svojstava samog spoja kao što su smanjena tvrdoća i smanjena otpornost na lom. Uostalom moguće je nastajanje i nepoželjnog obojenja zavara koji ukazuje na stupanj oksidacije zavarenog spoja.
3. Zavarivanjem titanija korištenjem različitih inertnih plinova kao što su argon 4.8, argon 5.0 i mješavina argona i helija vidljive su razlike na ispitanim uzorcima prilikom zavarivanja. Prilikom korištenja različitih vrsta inertnog plina argona nisu vidljive promjene u zavaru i svojstvima dok je prilikom zavarivanja mješavinom argona i helija došlo je do poboljšanja mehaničkih svojstava radi bolje penetracije u zavar.
4. Prilikom zavarivanja debljih stjenki uzoraka potrebno je koristi dodatni materijal većeg promjera tj. umjesto korištenog dodatnog materijala promjera 1,6 mm trebalo bi ga zamijeniti dodatnim materijalom promjera 2,4 mm. Do ovog zaključka se došlo spoznajom da se dodatni materijal promjera 1,6 mm nekontrolirano tali u električnom luku povećanih jakosti struje zavarivanja ( $I = 200$  A) pa iz toga slijedi da bi se dodatni materijal promjera 2,4 mm kontrolirano talio.

Prilikom procesa zavarivanja pravilnim odabirom parametara moguće je smanjiti troškove proizvodnje, a istovremeno dobiti bolja mehanička svojstva zavarenog spoja.



## 9. LITERATURA

- [1] Ćorić, D., Alar Ž.: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, predavanja, FSB, Zagreb, 2016-2017
- [2] <https://www.britannica.com/science/titanium>, 6.10.2018
- [3] <https://www.williamhenry.com/materials/titanium/> 6.10.2018
- [4] <https://www.britannica.com/technology/titanium-processing#ref81522> 8.10.2018
- [5] Požar H.: *Tehnička enciklopedija*, Grafički zavod Hrvatske, 1987.
- [6] *Krebs, Robert E.: The History and Use of Our Earth's Chemical Elements: A Reference Guide, 2006*
- [7] <https://geology.com/minerals/ilmenite.shtml> 8.9.2018 8.10.2018
- [8] "Titanium". Columbia Encyclopedia. New York: Columbia University Press.
- [9] <http://www.tc-titanium.com/titanium-sheet/gr9-titanium-sheet.html> 8.10.2018
- [10] [https://www.webelements.com/compounds/titanium/titanium\\_tetrachloride.html](https://www.webelements.com/compounds/titanium/titanium_tetrachloride.html) 8.10.2018
- [11] <http://metalpedia.asianmetal.com/metal/titanium/titaniumsponge.shtml> 9.9.2018
- [12] <https://groupdf.com/en/press-center/news/zmmc-increased-production-of-titanium-sponge-by-32-6-for-8-months-of-2015/> 9.10.2018
- [13] <http://www.wstitanium.com/titanium/titanium-ingot.html/> 9.10.2018.
- [14] Meija, J.,: "Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report)". 2016
- [15] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=221> 9.10.2018
- [16] Ćorić D., Filetin T.: Materijali u zrakoplovstvu, Interna skripta, FSB, Zagreb, šk. god. 2010./2011
- [17] <http://hr.xinliantitanium.com/info/astm-b348-gr9-industrial-titanij-1775335.html> 9.10.2018
- [18] Krebs, Robert E.: The History and Use of Our Earth's Chemical Elements: A Reference Guide, Westport, CT, 2006
- [19] <http://www.king-titanium.com/technical-article/aviation-sr71.html> 9.10.2018
- [20] <https://www.voestalpine.com/blog/en/mobility/voestalpine-and-aerospace/> 9.10.2018
- [21] <http://theleadsouthaustralia.com.au/industries/manufacturing/filtration-system-launches-titanium-membrane/> 9.10.1018
- [22] S. Kralj, Š. Andrić.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka , FSB, Zagreb 1992.
- [23] Kazakov N.F: Diffusion Bonding of Materials, Sveučilište u Cambridgu, 1985.

- [24] P. W. Muncaster: Practical TIG (GTA) welding , Cambridge , Engleska, 1991.
- [25] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tig-welding-101> 10.10.2018
- [26] <https://www.castolin.com/en-CA/our-technologies> 10.10.2018
- [27] <https://www.killfab.com/blogs/news/exhaust-materials-stainless-vs-titanium> 10.10.2018
- [28] American Welding Society: Specification for Titanium and Titanium-Alloy Welding Electrodes and Rods, Miami, SAD, 2004.
- [29] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022508867900173> 11.10.2018
- [30] [https://bib.irb.hr/datoteka/665472.Diplomski\\_rad\\_Jure\\_Njavro.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/665472.Diplomski_rad_Jure_Njavro.pdf) 12.10.2018
- [31] Christoph Leyens, Manfred Peters Weinheim: Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications, Weinheim 2003.
- [32] [http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na\\_dipl4/5.pdf](http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/5.pdf) 13.10.2018
- [33] [http://repositorij.fsb.hr/5120/1/%C4%86osi%C4%87\\_2016\\_zavrsni\\_preddiplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/5120/1/%C4%86osi%C4%87_2016_zavrsni_preddiplomski.pdf) 13.10.2018
- [34] [http://repositorij.fsb.hr/2944/1/18\\_09\\_2014\\_Zavrsni\\_rad\\_-\\_Adnan\\_Sinanovic.pdf](http://repositorij.fsb.hr/2944/1/18_09_2014_Zavrsni_rad_-_Adnan_Sinanovic.pdf) 13.10.2018
- [35] [https://www.123rf.com/photo\\_69902914\\_visual-inspections-of-the-weld-pipe-with-a-magnifying-glass.html](https://www.123rf.com/photo_69902914_visual-inspections-of-the-weld-pipe-with-a-magnifying-glass.html) 13.10.2018
- [36] D. Pavletić: Zavarivanje I, Tehnički fakultet, Rijeka, 2011.
- [37] [http://repositorij.fsb.hr/2828/1/10\\_07\\_2014\\_Diplomski\\_rad\\_Carek.pdf](http://repositorij.fsb.hr/2828/1/10_07_2014_Diplomski_rad_Carek.pdf) 13.10.2018
- [38] <https://slideplayer.com/slide/5937189/> 13.10.2018
- [39] [http://manufacturing-science.asmedigitalcollection.asme.org/data/journals/jmsefk/934678/manu\\_137\\_06\\_061012\\_f004.png/](http://manufacturing-science.asmedigitalcollection.asme.org/data/journals/jmsefk/934678/manu_137_06_061012_f004.png/) 24.10.2018