MIG zavarivanje Titanija

Matić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:235:486786

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Matić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

MIG ZAVARIVANJE TITANIJA

Mentor: Student:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić Luka Matić

Zagreb, 2020.

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

Hvala mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju i stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada.

Zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na velikom razumijevanju, strpljenju i pomoći u svim segmentima izrade ovog rada.

Također zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Velike zahvale kolegici Mariji Karamarko, mag. ing. mech. na prijateljstvu i pomoći tijekom cijelog mog studiranja, kao i svim pozitivnim i negativnim trenucima koje smo dijelili tijekom studiranja.

Na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj obitelji – ocu Anti, majci Ružici, te braći Ivanu i Franu na ukazanome povjerenju, podršci i strpljenju tijekom studiranja.

Luka Matić

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: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA MATIĆ** Mat. br.: 0035201775

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MIG zavarivanje Titanija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MIG welding of Titanium**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada proučiti titanij kao konstrukcijski materijal, navesti njegova svojstva i područja primjene. Opisati problematiku zavarivanja titanija te navesti prikladne postupke zavarivanja s posebnim naglaskom na MIG postupak. Detaljno proučiti specifičnosti dinamičke karakteristike uređaja prilikom zavarivanja titanija tj. mogućih opcija prijenosa metala u električnom luku.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je, za zadane dimenzije osnovnog i dodatnog materijala, odabrati adekvatnu pripremu spoja sukladno pripadajućim normama te odrediti parametre zavarivanja za MIG postupak. Izraditi više zavarenih uzoraka s različitim vrijednostima unosa topline. Prilikom zavarivanja snimiti i analizirati dinamičku karakteristiku uređaja. Na izrađenim uzorcima ispitati mikrostrukturu i odrediti osnovna mehanička svojstva. Konačno, utvrditi utjecaj unosa topline i prijenosa metala u električnom luku na svojstva zavarenog spoja te dati preporuke za primjenu u proizvodnji.

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

Zadatak zadan:
24. rujna 2020.

Rok predaje rada:
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS KRATICA VI
POPIS OZNAKA VII
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. TITANIJ I NJEGOVE LEGURE 2
2.1. Općenito 2
2.2. Odabir legure titanija 3
2.3. Kristalna struktura i tipovi legura 6
2.4. Grupiranje titanija 10
2.4.1 Nelegirani (tehnički) titanij 10
2.4.2 Alfa i near-alfa (superalfa) legure 11
2.4.3 Alfa + beta legure 12
2.4.4 Beta faza 13
3. ZAVARIVANJE TITANIJA I NJEGOVIH LEGURA 15
3.1. Općenito 15
3.2. Zavarljivost legura 16
3.2.1 Tehnički titanij, alfa i near-alfa legure 16
3.2.2 Alfa-beta legure 16
3.2.3 Beta legure 17
3.3. Mikrostruktura zavara 17
3.4. Tretiranje površine nakon zavarivanja 22
3.5. Pogreške u zavarenim spojevima titanija 24
3.5.1 Pukotine 24
3.5.2 Povećanje krhkosti uslijed onečišćenja vodikom 24
3.5.3 Pore 25
3.5.4 Pad duktilnosti 26
3.6. MIG ZAVARIVANJE 26
3.6.1 Princip rada 27
3.6.2 Oprema za MIG postupak 28
3.6.3 Izvor struje 29
3.6.4 Pogonski sustav žice 31
3.6.5 Pištolj za zavarivanje 32
3.6.6 Zaštitni plinovi 33
3.6.7 Specifičnosti zavarivanja titanija i njegovih legura MIG postupkom 35
4. DINAMIČKA KARAKTERISTIKA 37
4.1. Prijenos metala električnim lukom kratkog spoja 38

4.2. Prijenos metala prijelaznim električnim lukom 39
4.3. Prijenos metala štrcajućim električnim lukom 40
4.4. Prijenos metala impulsnim električnim lukom 41
5. EKSPERIMENTALNI DIO 42
5.1. Oprema 42
5.2. Osnovni materijal 45
5.3. Dodatni materijal 46
5.4. Zaštitni plin 47
5.5. Odabir parametara 48
5.6. Zavarivanje 51
5.7. Dinamička karakteristika 59
5.7.1. Uzorak A 60
5.7.2 Uzorak B 62
5.8. Izrada makroizbruska 64
5.8.1 Uzorak A 66
5.8.2 Uzorak B 67
5.9. Tvrdoća 68
5.10. Osvrt na rezultate 72
6. ZAKLJUČAK 73
LITERATURA 74
PRILOG 76

POPIS SLIKA

Slika 1. Specifična čvrstoća naspram temperature materijala [4] 3
Slika 2. Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama za odabrane Ti-legure [2, 3] 4
Slika 3. Statička izdržljivost nakon 150 sati opterećenja za odabrane Ti-legure [2, 3] 5
Slika 4. Prikaz alotropskih modifikacija titanija. (a) Heksagonska rešetka (HCP). (b) Kubična volumno centrirana rešetka (BCC) [6] 6
Slika 5. Utjecaj legirajućih elemenata na fazne dijagrame Ti legura (shema) [4] 7
Slika 6. Trodimenzionalni fazni dijagram za razvrstavanje Ti legura (shema) [4] 8
Slika 7. Tipične mikrostrukture od alfa, alfa+beta i beta titanijskih legura. (a) Alfa u nelegiranom titaniju nakon 1h pri 699 °C. (b) Alfa+beta. (c) Igličasta zrna alfa+beta u Ti-6Al-4V leguri. (d) Beta u Ti-13V-11Cr-3Al leguri [1]. 9
Slika 8. Beta zrna u točkastom zavarivanju alfa-beta legure Ti-6Al-4V. (a)10x. (b) 240x [1] 18
Slika 9. Makrografski prikaz stupičastih beta zrna u zavaru načinjenog laserskom zrakom Ti-6Al-4V legure. 13x [1] 19
Slika 10. Makrografski prikaz veličine grubih prior-beta zrna u zavaru elektronskog snopa Ti-6Al-4V legure [1]. 20
Slika 11. Makrografski prikaz višesmjernih morfologija beta zrna u GTAW zavaru Ti-6Al-4V legure. 30x [1]. 20
Slika 12. Mikrostruktura zavarenog spoja izvedenog TIG postupkom zavarivanja nakon toplinske obrade. (a) Dozrijevano pri 482 °C na 24h, 275x. (b) Isto kao (a), 690x uvećano. (c) Dozrijevano na 593 °C na 8h, 275x. (d) Isto kao (c), 690x uvećano [1]. 22
Slika 13. Shematski prikaz nastajanja mikropora između beta-titanskih dendrita tijekom solidifikacije zavara [2, 14] 25
Slika 14. Princip rada MIG stanice. 1. Električni luk; 2. Elektroda (žica); 3. Bubanj sa namotanom žicom; 4. Pogonski kotači žice; 5. Fleksibilni vod; 6. Polikabel; 7. Pištolj za zavarivanje; 8. Izvoj struje; 9. Kontaktni vrh; 10. Zaštitni plin; 11. Sapnica; 12. Zavar [15] 27
Slika 15. Prikaz osnovne opreme za MIG zavarivanje [18] 28
Slika 16. Dijagram struje i napona karakteristike CC izvora (konstantna struja) [18] 29
Slika 17. Dijagram struje i napona karakteristike CV izvora (konstantan napon) [18] 30
Slika 18. Nepromijenjena duljina luka s CV karakteristikom (konstantnim naponom) [18] ... 31
Slika 19. a) Pogonski sustavi s dva ; b) Pogonski sustavi s četiri valjka [18] 31
Slika 20. Poprečni presjek pištolja za zavarivanje [18] 32
Slika 21. Izvođenje postupka zavarivanja u komori za zavarivanje [12] 34
Slika 22. Detaljan prikaz faza prijenosa kapljice metala električnim lukom kratkog spoja [21] 38
Slika 23. Oscilogram prijenosa metala električnim lukom kratkog spoja [21] 39
Slika 24. Oscilogram prijenosa metala prijelaznim lukom [23] 40
Slika 25. Oscilogram prijenosa metala štrcajućim električnim lukom [21] 40
Slika 26. Oscilogram prijenosa metala impulsnim električnim lukom [23] 41
Slika 27. Izvor struje Welbee P500L 43
Slika 28. Robotska stanica OTC Almega AX-V6 44
Slika 29. Osciloskop Tektronix TDS 45
Slika 30. Shema spajanja opreme za mjerenje tijekom provedbe eksperimenta [23] 45
Slika 31. Atest dodatnog materijala 46
Slika 32. Zaštitni plin Argon 4. 8 korišten za ispunjavanje komore 47
Slika 33. Komora za zavarivanje uzoraka 47
Slika 34. Zaštitni plin korišten na uređaju Welbee P500L 48

Slika 35. Navareni uzorci 1-8 50
Slika 36. Navareni uzorci 6 i 9 50
Slika 37. Pločice za kutni spoj od materijala Titan Gr. 2 51
Slika 38. Ispitni uzorci za zavarivanje 51
Slika 39. Izgled površine nakon odmašćivanja i čišćenja 52
Slika 40. Prikaz položaja robotske ruke, pištolja i uzorka tijekom zavarivanja kutnog spoja . 52
Slika 41. Prolaz 1 i 2 na uzorku A 55
Slika 42. Prolaz 3 i 4 uzorka A 56
Slika 43. Prolaz 5 na uzorku A 56
Slika 44. Prolaz 6 i 7 na uzorku A 57
Slika 45. Prolaz 1 i 2 na uzorku B 59
Slika 46. Dinamička karakteristika jakosti struje za zavar „Prolaz 5“ pri 80 A u impulsnom luku na uzorku A 60
Slika 47. Dinamička karakteristika napona za zavar „Prolaz 5“ pri 80 A u impulsnom luku na uzorku A 61
Slika 48. Dinamička karakteristika jakosti struje za zavar „prolaz 7“ pri 80 A u impulsnom luku s njihanjem na uzorku A 61
Slika 49. Dinamička karakteristika napona za zavar „prolaz 7“ pri 80 A u impulsnom luku s njihanjem na uzorku A 62
Slika 50. Dinamička karakteristika jakosti struje za zavar „prolaz 2“ pri 250 A u impulsnom luku na uzorku B 63
Slika 51. . Dinamička karakteristika napona za zavar „prolaz 2“ pri 250 A u impulsnom luku na uzorku B 63
Slika 52. Pore po presjeku zavara uzorka A 65
Slika 53. Makroizbrusak uzorka A 65
Slika 54. Makroizbrusak uzorka B 66
Slika 55. Izmjerene duljine u programu ImageJ za uzorak A 67
Slika 56. Izmjerene duljine u programu ImageJ za uzorak B 68
Slika 57. Uređaj za mjerenje tvrdoće 69
Slika 58. Graf tvrdoće zavara uzorka A 70
Slika 59. Graf tvrdoće zavara uzorka B 71

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva titanija [5]. 5
Tablica 2. Sastav i mehanička svojstva nekoliko komercijalnih razreda čistog titanija [2, 7]. 10
Tablica 3. Sastav i svojstva nekih α i near-α legura titanija [2, 8] 12
Tablica 4. Sastav i svojstva nekih α+β legura titanija [2,8] 13
Tablica 5. Sastav i svojstva nekih β- legura titanija [2, 8] 14
Tablica 6. Parametri žarenja i popuštanja za neke titanijske legure [11] 23
Tablica 7. Interpretacija indikacije ovisno o poprimljenoj boji titanija nakon obavljenog postupka zavarivanja [2, 19] 35
Tablica 8. Karakteristike Welbee P500L izvora struje za zavarivanje [24] 43
Tablica 9. Kemijski sastav Titan Gr. 2 [25] 45
Tablica 10. Mehanička svojstva Titan Gr. 2 [25] 46
Tablica 11. Parametri navarivanja uzoraka 49
Tablica 12. Parametri zavarivanja uzorka A 53
Tablica 13. Parametri zavarivanja uzorka A 54
Tablica 14. Parametri zavarivanja uzorka B 58
Tablica 15. Unos topline za uzorak A 62
Tablica 16. Unos topline za uzorak B 64
Tablica 17. Tvrdoća uzorka A 69
Tablica 18. Tvrdoća uzorka B 71

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
AC	Alternating Current
Al	Aluminij
ASTM	American Society for Testing and Materials
BCC	Body Centered Cubic
C	Ugljik
CC	Constant Current
Co	Kobalt
CP	Commercially Pure
Cr	Krom
CTWD	Contact tip to work distance
Cu	Bakar
CV	Constant Voltage
DC	Direct Current
ELI	Extra Low Interstitials
Fe	Željezo
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
H	Vodik
HCP	Hexagonal Close Packed
HRN	Hrvatska Norma
ISO	International Organization for Standardization
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Ni	Nikalj
O	Kisik
PM	Powder Metallurgy
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
Si	Silicij
Sn	Kositar
Ti	Titanij
TiAl	Titanium Aluminide
TIG	Tungsten Inert Gas
V	Vanadij
Zr	Cirkonij
ZUT	Zona utjecaja topline
α	Alfa
β	Beta

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost
E	GPa	Modul elastičnosti
I	A	Jakost struje
m	kg	Masa
Q	J/mm	Unos topline
Re	MPa	Granica razvlačenja
Rm	MPa	Vlačna čvrstoća
t	J/mm	Unos topline
U	V	Napon
v_{zav}	mm/s	Brzina zavarivanja
η		Stupanj korisnosti postupka zavarivanja
λ	Wm^{-1}/K^{-1}	Koeficjent toplinske vodljivosti
ρ	kg/m^3	Gustoća

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je odrediti utjecaj unosa topline na svojstva i izgled kutnog zavara od materijala titanija. U teorijskom dijelu rada iznesene su karakteristike titanija i njegovih legura kao karakteristike zavarljivosti pojedinih faza legura. Opisan je ukratko MIG postupak kojim su izrađeni zavari, kao i dinamička karakteristika prijenosa metala.

U eksperimentalnome dijelu rada provedeno je zavarivanje kutnog spoja impulsnim MIG načinom prijenosa metala. Također, izvršeno je izrada makroizbruska i ispitivanje tvrdoće. Analizom dobivenih rezultata doneseni su zaključci o MIG zavarivanju titanija s obzirom na unesenu toplinu, penetraciji zavara i zaštitnoj atmosferi.

Ključne riječi: titanij, MIG zavarivanje, unos topline

SUMMARY

The aim of this thesis is to determine the influence of heat input on the properties and appearance of angular weld made of titanium material. In the theoretical part of the paper, the characteristics of titanium and its alloys are presented as the weldability characteristics of individual phases of alloys. The MIG process by which welds are made is briefly described, as well as the dynamic characteristic of metal transfer.

In the experimental part of the work, the welding of the butt joint by pulsed-spray MIG method of metal transfer was performed. Also, macroetching and hardness testing were performed. By analyzing the obtained results, conclusions were made about MIG welding of titanium with regard to the heat input, weld penetration and protective atmosphere.

Keywords: titanium, MIG welding, heat input

1. UVOD

Titanij je otkriven 1790., ali nije postojao u čistom obliku sve do ranih 1900-ih. Štoviše, metal se nije široko upotrebljavao sve do druge polovice dvadesetog stoljeća. Zadnjih 50 godina sve je veća primjena titanija u konstrukcijske svrhe. Veći dio ove primjene dolazi u vojnim primjenama u zrakoplovima poput aviona SR71 ili plinskih turbina. U novijoj upotrebi nalaze se stavke kao što su golf klubovi i bicikli. Titanij je našao svoju ulogu u mnogim industrijama, zahvaljujući svojoj jedinstvenoj gustoći, korozijskoj postojanosti i prednostima relativne čvrstoće u odnosu na konkurentne materijale kao što su aluminij, čelika i superlegure [1].

Glavna podjela titanijevih legura vrši se prema mikrostrukturnom stanju, pa tako ovisno o udjelu unutar mikrostrukture razlikuju se različiti tipovi legure. Svaki od tipova legura i njihova svojstva bit će opisani u radu. Upravo ovisno o mikrostrukturnom stanju, svojstva titanijevih legura mogu značajno varirati [2, 3].

Osim utjecaja na mehanička svojstva mikrostruktura utječe i na zavarljivost. Određene mikrostrukture prilikom zagrijavanja prelaze temperature prekristalizacije čime su im narušena mehanička svojstva u odnosu na osnovni materijal. Različitim postupcima toplinske obrade moguće je ujednačiti svojstva materijala međutim to poskupljuje proces proizvodnje pa je ponekad ispravnim izborom materijala bolje izbjeći ovakve scenarije. Legure titanija mogu se spajati pomoću nekoliko različitih postupaka uključujući TIG, MIG, elektrootporno zavarivanje, zavarivanje elektronskim mlazom, zavarivanje laserom i drugi [2, 3].

2. TITANIJ I NJEGOVE LEGURE

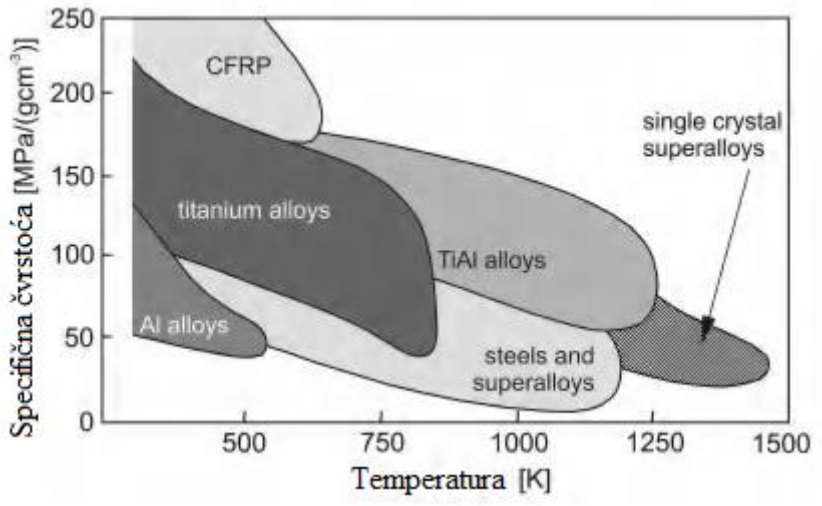
2.1. Općenito

Titanij je element niske gustoće (otprilike 60 % gustoće čelika) koji se može znatno ojačati legiranjem i procesima deformacije. Titan je nemagnetičan i ima dobra svojstva prijenosa topline. Koeficijent toplinskog širenja je nešto niži od koeficijenta čelika i manje od polovice aluminija [1].

Titanove legure prvenstveno se ističu zbog dva svojstva: visoke specifične čvrstoće i izvrsne otpornosti na koroziju. To također objašnjava njihovu preferencijalnu upotrebu u zrakoplovnom sektoru, kemijskoj industriji, medicinskom inženjerstvu i sektoru slobodnog vremena (leisure sector). Veću specifičnu čvrstoću imaju plastike ojačane ugljičnim vlaknima samo kod temperatura ispod 300 °C (Slika 1). Na višim temperaturama specifična čvrstoća titanovih legura je posebno atraktivna. Međutim, maksimalna temperatura nanošenja ograničena je ponašanjem oksidacije [4].

Budući da aluminidi titanija dijelom prevladavaju ovaj nedostatak, postali su fokusom intenzivnih napora u razvoju legure. Dok se konvencionalne titanove legure s povišenom temperaturom koriste samo do temperature malo iznad 500 °C, legure na bazi TiAl izravno se nadmeću s dobro utvrđenim visokotemperaturnim čelicima i super-legurama na bazi Ni. Na slici 1. možemo vidjeti usporedbu specifične čvrstoće s obzirom na temperaturu i vrstu materijala [4].

Titanij i legure titanija proizvode se u raznim oblicima. Titan može biti kovan, lijevan ili izrađen tehnologijom metalurgije praha (*Powder Metallurgy* – PM). Može se spojiti pomoću zavarivanja taljenjem, lemljenjem, lijepljenjem, difuzijskog vezivanjem ili spojnih elementima [1].



Slika 1. Specifična čvrstoća naspram temperature materijala [4]

2.2. Odabir legure titanija

Titanij i njegove legure koriste se prvenstveno u dva područja primjene gdje jedinstvene karakteristike ovih metala opravdavaju njihov odabir: proizvodi visoke korozijske postojanosti i proizvodi visoke čvrstoće. Za ta dva različita područja kriteriji odabira se značajno razlikuju. Primjena u području izrade proizvoda s jako dobrom korozijskom postojanošću obično koriste "nelegirani" titanij manje čvrstoće za proizvodnju spremnika, izmjenjivača topline ili reaktorskih posuda za postrojenja za kemijsku obradu, desalinizaciju ili proizvodnju energije. Nasuprot tome, primjena u izradi proizvoda kao što su plinske turbine, zrakoplovne strukture, oprema za bušenje i podmornice, ili čak i aplikacije kao što su biomedicinski implantati, okviri za bicikle i slično, tipično koriste titanijeve legure veće čvrstoće. Međutim, ova je uporaba na vrlo selektivan način ovisna o čimbenicima kao što su toplinska okolina, parametri opterećenja, korozijsko okruženje, raspoloživi oblici proizvoda, karakteristike izrade, te zahtjevi za inspekciju i / ili pouzdanost [1].

Razlozi primjene titanija su [2, 3]:

- Visoka čvrstoća; Vrijednosti vlačne čvrstoće kao i granice razvlačenja su vrlo visoke osobito kod toplinski obradivih precipitacijski očvrsnutih legura.

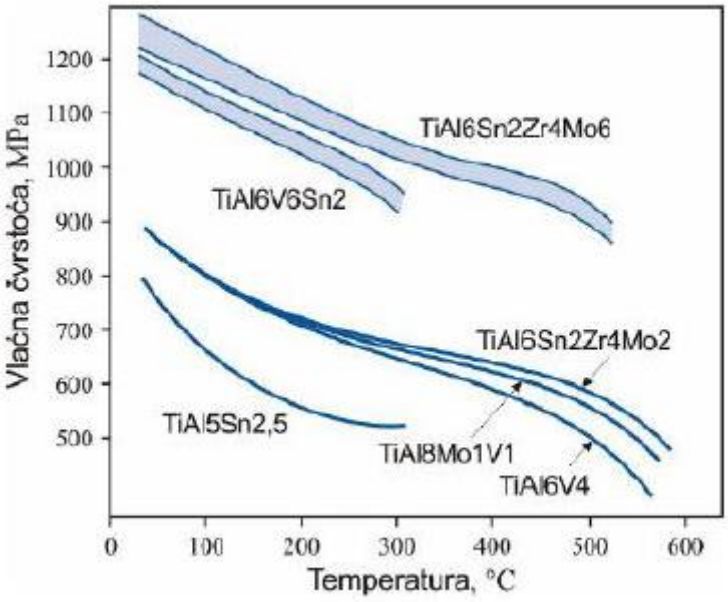
- Relativno niska gustoća; S gustoćom od oko 4500 kg/m3 titanijeve legure dvostruko su lakše od čelika i niklovih superlegura što im daje odličan omjer čvrstoće i gustoće.

- Visoka specifična čvrstoća; Visoka čvrstoća u odnosu na masu omogućuje titanijevim legurama da supstituiraju čelik u mnogim primjenama gdje je odlučujuća čvrstoća i dobra lomna žilavost. Visoku specifičnu čvrstoću zadržavaju u širokom području temperatura od

-200 °C do +550 °C.

- Visoka dinamička izdržljivost; Ti-legure imaju mnogo bolju dinamičku izdržljivost od Al-legura.

- Toplinska stabilnost; Legure titanija postojane su do temperatura +315 °C odnosno +600 °C, ovisno o tipu legure, prikazano na slici 1.

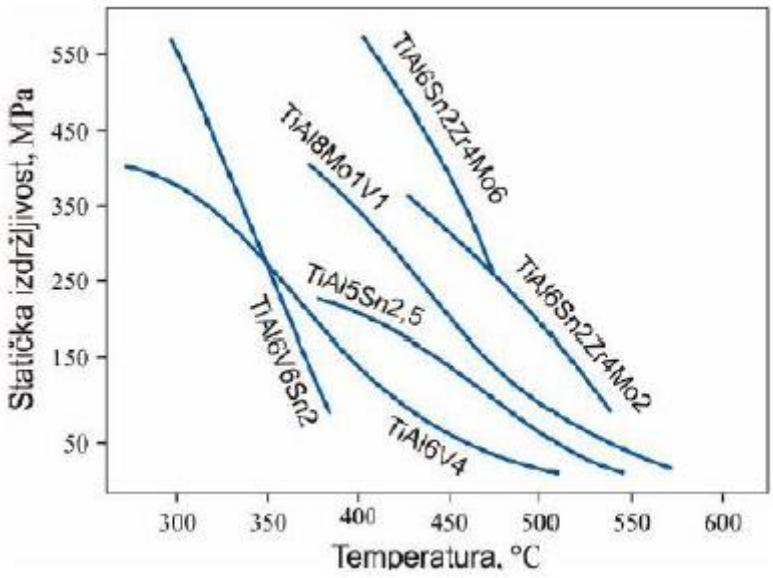


Slika 2. Vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama za odabrane Ti-legure [2, 3]

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

- Odlična biokompatibilnost; Ti i njegove legure otporne su na djelovanje tjelesnih tekućina što im daje značajnu prednost u primjeni u medicini.

- Dobra otpornost na puzanje; Određene legure titanija (α legure) posjeduju znatnu otpornost na puzanje. Statička izdržljivost nekih Ti-legura prikazana je na slici 2.



Slika 3. Statička izdržljivost nakon 150 sati opterećenja za odabrane Ti-legure [2, 3]

U tablici 1 prikazana su fizikalna i mehanička svojstva titanija.

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva titanija [5].

Gustoća, kg/m^3	4500
Talište, ^{o}C	1670
Modul elastičnosti, MPa	110 000
Toplinska rastezljivost, 10^{-6}/K	9
Vlačna čvrstoća*, Mpa	250-700
Istezljivost*, %	>10

*ovisno o stanju obrade i udjelu nečistoća

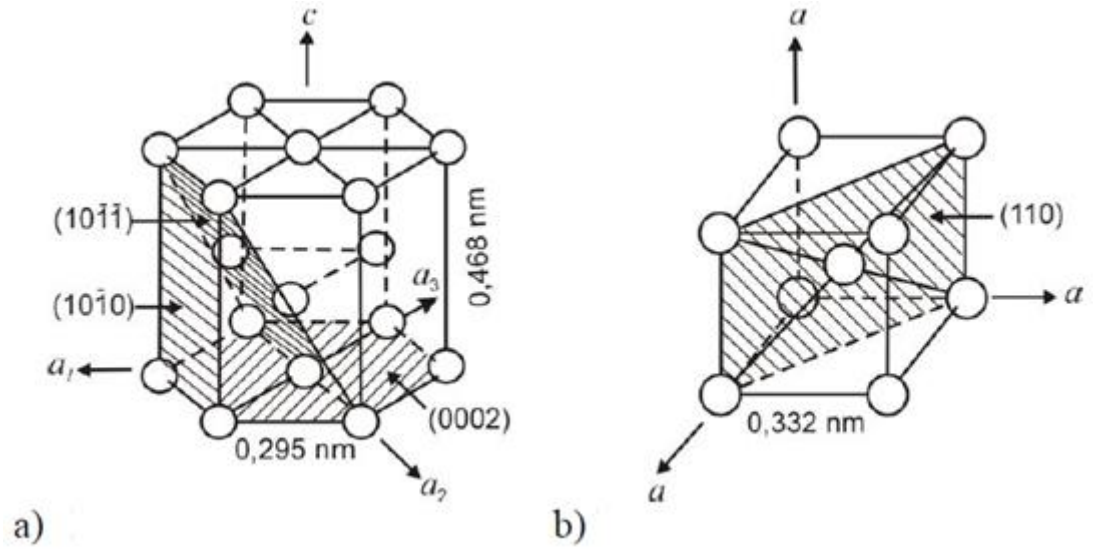
Osim spomenutih svojstava bitno je spomenuti i koeficijent toplinske vodljivosti λ=16,75 Wm^{-1}K^{-1}. Njegov koeficijent toplinske rastezljivosti niži je od onog za čelik i duplo manji od aluminijevog što osigurava visoku dimenzijsku postojanost dijelova od titanija. Dijelovi od titanija pokazuju i veću krutost od aluminijevih, a manju od čeličnih [2, 3].

Sposobnost hladnog oblikovanja je ograničena i ako se zahtijevaju veći stupnjevi deformacije potrebna su česta međužarenja. Pri višim temperaturama oblikovljivost je bolja ali

se pri tom ne smije prijeći 950 °C zbog velikog afiniteta titanija prema kisiku, vodiku, dušiku i ugljiku. Pri toplinskoj obradi ili tijekom deformiranja na zraku površina se prekriva oksidnom prevlakom koju je potrebno naknadno mehanički ukloniti. Zato se sitni dijelovi toplinski obrađuju u vakuumu ili zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Titanij je teško obradljiv odvajanjem čestica jer je vrlo žilav pa se lijepi a postoji opasnost od zapaljenja strugotine. Sve vrste titanijevih legura dobro su zavarljive u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumu [2, 3].

2.3. Kristalna struktura i tipovi legura

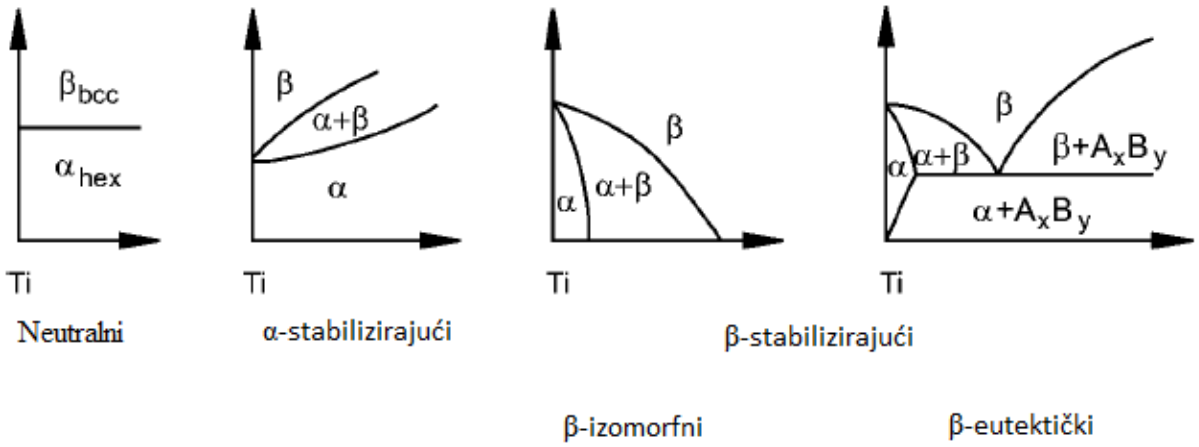
Titanij pokazuje transformaciju alotropske faze pri 882 °C, mijenjajući se od kubične kristalne strukture (β faze) pri višim temperaturama do heksagonske kristalne strukture (α faze) pri nižim temperaturama. Na točnu temperaturu transformacije snažno utječu intersticijalni i supstitucijski elementi te stoga ovisi o čistoći metala [6].



Slika 4. Prikaz alotropskih modifikacija titanija. (a) Heksagonska rešetka (HCP). (b) Kubična volumno centrirana rešetka (BCC) [6]

Ovisno o njihovom utjecaju na temperaturu beta-tranzicije, legirajući elementi titanija klasificiraju se kao neutralni, α-stabilizatori ili β-stabilizatori (slika 5). The α- stabilizacijski elementi proširuju fazno polje na veće temperature, dok β-stabilizirajući elementi prebacuju fazno polje na niže temperature. Neutralni elementi imaju samo blagi utjecaj na temperaturu β -tranzicije. Osim redovitih legirajućih elemenata, prisutni su i prije svega nemetalni elementi veličine oko 100 ppm kao nečistoće [4].

Među α -stabilizatorima aluminij je daleko najvažniji legirajući element titanija. Intersticijski elementi kisik, dušik i ugljik također pripadaju ovoj kategoriji. Uz širenje faznog polja na veće temperature, α-stabilizatori razvijaju dvofazno α+β polje. β-stabilizirajući elementi se dijele na β-izomorfne i β-eutektičke elemente. Od toga β-izomorfni elementi, npr. Mo, V i Ta, daleko važniji zbog svoje veće topljivosti u titaniju. S druge strane, čak i vrlo male količine β-eutektičkih elemenata, npr. Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Si i H, mogu dovesti do stvaranja intermetalnih spojeva. Sn i Zr smatraju se neutralnim elementima jer nemaju (gotovo) nikakav utjecaj na α / β faznu granicu. Što se tiče čvrstoće, one nisu neutralne jer prvenstveno jačaju α-fazu [4].



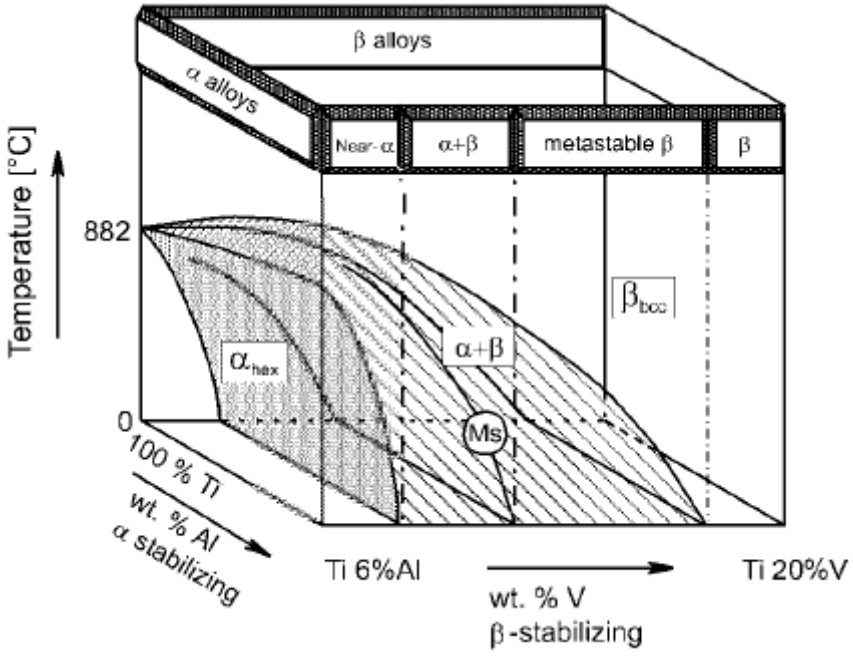
Slika 5. Utjecaj legirajućih elemenata na fazne dijagrame Ti legura (shema) [4]

Uobičajeno je da se legure razdvoje u četiri kategorije, koje se odnose na prisutne faze. Kategorije legura obično se nazivaju [4]:

- α (alfa)
- Near-alfa
- α+β (alfa plus beta)
- β (beta)

Ponekad se razmatra i kategorija near-beta ili metastabilna beta legura. To je shematski prikazano u trodimenzionalnom faznom dijagramu, koji je sastavljen od dva fazna dijagrama s α– i β- stabilizirajućim elementom (slika 6). Prema ovoj shemi, alfa-legure su komercijalno čisti (cp) titanij i legure isključivo legirane s α-stabilizirajućim i / ili neutralnim elementima. Ako se dodaju manje količine β -stabilizirajućih elemenata, one se nazivaju near-alfa legurama. α+β legure, najčešće korištena skupina legura, pri sobnoj temperaturi imaju

volumni udio β-faze u rasponu od oko 5 do 40%. Ako se udio β-stabilizirajućih elemenata dodatno poveća na razinu u kojoj se više ne transformiraju u martenzit nakon brzog gašenja, legure su još uvijek u dvofaznom polju i postiže se klasa metastabilnih beta legura. Konačno, jednofazne beta-legure označavaju kraj ljestvice uobičajenih legura titanija [4].



Slika 6. Trodimenzionalni fazni dijagram za razvrstavanje Ti legura (shema) [4]

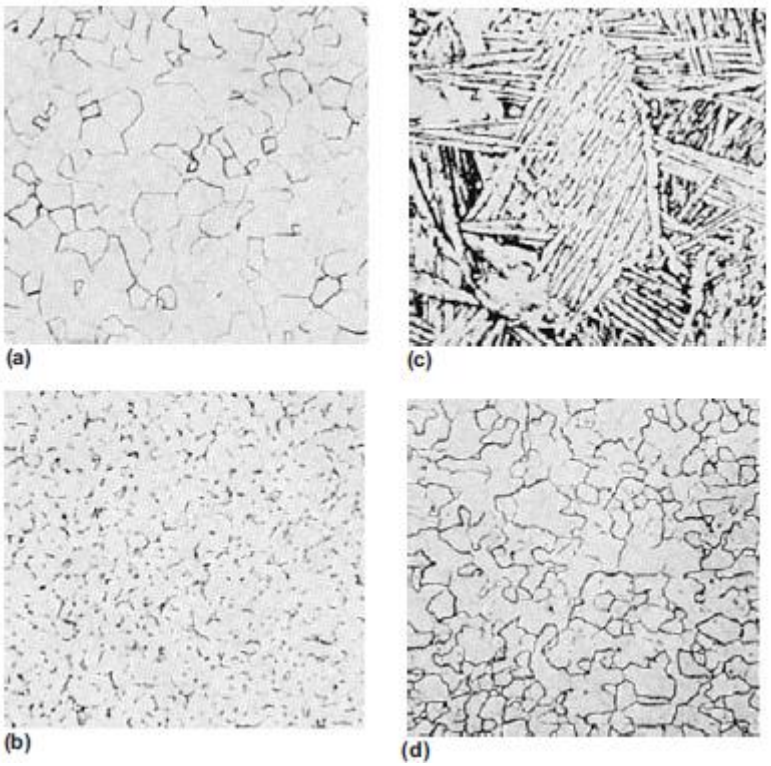
Ove kategorije označavaju opći tip mikrostrukture nakon obrade. (Mikrostruktura se odnosi na faze i strukturu zrna prisutnih u metalnoj komponenti.) Navedene kategorije opisuju podrijetlo mikrostrukture u odnosu na osnovnu kristalnu strukturu koju preferira sastav legure. Tako legura sa samo prisutnom alfa fazom postaje alfa legura. Kristalna struktura i struktura zrna (tj. Mikrostruktura) nisu sinonimi. Oba moraju biti specificirana kako bi se u potpunosti identificirala legura i njezina očekivana mehanička, fizička i korozijska ponašanja. Važno je imati na umu da, iako oblik i veličina zrna utječu na ponašanje, promjene kristalne strukture (od alfa do beta i natrag) koje se javljaju tijekom obrade igraju veliku ulogu u definiranju svojstava titanija [1].

Ponašanje kristalnih rešetki.

Alfa legura (tako opisana zato što njegova kemija favorizira alfa fazu) normalno ne formira beta fazu pri zagrijavanju. Near-alfa (ponekad nazvana "superalfa") legura tvori samo ograničenu beta fazu pri zagrijavanju, pa može izgledati mikrostrukturno slično alfa leguri kada

se gleda na nižim temperaturama. Alfa-beta legura je ona za koju sastav dopušta potpunu transformaciju u beta pri zagrijavanju, ali se transformira natrag u alfa plus zadržanu i / ili transformiranu beta pri nižim temperaturama. Sastav near-beta ili beta legure je onaj koji nastoji zadržati, na neodređeno vrijeme na nižim temperaturama, beta fazu koja se formira pri visokim temperaturama. Međutim, beta koja nastaje pri početnom hlađenju do sobne temperature je metastabilna. Ovisno o kemiji, može izazvati precipitaciju sekundarne faze tijekom toplinske obrade [1].

Mikrostrukture pokazuju varijacije u morfološkom razvoju alfa faze i beta faze, koje ovise o kemiji legure, prethodnom radu, temperaturi iz koje se hladi i brzini hlađenja. Tipične titanijske mikrostrukture prikazane su na slici 7. Te slike predstavljaju strukturu, ali nisu sveobuhvatne jer stvarna mikrostruktura ovisi o sastavu i procesima obrade [1].



Slika 7. Tipične mikrostrukture od alfa, alfa+beta i beta titanijskih legura. (a) Alfa u nelegiranom titaniju nakon 1h pri 699 °C. (b) Alfa+beta. (c) Igličasta zrna alfa+beta u Ti-6Al-4V leguri. (d) Beta u Ti-13V-11Cr-3Al leguri [1].

2.4. Grupiranje titanija

Iako su opisane četiri kategorije ili klase titanija, u poslovnoj praksi ponekad se koristi malo drugačija klasifikacija ili grupiranje. Na primjer uobičajeno je grupirati titanijske materijale prema [1]:

- Nelegirani (tehnički) titanij
- Alfa i near-alfa legure
- Alfa-beta legure
- Metastabilna beta legura

2.4.1 Nelegirani (tehnički) titanij

Općenito poznat kao komercijalno čist (CP) titan je najslabija, ali najotpornija na koroziju verzija metala. Intersticijalni elementi kisika i dušika znatno očvršćuju "čisti" titan. CP titan iskorištava intersticijalno očvršćivanje kisika i malih dodataka drugih elemenata (npr. željeza i paladija) kako bi se proizvele različiti razredi metala koji odgovaraju različitim primjenama kao što su prikazani u tablici 2. Razredi veće čistoće (niži intersticijalni sadržaj) su niže čvrstoće i tvrdoće, a imaju nižu temperaturu transformacije od onih viših u intersticijalnom sadržaju [1, 4].

Tablica 2. Sastav i mehanička svojstva nekoliko komercijalnih razreda čistog titanija [2, 7]

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

Tehnički titanij je otporan na mnoge kiseline i lužine. Najčešće koristi u primjenama koje zahtijevaju visoku otpornost na koroziju te oblikovljivost, osobito ako se radi o primjeni kada čvrstoća materijala nije presudna. Visoka topljivost intersticijskih elemenata kisika i dušika specifične su za titanij u usporedbi s drugim metalima ali ta specifičnost stvara i poteškoće zbog oksidacije kod zagrijavanja. Dolazi i do otvrdnuća površine koje je posljedica difuzije kisika i

dušika u površinske slojeve. Pri tome se formira površinski otvrdnuti α-sloj koji se mora ukloniti nekim od mehaničkih postupaka iz razloga što smanjuje dinamičku izdržljivost i duktilnost [2, 3].

2.4.2 Alfa i near-alfa (superalfa) legure

Alfa legure su legure s relativno velikim količinama alfa stabilizatora i niskih količina beta stabilizatora. Takve su legure općenito otpornije na puzanje pri visokoj temperaturi od alfa-beta ili beta-legura. Alfa-legure koje sadrže aluminij, kositar i / ili cirkonij preferiraju se za visokotemperaturne i kriogene primjene. Međutim, duktilnost i žilavost legura bogatih alfa fazom su kompromitirane pri kriogenim temperaturama osim ako se intersticijalni sadržaj reducira. Titanijeve legure s reduciranom intersticijskom razinom označene su kao "iznimno niski intersticijalni" (ELI) [1].

Zbog ograničene fazne transformacije u uvjetima normalne toplinske obrade (struktura ostaje alfa ili približno cijela alfa), alfa-legure se obično ne mogu ojačati toplinskom obradom. Near-alfa legure ili superalfa legure nastaju uvođenjem neke količine beta stabilizirajućih elemenata u alfa-legiranu kemiju. Legure superalfe su donekle toplinski obradive [1].

Promjene strukture zrna u alfa i superalfa legurama se postižu indukcijom rekristalizacije hladnim oblikovanjem i žarenjem. Zaostala naprezanja inducirana hladnom obradom alfa i superalfe legura oslobađaju se popuštanjem ili rekristalizacijskim žarenjem [1].

Ti-8Al-1Mo-1V i Ti-6Al-2Nb-1Ta-0. 8Mo su primjeri alfa legura koji sadrže male količine beta stabilizatora. Ove legure su klasificirane kao near-alfa ili superalfa legure. Iako legure posjeduju beta fazu nakon zagrijavanja i hlađenja uglavnom se sastoje od alfa faze, te se ponašaju kao konvencionalne alfa legure. Budući da alfa faza ima veću otpornost na puzanje, superalfa legure imaju izvarednu otpornost na puzanje. I budući da se za postizanje superalfa legura često koristi aluminij, te legure imaju veću tendenciju proizvodnje alfa-2 faze koja je uključena u napetosnu koroziju titanskih legura. U superalfa legurama ograničena je otpornost na koroziju i mora se voditi računa o uporabi takvih materijala [1].

Jedan od prednosti alfa legura je njihova dobra zavarljivost, koja proizlazi iz činjenice da su alfa legure općenito neosjetljive na toplinsku obradu. Međutim alfa legure obično imaju slabiju kovljivost i uži raspon temperatura kovanja od alfa-beta i beta legura [1].

Sastav i svojstva nekih od legura iz ove skupine prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Sastav i svojstva nekih α i near-α legura titanija [2, 8]

Vrsta legure	Re, MPa	Rm, MPa	Maks. sadržaj nečistoća, %					Sadržaj legiranih elemenata, %				
			N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Ostali
TiAl5Sn2,5	760	790	0,05	0,08	0,020	0,5	0,2	5	2,5	-	-	-
TiAl5Sn2,5 ELI	620	690	0,07	0,08	0,0125	0,25	0,12	5	2,5	-	-	-
TiAl8Mo1V1	830	900	0,05	0,08	0,015	0,3	0,12	8	-	-	1	1 V
TiAl6Sn2Zr4Mo2	830	900	0,05	0,05	0,0125	0,25	0,15	6	2	4	2	0,08 Si
TiAl6Nb2Ta1 Mo0,8	690	790	0,02	0,03	0,0125	0,12	0,1	6	-	-	1	2 Nb 1 Ta
TiAl2,25Sn11Zr5 Mo1	900	1000	0,04	0,04	0,008	0,12	0,17	2,25	11	5	1	0,2 Si
TiAl5,8Sn4Zr3,5Nb 0,7Mo0,5Si0,35	910	1030	0,03	0,08	0,006	0,05	0,15	5,8	4	3,5	0,5	0,7 Nb. 0,35 Si

2.4.3 Alfa + beta legure

Alfa+beta legure sadrže jedan ili više alfa stabilizatora (npr. aluminij) i jedan ili više beta stabilizatora (npr. vanadij i molibden) u većim količinama nego near-alfa legurama. Pomicanjem satsava legure s fazne granice alfa, ove legure stvaraju značajnu beta fazu kada se zagrijavaju. Kada je prisutno dovoljno beta stabilizatora relativno je lako proći temperaturu α/β prekristalizacije (najniža temperatura gdje postoji 100% beta faza) zagrijavanjem i dobiti leguru beta faze prije naknadnog hlađenja. Alfa-beta legure mogu zadržati značajnu količinu ne transformirane beta faze nakon rastopnog žarenja i hlađenja. Pretvorba alfa faze niske temperature u beta fazu visoke temperature, koja se odvija zagrijavanjem alfa-beta legura, završena je ako temperatura zagrijavanja ide iznad temperaturu α/β prekristalizacije. Stvaranje male količine beta faze ili cjelokupne strukture of beta faze dopušta ojačavanje alfa-beta legura toplinskom obradom i starenjem [1].

Udio beta faze koji će se transformirati pri fiksnoj temperaturi ovisi o količina beta stabilizatora prisutnih u uvjetima obrade. Specifična količina beta faze dostupne za transformaciju s fiksne temperature ovisi o količini prisutnih beta stabilizatora i uvjetima

obrade. Širok raspon mikrostruktura može se generirati u alfa-beta legurama podešavanjem termomehaničkih procesnih parametara. Treba napomenuti da se beta formirana pri visokim temperaturama i transformirana u alfa ili martenzitne varijante kada se hladi, često naziva transformirana beta. Iako je ovo dobra generalizacija mikrostrukturnih promjena koje se događaju, ona ne opravdava stvarnu mikrostrukturu alfa-beta sustava [1].

Alfa+beta legure sadrže 4-16 % beta-stabilizatora. Pri sobnoj temperaturi njihova mikrostruktura tipično sadrži 10-20 % beta-faze. Moguć je i udio do 50 % beta-faze. Čvrstoća ove grupe titanijevih legura ovisi o udjelima alfa i beta-faza i o legirnim elementima otopljenim u njima kao i efektima toplinske obrade koja se temelji na metastabilnosti, tj. raspadu metastabilne β-faze. [2,9]

U tablici 4 su navedene neke α+β legure s pripadajućim svojstvima.

Tablica 4. Sastav i svojstva nekih α+β legura titanija [2,8]

Vrsta legure	Re, MPa	Rm, MPa	Maks. sadržaj nečistoća, %					Sadržaj legiranih elemenata, %				
			N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Ostali
TiAl6V4	830	900	0,05	0,1	0,0125	0,3	0,2	6	-	-	-	4V
TiAl6V4 ELI	760	830	0,05	0,08	0,0125	0,025	0,13	6	2,5	-	-	4V
TiAl6V6Sn2	970	1030	0,04	0,05	0,015	0,1	0,2	3	2	-	-	0,75Cu 6V
TiAl6Sn2Zr4 Mo6	1100	1170	0,4	0,4	0,0125	0,25	0,15	6	2	4	6	-
TiAl5Sn2Zr2 Mo4Cr4	1055	1125	0,04	0,05	0,0125	0,3	0,13	5	2	2	4	4Cr
TiAl6Sn2Zr2 Mo2Cr2	965	1035	0,03	0,05	0,0125	0,25	0,14	5,7	2	2	2	2Cr 0,25Si
TiAl3V2,5	520	620	0,015	0,05	0,015	0,3	0,12	3	-	-	-	2,5V
TiAl4Mo4Sn2 Si0,5	960	1100	0,04	0,2	0,0125	0,2	0,14	4	2	-	4	0,5 Si

2.4.4 Beta faza

Beta legure sadrže elemente poput vanadija, niobija i molibdena koji snižavaju temperaturu α/β prekristalizacije i tako potiču razvoj prostorno centrirane kubične (BCC) rešetke β-faze. Beta legure osjetljivije su na toplinsku obradu, imaju bolju duktilnost i žilavost

u žarenom stanju te znatno bolju oblikovljivost u odnosu na α i α+β legure. Osim što ih je u odnosu na α legure lakše oblikovati također je u to moguće obaviti u širem temperaturnom području. Imaju dobru zavarljivost, visoko su prokaljive, pokazuju visoku lomnu žilavost i dobru otpornost rastu napukline ali su ograničeno primjenjive pri povišenim temperaturama (do 370 °C) zbog opasnosti od puzanja. Glavni nedostatak ovih legura je krhkost pri niskim temperaturama te povišena gustoća zbog udjela elemenata koji se dodaju radi stabilizacije β-faze [2, 3, 7].

Iako osjetljive na toplinsku obradu, β legure njome mogu postići visoku čvrstoću, osobito u hladnom stanju. Toplinsko očvrsnuće ostvaruje se rastopnim žarenjem i dozrijevanjem. Određene legure iz ove grupe posjeduju visoki omjer čvrstoća/gustoća te visoku duktilnost. Gustoća ovih legura povećana je dodatkom kroma i vanadija, teških metala visoke gustoće, koji se dodaju radi stabilizacije β-faze. Sastav i svojstva nekih od legura iz ove skupine prikazani su u tablici 5 [2, 3, 5].

Beta legure imaju neke nedostatke u odnosu na alfa-beta legure. Beta-legure obično imaju veću gustoću, nižu otpornost puzanja i nižu istezljivost nakon starenja. Međutim, premda je vlačna istezljivost niža, lomna žilavost beta-legure nakon starenja općenito je veća od žilavosti alfa-beta legure nakon starenja. Općenito, klasa beta-legura služi velikoj potrebi za titanskim komponentama koje se mogu izraditi za primjenu u umjerenim temperaturama [1].

Tablica 5. Sastav i svojstva nekih β- legura titanija [2, 8]

Vrste legura	Re [MPa]	Rm [MPa]	Maks. sadržaj nečistoća [%]					Sadržaj legiranih elemenata [%]				
			N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Ostali
TiV10Fe2Al3	1100	1170	0,05	0,05	0,015	2,5	0,16	3	-	-	-	10V
TiAl3V8Cr6Mo4Zr4	830	900	0,03	0,05	0,02	0,25	0,12	3	-	4	4	6 Cr 8 V
TiV15Al3Cr3Sn3	985	1096	0,05	0,05	0,015	0,25	0,13	3	3	-	-	15 V 3 Cr
TiMo15Al3Nb2,7Si0,25	793	862	0,05	0,05	0,015	0,25	0,13	3	-	-	15	2,7Nb 0,25Si

3. ZAVARIVANJE TITANIJA I NJEGOVIH LEGURA

3.1. Općenito

Jedna od glavnih metoda spajanja konstrukcija od legura titanija u strojarstvu je zavarivanje. Učinak toplinskog ciklusa zavarivanja na metal popraćen je pojavom posebnog strukturnog i faznog stanja zavara, koji se razlikuje za određeni skup fizičko-kemijskih svojstava od osnovnog metala. Jedna od najrasprostranjenijih i najučinkovitijih vrsta zavarivanja titanijevih legura, koja omogućava proizvodnju raznih složenih konstrukcija, je zavarivanje taljenjem [10].

Svaka određena vrsta zavarivanja taljenjem (elektrolučno zavarivanje u zaštiti argona s ili bez dodatnog materijala, u jednom ili više prolaza; zavarivanje elektronskim snopom; podvodno zavarivanje itd.) ima specifičan učinak na metal. Učinak se izražava promjenom kemijskog i faznog sastava metala u zoni zavarivanja (zavar, linija staljivanja, zona utjecaja topline). To pak dovodi do različitih fizikalno-mehaničkih svojstava zavarenog spoja u različitim područjima [10].

Prema postojećim stajalištima, sve faze α, (α+β) i β titanijeve legure zadovoljavajuće se zavaraju zavarivanjem taljenjem u zaštitnoj atmosferi. Razlika u svojstvima, strukturi i nastajanju unutarnjih naprezanja legura s različitim omjerom α- i β-faza (Kβ) prikazana je u zavarenom spoju u nakon zavarivanja. Legure bazirane na α-strukturi i s malim sadržajem β-faze (Kβ <0,250) imaju zavareni spoj, koji je po svojim svojstvima i strukturi blizu osnovnog metala. Kako se količina β-faze povećava, legure s (α + β)-strukturom tvore zavareni spoj sa smanjenom plastičnošću, što je povezano s mogućim formiranjem metastabilnih α′- i ω-faza u zavarenom spoju. U legurama na bazi β-strukture, plastična metastabilna β-faza se formira u toplinskom ciklusu zavarivanja, a zavareni spojevi imaju mehanička svojstva bliska osnovnom metalu. Naknadnom toplinskom obradom (žarenje ili gašenje i starenje) mehanička svojstva i fazni sastav zavarenih spojeva približavaju se onima od osnovnog metala [10].

3.2. Zavarljivost legura

3.2.1 Tehnički titanij, alfa i near-alfa legure

Alfa i alfa-alfa legure kao što su Ti-5Al-2. 5Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo, Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo i Ti-8Al-lMo-1V uvijek se zavaruju nakon žarenja. Nelegirane titanijeve i alfa titanijeve legure imaju dobru zavarljivost jer su neosjetljive na toplinsku obradu, te zbog svoje dobre duktilnosti. Postupci zavarivanja imaju mali utjecaj na mehanička svojstva žarenih materijala u zoni utjecaja topline. Zavarivanje taljenjem hladno oblikovanih legura žari ZUT i štetno djeluje na čvrstoću hladno oblikovane legure. Stoga se sve vrste nelegiranog titanija i alfa-legura normalno zavaruju samo nakon žarenja. Općenito se preporučuje uklanjanje naprezanja zavarenih spojeva [1].

3.2.2 Alfa-beta legure

Zavarivanje alfa-beta legura može značajno promijeniti svojstva čvrstoće, duktilnosti i žilavosti kao rezultat toplinskog ciklusa kojem su izloženi. Alfa-beta legure, kao što su Ti-6Al-4V i druge slabo stabilizirane legure, mogu se uspješno spojiti nakon žarenja ili rastopnog žarenja i starenja, sa završenim starenjem tijekom popuštanja zaostalog naprezanja zavara. Niska duktilnost rezultat je zavarivanja mnogih alfa-beta legura,a uzrokovana je faznim transformacijama. Za razliku od nelegiranog titanija i alfa-legura, koje se mogu ojačati samo hladnim oblikovanjem, alfa-beta (i beta) legure mogu se ojačati toplinskom obradom; taj faktor dodaje komplikaciju pri izboru procesa spajanja [1].

Alfa-beta legure mogu se autogeno zavarivati (bez dodatnog materijala) ili s dodatnim materijalom od nelegiranog titanija ili alfa-titanijeve legure kako bi se dobio zavar koji ima nizak udio beta faze. Uporaba dodatnog materijala može poboljšati duktilnost zavara, ali neće spriječiti krhkost ZUT-a u osjetljivim legurama. Posebice, takvi postupci ne prevladavaju nisku duktilnost ZUT-a u legurama koje sadrže velike količine beta stabilizatora. Osim toga, zavari mogu biti zahvaćeni vodikovom precipitacijom. Valja napomenuti, međutim, da se pravilnom pripremom spojeva, skladištenjem dodatnog materijala i zaštitom, može izbjeći vodikovo taloženje [1].

3.2.3 Beta legure

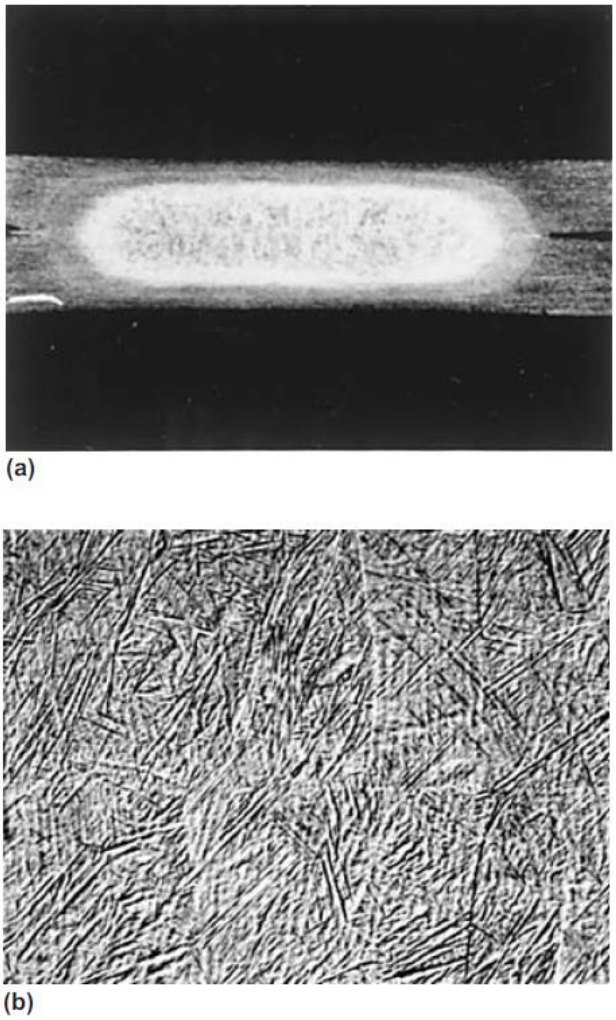
Metastabilne beta legure, kao što su Ti-13V-11Cr-3Al, Ti-11. 5Mo-6Zr-4. 5Sn, Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn i Ti-3Al-5V -6Cr-4Zr-4Mo, mogu se zavarivati u žarenom ili rastopno žarenom stanju. Zavareni spojevi imaju dobru duktilnost, ali relativno nisku čvrstoću nakon zavarivanja. Oni se, međutim, najčešće koriste u ovom stanju, jer zavareni spoj može različito reagirati na toplinsku obradu nego osnovni metal, a toplinska obrada zavarenih beta legura može dovesti do poteškoća u duktilnosti zavara [1].

Starenje se može odvijati ako su zavareni spojevi izloženi povišenim temperaturama u upotrebi, time zavari u beta-legurama mogu biti prilično krhki. Toplinska obrada za očvršćivanje zavarenih beta legura procesom starenja treba koristiti s oprezom. Da bi se dobila maksimalna čvrstoća, neke metastabilne beta legure su zavarene u žarenom stanju; zavar je onda hladno oblikovan,te se onda konstrukcija zatim rastopno žari i stari. Ovaj postupak postiže odgovarajuću duktilnost u zavaru [1].

3.3. Mikrostruktura zavara

Mikrostruktura zavarenog spoja, kao i opseg u kojem se razlikuje od termomehanički obrađenog kovanog osnovnog materijala ili odljevka i toplinski obrađenog osnovnog materijala, snažno je pod utjecajem toplinskog ciklusa zavarivanja. Dvije značajke koje su od vitalne važnosti su veličina i oblik prethodnih beta zrnaca i fazne transformacije koje se događaju tijekom hlađenja zavara. Ove karakteristike su opisane za alfa-beta (Ti-6Al-4V) i metastabilne beta-legure u ovom odjeljku [1].

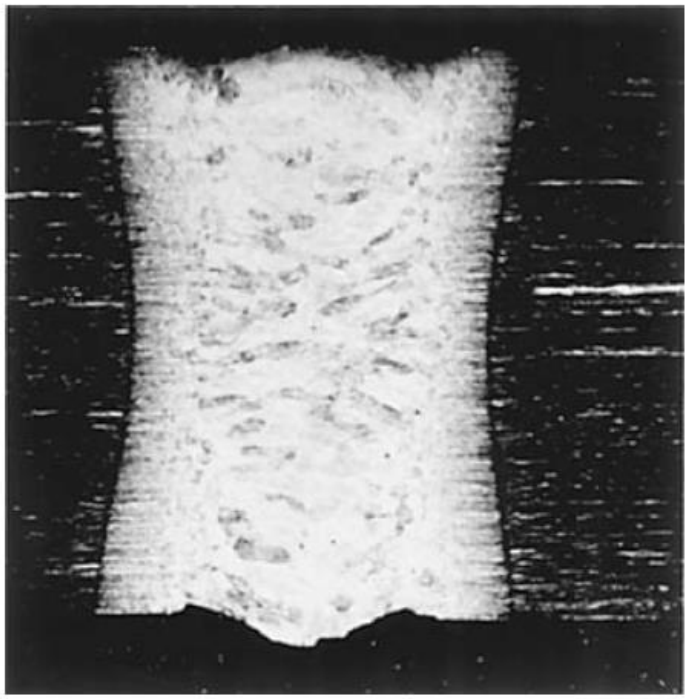
Alfa-beta legure. Mehanička svojstva zavarenih struktura u titanijevim legurama ovise o strukturnim karakteristikama svakog zavarenog područja, što opet ovisi o specifičnim toplinskim ciklusima koji se odvijaju tijekom zavarivanja i naknadnoj toplinskoj obradi nakon zavarivanja. Kao što je prikazano na slikama mikrostrukture zavara 6 do 9, zona metala zavara u titanijevim legurama karakterizirana je krupnim, stubastim zrncima prior-beta koji su nastali tijekom skrućivanja zavara. Veličina i morfologija ovih zrna ovisi o prirodi toplinskog toka koji se javlja tijekom skrućivanja zavara [1].



Slika 8. Beta zrna u točkastom zavarivanju alfa-beta legure Ti-6Al-4V. (a)10x. (b) 240x [1]

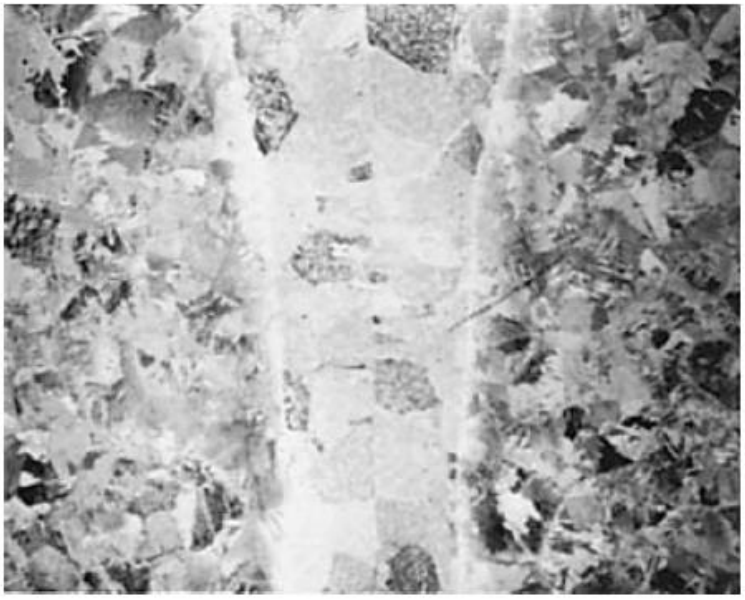
Pod jednostavnim, jednoosnim toplinskim tokom (kao što se događa u točkastom zavarivanju), beta zrna se epitaksijalno nateciraju na beta zrncima u osnovnim metalnim podlogama i stvrdnjavaju se prvenstveno u smjeru paralelnom s maksimalnim temperaturnim gradijentom (tj. paralelno s elektrodama za zavarivanje) dok ne zahvati vodoravnu središnju liniju zavarivanja (sl. 6). Kod dvodimenzionalnih uvjeta protoka topline karakterističnih za plazma luk punom penetracijom, lasersku zraku i zavarivanje elektronskim snopom, stupčasta beta zrna se stvrdnjavaju prema unutra od osnovnog metala u smjeru koji je gotovo paralelan s površinom ploče, naposljetku udarajući se formiraju vertikalnu granicu zrna na središnjoj liniji zavarivanja (sl 7 i 8). Trodimenzionalni ili mješoviti dvodimenzionalni i trodimenzionalni uvjeti protoka topline, kao što su oni prisutni u jedno-prolaznim i višeprolaznim elektrolučnim zavarivanjem netaljivom elektrodom (GTAW) i elektrolučnim zavarivanjem taljivom žicom

pod zaštitom inertnog plina (GMAW), promiču stvaranje složenijih, višesmjernih morfologija beta zrna (slika 9) [1].



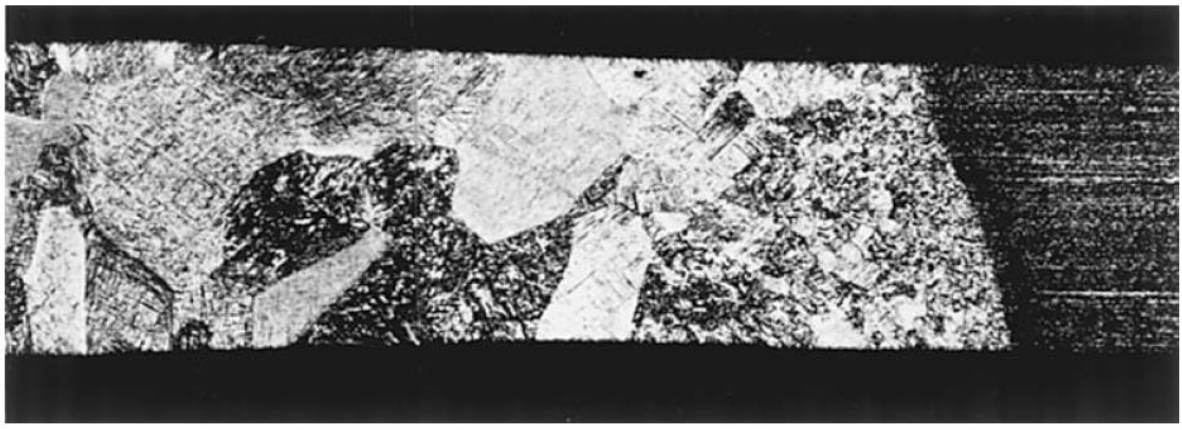
Slika 9. Makrografski prikaz stupičastih beta zrna u zavaru načinjenog laserskom zrakom Ti-6Al-4V legure. 13x [1]

Veličina beta zrna u zoni taljenja ovisi prvenstveno o unosu topline zavarivanja, pri čemu veći unos energije povećava veličinu zrna. Zbog epitaksijalnog rasta zrna veličina beta zrna u zoni metala zavara također može izravno ovisiti o veličini beta zrna ZUT-a u blizini linije taljenja. Ovaj posljednji učinak veličine zrna osnovnog metala je najznačajniji u zavarivanju iznimno krupno zrnatih lijevanih ili žarenih beta legura, kao što je prikazano na slici 8 za zavar proizveden elektronskim snopom na krupno zrnatom odljevku. Budući da se mehanička svojstva zavarivanja, osobito duktilnost, mogu degradirati grubom veličinom zrna prior-beta, važno je održavati što je moguće finije zrnaste strukture minimiziranjem ulaza energije zavarivanja [1].



Slika 10. Makrografski prikaz veličine grubih prior-beta zrna u zavaru elektronskog snopa Ti-6Al-4V legure [1].

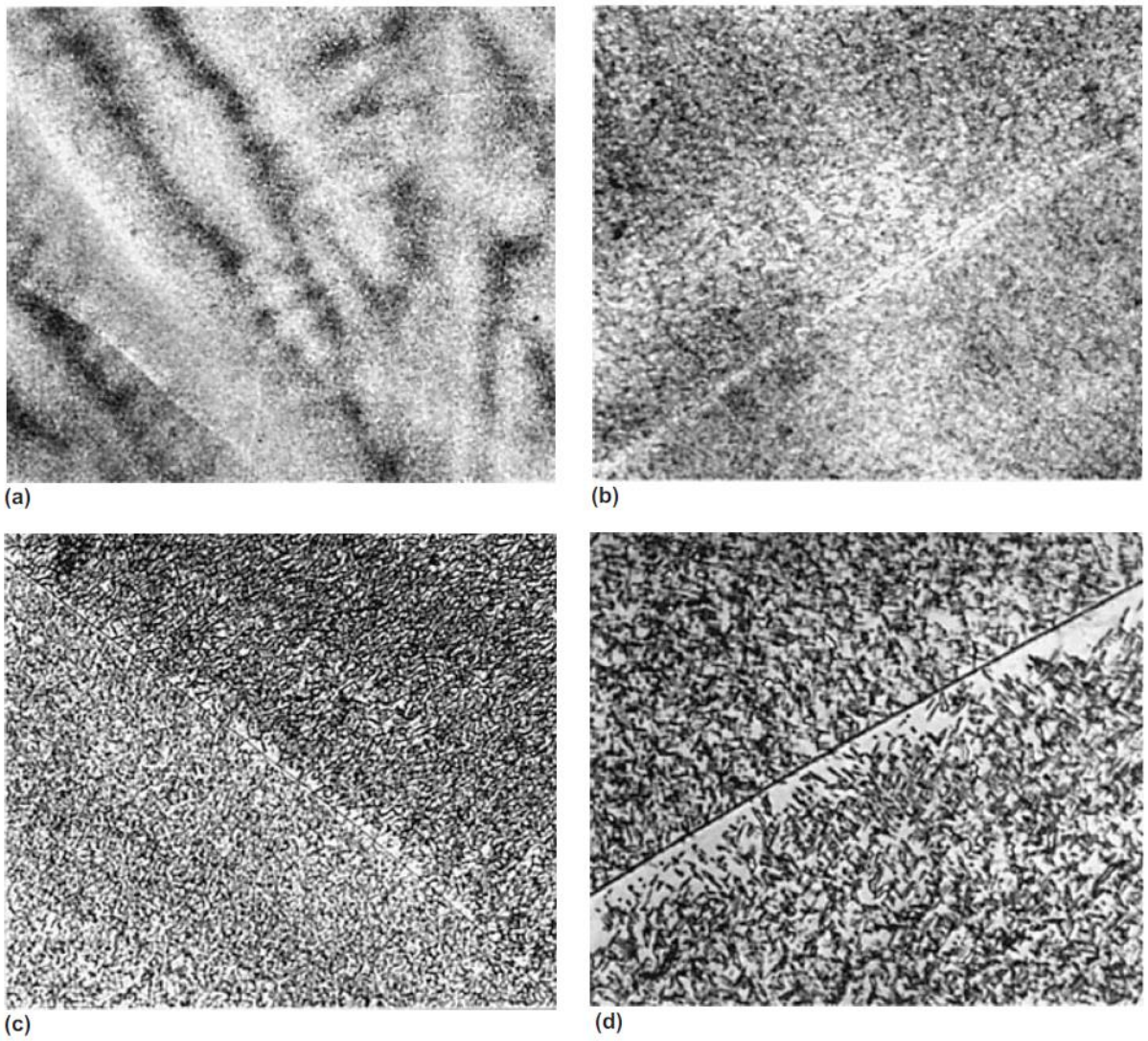
Osim veličine zrna prior-beta, na mehanička svojstva zone zavarivanja u Ti-6Al-4V značajno utječe način na koji se beta faza visoke temperature pretvara hlađenjem na nisko-temperaturnu alfa fazu. Karakteristike ove "transformirane-beta" mikrostrukture ovise prvenstveno o brzini hlađenja iznad temperature α/β prekristalizacije, na koju na odgovarajući način utječu postupak zavarivanja, procesni parametri i drugi uvjeti zavarivanja (kao što je geometrija obradaka i učvršćenje) [1].



Slika 11. Makrografski prikaz višesmjernih morfologija beta zrna u GTAW zavaru Ti-6Al-4V legure. 30x [1].

U područjima blizu ZUT-a, visoke brzine hlađenja povezane s procesima zavarivanja s koncentriranijim unosom topline, kao što su laserska zraka, elektronski snop i otporno zavarivanje (100–10 000 °C / s) potiču transformaciju beta u alfa-primarni martenzit. Ova iznimno fina, igličasta transformacija ima za posljedicu visoku čvrstoću i tvrdoću, ali relativno nisku duktilnost i žilavost. Pri nižim brzinama hlađenja povezanim GTAW, GMAW ili plazma elektrolučnim zavarivanjem (10–100 °C / s,), grublja struktura Widmanstätten alfa plus zadržane beta, ili mješavina ove strukture i alfa-prime se postiže, koja rezultira granicom tečenja i vlačnom čvrstoćom koje su bolje od onih u žarenom osnovnom metalu i duktilnost i žilavost veće od onih u potpuno martenzitnoj mikrostrukturi. U udaljenim područjima ZUT-a, mikrostrukture se sastoje od primarne alfa faze, koja potječe od mikrostrukture osnovnog metala, raspršena u matrici transformirane beta [1].

Metastabilne beta legure. Makrostrukture beta zrna ZUT-a i zrna zone taljenja u metastabilnim beta-titanijevim legurama u osnovi su identične onima u alfa-beta legurama. Zbog značajnog sadržaja beta-stabilizatora u metastabilnim beta-titanijevim legurama i relativno spore difuzivnosti tih elemenata, beta-faza visoke temperature se zadržava tijekom hlađenja zavara do sobne temperature (iako se u nekim legurama može dogoditi toplinska transformacija u omega fazu. Naknadna naknadna toplinska obrada starenja na temperaturama u rasponu od oko 450 do 650 °C potiče taloženje fine alfa faze i unutar granica zrna i duž granica zrna prior-beta (slika 10). Kroz pravilnu kontrolu temperature i vremena starenja, može se postići širok raspon kombinacija čvrstoće/duktilnosti osnovnog materijala i metala zavara [1].



Slika 12. Mikrostruktura zavarenog spoja izvedenog TIG postupkom zavarivanja nakon toplinske obrade. (a) Dozrijevano pri 482 °C na 24h, 275x. (b) Isto kao (a), 690x uvećano. (c) Dozrijevano na 593 °C na 8h, 275x. (d) Isto kao (c), 690x uvećano [1].

3.4. Tretiranje površine nakon zavarivanja

Popuštanje nakon zavarivanja se općenito preporučuje za složene konstrukcije kako bi se izbjeglo pucanje ili drugi neželjeni učinci visokih zaostalih naprezanja. Zaostala naprezanja nakon zavarivanja mogu biti dovoljno visoka za promicanje korozije na osjetljivim legurama. Kada se očekuje da će zaostala naprezanja pri zavarivanju biti problem, konstrukciju treba zagrijati do odgovarajuće temperature i držati dovoljno dugo da se rasterete naprezanja (vidi tablicu 6). Toplinska obrada žarenjem automatski smanjuje zaostala naprezanja. Općenito, minimalna temperatura za popuštanje je u rasponu od 540 do 700 °C za praktične kratkotrajne operacije. Važno je odrediti željena mehanička svojstva u zavarenom spoju prije odabira

temperature i vremena jer se može dogoditi starenje tijekom popuštanja legura. Nakon toplinske obrade, bilo kakva promjena boje može se ukloniti kemijskim čišćenjem [11].

Tablica 6. Parametri žarenja i popuštanja za neke titanijske legure [11]

	Žarenje			Popuštanje	
Legura	Temperatura, °C	Vrijeme, h	Medij hlađenja	Temperatura, °C	Vrijeme, h
Tehnički titanij	650-760	0. 1-2	zrak	480-600	0. 5-1
Alfa legure					
Ti-5Al-2. 5Sn	720-840	0. 2-4	zrak	540-650	1-4
Ti-8Al-1Mo-1V	790	1-8	zrak	580-610	2
Ti-5Al-5Sn-2Mo-2Zr	650-790	0. 5-2	zrak	600	2-8
Ti-6Al-2Cb-1Ta-0. 8Mo	790-900	1-4	zrak	600-650	0. 25-2
Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	790-900	0. 25-1	zrak	480-650	1-4
Alfa-beta legure					
Ti-3Al-2. 5V	650-760	0. 5-2	zrak	540-600	0. 5-2
Ti-6Al-4V	700-790	1-4	Zrak ili peć	540-600	2-4
Ti-7Al-4Mo	700-790	1-8	zrak	480-700	0. 5-8
Ti-6Al-6V-2Sn	700-815	1-4	Zrak ili peć	480-650	1-4
Ti-6Al-6Mo-4Zr-2Sn	700-735	2	zrak	600-700	0. 5-4
Ti-8Mn	650-760	0. 5-1	Peć do 540 °C i onda zrak	480-600	0. 25-2
Ti-10V-2Fe-3AL	790-815	0. 1-0. 25	zrak	680-700	0. 5-2
Beta legure					
Ti-13V-11Cr-3Al	700-790	0. 2-1	Zrak ili voda	480-540	0. 5-60
Ti-11. 5Mo-6Zr-4. 6Sn	700-760	0. 2-1	Zrak ili voda	720-730	0. 1-0. 25
Ti-8Mo-8V-3Al-2Fe	770-790	0. 1-0. 25	Zrak ili voda	510-600	1-4

3.5. Pogreške u zavarenim spojevima titanija

3.5.1 Pukotine

Ako je prilikom provođenja postupka zavarivanja zagrijani metal izložen zraku vrlo će lako stupiti u reakciju s kisikom, dušikom, ugljikom i vodikom. Ovi mali intersticijski elementi ulaze u kristalnu strukturu i onemogućavaju plastičnu deformaciju te povećavaju čvrstoću uz znatan pad duktilnosti. Kada onečišćenje prelazi određenu granicu, naprezanja koja nastaju uslijed zavarivanja mogu rezultirati pucanjem materijala. α legure su osobito podložne pucanju uslijed onečišćenja jer intersticijski atomi iskrivljuju HCP rešetku alfa faze [2, 24].

Pukotine uzrokovane onečišćenjem moguće je izbjeći [2, 12]:

1. Uklanjanjem površinskih onečišćenja s radnog komada četkom od nehrđajućeg čelika ili brušenjem korištenjem brusne ploče od aluminijevog oksida ili silicijevog karbida pri čemu se preporučuje nova brusna ploča

2. Temeljito odmašćivanje radnog komada acetonom

3. Dobra zaštita inertnim plinovima i održavanje zaštite po zavarivanju dok se radni komad ne ohladi na temperaturu nižu od 260 °C

4. Korištenje zaštitnog plina s dovoljno niskom točkom rosišta i dovoljno malim udjelom kisika

5. Adekvatna zaštita vrućeg kraja dodatnog materijala kako ne bi stupio u reakciju s atmosferom

3.5.2 Povećanje krhkosti uslijed onečišćenja vodikom

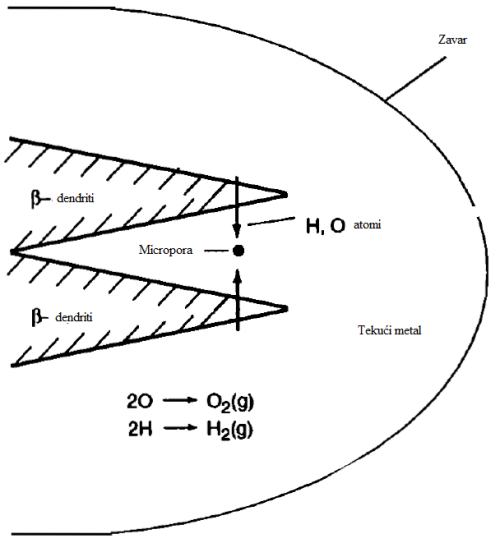
Uz prethodno spomenute pojave pukotina uslijed onečišćenja elementima iz atmosfere, vodik može uzrokovati i povećanje krhkosti. Jedan od mehanizama koji se javlja je precipitacija titanijevih hidrida u blizini pukotina. Ako je u zavaru prisutna mikropukotina, vodikovi atomi će difundirati u vrh pukotine. Potom se na lokaciji javljaju intersticijska područja unutar kojih se smještaju atomi vodika. Pri prelasku kritične koncentracije vodika, titanijevi hidridi počinju precipitaciju ispred vrha pukotine dok istovremena difuzija vodika unutar pukotine može formirati dvoatomni plin uslijed čega raste koncentracija naprezanja na vrhu pukotine. Nakon nekog vremena hidridi razaraju dio ispred pukotine i posljedično ju šire. Nakon razaranja hidridi se ponovno dijele i difundiraju u novonastali vrh pukotine čime započinje novi proces razaranja.

S obzirom na to da proces ovisi o vremenu i temperaturi mogu proći sati, dani, čak i mjeseci nakon zavarivanja prije no što pukotina postane vidljiva. Proces se sprječava minimiziranjem kontakta između vodika i metala zavara. Toplinska obrada po završetku zavarivanja pomaže u smanjenju zaostalih naprezanja i time usporava napredovanje pukotina [2, 13].

3.5.3 Pore

Pore pri zavarivanju titanijevih legura nastaju na stražnjoj strani metala zavara. Mikropore dvoatomnih plinova poput kisika i vodika su obično veličine od oko 1 μm. Formiraju se kada koncentracija monoatomnog kisika ili vodika dosegne kritičnu koncentraciju. Po formiranju (slika 12) mogu biti zarobljene ili se mogu spojiti s drugim mikroporama tvoreći makropore. Makropore mogu ostati zarobljene u materijalu ili mogu izaći na površinu metala zavara i nestati [2,13].

Njihov nastanak se izbjegava adekvatnom zaštitom metala zavara od kisika i vodika tijekom postupka zavarivanja. Pod zaštitom se podrazumijeva čišćenje površine radnog komada prije zavarivanja i zaštita u obliku inertnih plinova prilikom samog postupka. Nastanak pora prisutan je pri manjim razinama onečišćenja od pukotina, ali može biti indikator povećanja krhkosti uslijed onečišćenja vodikom [2,13].



Slika 13. Shematski prikaz nastajanja mikropora između beta-titanskih dendrita tijekom solidifikacije zavara [2, 14]

3.5.4 Pad duktilnosti

Određene legure titanija podložne su pucanju prilikom hlađenja s temperature α/β prekristalizacije. Osobito su osjetljive α+β legure koje sadrže niobij umjesto vanadija kao β-stabilizator. Legura 6Al2Nb1Ta0,8Mo je najosjetljivija na pad duktilnosti te je velika vjerojatnost da će se pri hlađenju nakon zavarivanja u zavaru javiti pukotine. [2, 13]

3.6. MIG ZAVARIVANJE

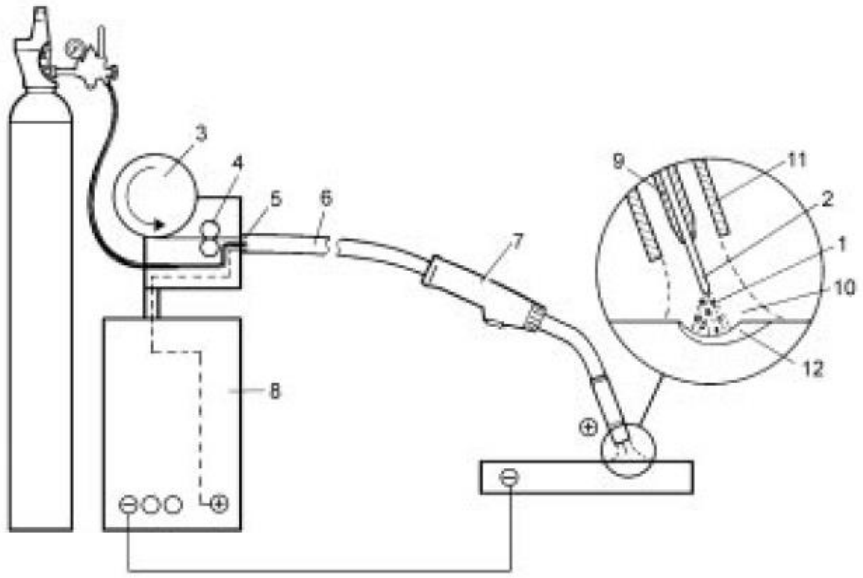
MIG postupak zavarivanja ili elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina (engl. *Gas Metal Arc Welding* – GMAW) je vrsta elektrolučnog zavarivanja. Postupak se koristi u širokom rasponu debljina ploča iako je bio najdominantniji u zavarivanju tankih ploča. To je zbog lakoće pokretanja i zaustavljanja, a time i relativno visoke produktivnosti. U usporedbi sa ručnim elektrolučnim zavarivanjem (REL), nema potrebe za čestim izmjenama elektroda i uklanjanjem troske [15].

Princip MIG zavarivanja je da se metalna žica dovodi kroz pištolj za zavarivanje i tali u luku. Žica služi dvostrukoj svrsi djeluje kao elektroda koja nosi struju i kao dodatni materijal. Električna energija za luk napaja se iz izvora energije zavarivanja. Luk i bazen rastaljenog materijala zaštićeni su zaštitnim plinom, koji je inertan. U tom kontekstu, inertni plin je onaj koji ne reagira sa rastopljenim materijalom. Primjeri plinova u ovoj kategoriji su argon i helij. Da bi se postigli optimalni učinci zavarivanja, važno je da su parametri zavarivanja pravilno postavljeni. Primjeri takvih parametara u MIG zavarivanju su napon, brzina dovoda žice i protok zaštitnog plina [15].

MIG postupak nije se primjenjivao tako široko u na titanij kao na željezne i druge legure. Mnogi povijesni razlozi zbog kojih MIG zavarivanje nije bilo pogodno za titanij više se ne primjenjuju. Za stabilan prijenos metala potrebne su velike struje, a loše površine izvorno proizvedene na titanovoj žici uzrokovale su brzo trošenje vrha kontakta. U novije vrijeme kombinacija modernih inverterskih izvora napajanja sa impulsnom strujom daje stabilniji prijenos metala, dok poboljšana površinska obrada titanskijske žice smanjuje trošenje kontaktnih vrhova tako da je problem jedva očit u razvojnom radu [16].

3.6.1 Princip rada

Na slici 13 prikazan je princip MIG zavarivanja. Luk se nalazi između radnog dijela i žice koja se neprestano dovodi kako bi zamijenila rastopljenu žicu. Žica se isporučuje na kolut ili bubanj te je potom pogonski valjci guraju žicu kroz fleksibilni vod u polikabel do pištolja za zavarivanje. Električna energija za luk napaja se iz izvora struje. Struja zavarivanja prenosi se do elektrode preko kontaktnog vrha u pištolju za zavarivanje. Taj kontaktni vrh normalno je spojen na pozitivni pol izvora napajanja, a radni dio na negativni pol. Žica malog promjera, obično oko 1 mm, dovodi se mehaniznom za dovođenje žica brzinom od nekoliko metara u minuti. Duljina luka tada se samo podešava ovisno o naponu izvora struje. Zaštitni plin koji štiti elektrodu, luk i bazen za zavarivanje od utjecaja okolnog zraka, protječe kroz sapnicu koja okružuje kontaktni vrh [15].



Slika 14. Princip rada MIG stanice. 1. Električni luk; 2. Elektroda (žica); 3. Bubanj sa namotanom žicom; 4. Pogonski kotači žice; 5. Fleksibilni vod; 6. Polikabel; 7. Pištolj za zavarivanje; 8. Izvoj struje; 9. Kontaktni vrh; 10. Zaštitni plin; 11. Sapnica; 12. Zavar [15]

Prednosti MIG postupka zavarivanja su [17] :

- Primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- Zavarivanje u svim položajima
- Zavarivanje u radionici i na terenu
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina

- Mogućnost primjene praškom punjene žice

- Široki raspon debljina

- Velika učinkovitost i proizvodnost

- Pogodan za automatizaciju

- Moguća primjena i za lemljenje

Dok su nedostatci sljedeći [17] :
- Kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite-vjetar!

- Problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij)

- Veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)

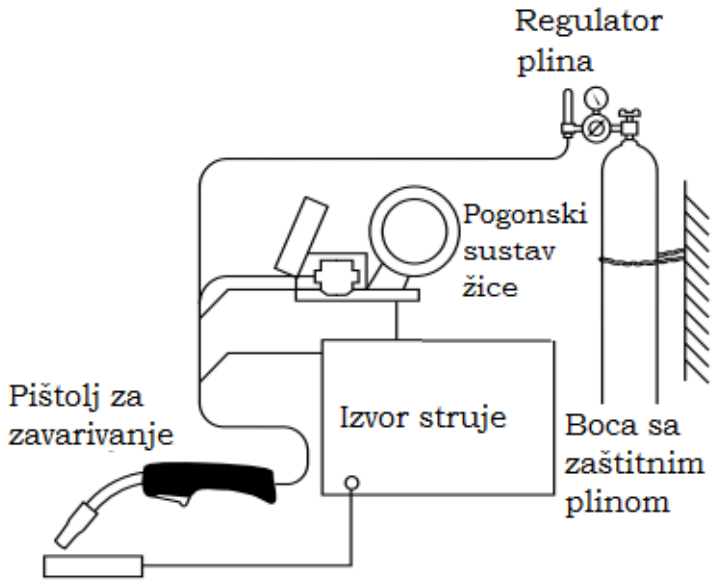
- Štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba za naknadnom obradom)

- Složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija)

3.6.2 Oprema za MIG postupak

Osnovni industrijski MIG/MAG sustav se sastoji od četiri komponente [18] :

- izvor struje
- pogonski sustav žice
- pištolj za zavarivanje i polikabel
- boca sa zaštitnim plinom i regulator plina



Slika 15. Prikaz osnovne opreme za MIG zavarivanje [18]

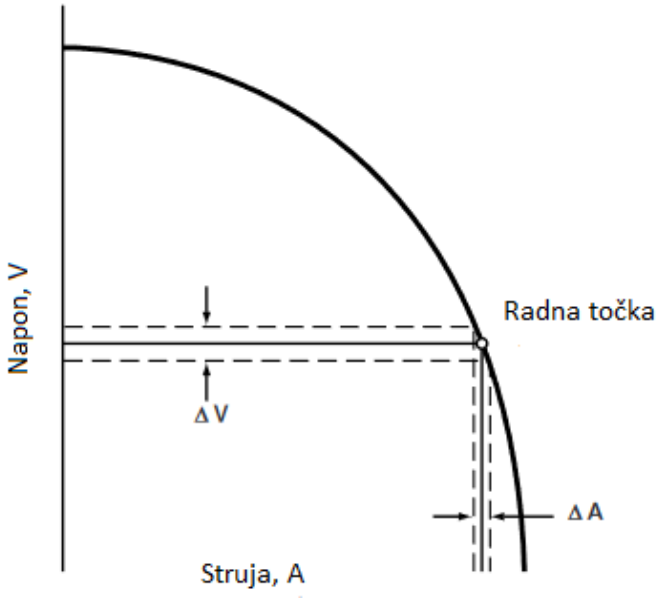
3.6.3 Izvor struje

Izvori struje uključuju izlazne karakteristike dizajnirane da optimiziraju performanse luka za određeni postupak zavarivanja. Za GMAW, izlazne karakteristike spadaju u dvije glavne kategorije [18]:

- konstantna struja
- konstantan napon

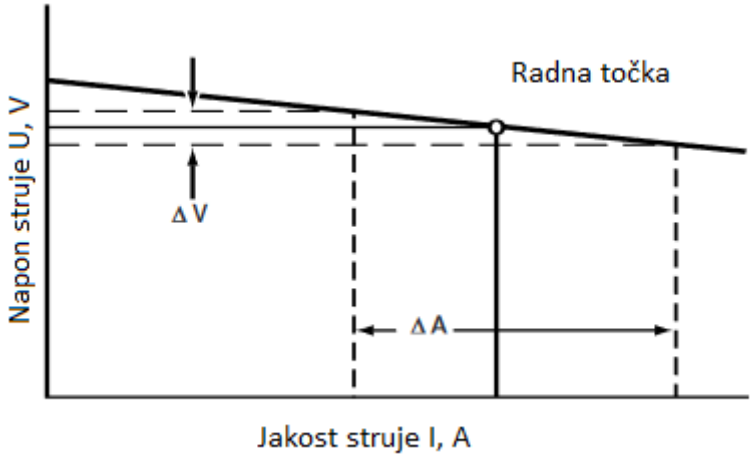
Svaki od ova dva izraza odnosi se na naponsko-amperske karakteristike izvora napajanja, a u svakom slučaju, odnos volt-ampera odnosi se na nagib izlaza. Pogledajte slike 15 i 16 za usporedbu izlaznih krivulja CC (konstantna struja) i CV (konstantni napon).

Izlazne krivulje konstante struje su se više koristili u ranijim danima GMAW-a nego danas, ali vide kontinuiranu uporabu u zavarivanju aluminija. Dizajn koristi opadajuću izlaznu krivulju, vidi sliku 15. U konstantnoj struji CTWD (kontaktni vrh do radne udaljenosti, eng. Contact tip to work distance) određuje duljinu luka. Kako se CTWD povećava, dužina luka se povećava, a kako se smanjuje CTWD,time se i dužina luka smanjuje. Ovo je predstavljalo problem poluautomatskog zavarivanja jer je teško održavati isti CTWD. Da bi se nadoknadio ovaj problem, stvoren je dodavač žica koji se kontrolira elektrolučnim naponom kako bi se kompenzirale promjene duljine luka. U ovom scenariju, kako se CTWD smanjuje, brzina dovoda žice bi se povećavala; i kako se CTWD povećava, brzina dodavanja žice bi se smanjivala [18].



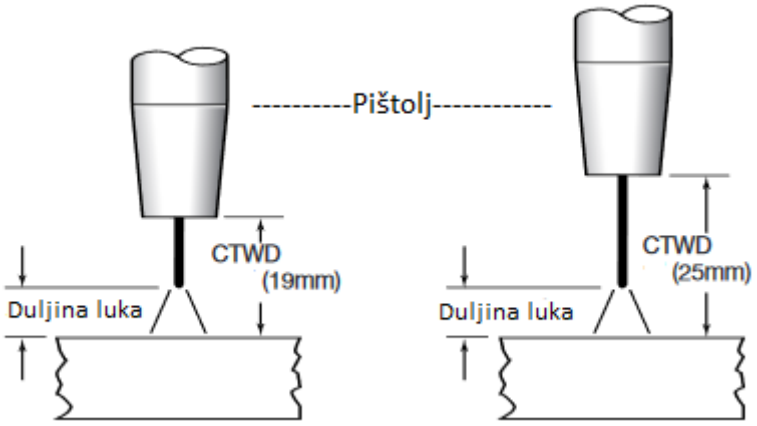
Slika 16. Dijagram struje i napona karakteristike CC izvora (konstantna struja) [18]

Izlazna krivulja konstantnog napona pruža specifični elektrolučni napon za unaprijed odabranu brzinu dovođenja žice. Nagib volt-amper krivulje relativno je ravna. Kako se CTWD povećava ovim izvorima napajanja, dolazi do smanjenja struje zavarivanja. Kako se CTWD smanjuje dolazi do povećanja struje zavarivanja. Luk u ovom slučaju postaje serijski krug, a CTWD pruža otpor struji. U oba scenarija napon ostaje isti, a duljina luka ostaje ista, vidi sliku 17 [18].



Slika 17. Dijagram struje i napona karakteristike CV izvora (konstantan napon) [18]

Izvori energije dizajnirani za GMAW zahtijevaju značajku za osiguravanje induktivnosti. Upravljanje promjenjivom induktivnošću važno je za zavarivanje kratkim spojem, jer će omogućiti precizno podešavanje luka kako bi se smanjilo prskanje. Tradicionalni izvor napajanja GMAW pružit će analogne ili digitalne brojila koja se koriste za kvantificiranje napona i struje. Ovo su bitne varijable i njihova točnost je važna u kvaliteti gotovog zavara. Razvoj dizajna transformatora omogućava upotrebu manjih pretvarača, što povećava prenosivost i smanjuje prostor potreban za izvor napajanja. To zauzvrat pruža olakšanje vrijednom proizvodnom prostoru. Izvedbeni pretvarači karakteristično omogućuju gladak i efikasan izlaz luka. Mnogi projekti uključuju uporabu softvera za zavarivanje za postizanje dobrih rezultata i kvalitete luka [18].



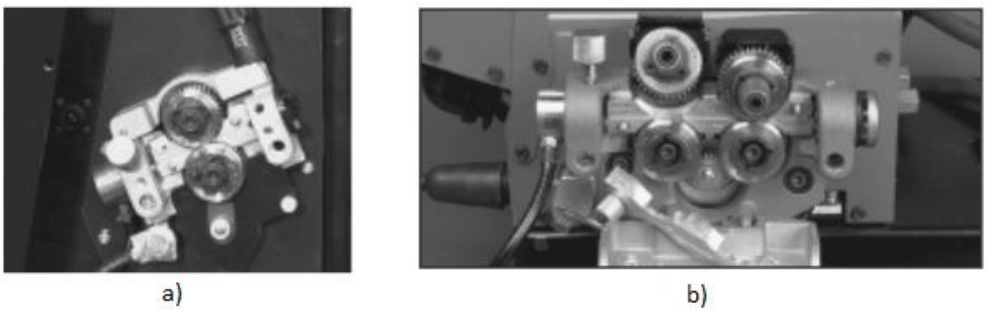
Slika 18. Nepromijenjena duljina luka s CV karakteristikom (konstantnim naponom) [18]

3.6.4 Pogonski sustav žice

GMAW izvedbe pogona žica omogućuju upotrebu širokog raspona krutom žicom ili metalnim prahom punjenom žicom promjera 0,6 - 1,6 mm. Brzina dodavanja žice može se unaprijed podesiti pomoću digitalnog očitavanja ili kalibriranog sustava označavanja na kontroli brzine dodavanja žice. Sposobnost pružanja precizne brzine žice važna je za dobru kontrolu postupka zavarivanja. Većina standardnih žičanih pogona za GMAW pruža motor s trajnim magnetom, koji zauzvrat omogućuje brzo pokretanje i zaustavljanje sustava dodavanja žice. Učinkovit raspon brzine dovođenja žicama je važan, a većina pogona pružit će raspon od 2 - 20 m/min [18].

Sustav pogona žicama pruža plinski solenoid, koji se aktivira kada pritisnete okidač GMAW pištolja. Zaštitni plinovi prije protoka i nakon protoka kontroliraju elektromagnetski krug i dodaju plin prije i nakon uspostavljanja luka [18].

Pogonski sustavi s dva ili četiri valjka isporučuju elektrodu za zavarivanje. Dvovaljni sustavi standardni su s manjim neindustrijskim sustavima, ali četverovalni sustav popularan je za industrijsku primjenu (slika 18) [18].



Slika 19. a) Pogonski sustavi s dva ; b) Pogonski sustavi s četiri valjka [18]

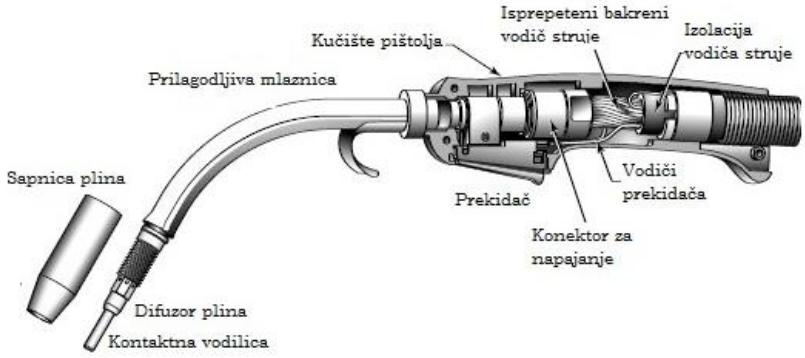
Upotreba uređaja za ispravljanje žica uključuje sposobnost žičnog pogona da pruži tri važne karakteristike luka [18]:

1. Uređaj za ispravljanje smanjuje odljev zamotane, namotane ili rasute elektrode koja se koristi za zavarivanje. To je posebno važno za legure nikla.
2. Smanjenje odljevaka poboljšava postavljanje luka elektrode u zavarni spoj.
3. Smanjenje odljevaka pomaže u smanjenju povlačenja polikabla GMAW pištolja i, zbog toga, smanjuje prerano trošenje.

3.6.5 Pištolj za zavarivanje

Pištolj za MIG zavarivanje (slika 15) je polikabelom povezan s pogonskim sustavom žice. Polikabel služi kao vod za električnu struju, zaštitni plin i dodatni materijal. Unutarnja građa polikabela ovisi o konfiguraciji izvora struje za zavarivanje, tj. koristimo li izvor struje s vodenim hlađenje ili obično zračno hlađenje pištolja za zavarivanje. Sitnija vlakna, fino namotana daju veću fleksibilnost polikabela. Pored dovoda i odvoda vode za hlađenje, u kabelu je sadržan dovod za žicu, dovod za plin te strujni pinovi za provod signala za paljenje i gašenje luka, te novih funkcija poput zaslona i kontrola na modernim pištoljima za zavarivanje. [18]

Pritiskom prekidača električna struja dovedena polikabelom preko bakrenog vodiča struje prijenosi se u kontaktnoj vodilici na žicu dodatnog materijala uz istovremen izlazak zaštitnog plina iz sapnice. [18]



Slika 20. Poprečni presjek pištolja za zavarivanje [18]

3.6.6 Zaštitni plinovi

Dostava zaštitnog plina u luk važna je za kvalitetu gotovog zavara. GMAW zahtijeva regulator za mjerenje protoka plina ili iz razvodnog sustava, koji uključuje nekoliko plinskih boca pod tlakom; skupni sustav raspodjele inertnog plina, koji se zatim cijevima dovodi na radne stanice za zavarivanje; ili iz jednog plinskog cilindra. Dizajni regulatora mjerača protoka osiguravaju dva očitanja zavarivaču: prvo očitanje je brojilo koje mjeri unutarnji tlak u cilindru i omogućava zavarivaču da prepozna koliko plina ostaje u cilindru. Drugi mjeri brzinu protoka zaštitnog plina dok izlazi iz cilindra. Brzina protoka plina mjeri se u kubičnim stopama na sat (cfh) ili u litrama u minuti (L / min). Crijevo povezuje regulator koji se regulira sa plinskim solenidom koji se nalazi u žicama. Priključno crijevo proteže se od prednjeg dijela žice do mjedene sapnice smještene na pištolju GMAW [18].

Prilikom zavarivanja titanija i njegovih legura veoma je važna čistoća površine zbog već spomenute velike reaktivnosti titanija prema elementima iz atmosfere poput kisika i dušika, ulazi vodik, mazivu i drugim metalima kada se formiraju krhki intermetalni spojevi. Prije zavarivanja potrebno je pažljivo ukloniti masnoće, boje i druge strane materijale na široj udaljenosti oko zavarenog spoja i s dodatnog materijala. Za čišćenje su prikladna otapala kao što su aceton, etanol ili toluen. Trikloretilen ili tetraklor ugljik mogu kasnije biti uzročnici napetosne korozije. Za mehaničko čišćenje površine i uklanjanje površinskoga oksidnog sloja treba koristiti četke od titanija ili nehrđajućeg CrNi čelika. Nakon što je obradak očišćen ne smije ga se dirati golim rukama jer masnoće i vlaga s ruku mogu nepovoljno utjecati na zavar. [2, 4]

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

zonu utjecaja topline uz zavar i dovod koji štiti donju stranu zavara u slučajevima gdje se zahtijeva potpuni provar [2, 3, 4].

Helij omogućava više temperature zavarivanja nego argon i time omogućuje bolju penetraciju zavara i veće brzine zavarivanja, ali zbog manje stabilnosti luka pri upotrebi helija češće se upotrebljava argon. Za veće serije, jednostavnije i jeftinije je korištenje komora za zavarivanje koje se ispune inertnim plinom. Ove komore, kao ona prikazana na slici 11, su obično izrađene od plastike, oblika polukugle, s utorima za pištolj s elektrodom i ruke zavarivača. Argon je teži od zraka pa pada na dno komore i istiskuje atmosferski zrak kroz ventil na vrhu komore[2, 3, 4].



Slika 21. Izvođenje postupka zavarivanja u komori za zavarivanje [12]

Bitno je naglasiti kako je već u vizualnoj inspekciji zavara donekle jasno izražena njegova kvaliteta, barem u pogledu kvalitete zaštite. Kao i kod drugih materijala pri vizualnoj inspekciji oblik zavara, veličina, oblik i jednoličnost nadvišenja kao i dubina penetracije pokazatelji su uspješnosti ostvarenog spoja. Olakotna okolnost je ta da je u pogledu najveće osjetljivosti titanija, a to je ona na atmosfersko onečišćenje, već vizualnom inspekcijom moguće interpretirati razinu onečišćenja. Naime, što je zaštita radnog komada lošija to se na površini stvara deblji sloj oksida koji uslijed interferencije svjetlosti poprima različite boje. Uz vizualnu

inspekciju testiranje tvrdoće je najbitnija metoda ispitivanja kvalitete zavarenog spoja. Dobar zavar ima samo malo povećanje tvrdoće u odnosu na osnovni materijal. Procjena razine oksidacije u ovisnosti o boji dana je u tablici 8. [2, 4, 19]

Tablica 7. Interpretacija indikacije ovisno o poprimljenoj boji titanija nakon obavljenog postupka zavarivanja [2, 19]

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

3.6.7 Specifičnosti zavarivanja titanija i njegovih legura MIG postupkom

U GMAW, luk se stvara između neprekidno dodavanog dodtanog materijala (žice)i osnovnog metala. Četiri metode prijenosa metala punila koriste se u GMAW [20]:

(1) prijenos metala kratkim spojem,

(2) prijenos metala mješovitim lukom,

(3) Prijenos metala štrcajućim lukom, i

(4) Prijenost metala pulsirajućim lukom.

Kod zavarivanja titanija prskanje iz procesa GMAW nepoželjno je iz više razloga, ali prvenstveno zbog vjerojatnosti lokaliziranog onečišćenja kao rezultat vrućih kapljica dodatnog materijala koji dolaze u kontakt s osnovnim metalom, i onih kapljica koje se otapaju u bazenu zavara. Zbog toga se metode prijenosa metala kratkim spojem i mješovitim lukom ne smiju koristiti za zavarivanje titana zbog velike količine prskanja koju mogu proizvesti. Prijenos metala štrcajućim lukom proizvodi dovoljno energije za spajanje titana, međutim poželjna metoda za zavarivanje titanija je pulsirajućim lukom. Zaštitni plin za zavarivanje je ili argon ili helij, ili je smjesa dvaju. Dobri rezultati postignuti su sa 75% helija + 25% argona [20].

GMAW postupak može proizvesti malu količinu crne čađe na osnovnom materijalu s obje strane zavara. Tu čađu treba ukloniti između sljedećih prolaza. Općenito, GMAW se izvodi u položenom i horizontalnom položaju. Vertikalno zavarivanje može biti moguće uz izmjene karakteristika luka. Nadglavni položaj se ne preporučuje [20].

Koristeći nedavna dostignuća u digitalnoj tehnologiji izvora napajanja GMAW postupka postaje moguće zavarivati dijelove titanija od debeloga presjeka. Uz brzinu taloženja i brzinu dodavanja žice koja premašuje tradicionalni GTAW za 10x ili više, GMAW postupak ima mogućnost dosljednog spajanja korijena zavara i smanjenje unosa topline u područje zavarivanja. Proces nudi ekonomičnu alternativu za spajanje velikih strukturnih komponenata ili opreme [20].

4. DINAMIČKA KARAKTERISTIKA

Dinamička karakteristika (*eng. Waveform characteristic)* prikazuje trenutne promjene napona i struje tijekom postupka zavarivanja zbog analiziranja ponašanja električnog luka prilikom formiranja i odvajanja rastaljene kapljice dodatnog materijala. Ovisno o postupku zavarivanja, registriraju se promjene napona i jakosti struje zavarivanja do 10 ili više kHz, pri čemu se koriste različiti sistemi za mjerenje, registraciju i obradu glavnih parametara zavarivanja (napona i jakosti struje). Trenutne vrijednosti struje i napona tijekom prijenosa metala mjere se pomoću osciloskopa, a dobiveni graf trenutnih vrijednosti struje i napona naziva se oscilogram [21, 22].

Dinamička karakteristika u električnom luku za zavarivanje dobije se na osnovi velikog broja mjerenja napona i jakosti struje zavarivanja tijekom zavarivanja. Predstavlja dakle odnos napona i jakosti struje zavarivanja koji se dobije tijekom zavarivanja. Izgled dinamičke karakteristike ovisi o mnogim čimbenicima. No u osnovi se može razlikovati dinamička karakteristika istosmjerne (Direct Current) i izmjenične struje (Alternating Current). Unutar svake grupe postoje različiti oblici prijenosa materijala, različiti postupci zavarivanja, materijali,. . . [21, 22].

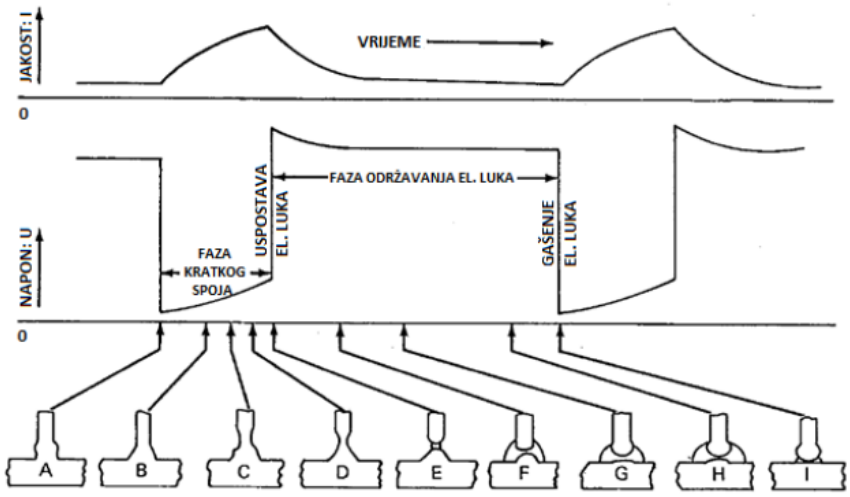
Mjerenje dinamičke karakteristike se generalno povezuje sa MIG/MAG postupkom zavarivanja, gdje se ovisno o jačini i naponu struje mogu dobiti različiti prijenosi rastaljenog metala u električnom luku. Iako postoje mnogobrojne kombinacije prijenosa metala, četiri su se prijenosa ustanovila kao industrijski dominantnima te jedan specifični prijenos metala [24]:

1) Električnim lukom kratkog spoja
2) Prijelaznim električnim lukom
3) Štrcajućim električnim lukom
4) Impulsnim električnim lukom

Ovisno o načinu prijenosa metala se drastično mijenjaju dinamičke karakteristike koje se mogu jednostavno grafički prikazati te dijagramima ukazati na prednosti i nedostatke pojedine karakteristike [21].

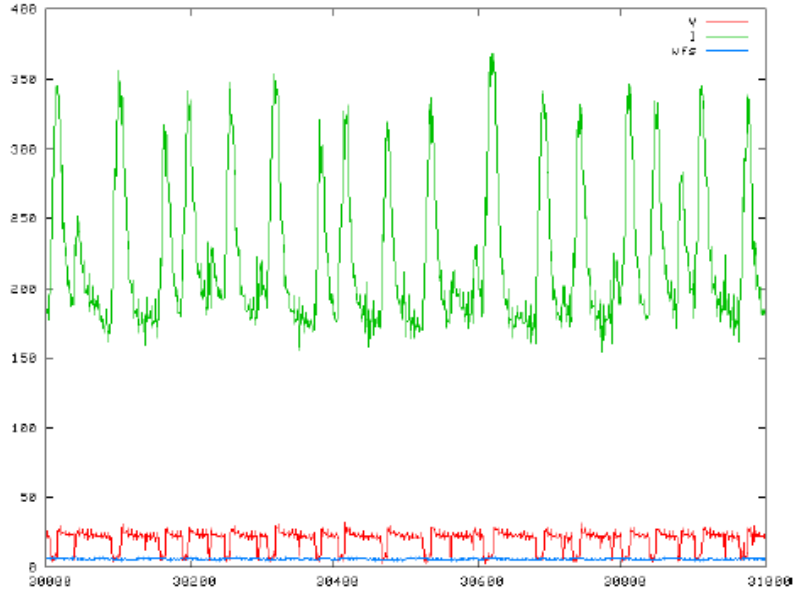
4.1. Prijenos metala električnim lukom kratkog spoja

Na slici 22 je prikazan shematski prikaz idealne dinamičke karakteristike prijenosa metala kratkim spojevima.



Slika 22. Detaljan prikaz faza prijenosa kapljice metala električnim lukom kratkog spoja [21]

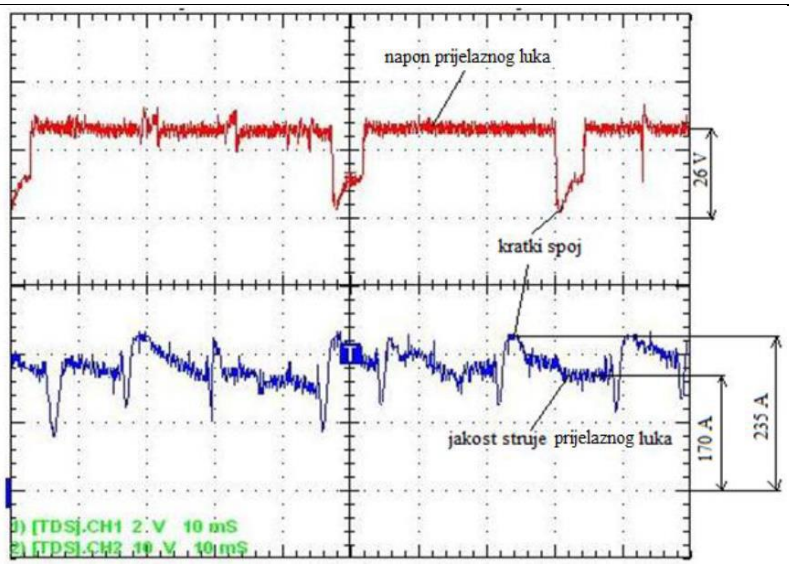
U trenutku kada je napon približno nuli dolazi do povećanja struje, te je u tom trenutku vršak elektrode u kratkom spoju s radnim komadom (faze A-D). Povećanje jakosti struje tijekom kratkog spoja pojačava elektromagnetno polje koje stvara efekt uklještenja (engl. *pinch effect*), na mjestu gdje je formirana kapljica prešla iz kruto u tekuće stanje (na radnom komadu), ali se samostalno ne može odvojiti od žice dodatnog materijala. Nakon odvajanja kapljice dodatnog materijala električni luk se ponovno uspostavlja pomoću naglog izboja napona te smanjivanjem jakosti električne struje u fazama E i F. U tim trenutcima se javlja ključan problem naglog prskanja kapljice metala jer se teži uspostavi električnog luka te zagrijavanju vrška žice kako bi se ostvarila sljedeća sekvenca prijenosa metala. Prskanje se može eliminirati ili smanjiti optimizacijom procesa delikatnim modifikacijama i promjenom induktiviteta. Do faze G i H,generirana toplina od električnog luka formira novu rastaljenu kapljicu koja mora biti dovoljno velika, ali takva da samostalno ne padne na osnovni materijal. Naglim smanjenjem napona smanjuje se visina električnog luka u fazi I, što uz dovođenje žice uzrokuje dodirivanje vrška žice s talinom i kontroliranog odvajanja kapljice metala. Pravilan oblik amplitude i duljine perioda jedne i druge krivulje ukazuje na miran i stabilan postupak. Takav dijagram prikazan je na slici 23 čije su vrijednosti dobivene u realnome vremenu mjerene osciloskopom [21,23].



Slika 23. Oscilogram prijenosa metala električnim lukom kratkog spoja [21]

4.2. Prijenos metala prijelaznim električnim lukom

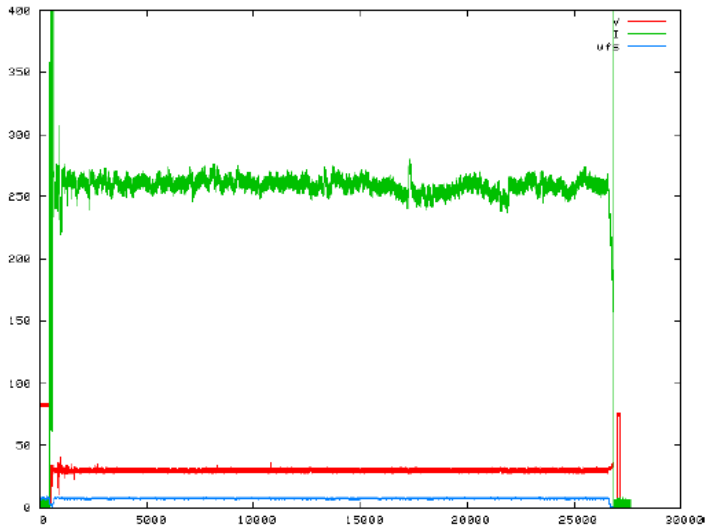
Pojava prijelaznog električnog luka se zamjećuje pri nižim vrijednostima jakosti struje, ali opet dovoljno visokim da prijenos metala u kratkom spoju učini vrlo nestabilnim što je vidljivo iz slike 24 gdje je prikazan izgled dinamičke karakteristike prijenosa metala prijelaznim lukom. Zavarivanje pomoću prijelaznog električnog luka je obilježeno mješovito stabilnim radom u kratkom spoju te nestabilnim radom štrcajućim lukom u kojem se kapljice nepravilno formiraju te prilikom dodira s rastaljenom talinom često nasilno štrcaju. Razlog tomu su uz niske vrijednosti napona struje je el. luk vrlo kratak te se veći dio žice elektrootporno zagrijava i sudara s radnim komadom što rezultira visokim unosom topline i time kapljice vrlo intenzivno rasprskavaju. Zavarivanje provedeno uz više vrijednosti napona struje manifestira visoki električni luk koji ne zagrijava radni komad i kraj žice dovoljno, čime se događa naljepljivanje ili nedovoljno pretaljivanje te nagomilavanje zavara. Unatoč ograničenjima primijeni odgovarajući skup parametara u kombinaciji s vještinom zavarivača-ovaj proces može biti industrijski prikladan [21,23].



Slika 24. Oscilogram prijenosa metala prijelaznim lukom [23]

4.3. Prijenos metala štrcajućim električnim lukom

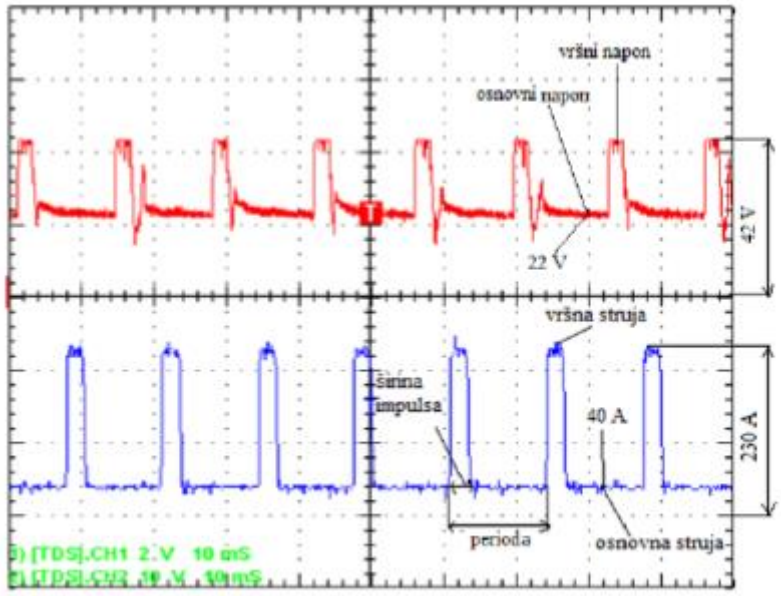
Povećanje vrijednosti napona i jakosti struje dovodi do stabilnijeg prijelaza metala u obliku mlaza sitnih kapljica koji se odlikuje visokom stabilnošću, velikim unosom topline i velikim količinama depozita. Uspostavom električnog luka se zbog visoke vrijednosti napona struje javlja visoki električni luk, što omogućava da se kratki spojevi u potpunosti eliminiraju. Visoke vrijednosti jakosti struje također stvaraju i jako magnetno polje koje „steže“ žicu čiji se vrh tali te u iznimno kratkim intervalima proizvodi mlaz sitnih kapljica. Zbog visoke struje i napona dolazi do većeg unosa topline pri ovoj vrsti prijenosa metala i time nastaje tekuća talina koja se sporije hladi te je podložnija utjecajima elemenata iz atmosfere. Na slici 25 prikazana je dinamička karakteristika takvog prijenosa metala iz kojeg se vidi stabilnost procesa [21,23].



Slika 25. Oscilogram prijenosa metala štrcajućim električnim lukom [21]

4.4. Prijenos metala impulsnim električnim lukom

Impulsno zavarivanje je izumljeno kako bi se omogućilo zavarivanje koje ima pozitivne strane štrcajućeg luka poput načina prijenosa metala sitnim kapljicama, ali uz manje struje zbog kontrole impulsa kojim se kapljica odvaja od žice. Iz oscilograma prikazanim na slici 26 je vidljivo da se radi o visoko kontroliranom, izrazito stabilnom procesu prijenosa metala. Izvor struje proizvodi dvije razine jakosti struje čije se uzlazne i silazne karakteristike modificiraju prema tvorničkom programu ili prema odabiru korisnika. Niža početna vrijednost struje služi za održavanje električnog luka tijekom koje se kapljica odvaja. Viša vršna vrijednost struje koje je značajno viša od potrebne da bi se ostvario štrcajući električni luk. Frekvencija i amplituda tj. oblik impulsa do vršne vrijednosti diktira način prijenosa metala i brzine kojom se formira kapljica. Svaki impuls odgovara jednoj otpuštenoj kapljici taline i jednakog je trajanja, jednake osnovne i vršne struje kao i napona [21,23].



Slika 26. Oscilogram prijenosa metala impulsnim električnim lukom [23]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom radu izmjerene su dinamičke karakteristike prijenosa metala impulsnim električnim lukom pri MIG zavarivanje titanija. Provedeno je mjerenje dvaju različitih unosa topline za kutni zavar. Dobiveni rezultati analitički su obrađeni te iskorišteni za izračun topline. Nakon toga je napravljena usporedba s rezultatima dobivenim u skladu s normom HRN EN 1011-1. 2009, a rezultati mjerenja su prikazani tablično i u grafičkom obliku. Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Eksperiment je proveden u tri faze. Osnovni materijal koji je upotrebljen u eksperimentu je titan Gr. 2. U prvoj fazi izvršeno je navarivanje na osnovni materijal s različitim parametrima sa svrhom odabira dvaju drastično različitih i stabilnih kombinacija parametara zavarivanja za sljedeću fazu pokusa. U drugoj fazi rada provedena su tri zavarivanja kutnog spoja s odabranim parametrima. U trećoj fazi rada izvršena je izrada makroizbruska zavarenih spojeva i analiza dobivenih rezultata.

5.1. Oprema

Navarivanje i zavarivanje ispitnih uzoraka provedeno je robotiziranim MIG postupkom koji uključuje izvor struje za zavarivanje Welbee P500L i robotska stanica OTC Almega AX-V6. A za mjerenje dinamičkih karakteristika korišten je osciloskop Tektronix TDS 210.

Izvor struje korišten u eksperimentu je Welbee P500L tvrtke DAIHENVARSTROJ. To je MIG/MAG aparat za zavarivanje sa sinergijskim funkcijama. Pogodan je za zavarivanje raznih vrsta materijala i ima sinergijske funkcije za nehrđajući čelik, aluminij i aluminijeve legure, titan i titanove legure, meke čelike i bakar. Kod ovakvog uređaja sa sinergijskim funkcijom potrebno je odabrati samo jedan parametar (u ovom slučaju jakost struje) dok uređaj određuje sam ostale parametre. Slika 27 prikazuje navedeni izvor struje za zavarivanje, a tablica 8 karakteristike istoga.



Slika 27. Izvor struje Welbee P500L

Tablica 8. Karakteristike Welbee P500L izvora struje za zavarivanje [24]

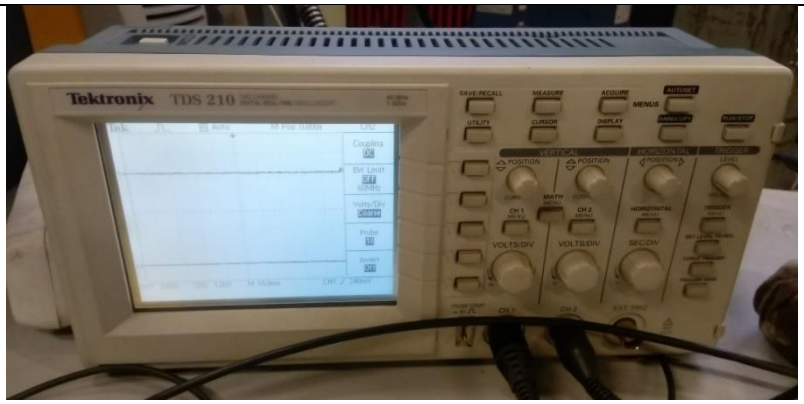
Napon napajanja (+/- 15 %), V	400
Broj faza	3
Određena ulazna snaga, kVA	25
Određeni radni ciklus, %	DC = 60 100 / Pulse = 80
Određena struja zavarivanja, A	DC = 500 410 / Pulse = 400
Određeni napon, V	DC = 39 / Pulse = 34
Jačina struje zavarivanja, A	DC = 30 - 500 / Pulse = 30 – 400
Izlazni napon, V	DC = 12 - 39 / Pulse = 12 – 34
Maksimalni određeni napon, V	80
Težina, kg	83
Dimenzije Š / V / D, mm	395 / 710 / 592

U svrhu što manje kontaminacije komore i dobivanja što točnijih rezultata unosa topline, zavarivanje titanija je provedeno tako da je pištolj za zavarivanje montiran na numerički upravljanu robotsku stanicu prikazanu na slici 28. Tako se osiguralo da je u svakom prolazu brzina konstantna, da je visina pištolja u odnosu na radni komad uvijek jednaka te je eliminirana mogućnost ljudske greške. Robotskoj ruci je za svaki prolaz bila zadana ista putanja u horizontalnoj ravnini. Na uređaju je namješten parametar jakosti električne struje *I* i kontrola luka (*eng. Arc control*), očitana je vrijednost napona *U*, a brzina zavarivanja *v* se definirala pri programiranju robota.

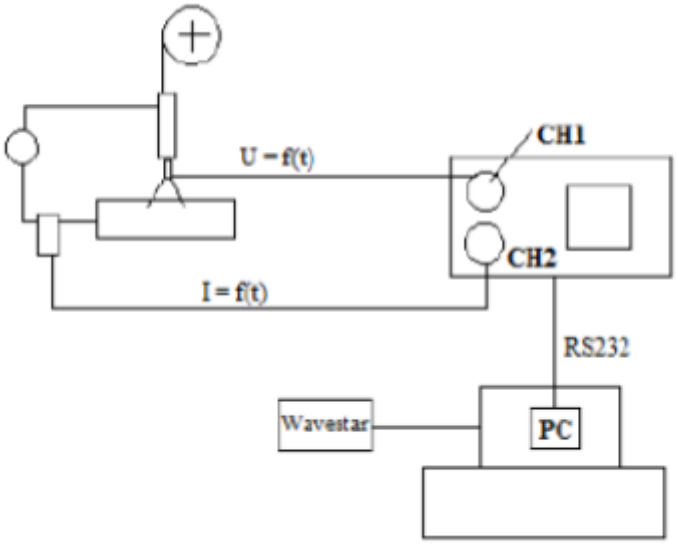


Slika 28. Robotska stanica OTC Almega AX-V6

Osciloskop Tektronix TDS 210 prikazan na slici 29 korišten je za mjerenje dinamičke karakteristike zavarivanja, a u kombinaciji s njim korištena su strujna kliješta i računalni programu Wavestart. Shema spajanja uređaja za zavarivanje, osciloskopa i računala je prikazana na Slici 30.



Slika 29. Osciloskop Tektronix TDS



Slika 30. Shema spajanja opreme za mjerenje tijekom provedbe eksperimenta [23]

5.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentalnome radu korišten je titanij oznake Titan Gr. 2 prema normi EN ISO 9001:2015 proizvođača Bibus Metals Kft. . U tablici 9 prikazan je kemijski sastav osnovnoga materijala, dok su u tablici 10 prikazana njegova mehanička svojstva.

Tablica 9. Kemijski sastav Titan Gr. 2 [25]

Element	Ti	Fe	O	C	N	H
Maseni udio elementa, %	≥ 98. 9	≤ 0. 30	≤ 0. 25	≤0. 080	≤ 0. 030	≤0. 015

Tablica 10. Mehanička svojstva Titan Gr. 2 [25]

Oznaka	Granica razvlačenja (R_e), MPa	Vlačna čvrstoća (R_m), MPa	Modul elastičnosti (E), GPa	Tvrdoća, HV
Titan Gr. 2	485	345	105-120	160-200

Za provedbu eksperimentalnoga dijela rada korištene su ploče osnovnoga materijala debljine 6. 8 mm.

5.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za izradu uzoraka upotrijebljena je puna žica proizvođača Daiko S. r. l., trgovačkog imena Daiko Ti 2 promjera 1,2 mm. Specifikacija dodatnog materijala prikazana je na slici 31.



CERTIFIED MATERIAL TEST REPORT

No. M - 8208 dtd 23/09/2020

DAIKO

CUSTOMER No.: C004345

CUSTOMER: ELEKTRODA ZAGREB D.D.

PRODUCT: DAIKO Ti 2
ALLOY: TITANIUM ALLOYS
DESCRIPTION: MIG WIRE
SIZE: 1.20mm
PACKAGING:
SPECIFICATIONS: A5.16 ERTi-2

ORDER No. N 178/20
TRANSP. DOC No. 2071
QUANTITY 10,50 Kg.
HEAT - LOT TD2017190

PRODUCT APPROVALS:

According to EN 10204 3.1

CHEMICAL ANALYSIS (%)

C	O	N	H	Fe	Al	V	Pd	Ru	Ni						
0,0078	0,096	0,0078	0,001	0,073	-	-	-	-	-						

Other: Mo -

According to EN 10204 2.2

MECHANICAL TEST (all weld metal)

As welded	MIG WIRE		OTHER TESTS:		
Tensile strength [MPa]	460				
Yield strength [MPa]	390				
Elongation 5d [%]	20				
Impact Energy ISO V [J]	-				

NOTE:

The test results reported above are correct as contained in the record of the company.

INTERNATIONAL WELDING ENGINEER I.W.E. CLAUDIO ONGARO

Slika 31. Atest dodatnog materijala

5.4. Zaštitni plin

U eksperimentu korištena su dva zaštitna plina proizvođača Messer.

Plin trgovačkog naziva Argon 4. 8 (slika 32) čiji je volumni sastav 99. 998% argon korišten je za ispunjavanje komore prikazane na slici 33.



Slika 32. Zaštitni plin Argon 4. 8 korišten za ispunjavanje komore



Slika 33. Komora za zavarivanje uzoraka

Plin trgovačkog naziva Argon 5. 0 (slika 34) čiji je volumni sastav 99. 999% argon korišten je na uređaju Welbee P500L.



Slika 34. Zaštitni plin korišten na uređaju Welbee P500L

5.5. Odabir parametara

U svrhu definiranja odgovarajućih parametara zavarivanja za daljnji tijek rada, provedeno je navarivanje na osnovnome materijalu. Navarivanje je izvedeno s različitim brzinama zavarivanja, jakosti struje i *arc control*-a u impulsnom električnom luku prijenosa metala. Postupak navarivanja izvršen je neutralnom tehnikom rada.

Parametri navarivanja su definirani na dva načina. Prva skupina parametara navarivanja definirana je preko jakosti struje zavarivanja, dok je druga skupina parametara definirana s obzirom na unos topline. Slobodni kraj žice i protok zaštitnoga plina bili su jednaki u oba slučaja. Prije navarivanja i zavarivanja komora bi se ispunila s protokom plina od 25 l/min u trajanju od 8 min i nakon toga bi se protok smanjio na 10 l/min. Protok plina tijekom navarivanja i zavarivanja iznosio je 20 l/min, dok je slobodni kraj žice postavljen na 15 mm. Unos topline u zavareni spoj računa se prema izrazu.

$$Q = \eta \; x \; \frac{U \; x \; I}{v_{zav}} \; x \; \frac{60}{1000} \qquad (1)$$

Gdje su:

Q – unos topline u zavareni spoj, kJ/cm

η – stupanj korisnosti postupka zavarivanja (za MIG postupak iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

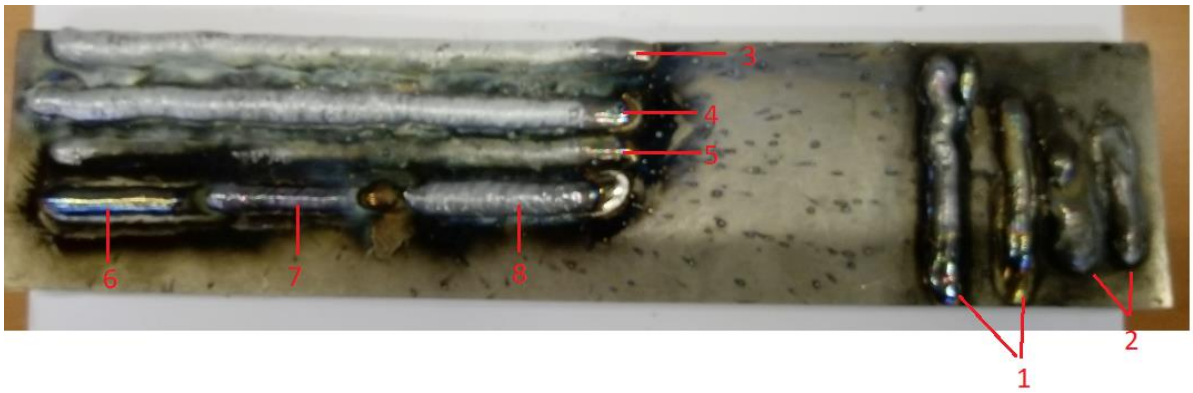
v_{zav} *– brzina zavarivanja, cm/min*

Kod parametara navarivanja struja zavarivanja namještena na uređaju, a ostali parametri potom se automatski podešavaju prema sinergijskoj krivulji izvora struje. U tablici 11 prikazani su parametri navarivanja. Za proračun unosa topline uvrštene su očitane vrijednosti struje i napona zadane na uređaju.

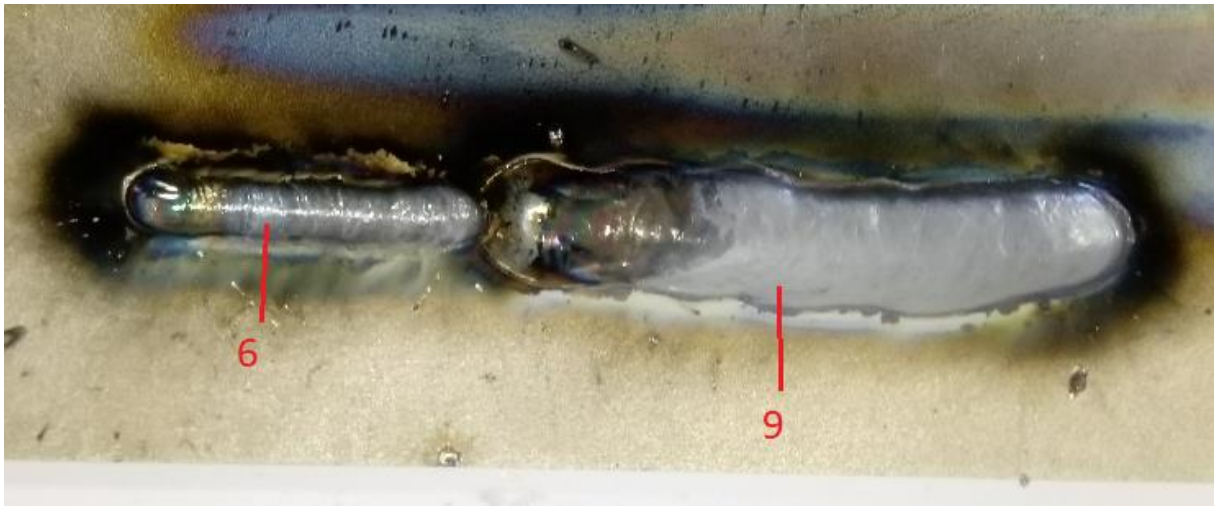
Tablica 11. Parametri navarivanja uzoraka

Oznaka uzorka	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Jakost struje, A	100	70	100	120	120	80	80	160	250
Napon, V	18	17,1	19	18,8	19,3	17,4	17,4	22,5	26
Brzina zavarivanja cm/min	25	25	25	25	25	20	30	50	50
Unos topline, kJ/mm	0,346	0,2298	0,365	0,433	0,445	0,334	0,223	0,346	0,624
Arc control	/	/	5 do -5	5 do -5	-3	-3	-3	-3	-3

Na slici 35 i 36 prikazani su navareni uzorci prema podacima iz tablice 11. Za prvi uzorak uzeta je struja od 100A kao početna točka. Za uzorak dva smanjena je struja što je rezultiralo nestabilnom procesu i gotovo ne postojećem navaru koji je vidljiv na slici. Za uzorak 3 tri i četiri isprobava se promjena *arc control*-a dužinom navara. Temeljem opažanja tijekom navarivanja uzorka tri i četiri ustanovljeno je kako *arc control* -3 daje najstabilniji električni luk. Na uzorku pet isprobava se *arc control* kako bi se potvrdila teza. S *arc control* -3 isprobava se jakost struje 80 A na uzorku 6 i 7 s različitim brzinama kako bi se vidio navar s obzirom na unos topline. Za uzorak 8 se koristi unos topline uzorka 6, struje 160 A i brzine zavarivanja 50 cm/min radi promatranja razlivenosti navara s obzirom na jačinu struje. Za uzorak 9 uzeta je otprilike duplo veća vrijednost unosa topline.



Slika 35. Navareni uzorci 1-8

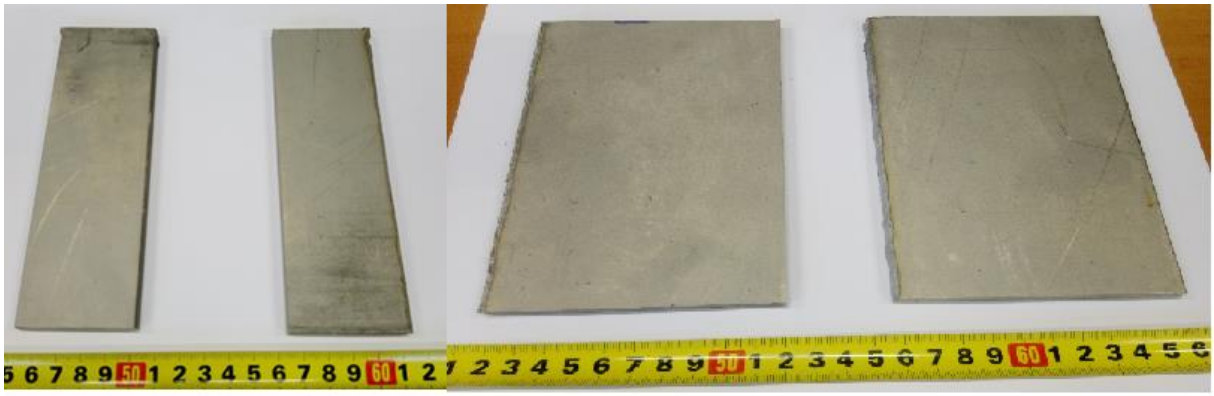


Slika 36. Navareni uzorci 6 i 9

Nakon navarivanja završen je postupak definiranja parametara te su odabrani uzorci 6 i 9 za daljnje ispitivanje s obzirom na razlivenost i izgled zavara.

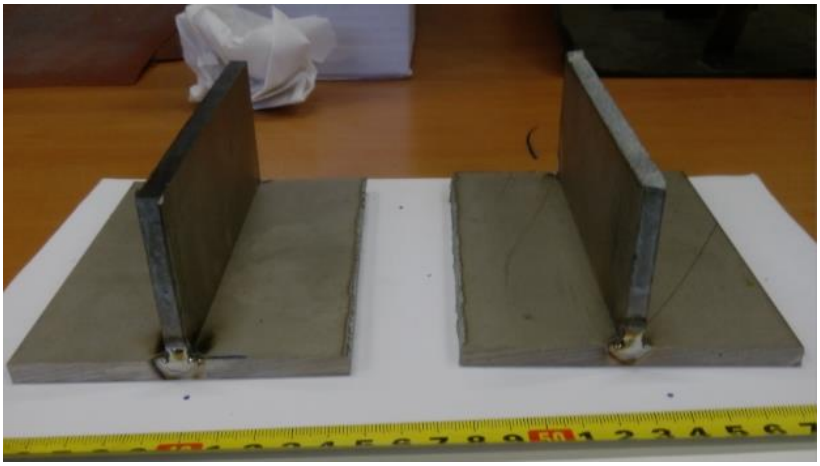
5.6. Zavarivanje

Provedeno je zavarivanje kutnog spoja s parametrima dobivenim u prethodnoj fazi. Za prvi uzorak kutnog zavara (odsada zvan „A“) izvedena su 7 zavara prema parametrima uzorka 6. Za drugi uzorak kutnog spoja (odsada zvan „B“) izvedena su 2 zavara prema parametri uzorka 9. Korišten je osnovni materijal Titan Gr. 2, debljina ploče za svaki spoj iznosi 6. 8mm. Pločice korištene za eksperiment prikazane su na slici 37 i 38. Dimenzija pločica su: 50x150x6,8 mm i 102x150x6,8 mm.



Slika 37. Pločice za kutni spoj od materijala Titan Gr. 2

Pločice su spojene TIG postupkom s uređajem MagicWave 230 i odmašćeni alkoholom trgovačkog naziva Ethanolum 96% firme KEMIG d. o. o.



Slika 38. Ispitni uzorci za zavarivanje



Slika 39. Izgled površine nakon odmašćivanja i čišćenja

Nakon odmašćivanaj uzorak A stavljen je u komoru i pripremljen za početak zavarivanja prikazano na slici 40. Pištolj koji se nalazi na robotskoj ruci je u neutralnom položaju prema zavaru.



Slika 40. Prikaz položaja robotske ruke, pištolja i uzorka tijekom zavarivanja kutnog spoja

Uzorak A

Parametri zavarivanja koji se postavljaju kod uzorka A odgovaraju parametrima navarivanja uzorka 6. Za sve prolaze podešeni parametri jakosti struje i *arc control*-a bili su isti. Za zavare oznake 1, 2 i 5 nije se koristilo njihanje dok je za zavare oznake 3, 4, 6 i 7 korišteno je njihanje. Tijekom zavarivanja podešavao se je način i količina dovođenja zaštitnoga plina. U tablici 12 i 13 prikazani su parametri zavarivanja.

Tablica 12. Parametri zavarivanja uzorka A

Oznaka prolaza		Prolaz 1	Prolaz 2	Prolaz 3	Prolaz 4
Jakost struje, A	Podešena	80	80	80	80
	Očitana	82	81	84	87
Napon, V	Podešena	17,4	17,4	17,4	17,4
	Očitana	17,5	17,8	17,4	17,0
Brzina zavarivanja, cm/min		20	20	20 S njihanjem	20 S njihanjem
Protok zaštitnog plina pištolja, l/min		20	20	20	20
Protok zaštitnog plina komore, l/min		35 Izravno na zavar	18 Izravno na zavar	20 Izravno na zavar	20 U komoru
Unos topline, kJ/mm	Podešena	0,3341	0,3341	0,3341	0,3341
	Očitana	0,3444	0,346	0,351	0,355

Tablica 13. Parametri zavarivanja uzorka A

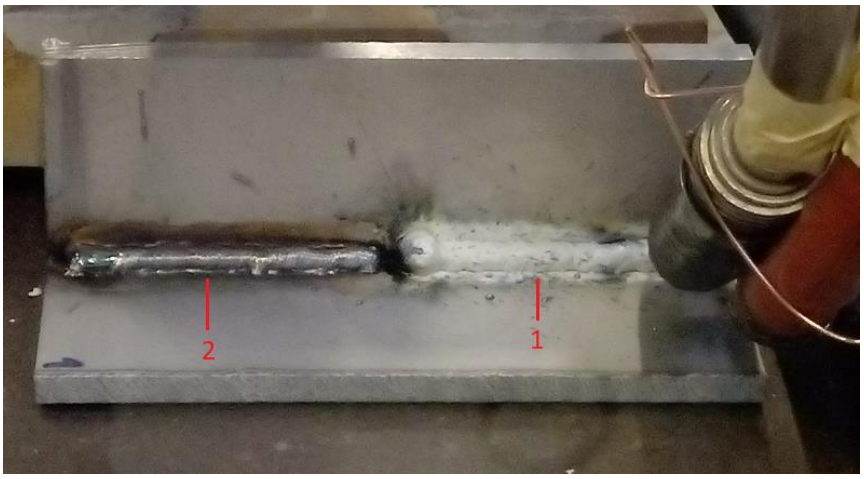
Oznaka prolaza		Prolaz 5	Prolaz 6	Prolaz 7
Jakost struje, A	Podešena	80	80	80
	Očitana	90	107	87
Napon, V	Podešena	16,9	16,9	16,9
	Očitana	16,1	15,3	16,4
Brzina zavarivanja, cm/min		20	(Namješteno 20) Stvarno nepoznata	Realna 20 (namještena 45) Kružno njihanje
Protok zaštitnog plina pištolja, l/min		20	20	20
Protok zaštitnog plina komore, l/min		0 tijekom zavarivanja	0 tijekom zavarivanja	0 tijekom zavarivanja
Unos topline, kJ/mm	Podešena	0,3245	nepoznato	0,3245
	Očitana	0,34776	Nepoznato	0,3424

Prolaz 1 i 2

Na slici 43 prikazan je zavar prvog i drugog prolaza. Zbog nemogućnosti vađenja uzorka kako bi se izbjegla kontaminacija komore rezolucija slike je niska. Vizualnom inspekcijom prolaza 1 primjećujemo da je zavar sive boje što ukazuje na veliku kontaminaciju površine zavara oksidima tijekom hlađenja. Komora se punila 8 min plinom protoka 25 l/min. Tijekom zavarivanja iz pištolja je izlazio plin protoka 20 l/min, dok je na zavar puhao plin protoka 35 l/min prikazano na slici. Prema podacima iz tablice vidimo malo odstupanje od početnih parametara i tijekom zavarivanja vizualno i auditivno električni luk je bio stabilan.

Za drugi prolaz tijekom zavarivanja iz pištolja je izlazio plin protoka 20 l/min, dok je na zavar puhao plin protoka 18 l/min. Vizualnom inspekcijom primjećujemo bolji izgled zavara u pogledu kontaminacije. Zavar poprima boje od srebrne do tamno plave što je prihvatljivo s

obzirom na uporabu, ali ne preporučljivo. Prema podacima iz tablice vidimo malo odstupanje od početnih parametara i tijekom zavarivanja vizualno i auditivno električni luk je bio stabilan.



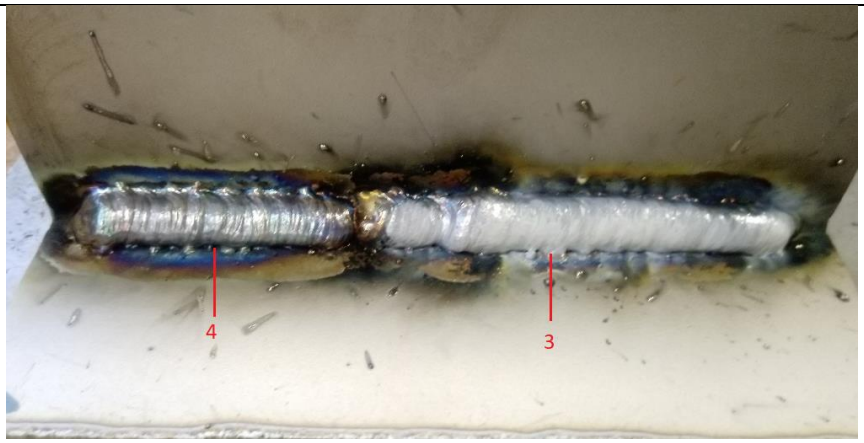
Slika 41. Prolaz 1 i 2 na uzorku A

Prolaz 3 i 4

Na slici 42 prikazani su prolazi 3 (koji je na prolazu 1) i prolaz 4 (na prolazu 2). Za ove prolaze koristilo se zavarivanje s njihanjem. Tijekom zavarivanja iz pištolja je izlazio plin protoka 20 l/min, dok je na zavar puhao plin protoka 20 l/min. Vizualnom metodom prolaza 3 primjećujemo isto kvalitetu kao i prolaza 1. Na ovome zavaru s vertikalne strane primjećujemo manjak sive boje. Na temelju te spoznaje otkriven je razlog kontaminacije. Dodatni plin koji se upuhivao na zavar kontaminirao je površinu zavara. Prema podacima iz tablice vidimo malo odstupanje od početnih parametara i tijekom zavarivanja vizualno i auditivno električni luk je bio stabilan.

Za prolaz broj 4 na temelju saznanja iz prethodnog zavara, cijev dodatnog plin montira se dalje od uzorka. Cijev dodatnog plina ima mlaznicu okrenutu od uzorka kako bi se smanjila kontaminacija. Kroz pištolj prolazi isti protok. Vizualnom metodom na prolazu 4 primjećujemo poboljšanje kontaminacije površine. Zavar poprima boje do svijetlo plave do plavo sive što je ne prihvatljivo.

Prema podacima iz tablice vidimo malo veće odstupanje od početnih parametara, ali tijekom zavarivanja vizualno i auditivno električni luk je bio stabilan.



Slika 42. Prolaz 3 i 4 uzorka A

Prolaz 5

Na slici 43 prikazan je prolaz broj 5. Na temelju prijašnjih prolaza odlučeno je prije zavarivanja pustiti plin iz pištolja na par minuta koji je čišći, a pritom zatvoriti dodatni plin. Tijekom zavarivanja protok iz pištolja je bio isti kao u prijašnjim zavarima. Vizualnom metodom kontaminacija zavara izgleda najbolje od svih provedenih zavara. Boje koje se zapažaju su od srebrene do svijetlo plave s pojedinim segmentima gdje se nalazi tamno plava boja. Prema podacima iz tablice vidimo odstupanje jakosti struja od 10 A, no tijekom zavarivanja vizualno i auditivno električni luk je bio stabilan.



Slika 43. Prolaz 5 na uzorku A

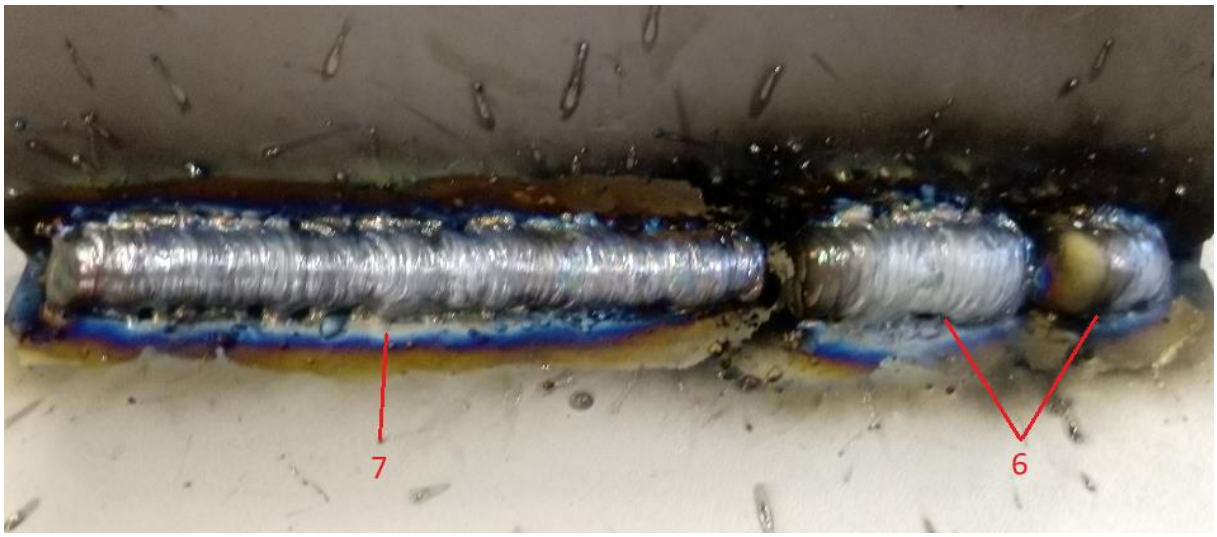
Prolaz 6 i prolaz 7

Na slici 44 prikazani su prolazi 6 i 7 koji se nalaze na prolazu 5. Za ove prolaze koristilo se kružno njihanje amplitude 3 mm sa zastojem na krajevima od 0. 3 sekunde i frekvencijom od 2 Hz.

Na slici vidimo dva pokušaja s parametrima u tablici koja su rezultirala nestabilnim lukom s prskanjem. Vizualnom metodom primjećujemo veliku količinu taljevine na zavaru. Razlog tomu je što za unesenu vrijednost od 20 cm/min na kružnom njihanju robotska stanica ne povećava brzinu kako bi kompenzirala veću putanju i zastoje na krajevima. Zbog toga nam je nepoznata stvarna brzina zavarivanja.

Na prolazu 7 kompenziran je nedostatak robota namještanjem brzine na 45 cm/min. Tako dobivena je linearna brzina od otprilike 20 cm/min. Vizualnom metodom kontaminacija zavara poprima boje od svijetlo plave do sivo plave. Prema podacima iz tablice vidimo malo odstupanje jakosti struja, no tijekom zavarivanja vizualno i auditivno električni luk je bio stabilan.

Na temelju dobivenih rezultata za daljnje istraživanje analizirane su dinamičke karakteristike i makroizbrusak prolaza 7, a samim time i prolaza 5.



Slika 44. Prolaz 6 i 7 na uzorku A

Uzorak B

Parametri zavarivanja koji se postavljaju kod uzorka B odgovaraju parametrima navarivanja uzorka 9. Za sve prolaze podešeni parametri jakosti struje i *arc control*-a bili su isti. U tablici 14 prikazani su parametri zavarivanja.

Tablica 14. Parametri zavarivanja uzorka B

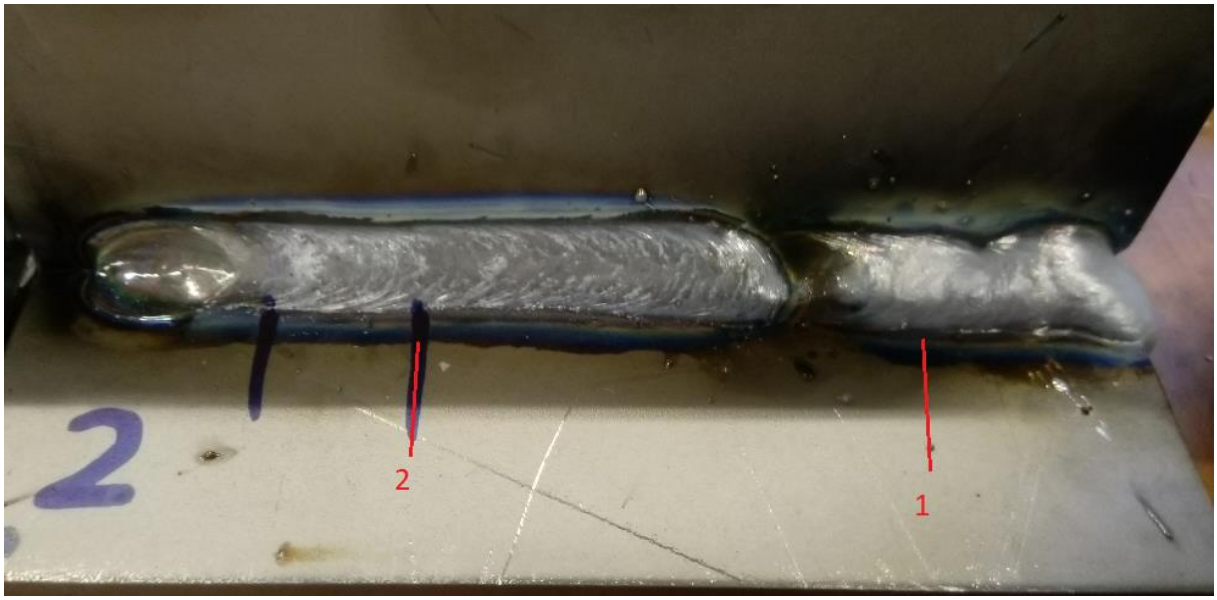
Oznaka prolaza		Prolaz 1	Prolaz 2
Jakost struje, A	Podešena	250	250
	Očitana	264	258
Napon, V	Podešena	26	26
	Očitana	26,1	26,4
Brzina zavarivanja, cm/min		50	50
Protok zaštitnog plina pištolja, l/min		20	20
Protok zaštitnog plina komore, l/min		0 tijekom zavarivanja	0 tijekom zavarivanja
Unos topline, kJ/mm	Podešena	0,624	0,624
	Očitana	0,662	0,654

Prolaz 1 i 2

Na slici 45 prikazani su prolazi 1 i 2 uzorka B. Vizualnom inspekcijom prolaza 1 primjećujemo da je zavar sive boje što ukazuje na veliku kontaminaciju površine zavara oksidima tijekom hlađenja. Tijekom zavarivanja dolazi do velikih promjena u parametrima što je rezultiralo nestabilnom luku i štrcanju koje vidimo na slici. Uzrok tim problemima leži u dodavačima žice i polikabelu koji nije bio ravan.

U prolazu dva riješen je problem što je vidljivo na slici i prema podacima u tablici gdje dolazi do malog odstupanja od početnih vrijednosti. Prije zavarivanja pušten je plin iz pištolja u

trajanju od 2 minute. Vizualnom metodom primjećujemo da nema štrcanja tijekom zavarivanja. Izgled zavara upućuje na veliku kontaminaciju oksidima osim na kraju zavara gdje se dodatno puštao plin iz pištolja. Tijekom zavarivanja električni luk je bio stabilan.



Slika 45. Prolaz 1 i 2 na uzorku B

Na temelju ovih rezultata za daljnje istraživanje analizirana je dinamička karakteristika i makroizbrusak drugog prolaza.

5.7. Dinamička karakteristika

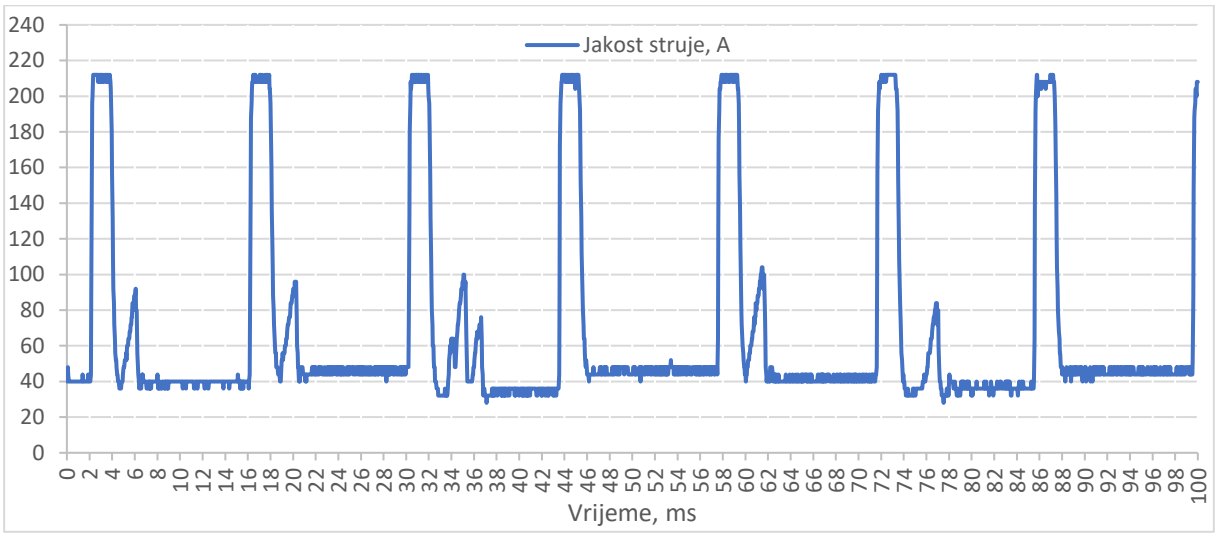
Podatke za izmjerenu dinamičku karakteristiku ranije navedenom opremom moguće je na računalu obraditi u obliku 2500 točaka zapisanih u formatu *(I,t)* za jakost struje i 2500 točaka zapisanih u formatu (*V,t*) za napon u vremenskom intervalu od 0,1 sekunde. Dakle osciloskop je svake 4 ms mjerio vrijednost struje i vrijednost napona. Skup podataka za jedan prolaz zavarivanja od ukupno 5000 točaka je prebačen u tablični program Excel. Eksperimentalno izračunata vrijednost unosa topline dobivena je na načina da se suma površina osciloskopom izmjerene jakosti struje i napona (*I*U*) za svaki mjereni trenutak (za svake 4 ms) pomnoži sa stupnjem iskoristivosti električnog luka *(η*=konst. =0,8 za MIG postupak) i podijeli s brzinom zavarivanja u skladu s normom HRN EN 1011-1. 2009, kao što je prikazano matematičkom formulom u općem obliku [26].

$$\tilde{Q} = \frac{\sum_1^n U*I*\frac{\eta}{v}}{2500} \quad (2)$$

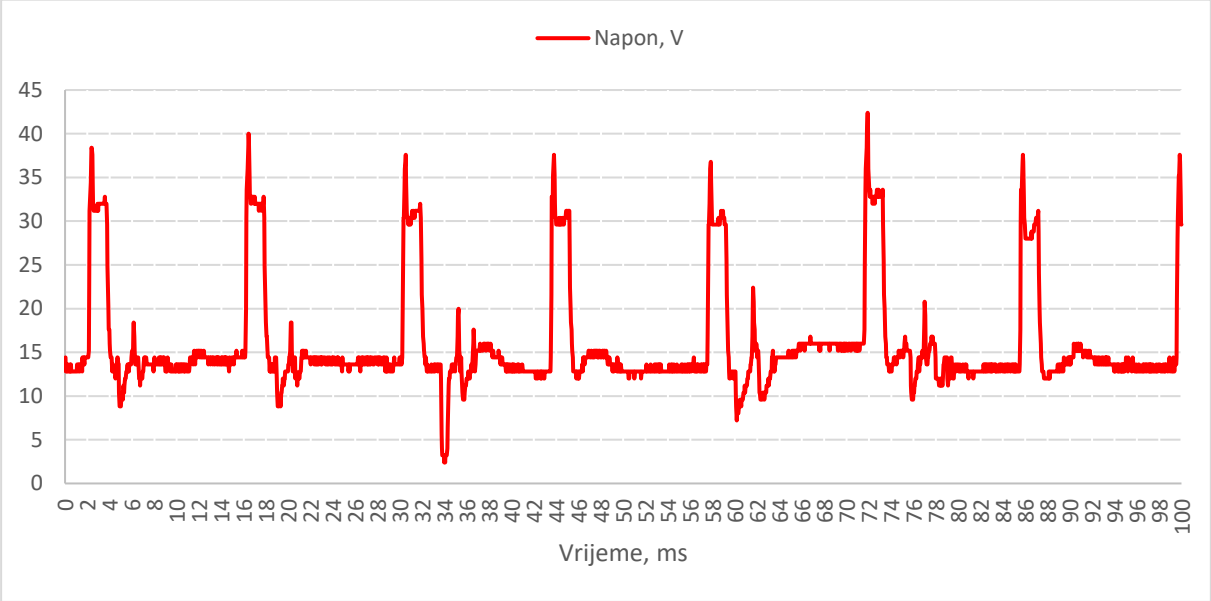
Na svim slikama koje prikazuju dinamičku karakteristiku, plavom bojom prikazana je krivulja promjene jakosti struje u vremenu, a crvenom bojom krivulja promjene napona u vremenu.

5.7.1. Uzorak A

Na Slikama 46 i 47 je prikazana dinamička karakteristika za uzorak A zavar „Prolaza 5“ pri načinu prijenosa metala impulsnim električnim lukom koja je izmjerena pri jakosti struje zavarivanja od 80 A. Jedan impuls predstavlja prijenos jedne kapljice dodatnog materijala. Izvor struje proizvodi dvije razine jakosti struje, što je i vidljivo na oscilogramu. Iz izgleda obje krivulje je vidljivo da proces nije potpuno stabilan.

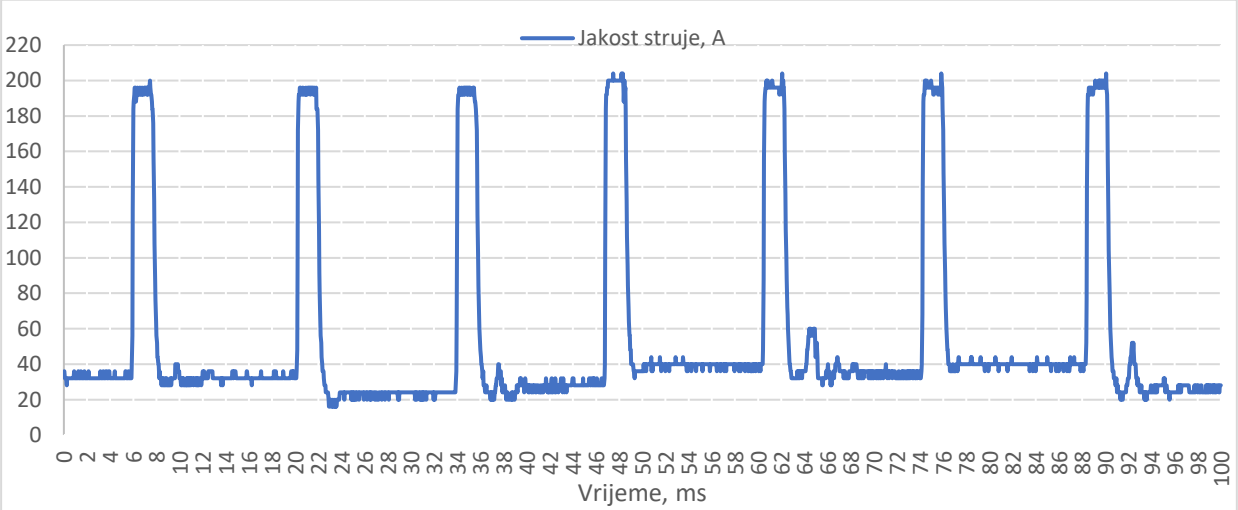


Slika 46. Dinamička karakteristika jakosti struje za zavar „Prolaz 5“ pri 80 A u impulsnom luku na uzorku A

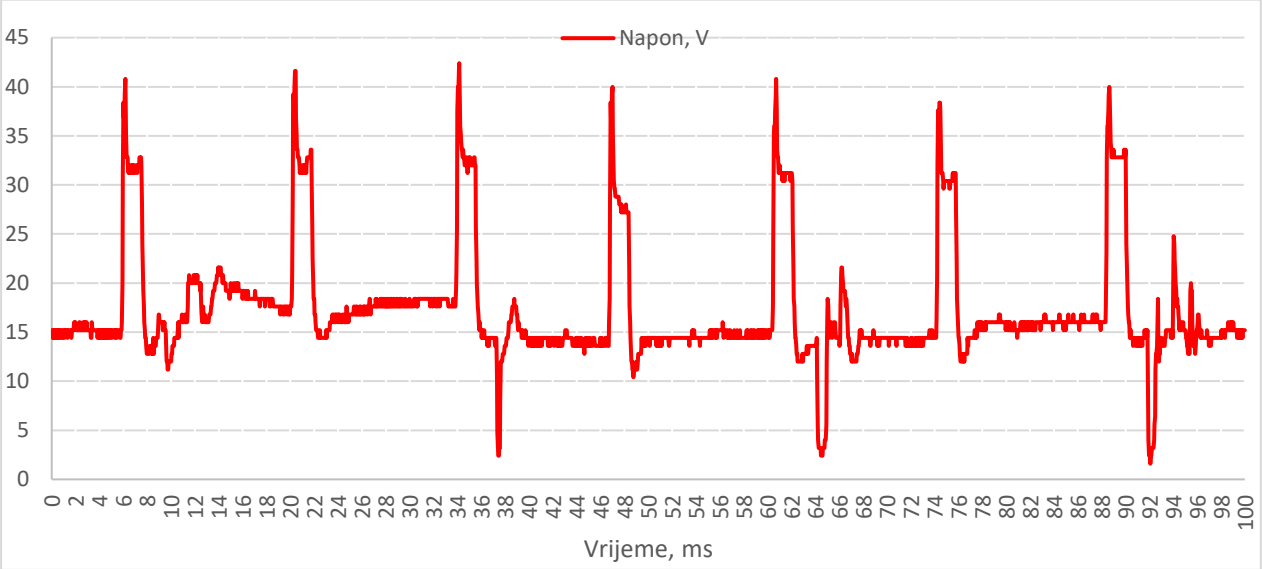


Slika 47. Dinamička karakteristika napona za zavar „Prolaz 5“ pri 80 A u impulsnom luku na uzorku A

Na Slikama 48 i 49 je prikazana dinamička karakteristika za uzorak A zavar „prolaz 7“ pri načinu prijenosa metala impulsnim električnim lukom koja je izmjerena pri jakosti struje zavarivanja od 80 A s njihanjem. Iz izgleda obje krivulje je vidljivo da je riječ relativno stabilnom i visoko kontroliranom procesu.



Slika 48. Dinamička karakteristika jakosti struje za zavar „prolaz 7“ pri 80 A u impulsnom luku s njihanjem na uzorku A



Slika 49. Dinamička karakteristika napona za zavar „prolaz 7“ pri 80 A u impulsnom luku s njihanjem na uzorku A

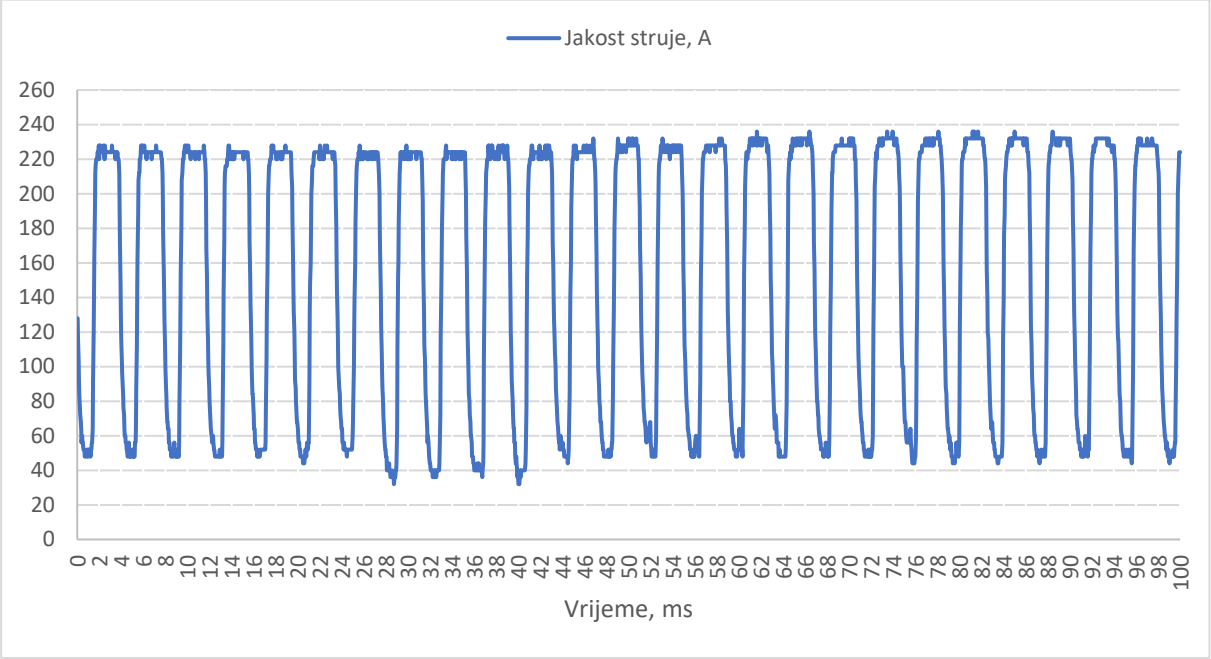
U tablici 15 prikazani su unosi toplina prema navedenim karakteristikama.

Tablica 15. Unos topline za uzorak A

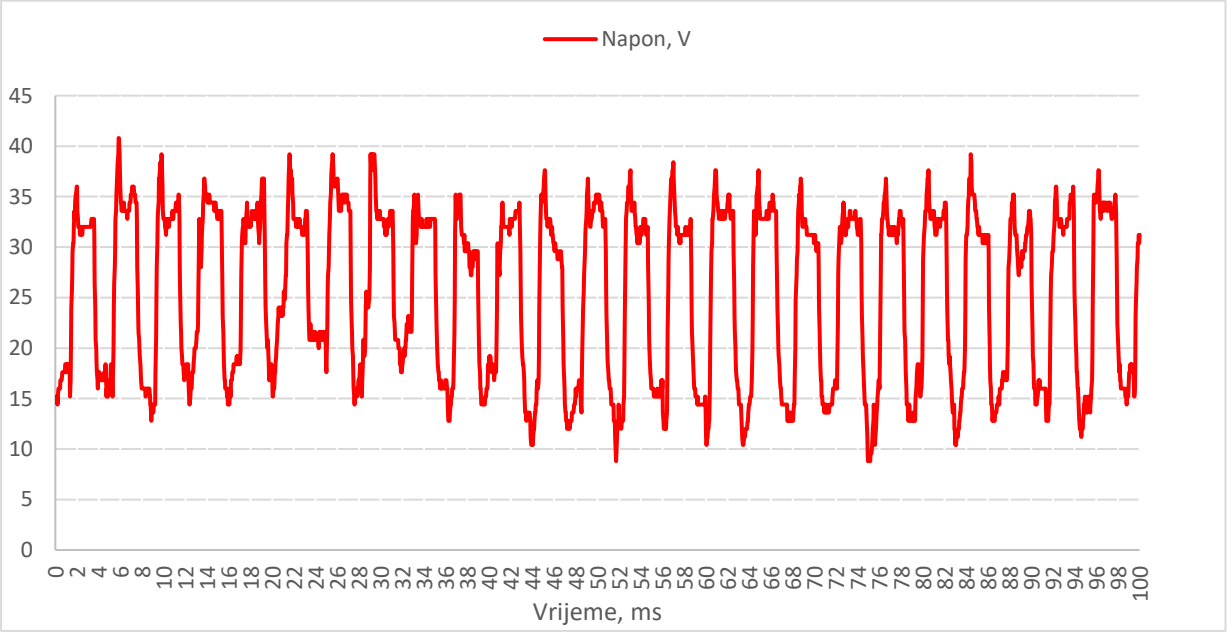
Unesena toplina, kJ/mm		
Zavar	Prolaz 5	Prolaz 7
Izračunata preko početnih parametara:	0,325	0,325
Izmjerena iz dinamičke karakteristike:	0,320	0,289
Razlika dobivenih vrijednosti:	0,005 (1,5% manje)	0,036 (11. 1% manje)

5.7.2 Uzorak B

Na Slikama 50 i 51 je prikazana dinamička karakteristika za uzorak B zavar „prolaz 2“ pri načinu prijenosa metala impulsnim električnim lukom koja je izmjerena pri jakosti struje zavarivanja od 250 A. Važno je za primijetiti ako usporedimo struje impulsa zavara sa slike 49 i 51 i ovoga zavara možemo uočiti kako su skoro identične iako su podešeni parametri 80 A i 250 A. Jedina razlika je učestalost impulsa. Broj impulsa na slici 50 iznosi 25 dok na slici 46 i 48 iznosi 7. Iz izgleda obje krivulje je vidljivo da je riječ relativno stabilnom i visoko kontroliranom procesu.



Slika 50. Dinamička karakteristika jakosti struje za zavar „prolaz 2“ pri 250 A u impulsnom luku na uzorku B



Slika 51. . Dinamička karakteristika napona za zavar „prolaz 2“ pri 250 A u impulsnom luku na uzorku B

U tablici 16 prikazani su unosi toplina prema navedenim karakteristikama.

Tablica 16. Unos topline za uzorak B

Unesena toplina, kJ/mm	
Zavar	Prolaz 2
Izračunata preko početnih parametara:	0,624
Izmjerena iz dinamičke karakteristike:	0,445
Razlika dobivenih vrijednosti:	0,179 (28. 7% manje)

5.8. Izrada makroizbruska

Poslije zavarivanja napravljeni su makroizbrusci uzoraka A i B kutnog spoja na kojima su vršena mjerenja dubine penetracije, širine navara te nadvišenja navara u programu ImageJ. Cilj je geometriju uzoraka povezati s parametrima zavarivanja te na temelju toga donijeti zaključak o parametrima. Izrada makroizbruska izvršena je u Laboratoriju za zavarivanje sljedećim redoslijedom:

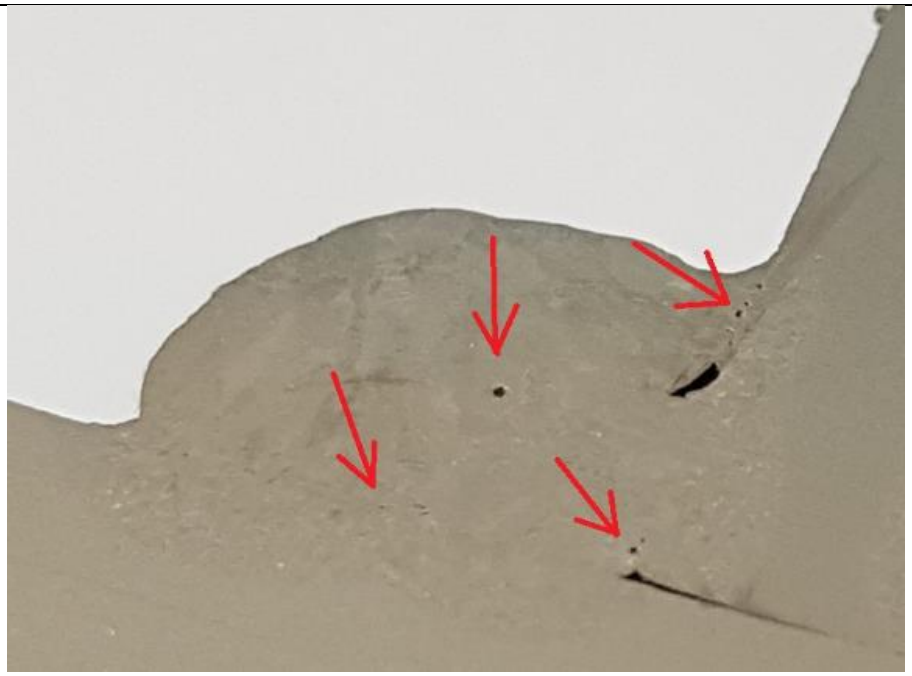
1) piljenjem uzoraka na tračnoj pili

2) brušenjem uzoraka brusnim papirima granulacija P100, P200, P300. . . P4000

3) poliranje uzoraka dijamantnom pastom veličine zrna od 3 μm.

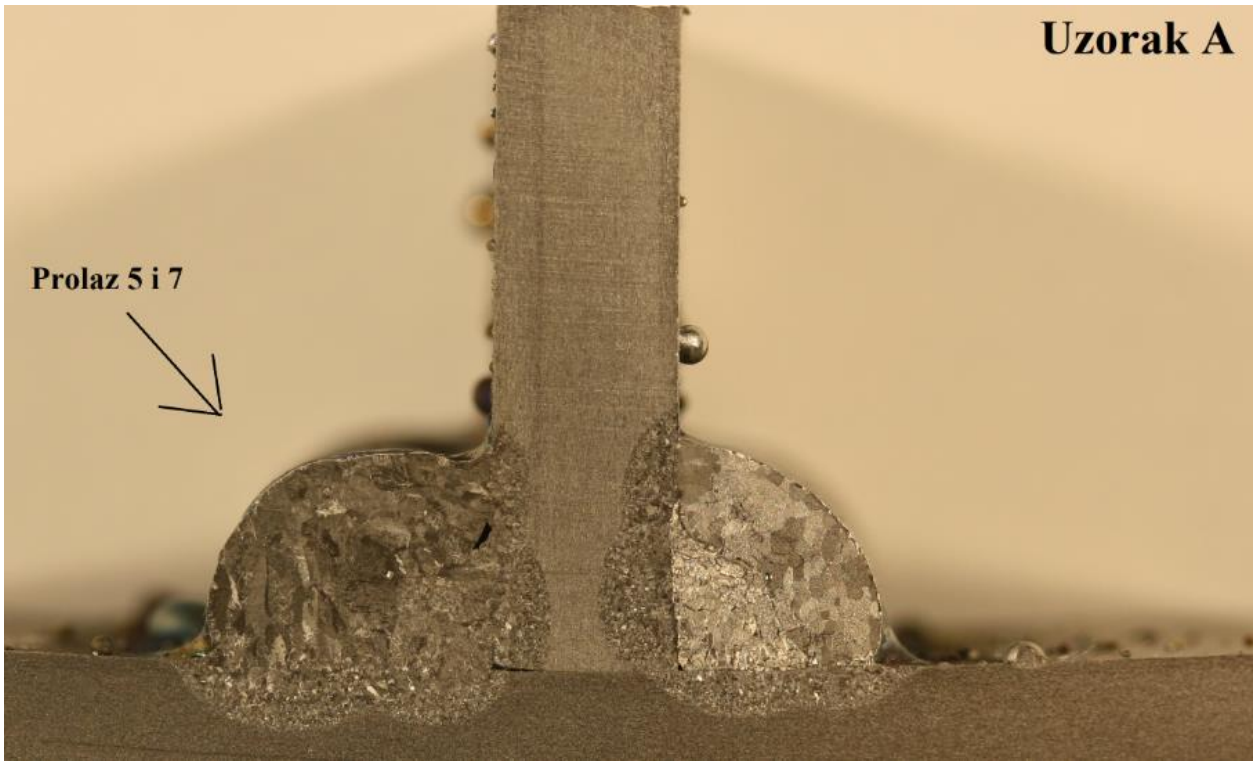
Nakon poliranja provedeno je nagrizanje makroizbruska u otopini kemijskog sastava 6mL HNO3 + 3 mL HF + 100 mL H2O. Poslije nagrizanja ista je površina isprana mlazom vode.

Prije nagrizanja makroizbruska na uzorku A primijećene su pore na površini zavara prikazane na slici 52.

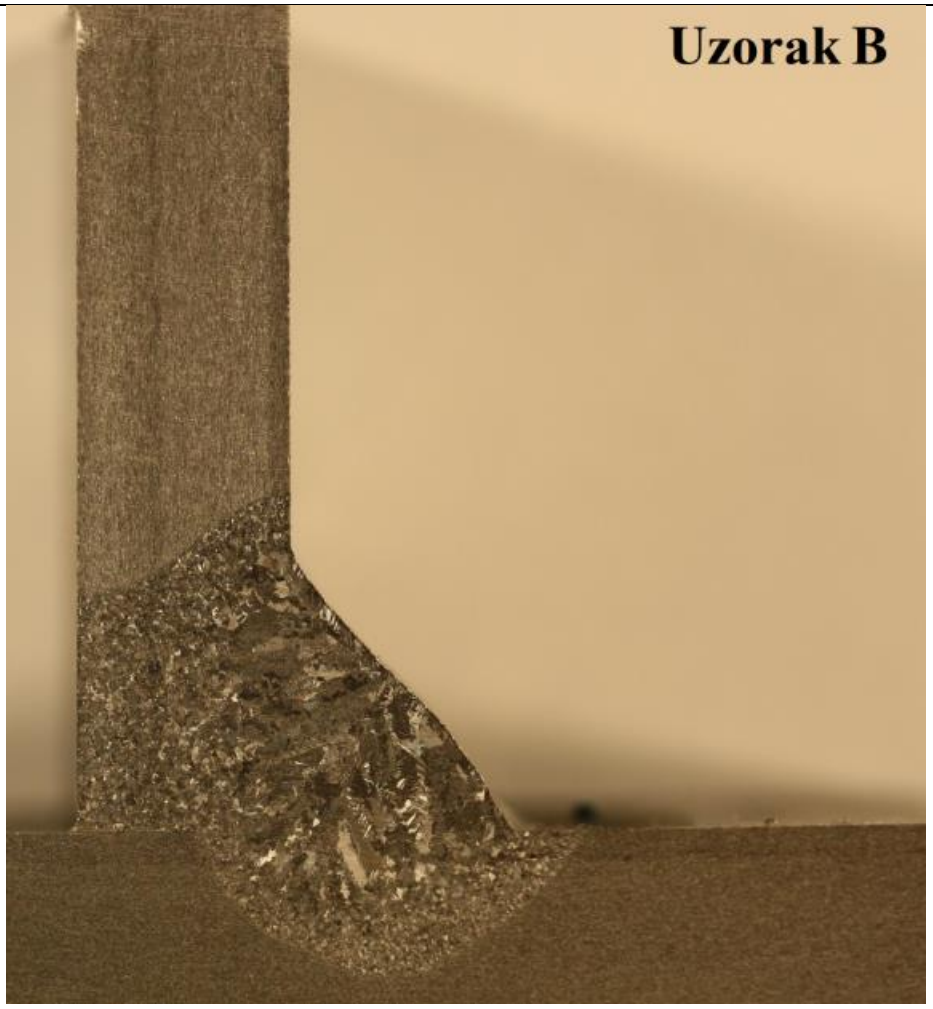


Slika 52. Pore po presjeku zavara uzorka A

Na slikama 53 i 54 prikazani su dobiveni rezultati uzoraka A i B.



Slika 53. Makroizbrusak uzorka A



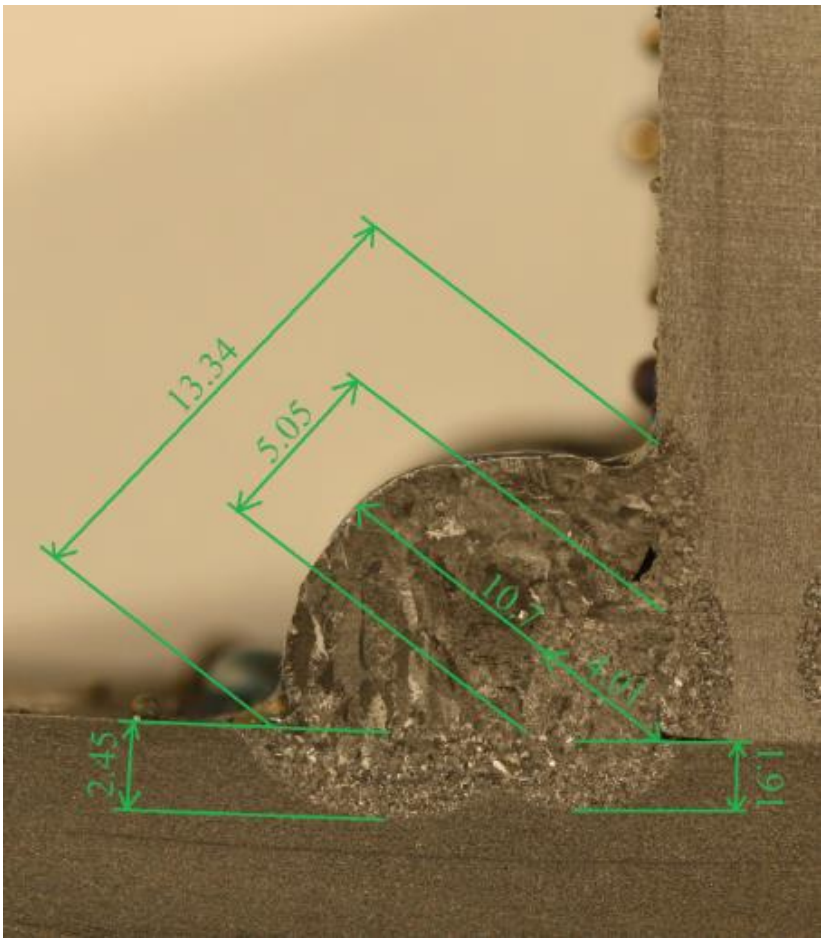
Slika 54. Makroizbrusak uzorka B

Kod makroizbruska A jasno se vidi kako nije ostvaren potpuni provar, dok je kod makroizbruska B isti ostvaren. Na uzorku A možemo primijetiti naljepljivanje zavara na desnoj strani slike što dokazuje kako malim promjenama u parametrima koje su se izvodile rezultirali su malo boljom penetracijom zavara „ prolaza 5“. Prema izgledu geometrije zavara na uzorku A vidljivo je veliko ispupčenje, dok na zavaru B vidimo skoro kut od 45%.

5.8.1 Uzorak A

Na slici 55 prikazane su izvršena mjerenja dubine penetracije, širine navara te nadvišenja zavara u programu ImageJ za uzorak A. Prema izmjerenim veličinama vidimo kako prolaz 5 ima dubinu ZUT-a 1,91 mm, dok za prolaz 7 iznosi 2,45 mm. Širina prolaza 5 iznosi 5,05 mm, a nadvišenje zavara iznosi 4,01 mm. Širina prolaza 7 iznosi 13,34 mm, dok nadvišenje iznosi

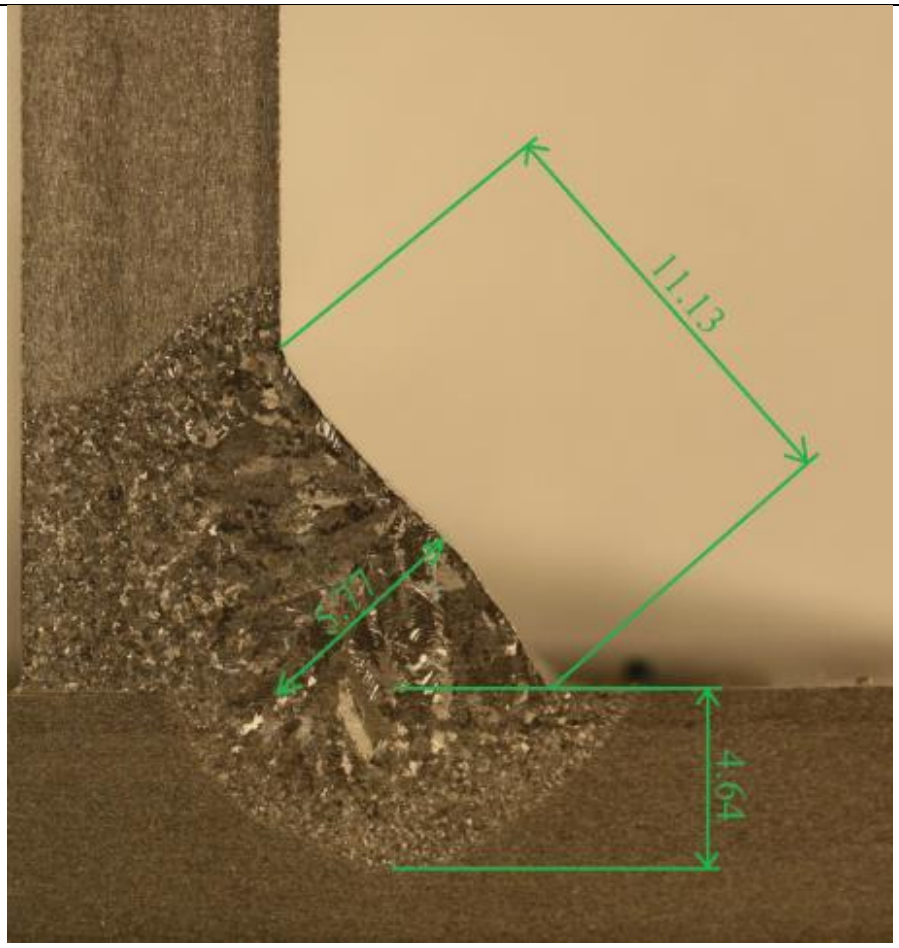
10,7 mm. Veća dubina penetracije kao i širina te ispupčenost tj. nadvišenje prolaza 7 proizlazi kao rezultat njihanja tijekom zavarivanja. Veća distance ujedno predstavlja i više taline.



Slika 55. Izmjerene duljine u programu ImageJ za uzorak A

5.8.2 Uzorak B

Na slici 56 prikazane su izvršena mjerenja dubine penetracije, širine navara te nadvišenja zavara u programu ImageJ za uzorak B. Prema izmjerenim veličinama vidimo kako prolaz 2 ima dubinu ZUT-a 4,64 mm. Znatno veća dubina u usporedbi s uzorkom A. Širina prolaza iznosi 11,13 mm. Iako su širine zavara približno iste uzorak B ima kut zavara od 51° te nema ispupčenja. Nadvišenje zavara iznosi 5,77 mm. Prema prikazanim slikama jasno je vidljivo kako parameteri uzorka B daje bolju razlivenost i penetraciju naspram parametara uzorka A.



Slika 56. Izmjerene duljine u programu ImageJ za uzorak B

5.9. Tvrdoća

Poslije izrade makroizbruska napravljeni testovi tvrdoće uzoraka A i B kutnog spoja na kojima su vršena mjerenja tvrdoće osnovnog materija, zone utjecaja topline i zavara. Cilj je tvrdoću uzoraka povezati s parametrima zavarivanja te na temelju toga donijeti zaključak o parametrima. Mjerenje tvrdoće provedeno je na stroju Brivisor KL 2 firme Reicherter prikazanom na slici 57. Na svakom uzorku napravljeno su dvije linije mjerenja po 15 uzoraka.



Slika 57. Uređaj za mjerenje tvrdoće

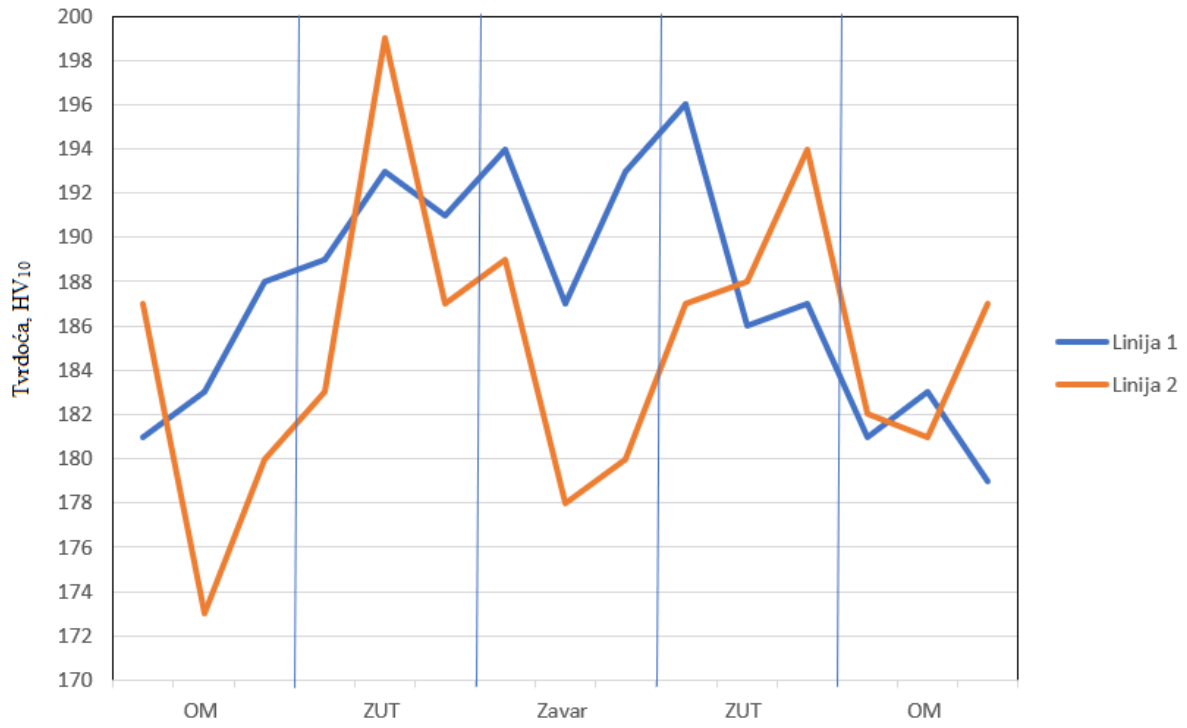
Uzorak A

Za uzorak A linija 1 prolazi kroz zavar prolaza 7, dok linija 2 predstavlja vrijednosti ZUT-a i zavara prolaza 5. U tablici 17 prikazani su rezultati mjerenja linije 1 i 2 za uzorak A. Na slici 58 prikazan je graf linije 1 i 2 prema podacima iz tablice 17. Prema podacima iz tablice i vizualno na grafu vidimo povećanje tvrdoće u ZUT-u na liniji 1 i 2. Zavar na liniji 1 ima vrijednosti bliže ZUT-u, dok na liniji 2 ima vrijednosti bliže osnovnom materijalu (OM).

Tablica 17. Tvrdoća uzorka A

	Linija 1		Linija 2	
Mjesto	Izmjereno	HV_{10}	Izmjereno	HV_{10}
Osnovni materijal (OM)	0,320	181	0,315	187
	0,318	183	0,327	173
	0,314	188	0,321	180
ZUT	0,313	189	0,318	183
	0,310	193	0,305	199
	0,312	191	0,315	187

Zavar	0,309	194	0,313	189
	0,315	187	0,323	178
	0,310	193	0,321	180
ZUT	0,308	196	0,315	187
	0,316	186	0,314	188
	0,315	187	0,309	194
OM	0,320	181	0,319	182
	0,318	183	0,320	181
	0,322	179	0,315	187



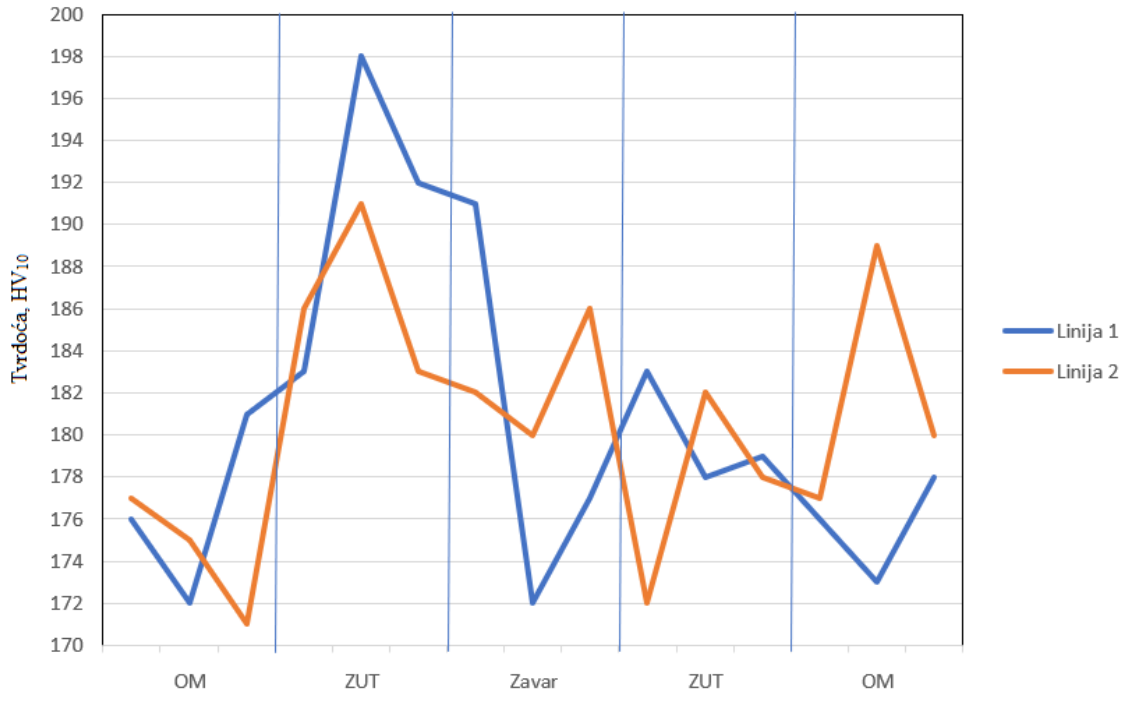
Slika 58. Graf tvrdoće zavara uzorka A

Uzorak B

Za uzorak B linija 1 i 2 predstavlja vrijednosti ZUT-a i zavara prolaza 2. U tablici 18 prikazani su rezultati mjerenja linije 1 i 2 za uzorak B. Na slici 59 prikazan je graf linije 1 i 2 prema podacima iz tablice 18. Prema podacima iz tablice i vizualno na grafu vidimo slične rezultate linije 1 i 2. Usporedimo li uzorak A i B možemo primijetiti kako nema velike razlike u rezultatima mjerenja.

Tablica 18. Tvrdoća uzorka B

	Linija 1		Linija 2	
Mjesto	Izmjereno	HV_{10}	Izmjereno	HV_{10}
Osnovni materijal (OM)	0,325	176	0,324	177
	0,328	172	0,326	175
	0,320	181	0,329	171
ZUT	0,318	183	0,316	186
	0,306	198	0,312	191
	0,311	192	0,318	183
Zavar	0,312	191	0,319	182
	0,328	172	0,321	180
	0,324	177	0,316	186
ZUT	0,318	183	0,328	172
	0,323	178	0,319	182
	0,322	179	0,323	178
OM	0,325	176	0,324	177
	0,327	173	0,313	189
	0,323	178	0,321	180



Slika 59. Graf tvrdoće zavara uzorka B

5.10. Osvrt na rezultate

Za uzorak A vizualnom metodom primijećena je velika kontaminacija zavara tijekom zavarivanja i hlađenja unatoč punjenju komore plinom. Uzrok kontaminacije dolazi zbog korištenja argona čistoće 99. 998% umjesto 99. 999% za punjenje komore, kao i loš dizajn komore. Isto tako primijećena je loša geometrija zavara. Neadekvatna viskoznost taline je uzrokovala ispupčenost zavara kao i loša razlivenost zavara. Dinamička karakteristika prolaza 5 ukazuje na nestabilniji proces prijenosa metala od onoga u prolazu 7. Izradom makroizbruska uočene su pore po presjeku zavara kao i loša penetracija, nepotpuni provar i naljepljivanje zavara. Posljedica tih rezultata je niski iznos unosa topline, tj preniska jakost struje i napon. Mjerenjem tvrdoće zavara dobiveni su rezultati tvrdoće s malim porastom naspram osnovnog materijala u ZUT-u i zavaru.

Za uzorak B vizualnom metodom primijećena je velika kontaminacija zavara tijekom zavarivanja i hlađenja unatoč punjenju komore plinom. Uzrok kontaminacije isti je kao kod uzorka A. Isto tako primijećena je dobra geometrija zavara. Dinamička karakteristika zavara ukazuje na veoma stabilni prijenos metala. Izradom makroizbruska uočena je odlična penetracija zavara, potpuni provar i dobar kut zavara. Posljedica tih rezultata je dobar iznos unosa topline koji za uzorak B iznosi 0,444 kJ/mm što je za 0.124 kJ/mm više od prolaza 5 i 0.155 kJ/mm od prolaza 7 uzorka A, prema izračunima unosa preko dinamičke karakteristike. Mjerenjem tvrdoće zavara dobiveni su rezultati tvrdoće s malim porastom naspram osnovnog materijala u ZUT-u i zavaru.

6. ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje kutnog spoja titanija impulsnim MIG načinom prijenosa metala s dva različita unosa topline. Uz to, izmjerena su dinamičke karakteristike zavara, napravljeni su makroizbrusci, te je testirana tvrdoća zavara. Provedenim ispitivanjem utvrđeno je da za zavarivanje titanija impulsnim MIG postupkom potrebno visoki unos topline.

Tijekom zavarivanja izmjerene su dinamičke karakteristike preko osciloskopa. Prema dobivenim podacima vidimo veoma stabilnu karakteristiku pri većoj struji, dok je proces pri manjim strujama mnogo nestabilniji, što potvrđuje naša promatranja električnoga luka tijekom zavarivanja.

Nakon zavarivanja vizualnom kontrolom uočeno je velika kontaminacija zavara uzorka A i B. Iako je korišten plin čistoće 99. 998% za ispunjavanje komore utvrđeno je da atmosfera u kojoj se zavaruje titanij mora biti hermetički zatvorena i ispunjena s plinom od 99. 999% čistoće. Tijekom zavarivanja i hlađenja zavar ukazuje na veoma jaku osjetljivost na oksidaciju.

Na temelju usporedbe makroizbruska uzoraka A i B vidi se kako je kod uzorka B, koji je zavaren strujom od 250 A, ostvarena potpuna penetracija i nije bilo pojave grešaka, dok je kod uzorka A zabilježen nepotpuni provar, pojava pora i naljepljivanje. Razlika je uočena i u geometriji zavara, pri čemu je kod uzorka A velika ispupčenost zavara za razliku od uzorka B gdje je zavar pod kutom od 50 °C.

Usporedbom mjerenja tvrdoće uzorka A i B ne ukazuje na velike razlike s obzirom na unos topline. Vrijednosti tvrdoće ZUT-a i zavara malo su veće od osnovnog materijala.

Prema tome, zaključuje se da za zavarivanje titanija Gr. 2 niskim strujama i naponom, tj niskim unosom topline, rezultirat će lošom geometrijom zavara, lošom penetracijom kao i nepotpunom penetracijom. Time se preporučuje zavarivanje većim strujama kako bi se dobio kvalitetan zavar. Za izbjegavanje kontaminacije zavara stoga se preporučuje korištenje 99.999% argona, kao i zavarivanje u hermetički zatvorenoj komori.

U pogledu daljnjih istraživanja preporučuje se ispitivanje parametara zavarivanja s jakostima struje iznad 200 A, mjerenje kisika u komori oksimetrom, poboljšavanjem konstrukcije komore kako bi se osigurala adekvatna plinska zaštita, te optimiziranje parametara kako bi se postigli još bolji rezultati.

LITERATURA

[1] Matthew J. Donachie - Titanium A Technical Guide (2000), ASM international

[2] Diplomski rad: Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju titanija, Matija Vukoja; Zagreb 2018

[3] Čorić, D. : Posebni metalni materijali – III Dio, (digitalni udžbenik), Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, Zagreb, 2017.

[4] Leyens, C., Peters, M. : Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Njemačka, 2003

[5] Filetin, T., Kovačićek, F., Indolf, J. : Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.

[6] Lutjering G., Williams J. : Titanium (Engineering Materials and Processes), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

[7] ASM Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Volume 2, 1990.

[8] Čorić, D. : Titan i njegove legure – svojstva i primjena, Poseban prilog časopisa „Zavarivanje“ br. 3/4 2017.

[9] Veiga, C., Davim, J. P., Loureiro, A. J. R. : Properties and Applications of Titanium Alloys: A Brief Review, Reviews on advanced materials science, 2012.

[10] (Advances in Metallic Alloys) Valentin N. Moiseyev-Titanium Alloys_ Russian Aircraft and Aerospace Applications-CRC Press (2005)

[11] W. H. Kearns (eds.) - Welding Handbook_ Volume 4 Metals and Their Weldability-Macmillan Education UK (1983)

[12] http://www. ckworldwide. com, učitano 5. 11. 2020.

[13] Oates, W., Saitta, A.,. ; Welding handbook – Volume 4: Materials and applications part 2, 8th edition, American Welding Society, SAD

[14] Steve Lampman (Eds.)-Weld Integrity and Performance - A Source Book Adapted from ASM International Handbooks, Conference Proceedings, and Technical Books-ASM International (1997)

[15] Klas Weman - MIG Welding Guide (Woodhead Publishing in Materials) -CRC Press (2006)

[16] https://www. twi-global. com/pdfs/pdfs-public/bpweldti. pdf, učitano 5. 11. 2020.

[17] https://www. fsb. unizg. hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1. ppt-, učitano 5. 11. 2020.

[18] https://www. lincolnelectric. com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200. pdf, učitano 5. 11. 2020.

[19] Smith, S. L., Threadgill, P., Gittos, M. ; Welding Titanium, A Designers and Users Handbook, World centre for materials joining technology, 1999, Velika Britanija

[20] AWS: Guide for the Fusion Welding of Titanium and Titanium Alloys

[21] Garašić I., Kožuh, Z. : Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[22] https://www. sfsb. hr/kth/zavar/tii/reg_l. pdf, učitano 5. 11. 2020.

[23] Završni rad: Izračun unosa energije analizom dinamičke karakteristike kod MAG postupka zavarivanja, Luka Car; Zagreb 2019.

[24] http://www. daihen-varstroj. si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/welbee-varilni-inverterji1_ang/welbee-p-500l-eng. html, učitano 5. 11. 2020.

[25] https://www. azom. com/article. aspx?ArticleID=9413, učitanp 5. 11. 2020.

PRILOG

I. CD-R disc