

Optimizacija zavarivanja AlMg cijevi TIG postupkom

Lovrić, Šime

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:461691>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Šime Lovrić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor :

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Šime Lovrić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentici mag. ing. mech Andreji Zanimović na smjernicama i savjetima prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem djelatnicima firme Brodogradilište Iskra te djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pomoći u izradi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom čitavog studija.

Šime Lovrić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Šime Lovrić** JMBAG: **0035220407**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija zavarivanja AlMg cijevi TIG postupkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of TIG welding on AlMg pipes**

Opis zadatka:

Na temelju literature detaljno proučiti i opisati specifičnosti zavarivanja aluminija TIG postupkom. Posebno naglasiti primjenu u brodogradnji i klasificirati osnovne vrste spojeva koji se primjenjuju pri izradi brodskih konstrukcija. Dati kratki pregled norme HRN EN ISO 9692-3 i komentirati dane preporuke za pripremu spojeva.

U eksperimentalnom dijelu provesti detaljnu analizu tehnologije zavarivanja AlMg cijevi TIG postupkom pri izradi brodske konstrukcije. Specificirati sve značajke pripreme spoja i parametara zavarivanja. Dobivene zavare ispitati prema kriterijima HRN EN ISO 10042. Predložiti unaprjeđenje pripreme i parametara s ciljem postizanja najviše razine kvalitete zavara.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	VV
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. ALUMINIJSKE LEGURE	2
2.1. Osnovna fizikalna svojstva alumnija	2
2.2. Podjela aluminijskih legura	2
2.3. Legirni elementi.....	3
2.4. Označavanje aluminijskih legura.....	3
2.4.1. Označavanje gnječenih aluminijskih legura	3
2.4.2. Označavanje lijevanih aluminijskih legura	4
2.5. Oznake temperiranja aluminiija.....	5
3. ZAVARLJIVOST ALUMINIJA	7
3.1. Poroznost aluminiija i njegovih legura	7
3.2. Aluminijev oksid	8
3.3. Tople pukotine	9
3.4. Smanjenje čvrstoće zbog utjecaja topline zavarivanja.....	9
4. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA TIG POSTUPKOM.....	12
4.1. Oprema za TIG zavarivanje	12
4.2. Pištolj za TIG zavarivanje	13
4.3. Elektroda za TIG zavarivanje	14
4.4. Zaštitni plinovi.....	15
4.5. Dodatni materijal	17
4.6. Tehnika rada	18
4.7. Vrsta struje i polaritet elektrode	19

5. PRIPREMA SPOJEVA ZA ZAVARIVANJE	22
5.1. Klasifikacija osnovnih položaja zavarivanja	22
5.2. Norma HRN EN ISO 9692-3	23
6. EKSPERIMENTALNI RAD	25
6.1. Oprema za zavarivanje	25
6.2. Osnovni i dodatni materijal	26
6.3. Zaštitni plin	27
6.4. Postupak izrade	28
6.4.1. Zavarivanje cijevi	28
6.4.2. Priprema uzoraka za ispitivanje	32
6.5. Ocjenjivanje kvalitete zavara	33
6.6. Radiografsko ispitivanje zavara	35
6.7. Statički vlačni pokus	38
6.8. Makroskopska analiza	41
6.9. Statički vlačni pokus	42
7. EKSPERIMENTALNI RAD	45
LITERATURA	47

POPIS SLIKA

Slika 1.	Topljivost vodika u aluminiju [5]	8
Slika 2.	Prikaz tople pukotine nastale tijekom zavarivanja aluminija[5]	9
Slika 3.	Utjecaj topline zavarivanja na legure aluminija očvrsnute hladnom deformacijom [5]	10
Slika 4.	Utjecaj temperature žarenja na granicu razvlačenja [5]	10
Slika 5.	Utjecaj topline zavarivanja na precipitacijski očvrsnute legure [5]	11
Slika 6.	Oprema za TIG zavarivanje [8]	13
Slika 7.	Osnovni dijelovi pištolja za TIG postupak zavarivanja [8]	13
Slika 8.	Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja[9]	16
Slika 9.	Uspostava električnog luka [8]	18
Slika 10.	Uspostava el. luka, taljenje dodatnog i osnovnog materijala. [8]	19
Slika 11.	Utjecaj polariteta na katodno čišćenje elektroda i raspodijela topline električnog luka[5].....	20
Slika 12.	Učinak funkcije BALANCE [10].....	21
Slika 13.	Utjecaj frekvencije na zavar [10]	21
Slika 14.	Prikaz položaja zavarivanja [19]	22
Slika 15.	Fronius MagicWave 3000.....	25
Slika 16.	Boca zaštitnog plina Argon 5.0.....	27
Slika 17.	Priprema spoja.....	28
Slika 18.	Radni komadi nakon čišćenja	28
Slika 19.	Parametri na aparatu za zavarivanje	29
Slika 20.	Prikaz uzdužnog zareza na površini korijena zavora zavarenog bez skošenja na unutarnjem rubu cijevi.....	30
Slika 21.	Zavarivanje cijevi u zavarivačkoj radionici Iskra brodogradilište Šibenik	30
Slika 22.	Redoslijed zavarivanja.....	31
Slika 23.	Izgled zavora nakon drugog prolaza.....	31
Slika 24.	Prikaz korijena zavora zavarenog sa skošenjem na unutarnjem rubu cijevi.....	32
Slika 25.	Uzorci za ispitivanje izrezani na tračnoj pili	33
Slika 26.	RTG uređaj – Balteau 300 D	36
Slika 27.	Radiografsko snimanje uzorka.....	37

Slika 28.	Radiografska snimka uzorka.....	37
Slika 29.	Epruveta za statički vlačni pokus	38
Slika 30.	Epruveta uklještena u kidalici.....	39
Slika 31.	Dijagram sila-produljenje	40
Slika 32.	Epruveta ispitana statičkim vlačnim pokusom na kidalici	41
Slika 33.	Makroskopska snimka metala zavora i ZUT-a.....	42
Slika 34.	Prikaz ispitivanja savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u.....	43
Slika 35.	Rezultati ispitivanja savijanjem	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podoznake za H – hladno deformirano	5
Tablica 2. Podoznake za T – toplinski obrađeno.....	6
Tablica 3. Maksimalno strujno opterećenje u ovisnosti o vrsti i promjeru elektrode.[6]	15
Tablica 4. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [12]	17
Tablica 5 Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge nastavak [17]	24
Tablica 6. Tehničke karakteristike izvora struje MagicWave 3000 [15].....	26
Tablica 7. Mehanička svojstva prema atestu osnovnog materijala	26
Tablica 8. Prikaz kemijskog sastava ispitne ploče prema atestu osnovnog materijala.....	26
Tablica 9. Mehanička svojstva dodatnog materijala [20]	27
Tablica 10. Prikaz kemijskog sastava dodatnog materijala [20]	27
Tablica 11. Ocjenjivanje kvalitete zavora [26]	34
Tablica 12. Ocjenjivanje kvalitete zavora [26]	65
Tablica 1. Podoznake za H – hladno deformirano [1]	5

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost
f	Hz	Frekvencija
F _k	kN	Konačna sila kod koje dolazi do pucanja epruvete
F _m	kN	Maksimalna sila kod statičkog vlačnog pokusa
P _{Al}	kg/m ³	Gustoća aluminija
P _Č	kg/m ³	Gustoća čelika
I	A	Struja
MIG		Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina
σ	N/mm ²	Naprezanje
R _e	N/mm ²	Granica razvlačenja
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
S ₀	mm ²	Površina presjeka epruvete
t	°C	Temperatura
t	mm	Debljina osnovnog materijala kod ocjenjivanja kvalitete zavora
TIG		Elektrolučno zavarivanje netačljivom elektrodom
U	V	Napon

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisana je podjela aluminijskih legura, njihove karakteristike i problematika zavarljivosti aluminijskih legura s posebnim osvrtom na primjenu aluminijskih legura u brodogradnji. Detaljno je opisan TIG postupak zavarivanja te je objašnjena klasifikacija osnovnih vrsta spojeva koji se primjenjuju pri izradi brodskih konstrukcija. U posljednjem dijelu teorijskog rada dan je pregled pripreme spojeva za zavarivanje aluminijskih legura prema normi HRN EN ISO 9692-3.

U eksperimentalnom dijelu rada odabrana je tehnologija zavarivanja aluminijske legure 6082 T6. Strojnom obradom sukladno normi HRN EN ISO 9692-3 pripremljene su dvije cijevi. Provedeno je zavarivanje radnih komanda AC TIG postupkom. Naposljetku su provedena ispitivanja radiografskom metodom, statično-vlačni pokus i ispitivanje savijanjem te je izvršena makroskopska analiza. Na temelju dobivenih rezultata eksperimentalnog rada donesen je zaključak.

Ključne riječi: Aluminij, TIG zavarivanje u brodogradnji, norma HRN EN ISO 9692- 3

SUMMARY

The theoretical part of this thesis deals with the division of the aluminum alloys, their characteristics and weldability problems, with special reference to the application of aluminum alloys in shipbuilding. The TIG welding process is described in detail. Moreover, the classification of the basic types of joints used in the construction of the ship structures is explained. An overview of the preparation of joints for welding aluminum alloys according to the HRN ISO 9692-3 standard is given in the last part of the theoretical work.

In the experimental part the suitable welding technology has been chosen for welding aluminum alloy 6082 T6. Two pipes were prepared by machining accordingly to the HRN ISO 9692-3. Butt welding of pipe was done using the AC TIG technology. Ultimately, tests were carried out using the radiographic method, static tensile test and bending test, along with performing macroscopic analysis. Based on the obtained results of the experimental work, a conclusion was made.

Key words: Aluminum, TIG welding in shipbuilding, HRN EN ISO 9692- 3 standard

1. UVOD

Aluminij nudi mnoge prednosti kao građevni materijal. Male je specifične težine, izrazite čvrstoće i korozijske otpornosti te se lako preoblikuje. Širok spektar njegove primjene vidljiv je u brodogradnji, automobilske, biciklističke, željezničke industriji, građevinarstvu, izradi kontejnera, strojeva itd. [11]

Temperatura taljenja prevlake aluminijskog oksida (2060°C) mnogo je viša od temperature tališta samog metala (660°C) te je oksidni sloj nužno odstraniti prije zavarivanja. Naime, tijekom zavarivanja može doći do uključivanja oksidnog sloja u područje zvara, što potencijalno uzrokuje nedostatak homogenosti metala zvara i smanjuje čvrstoću zvara. Aluminij izrazito dobro provodi toplinu što rezultira prekomjernim rasipanjem topline te može znatno otežati zavarivanje ili rezultirati neželjenim izobličenjem dijelova zbog prekomjernog unosa topline.[1] [11]

TIG zavarivanje aluminija i aluminijskih legura izvodi se izmjeničnom strujom, a karakteristike same taljevine drukčije su od one kod čelika. TIG postupak zavarivanja omogućuje stvaranje dovoljno topline kako bi se rastalilo područje zvara, a može se koristiti za spajanje debelih i tankih profila. Kao zaštitni plinovi koriste se inertni plinovi argon i helij, a dodatni materijal se u obliku žice/šipke dodaje u talinu.[1]

2. ALUMINIJSKE LEGURE

Aluminij je kemijski element koji čini oko 8% zemljine kore, što ga čini najzastupljenijim metalom i trećim najzastupljenijim elementom nakon kisika i silicija. Aluminij je dobro poznat po maloj gustoći, a zahvaljujući fenomenu pasivizacije, izvrsnoj otpornosti na koroziju. Danas je aluminij sveprisutan inženjerski materijal jer ga karakterizira dobar omjer čvrstoće i težine uz razumnu cijenu.[1]

2.1. Osnovna fizikalna svojstva aluminija [14]

- Mala gustoća ($\rho_{Al}=2660 \text{ kg/m}^3$ dok čelik $\rho_{\epsilon}=7850 \text{ kg/m}^3$)
- Visok omjer čvrstoće i težine
- Niska krutost (modul elastičnosti 70 GPa u usporedbi s čelikom 210 GPa)
- Zadržava dobru duktilnost na temperaturama ispod nule
- Visoka otpornost na koroziju
- Visoko elektronegativan
- Treba izbjegavati spajanje s plemenitim metalima (npr. bakrom)
- Nije otrovan
- Nema promjene boje kada se zagrije do raspona temperature zavarivanja
- Visoka toplinska vodljivost
- Deblji dijelovi mogu zahtijevati predgrijavanje
- Aluminij i njegove legure brzo razvijaju žilav, vatrostalan oksidni film kada su izložene zraku

2.2. Podjela aluminijskih legura

Aluminijske legure upotrebljavaju se u lijevanom i gnječenom stanju. Lijevani aluminij dobiva se kad se taljevina iz peći izlije u kalup, a gnječeni obradom metala pomoću alata u čvrstom stanju.[3]

Lijevane legure aluminija danas primjenu nalaze ponajviše u transportnom sektoru, primjerice za izradu blokova motora, glave motora, klipove. Aluminijske legure mogu se lijevati jednako dobro na sva tri osnovna načina: u pijesku, u kokilu i tlačno.[3]

Gnječene legure aluminija imaju izuzetna mehanička svojstva, proizvode se taljenjem čistih aluminijskih ingota s legirnim elementima potrebnim za izradu određene klase aluminija. Rastaljena legura se zatim lijeva te se valja, gnječi ili ekstrudira u svoj konačan oblik. U nekim slučajevima, legure se toplinski obrađuju kako bi se dodatno poboljšala njihova svojstva. Koriste se u obliku ploča, limova, otkivaka, žica.[4]

2.3. Legirni elementi

Čisti aluminij relativno je mekan te se dodavanjem malih količina legirnih elemenata dobiva čitav niz novih mehaničkih svojstava. Primarni elementi koji se koriste za legiranje aluminija su bakar, silicij, mangan, magnezij i cink. U aluminijskim legurama imat će sljedeći efekt[2]:

- bakar je legirni element koji povećava čvrstoću.
- silicij snižava temperaturu taljenja i poboljšava fluidnost taljevine.
- mangan osigurava veću čvrstoću uz izvrsnu duktilnost.
- magnezij daje veću čvrstoću te zadržava dobru korozijsku otpornost, a u kombinaciji sa silicijem dobiva se legura s većom čvrstoćom i dobrim ekstruzijskim osobinama.
- cink u kombinaciji s magnezijem i bakrom daje visoku čvrstoću. Legure cinka i magnezija imaju sposobnost nadoknađivanja čvrstoće koja je opala zbog utjecaja zavarivanja

Sekundarni legirajući elementi su krom, željezo, cirkonij, vanadij, bizmut, nikal i titan. Ovi elementi se dodaju kako bi poboljšali toplinsku obradivost, čvrstoću, korozijsku otpornost i ostala svojstva.[2]

2.4. Označavanje aluminijskih legura

U europskom sustavu se koriste sljedeći prefiksi [5]:

- AB – ingoti,
- AC – lijevani materijal,
- AM – predlegura za lijevanje,

- AW – gnječeni materijal

2.4.1. Označavanje gnječenih aluminijskih legura

Određene komercijalne legure imaju četveroznamenkastu oznaku prema međunarodnim specifikacijama za gnječene legure ili ISO alfa-numeričkom sustavu. Legure su grupirane prema glavnim legirnim elementima [1]:

- AW 1XXX – tehnički čisti aluminij,
- AW 2XXX – aluminij-bakar legure,
- AW 3XXX – aluminij-mangan legure,
- AW 4XXX – aluminij-silicij legure,
- AW 5XXX – aluminij-magnezij legure,
- AW 6XXX – aluminij-magnezij-silicij legure,
- AW 7XXX – aluminij-cink-magnezij legure,
- AW 8XXX – ostali elementi, npr. litij, željezo,
- AW 9XXX – nije određena legirna grupa.

Prva znamenka serije označava glavni legirajući element dodan aluminijskoj leguri i koristi se za opisivanje serije, tj. Serije 1000 ili 5000, itd. Druga znamenka predstavlja modifikaciju specifične legure unutar serije; tj. x1xx predstavlja prvu modifikaciju navedene legure, dok x2xx predstavlja drugu modifikaciju. Treća i četvrta znamenka identificiraju leguru unutar određene serije i označavaju čistoću aluminijske legure. Ukratko, legura 5083 je u seriji legura 5000, nema modifikacija i određena je legura tipa 83. [1]

2.4.2. Označavanje lijevanih aluminijskih legura

Ljevačke aluminijske legure se dijele na 11 podskupina [5]:

- AC 2 1 XXX – Al Cu,
- AC 4 1 XXX – Al SiMgTi,
- AC 4 2 XXX – Al Si7Mg,
- AC 4 3 XXX – Al Si10Mg,
- AC 4 4 XXX – Al Si,

- AC 4 5 XXX – Al Si5Cu,
- AC 4 6 XXX – Al Si9Cu,
- AC 4 7 XXX – Al Si(Cu),
- AC 4 8 XXX – Al SiCuNiMg,
- AC 5 1 XXX – Al Mg,
- AC 7 1 XXX – Al ZnMg.

Kao i kod gnječenih prva znamenka serije označava glavni legirajući element dok su druga i treća znamenka proizvoljne i koriste se za označavanje određene legure u skupini. Četvrta znamenka označava je li legura za lijevanje gotovog oblika (0) ili za lijevanje ingota (1 ili 2 ovisno o čistoći) [2].

2.5. Oznake temperiranja aluminija

Aluminijske legure također mogu sadržavati oznaku temperiranja, koja definira dodane korake obradi (ako se implementiraju). Na mehanička svojstva aluminijskih legura ne utječe samo kemijski sastav, već i stanje u kojem se nalaze, npr. odžareno, hladno deformirano, precipitacijski očvrsnuto. [1]

Oznake temperiranja su :

- F - primarno isporučeno stanje. Oznaka se odnosi se na gnječene legure gdje nije primijenjena posebna kontrola nad uvjetima toplinskog procesa ili deformacijskog očvršćivanja.
- O - žareno stanje. Oznaka se odnosi na proizvod koji je zagrijan kako bi se postigao najniži uvjet čvrstoće i time povećala duktilnost.
- H – hladno deformirano. Oznaka se odnosi na proizvode koji su očvrsnuti deformacijom. Obrada deformiranjem može biti popraćena dodatnom termičkom obradom.
- W – homogenizacijski žareno. Nestabilno stanje i odnosi se samo na legure koje očvršćuju na sobnim temperaturama, nakon homogenizacije.
- T – toplinski obrađeno. Vrši se s ciljem dobivanja stabilnog stanja (različitog od F, O ili H). Ponekad se primjenjuje u kombinaciji s deformacijskim očvršćivanjem.

Podoznake temperiranja. Prvi broj iza slova H označava osnovno stanje [Tablica 1].

Tablica 1. Podoznake za H – hladno deformirano [1]

H oznaka temperiranja	Značenje
H1	Hladno deformirano
H2	Hladno deformirano i djelomično žareno
H3	Hladno deformirano i stabilizirano
H4	Hladno deformirano i zaštićeno prevlakom

Podoznake temperiranja. Prvi broj iza slova T označava osnovno stanje [Tablica 2].

Tablica 2. Podoznake za T – toplinski obrađeno [1]

T oznaka temperiranja	Značenje
T1	hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i prirodno dozrijevano
T2	hlađeno s povišene temperature preoblikovanja, hladno deformirano i prirodno dozrijevano
T3	homogenizirano, hladno deformirano i prirodno dozrijevano
T4	homogenizirano i prirodno dozrijevano
T5	hlađeno s povišene temperature oblikovanja i umjetno dozrijevano
T6	homogenizirano i umjetno dozrijevano
T7	homogenizirano i stabilizirano
T8	homogenizirano, hladno deformirano i umjetno dozrijevano
T9	homogenizirano, umjetno dozrijevano i hladno deformirano

3. ZAVARLJIVOST ALUMINIJA

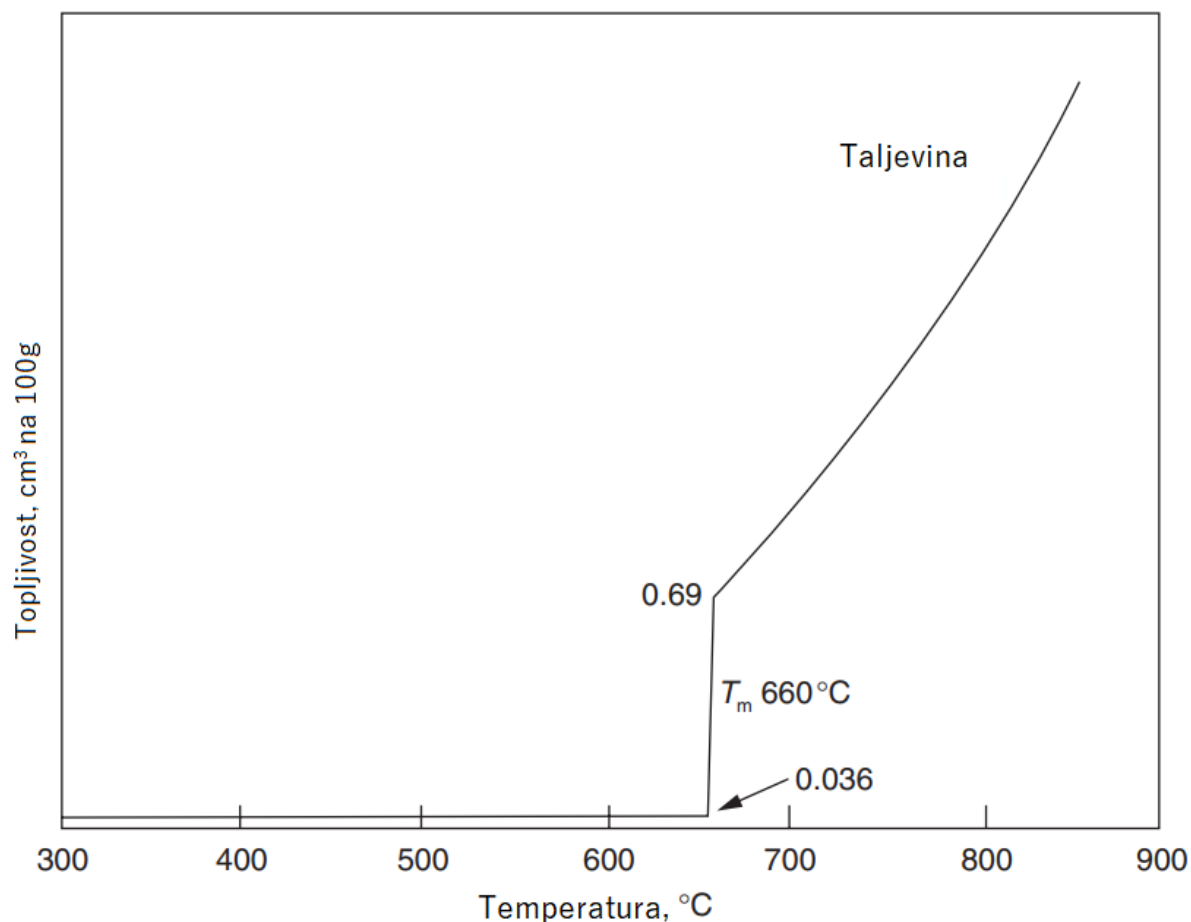
U idealnom zavaru cijeli zavareni spoj koji se sastoji od metala zavara, zone utjecaja topline (ZUT) i susjednog osnovnog metala treba imati ista svojstva kao i osnovni metal. Međutim postoji niz problema povezanih sa zavarivanjem aluminija i njegovih legura koji otežavaju postizanje ovog ideala. Značajke i nedostaci koji mogu doprinijeti gubitku svojstava uključuju sljedeće [5] :

- Poroznost
- Oksidni sloj i uključci oksida
- Tople pukotine
- Smanjena čvrstoća u zavaru i ZUT-u
- Nepotpun provar
- Smanjena otpornost na koroziju
- Smanjeni električni otpor

3.1. Poroznost aluminija i njegovih legura

Poroznost je problem ograničen na metal zavara. Uzrok toj grešci je plin otopljen u rastaljenom metalu zavara koji ostaje zarobljen zbog smanjenja topljivosti tijekom solidifikacije metala te tako tvori mjehuriće u skrutnutom zavaru. Pad topljivosti vodika je toliko izražen da je izuzetno teško zavariti aluminij bez poroznosti. Poroznost može varirati od izuzetno sitne mikro poroznosti do pora promjera 3 do 4 mm. Pore u slučaju aluminija stvara vodik koji ima visoku topljivost u rastaljenom aluminiju, ali vrlo nisku topljivost u krutom stanju[5].

Na [Slika 1] prikazano je smanjenje topljivosti vodika u aluminiju kako se skrućivanje odvija.



Slika 1. Topljivost vodika u aluminiju [5]

3.2. Aluminijev oksid

Aluminijev oksid Al_2O_3 je vrlo tvrd i brzo stvarajući oksid koji daje aluminiju izvrsnu otpornost na koroziju. Aluminijev oksid ima vrlo visoku točku taljenja koja iznosi 2060°C u usporedbi s čistim metalom čija točka taljenja iznosi 660°C . Zagrijavanje aluminija bez čišćenja oksidnog filma do točke njegovog taljenja rezultirat će rastaljenim aluminijem okruženog oksidnom membranom koja sprječava taljevinu metala da se spaja s osnovnim metalom. Oksidni film se mora ukloniti kako bi se moglo zavarivati.[5]

3.3. Tople pukotine

Pukotine u zavaru koje nastaju pri visokim temperaturama dok se metal zavara skrućuje. Dodatak legirnih elemenata u čisti aluminij uzrokuje promijene u temperaturi skrućivanja jer se skrućivanje tada odvija u većem rasponu temperatura. Tijekom skrućivanja dio taljevine će biti prisutan u inter-dendritskim područjima dok se metal zavara hladi i skuplja. Naprezanje skupljanja tada uzrokuje pojavu pukotina u inter-dendritskim područjima. Sve aluminijske legure su osjetljive na tople pukotine i ovise samo o stupnju osjetljivosti. Osnovni način za sprječavanje pojave pukotina u zavarima aluminijskih legura je upravljanje sastavom metala zavara korištenjem odgovarajućeg dodatnog materijala.[2]

Na [Slika 2] prikazana topla je pukotina nastala tijekom zavarivanja aluminija.

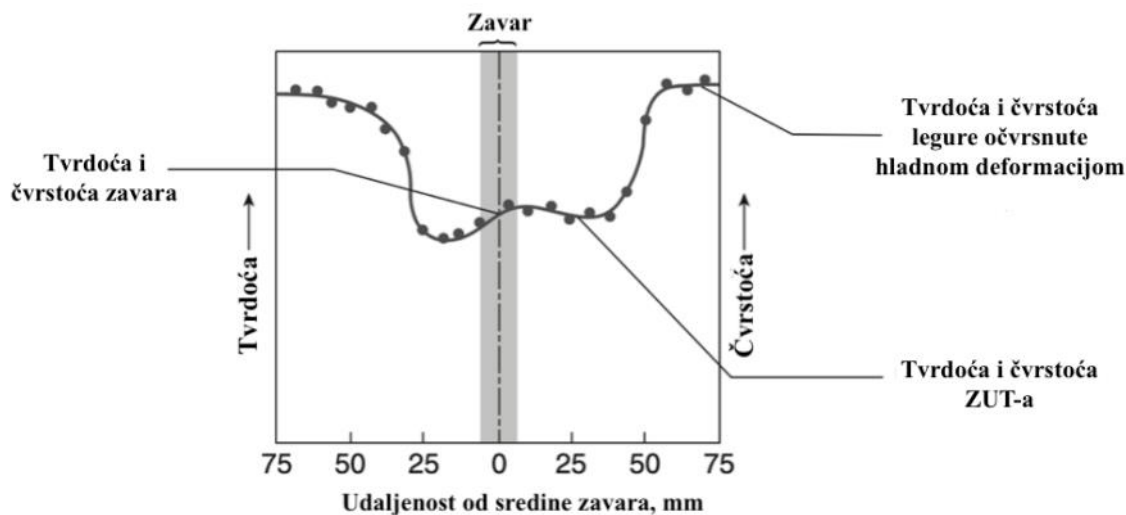


Slika 2. Prikaz tople pukotine nastale tijekom zavarivanja aluminija[5]

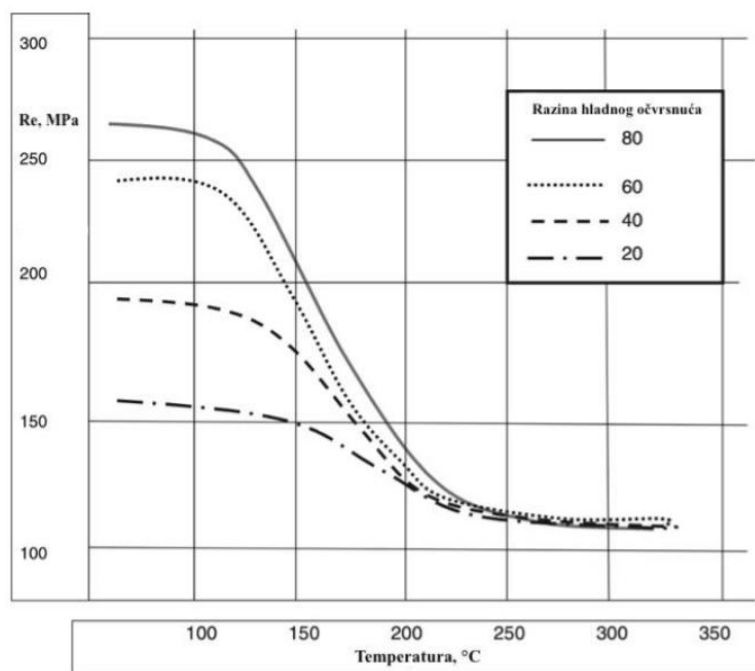
3.4. Smanjenje čvrstoće zbog utjecaja topline zavarivanja

Toplina unesena postupkom zavarivanja rezultira stvaranjem različitih zona zavarenog spoja. Razlikujemo osnovni materijal, zonu utjecaja topline i metal zavara. Budući da ZUT može proći više ciklusa zagrijavanja i hlađenja svojstva ZUT-a mogu biti različita od nepromijenjenog osnovnog materijala. To se posebno odnosi na aluminijske legure koje su

bile podvrgnute hladnom ili precipitacijskom očvršnuću u kojima je došlo do rekristalizacije [Slika 3]. Rekristalizacija se počinje odvijati kada temperatura u ZUT-u prijeđe 200°C te se punim opsegom odvija na temperaturama iznad 300 °C kao što je prikazano na [Slika 4]. [5]



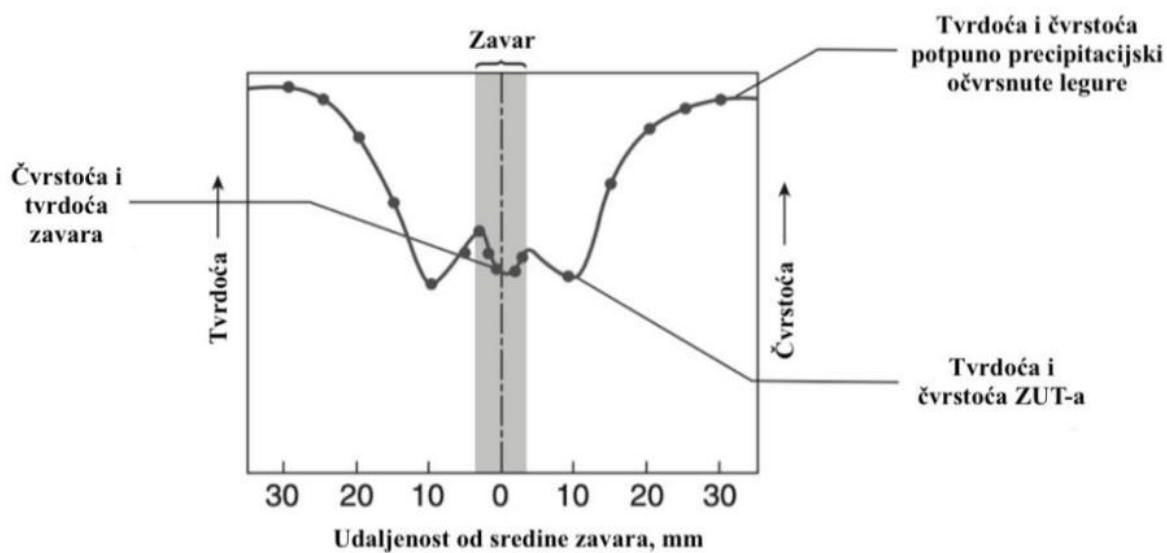
Slika 3. Utjecaj unosa topline na legure aluminija očvrsnute hladnom deformacijom [5]



Slika 4. Utjecaj temperature žarenja na granicu razvlačenja [5]

Smanjenje čvrstoće zbog utjecaja unosa topline može se primijetiti i u legurama koje se toplinski obrađuju. Rezultat unosa topline je pogrubljenje zrna te samim time smanjenje čvrstoće zavarenog spoja. Međutim, poslije zavarivanja, legure se mogu dodatno ojačati

toplinskom obradom te se čvrstoća spoja može dovesti do razine čvrstoće osnovnog materijala. Nadalje, izbor odgovarajućeg dodatnog materijala može značajno doprinijeti većoj čvrstoći metala zavar.[5]



Slika 5. Utjecaj unosa topline na precipitacijski očvrsnute legure [5]

4. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA TIG POSTUPKOM

Ovaj postupak zavarivanja poznat je kao TIG ili WIG ili kao GTAW (141)

- TIG = Tungsten Inert Gas
- WIG = Wolfram Inert Gas
- GTAW = Gas Tungsten Arc Welding

(Tungsten = eng. Volfram, Inert = eng. inertni, Gas = plin)

TIG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Električni luk služi kao izvor topline, a ovisno o potrebi zavarivač dodaje dodatni materijal u kupku rastaljenog metala. Na mjesto taljenja dovodi se zaštitni plin argon ili helij (Ar, He), tako da se zavarivanje izvodi u zaštitnoj atmosferi. Taljevina se lako kontrolira te se mogu napraviti provari korijena bez uporabe podloške. Električni luk je izrazito stabilan i pri niskoj struji zavarivanja što omogućuje i zavarivanje tankih limova. Kvaliteta zavarenog spoja TIG postupkom je vrlo visoka. Brzina zavarivanja TIG postupkom manja je od brzine zavarivanja MIG/MAG postupkom te ima manji depozit dodatnog materijala što ga čini manje isplativim u pojedinim slučajevima.[5]

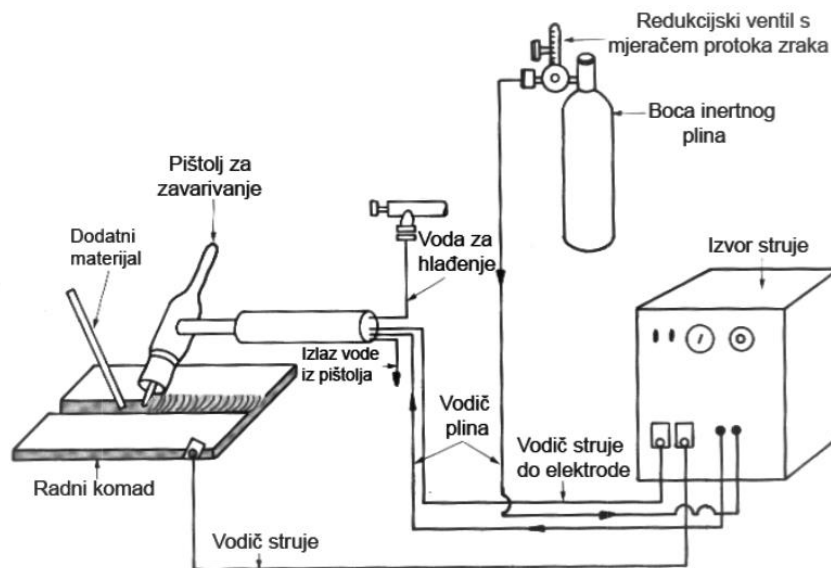
4.1. Oprema za TIG zavarivanje

Uređaj za zavarivanje TIG postupkom sastoji se od:

- Izvora struje zavarivanja,
- Komadnog ormarića s upravljačkim uređajem i visokofrekventnim ili impulsnim generatorom,
- Pištolja za zavarivanje s volframovom elektrodom i pripadajućim polikabelom (u kojem se nalaze cijevi za hlađenje, cjevovoda za dovod plina, kabla za dovod struje i vodova za upravljanje),
- Boce sa zaštitnim plinom i pripadajućim redukcionim ventilom i mjerачem protoka plina.[6]

Na [Slika 6] shematski je prikazano zavarivanje TIG postupkom. Pištolj za zavarivanje u kojem se nalazi volframova elektroda, spojen je na polikabel. Zaštitni plin se iz boce preko redukcijskog ventila kroz polikabel dovodi u pištolj za zavarivanje. S izvorom struje spojen je

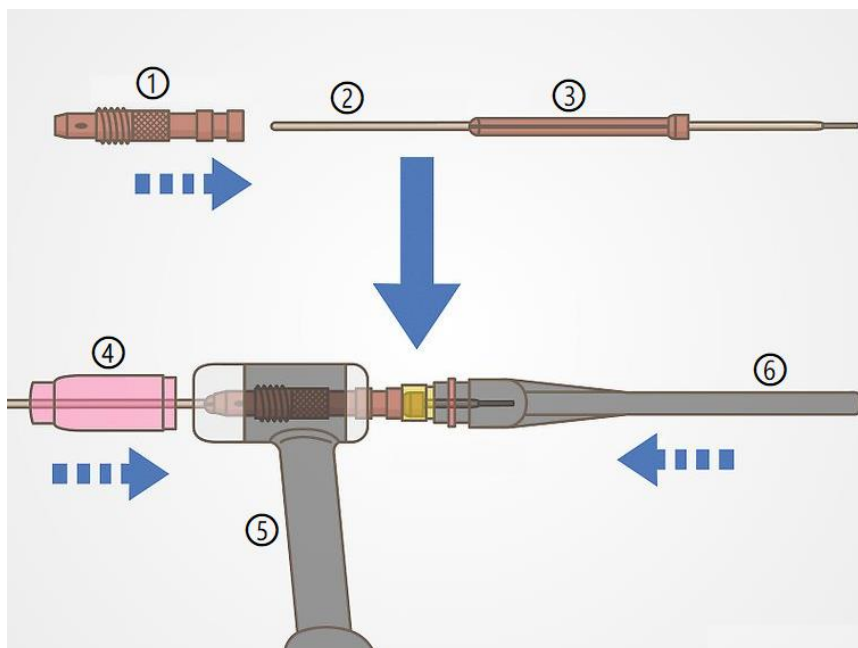
priključak mase na radnom komadu i volframova elektroda pomoću polikabela. Za veća strujna opterećenja pištolj za zavarivanje se hladi vodom.[6]



Slika 6. Oprema za TIG zavarivanje [8]

4.2. Pištolj za TIG zavarivanje

Pištolji za TIG zavarivanje mogu se podijeliti u dvije skupine ovisno o tome hlade li se s rashladnom tekućinom ili zrakom. Pištolji hlađeni sa zrakom namijenjeni su za manje jakosti struje zavarivanja (150-200 A) te imaju kraće vrijeme opterećenja, dok su pištolji hlađeni s rashladnom tekućinom namijenjeni za veća strujna opterećenja (< 200 A) te imaju duža vremenska opterećenja.[8]



Slika 7. Osnovni dijelovi pištolja za TIG postupak zavarivanja [8]

Osnovni dijelovi pištolja za zavarivanje prikazani su na [Slika 7]. Elektroda (2) je učvršćena u tijelu pištolja pomoću stezača (1) i kontaktne cjevčice (3). Na izlazu elektrode nalazi se sapnica za plin (4). Kapa pištolja (6) ima zadatak da zaštiti volframovu elektrodu od lomljenja i da spriječi izlaz plina prema gore. Na tijelu pištolja (5) nalazi se rukohvat s prekidačem za uključivanje i isključivanje struje, dovoda plina i vode za hlađenje (ako je pištolj hlađen vodom). Od rukohvata vodi snop cijevi koji sadrži kabel za dovod struje zavarivanja, cjevovod za dovod plina, vodove za upravljanje i cjevovod za dovod vode za hlađenje (ako je pištolj hlađen vodom).[6]

Sapnice za plin mogu biti izrađene od metala ili keramike. Metalne sapnice se hlade rashladnom vodom da se ne bi istopile pod utjecajem temperature dok se keramičke mlaznice upotrebljavaju gdje nema hlađenja vodom. Radi sigurne zaštite rastaljenog metala, elektroda ne smije stršiti iz mlaznice više od 5 do 8 mm.[6]

4.3. Elektroda za TIG zavarivanje

Za TIG zavarivanje se zbog visoke temperature taljenja upotrebljava elektroda od volframa. Elektrode od čistog volframa su manje u upotrebi, već se upotrebljavaju elektrode od volframa legirane barijem, cezijem, torijem ili cirkonijem. Torij i cirkonij se dodaju u količini 1 do 2% u obliku torijeva ili cirkonijeva oksida koji omogućuju da elektrode podnose veće strujno opterećenje nego ako se upotrebljava čisti volfram, imaju duži vijek trajanja i povećavaju stabilnost električnog luka zbog lakše emisije elektrona s površine katode. Uključci u zavaru su manji ako se koriste elektrode legirane torijem ili cirkonijem nego ako se koriste elektrode od čistog volframa. Elektrode legirane cirkonijem namijenjene su za rad s izmjeničnom strujom, posebno za zavarivanje aluminija i magnezija.

Standardna duljina elektrode iznosi 175 cm, a proizvode se u promjerima od 0,5 do 6,4 mm. Vijek trajanja elektrode iznosi 30 do 40 radnih sati, ovisno o uvjetima rada i vrsti struje.[6] Maksimalno strujno opterećenje ovisi o promjeru elektrode, te o vrsti i polu struje. Ti podaci navedeni su u [Tablica 3].

**Tablica 3. Maksimalno strujno opterećenje u ovisnosti
o vrsti i promjeru elektrode.[6]**

Ø Elektrode mm	Maksimalno strujno opterećenje		
	Torirana elektroda		Elektroda s cirkonijem
	Istosmjerna struja -pol	Izmjenična struja	Izmjenična struja
0,8	45	30	-
1,0	60	35	35
1,2	75	40	40
1,6	145	55	55
2,4	240	90	90
3,2	380	140	150
4,0	440	195	210
4,8	500	250	275
5,6	-	275	320

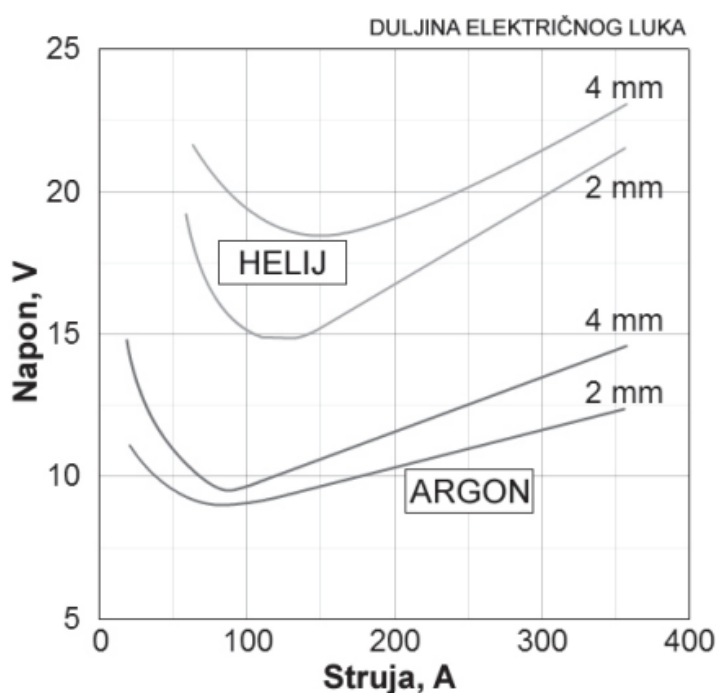
4.4. Zaštitni plinovi

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u primjeni TIG postupka su argon, helij ili njihova mješavina. Izvorni plin koji se koristio u primjeni TIG postupka bio je helij no danas je argon taj koji je najčešće u upotrebi. Oba plina su inertna, tj. prilikom zavarivanja ne dolazi do kemijskih reakcija između zaštitnog plina i osnovnog materijala. Zaštitni plin osim što ima ulogu u zaštiti rastaljenog materijala od utjecaja atmosfere, direktno utječe i na stabilnost te kvalitetu električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, estetski izgled zavarenog spoja kao i na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja.

Argon, osim zbog cijene niže od helija ima niz drugih prednosti. Ima niski ionizacijski potencijal (energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion), 15,7 eV, što olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. Teži je od zraka 1,4 puta što mu omogućava da dobro štiti rastaljeni metal te omogućuje zavarivanje s manjim protokom plina od primjerice helija. U odnosu na helij ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira

kompaktnijim električnim lukom čime se dobiva manja penetracija i protaljivanje. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95%, iznimno 99,997%.

Ionizacijski potencijal helija veći je od argona te iznosi 24.5 eV što mu otežava uspostavu električnog luka. Male je mase (10 puta manje nego argon), zbog čega protoci helija moraju biti i do tri puta veći u odnosu na argon. Helij ima vrlo dobru toplinsku vodljivost te daje širi električni luk. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i unos topline (napon električnog luka sa zaštitnim plinom helijem je značajno veći nego kod argona pri istim strujama), [Slika 8]. Iz slike je vidljivo povećavanje napona električnog luka pri nižim strujama (kod helija je to između 50 i 100 A što je nepovoljno kod zavarivanja tanjih materijala koje se upravo i zavaruju u ovom rasponu struja). Minimalna potrebna čistoća helija kao zaštitnog plina iznosi 99,99%.[9]



Slika 8. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja [9]

Osim čistog inertnog plina argona i helija, česta je upotreba i njihove mješavine u različitim omjerima. Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava argona odnosno helija, a primjeri karakteristika zavarivanja dana je u [Tablica 4] [9].

Tablica 4. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [12]

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	smanjena	veća nego kod 100% Ar	veća
Penetracija	smanjena	veća nego kod 100% Ar	povećana
Čišćenje oksida	dobro	sličnije kao kod 100% Ar	loše
Uspostava luka	laka	bolja nego kod 100% He	otežana
Stabilnost luka	dobra	bolja nego kod 100% He	niža kod manjih struja
Oblik luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	širi
Napon luka	manji	srednja	veći
Protok	manji	veći nego kod 100% Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego 100% Ar	veća nego 100% Ar

4.5. Dodatni materijal

Izbor dodatnog materijala ovisi o nekoliko faktora uključujući sljedeće: [13]

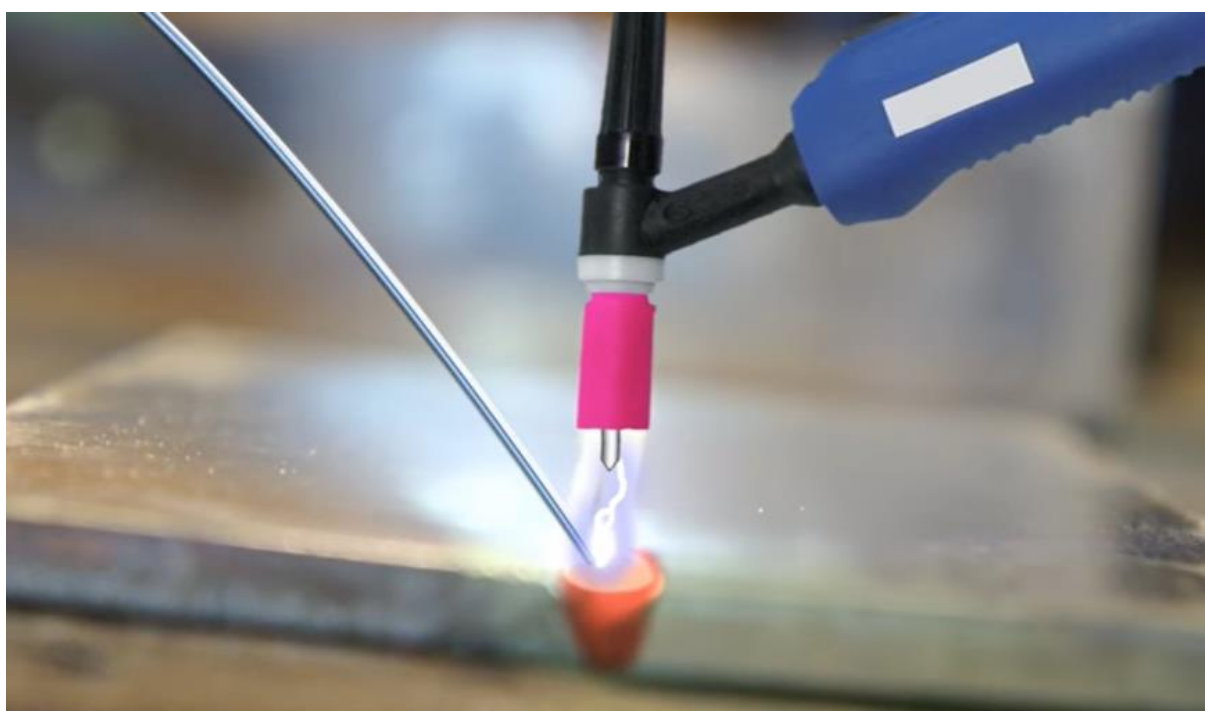
- Kompatibilnosti s kemijskim sastavom osnovnog materijala npr. sklonost pucanju zavara
- Mehaničkim svojstvima koja se zahtijevaju od spoja (uzimajući u obzir i ZUT i svojstva metala zavara)
- Naknadne obrade zavarenog dijela ili konstrukcije, npr. površinska obrada, eloksiranje i dekorativna završna obrada
- Otpornost na koroziju koja se zahtijeva od spoja
- Optimalna zavarljivost

Legure s visokim sadržajem magnezija (5356, 5183 i 5556) kao dodatni metal za zavarivanje koriste leguru 5083 koja pruža najveću čvrstoću zavara i financijski je isplativa. Međutim za zavarivanje legure 6061 treba koristiti legure s visokim sadržajem silicija (4043 ili 4047).[14]

Dodatni materijal trebao bi biti skladišten u originalnom pakiranju na suhom mjestu adekvatno zaštićenom od okolišnih utjecaja prema preporukama proizvođača.[13]

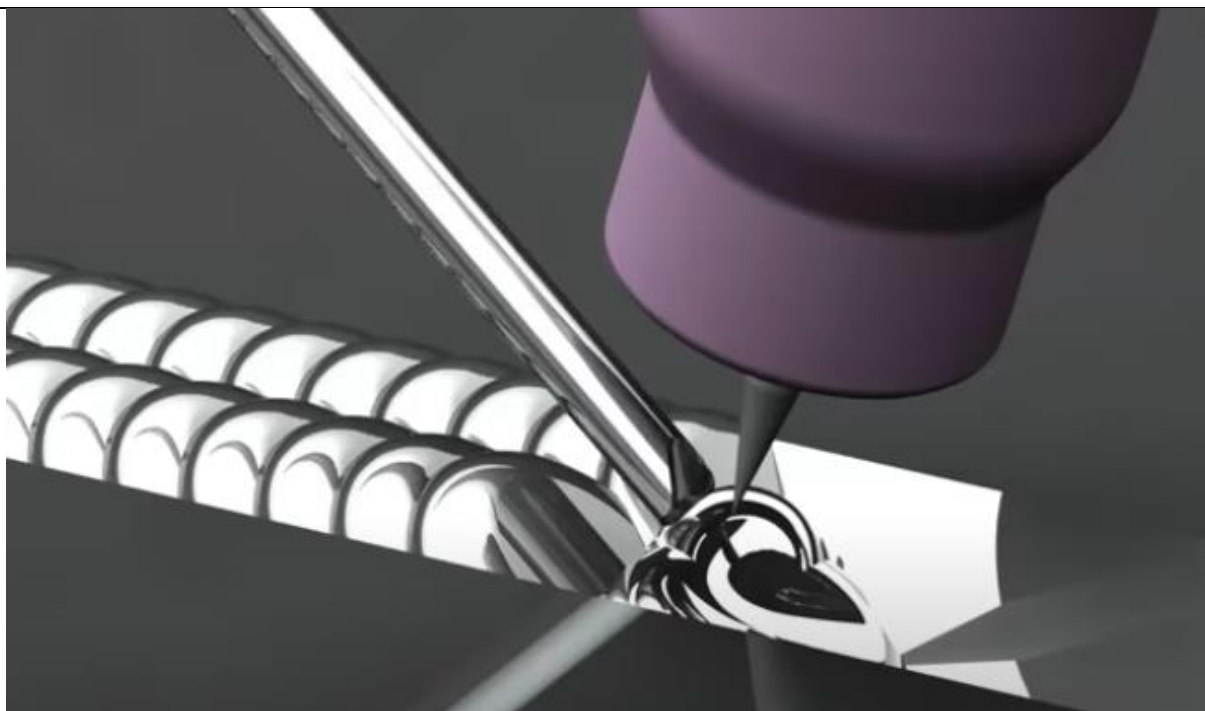
4.6. Tehnika rada

TIG postupkom mogu se zavarivati različiti metali primjenom različitih vrsta žljebova i u svim položajima zavarivanja. Površina osnovnog materijala se prije zavarivanja mora očistiti od ulja, masnoća i boja da bi se dobio zavareni spoj zadovoljavajućih mehaničkih karakteristika. Aluminij po površini brzo stvara oksidnu prevlaku pa ga treba zavarivati neposredno nakon čišćenja. Dodatni materijal također mora biti očišćen. Zagrijani kraj žice uvijek treba biti u atmosferi zaštitnog plina kako ne bi oksidirao.[6]



Slika 9. Uspostava električnog luka [8]

Kad se upotrebljava dodatni materijal, on se uvodi direktno u talinu. Šipka se drži pod kutom od 10° do 20° od horizontalne osi, a nagib pištolja je 100° do 110° . Sučeljeno zavarivanje sasvim tankih materijala izvodi se bez upotrebe dodatnog materijala, a pištolj se vodi pravolinijski. Za limove veće debljine promjer žice će biti veći.[6]



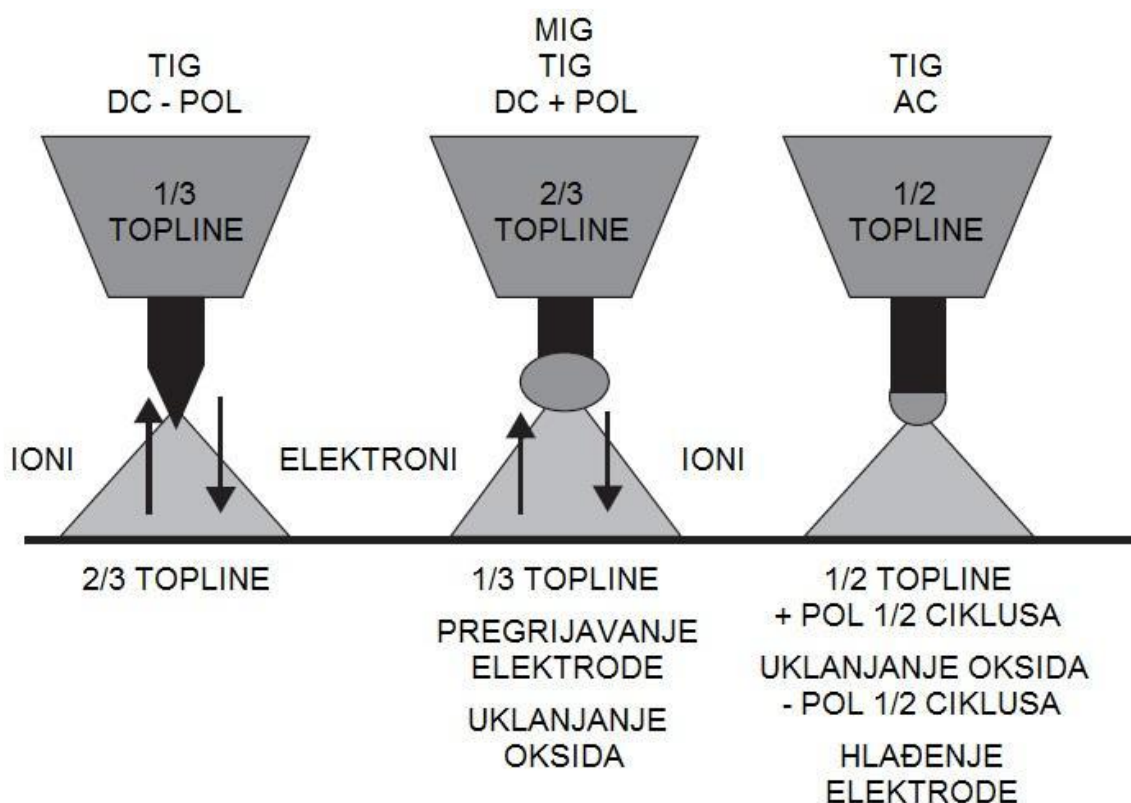
Slika 10. Uspostava el. luka, taljenje dodatnog i osnovnog materijala. [8]

Osnovni materijal se rastali toplinom električnog luka [Slika 9.], pri čemu se dodatni materijal ne nalazi u električnom luku. Pištolj se zatim ukloni za oko 6 mm, a istovremeno se u talinu uvede žica [Slika 10.]. Kad se žica ukloni, kapljica metala ostaje u talini, a istovremeno se pištoljem opet zagrijava osnovni materijal. Zavarivanje se izvodi bez uvođenja dodatnog materijala u električni luk. Tako ne postoji opasnost od prenošenja kapljica iz taline i električnog luka na volframovu elektrodu.[6]

4.7. Vrsta struje i polaritet elektrode

Zavarivanje TIG postupkom može se izvoditi izmjeničnom ili istosmjernom strujom. Pri zavarivanju aluminija potrebno je razoriti oksidni sloj na metalu, a to je moguće samo kad je elektroda priključena na plus pol (DCEP - Direct Current Electrode Positive). Tada se pozitivni ioni kreću prema osnovnom materijalu, udaraju u oksidnu prevlaku na osnovnom materijalu i razaraju je. Ako je elektroda priključena na minus pol (DCEN - Direct Current Electrode Negative), elektroni se u električnom luku kreću od elektrode prema osnovnom materijalu, udaraju u oksidnu prevlaku, ali je ne razaraju i zavarivanje se ne može izvoditi. Zbog toga se ni zavarivanje aluminija ne može izvoditi istosmjernom strujom ako je elektroda priključena na minus pol. Zavarivanje istosmjernom strujom i elektrodom na plus polu

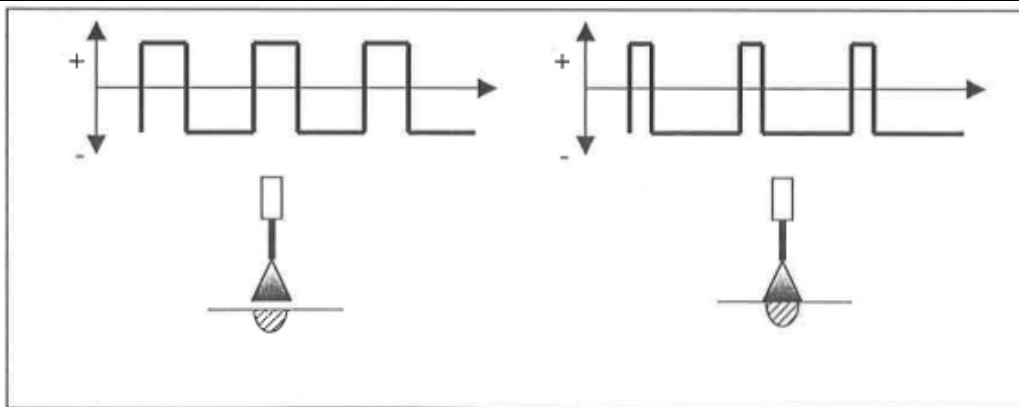
također nije moguće iako se oksidna opna razara. Pri takvom polaritetu elektroda se prekomjerno zagrijava i troši, pa bi se morala koristiti ili sasvim mala strujna opterećenja ili veoma debele elektrode. Rješenje postoji samo ako se upotrebljava izmjenična struja. Zbog promjene smjera struje, pri uporabi izmjenične struje mijenjaju se polovi, tj. naizmjenično se vrši razaranje oksidne prevlake i zavarivanje te hlađenje elektrode. Brzina kojom se te pojave izmjenjuju ovisi o frekvenciji električne struje. [6][9]



Slika 11. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje elektroda i raspodijela topline električnog luka[5]

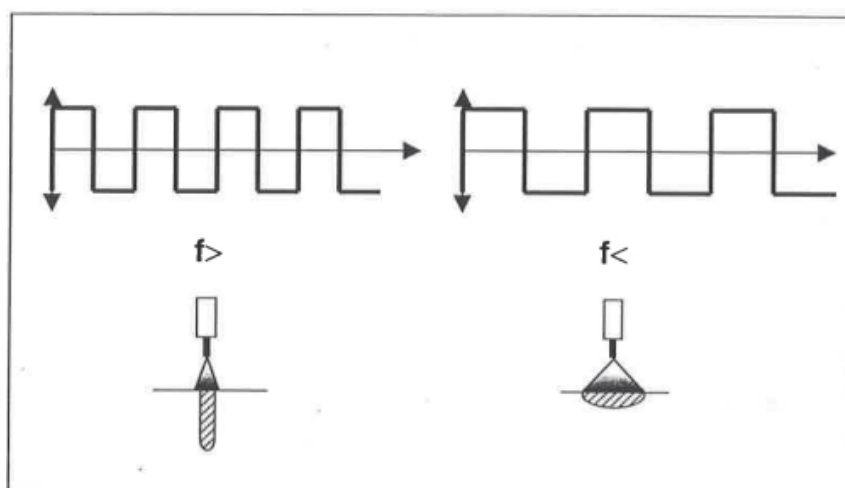
Kod TIG AC zavarivanja promjenom frekvencije izmjenične struje, ali i njezinim balansom (odnosom koliko vremena je elektroda na pozitivnom, a koliko na negativnom polu), može se utjecati na geometriju zavarenog spoja, čišćenje oksida, ali i toplinsko opterećenje radnog komada i elektrode [9].

Ako je oksidni film deblji, postavlja se nešto veći omjer pozitivne polarizacije, a ako je potrebna veća penetracija, a slabije čišćenje (tanji oksid), tada se postavlja na negativniju polarizaciju [Slika 11].[10]



Slika 12. Učinak funkcije BALANCE [10]

Podlašavanje frekvencije struje zavarivanja također utječe na penetraciju i širinu zavora. Niža frekvencija daje širi luk, te se dobiva manja penetracija i širi zavar, a viša frekvencija sužava luk, povećava penetraciju i smanjuje širinu zavora [10].



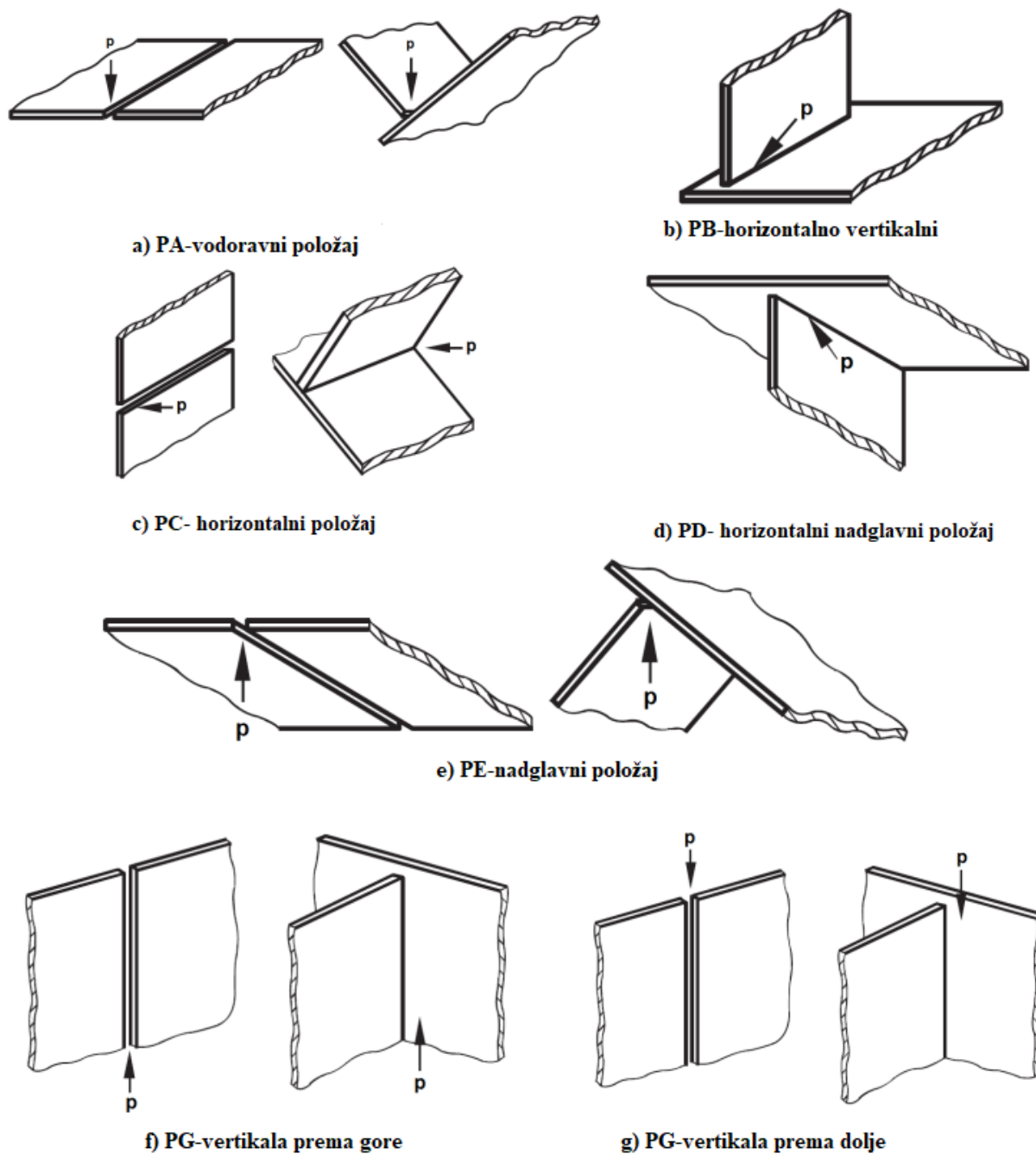
Slika 13. Utjecaj frekvencije na zavar [10]

5. PRIPREMA SPOJEVA ZA ZAVARIVANJE

5.1. Klasifikacija osnovnih položaja zavarivanja

Najčešći oblici zavarenih spojeva su kutni spojevi i sučeonni ili sučeljeni.

Na [Slika 14.] prikazane su neke varijante spojeva i položaji zavarivanja



Slika 14. Prikaz položaja zavarivanja [19]

5.2. Norma HRN EN ISO 9692-3

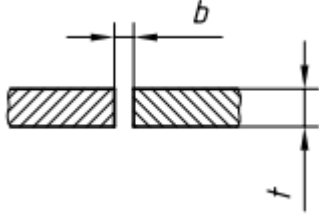
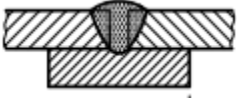
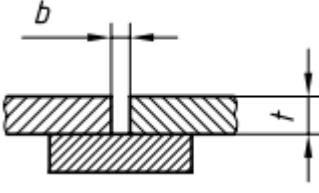
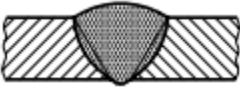
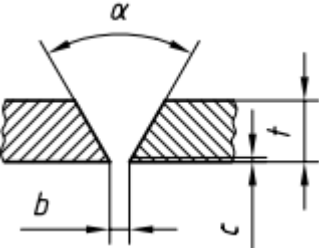
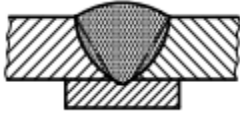
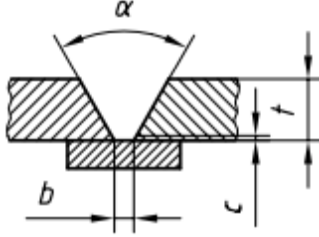
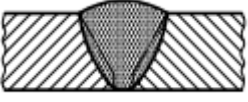
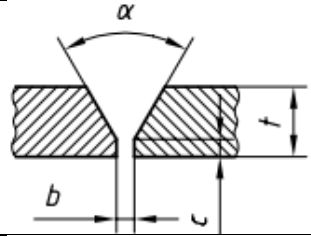
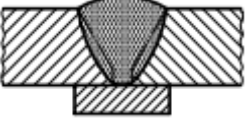
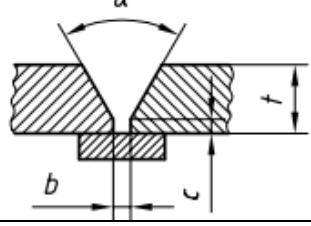
Norma HRN EN ISO 9692-3 Zavarivanje i srodni procesi - Preporuke za pripremu spoja - 3.dio: MIG i TIG zavarivanje aluminija i aluminijskih legura

Ovaj dio norme HRN EN ISO 9692 obuhvaća parametre koji karakteriziraju pripremu spojeva za zavarivanje aluminijskih legura MIG (131) i TIG(141) postupkom.

Priprema rubova obavlja se mehaničkim postupcima (poput rezanja, piljenja ili glodanja), a ako je rezanje izvršeno plazma rezačem, onda treba uzeti u obzir i kvalitetu reznih površina. Upotreba sredstva za čišćenje na bazi mineralnih ulja nije dopuštena. Pri razmacima većim od 1,5 mm preporučuje se upotrebu podloga.

U [Tablici 5]. prikazana je nekolicina primjera pripremljenih spojeva[17]

Tablica 5. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge nastavak [17]

Debljina osnovnog materijala t	Oznaka	Ilustracija	Presjek	Kut α, β	Razmak b	Visina grla c
$t \leq 4$				-	$b \leq 2$	-
$2 \leq t \leq 4$				-	$b \leq 1,5$	-
$3 \leq t \leq 5$	∇			$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$
$3 \leq t \leq 5$				$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$b \leq 4$	$c \leq 2$
$3 \leq t \leq 15$	Y			$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 2$	$c \leq 2$
$6 \leq t \leq 25$				$\alpha \geq 50^\circ$	$4 \leq b \leq 10$	$c = 3$

6. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio završnog rada izveden je u Iskra brodogradilište Šibenik u Šibeniku te u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U eksperimentalnom dijelu rada odabrana je tehnologija zavarivanja aluminijske legure 6082 T6. Strojnom obradom sukladno normi HRN EN ISO 9692-3 pripremljene su dvije cijevi. Provedeno je sučeono zavarivanje radnih komanda TIG postupkom. Naposljetku je proveden statički-vlačni pokus, ispitivanje savijanjem te je izvršena makroskopska analiza i radiogram cijevi. Na temelju dobivenih rezultata eksperimentalnog rada donesen je zaključak.

6.1. Oprema za zavarivanje

Za eksperiment je bio korišten inverterski izvor struje za zavarivanje MagicWave 3000, Fronius [Slika 15.]. Izvori struje MagicWave na osnovi prilagodljive AC-frekvencije imaju izvanredne performanse pri zavarivanju aluminija, aluminijskih legura i magnezija[15].

U [Tablica 6.] prikazane su tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje.



Slika 15. Fronius MagicWave 3000

Tablica 6. Tehničke karakteristike izvora struje MagicWave 3000 [15]

Izvor struje	MagicWave 3000
Struja zavarivanja/radni ciklus [10min/40°C]	300A/35%
Struja zavarivanja/radni ciklus [10min/40°C]	250A/60%
Struja zavarivanja/radni ciklus [10min/40°C]	200A/100%
Radni napon	10,1-22V
Mrežna frekvencija	50-60 Hz
Mrežni napon	3 x 400 V
Mrežni osigurač	16 A
Masa	28,1 kg

6.2. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentu korištene su cijevi aluminijske legure 6082 T6, debljine 4 mm, promjera 100 mm. U [Tablica 7.] prikazana su mehanička svojstva, a u [Tablica 8.] prikazan je kemijski sastav ispitne ploče aluminijske legure 6082 T6 prema atestu osnovnog materijala.

Tablica 7. Mehanička svojstva prema atestu osnovnog materijala

Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	218
Granica razvlačenja, R_e , MPa	198
Produljenje, A, %	11

Tablica 8. Prikaz kemijskog sastava ispitne ploče prema atestu osnovnog materijala

Udio kemijskog elementa %								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,470	0,192	0,01	0,037	0,399	0,004	0,038	0,014	ostatak

Kao dodatni materijal pri izradi eksperimentalnog rada korištena je žica proizvođača Elektroda Zagreb oznake Al Mg 4,5 Mn promjera 1,2 mm. Na [Tablica 9.] prikazana su očekivana mehanička svojstva dodatnog materijala, dok je na [Tablica 10.] vidljiv orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala.

Tablica 9. Mehanička svojstva dodatnog materijala [20]

Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	280
Granica razvlačenja, R_e , MPa	140
Produljenje, A , %	>24

Tablica 10. Prikaz kemijskog sastava dodatnog materijala [20]

Udio kemijskog elementa %				
Mg	Mn	Si	Fe	Al
4,8	0,7	0,1	0,2	ostatak

Aluminijska šipka za TIG zavarivanje legirana s cca 4,8% Mg i 0,7 % Mn namijenjena je za zavarivanje Al-Mg-Mn legura. Visoka čvrstoća i dobra žilavost metala zavara omogućuju široku primjenu kod zavarivanja aluminijskih konstrukcija. Zavar se odlikuje dobrom korozijskom postojanošću u morskoj atmosferi. [20]

6.3. Zaštitni plin

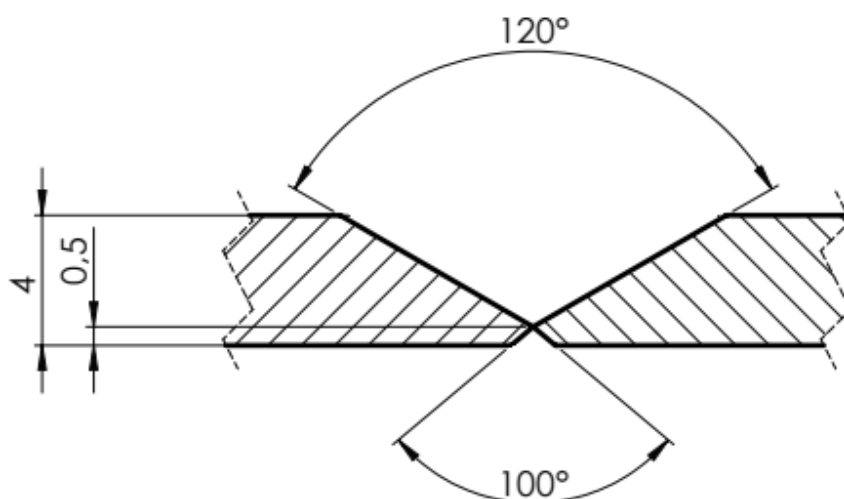
U eksperimentalnom dijelu rada korišten je zaštitni plin Argon 5,0 proizvođača Messer oznake I1 prema normi HRN EN ISO 14175. Volumni udio argona u njemu iznosi 99,999% te je protok plina iznosio 19 l/min.

**Slika 16. Boca zaštitnog plina Argon 5.0**

6.4. Postupak izrade

6.4.1. Zavarivanje cijevi

Za izradu eksperimenta korištene su dvije cijevi koje su sučeono zavarene [Slika 18.]. Priprema spoja je napravljena prema normi HRN EN ISO 9692-3 [Slika 17.]. Prije samog početka zavarivanja, obje ploče su očišćene i odmašćene alkoholom kako bi se spriječila onečišćenja zavara te ostvario što kvalitetniji zavareni spoj.



Slika 17. Priprema spoja



Slika18. Radni komadi nakon čišćenja

Drugi dio pripreme obuhvatio je namještanje parametara na aparatu za zavarivanje. Na [Slika 19.] je prikazano da je napon zavarivanja postavljen na 13,5 V, dok je jakost struje iznosila 167 A.



Slika 19. Parametri na aparatu za zavarivanje

Prije početka zavarivanja cijevi su pripojene na dva mjesta s minimalnim razmakom između njih. To je napravljeno da bi se spriječilo curenje taline jer se nije koristila keramička pločica koja služi za formiranje korijena zavara. Na [Slika 17.] je prikazano skošenje po unutarnjem rubu cijevi visine 0,5 mm pod kutom od 50° . Naime, prije zavarivanja aluminija potrebno je odstraniti aluminijev oksid. Razaranje aluminijevog oksida izmjeničnom strujom može se postići jedino na strani gdje je moguć pristup elektrodi za zavarivanje što je u ovom slučaju vanjska strana cijevi. Na unutarnjoj strani doći će do nakupljanja aluminijevog oksida na površini korijena zavara te će se formirati zarez u korijenu uzduž zavara kao što je prikazano na [Slika 20.]. Skošnje s unutarnje strane je napravljeno kako bi talina pri skrućivanju pod utjecajem gravitacije formirala blaži oblik zaobljenja korijena zavara, a samim time smanjila i uzdužni zarez.



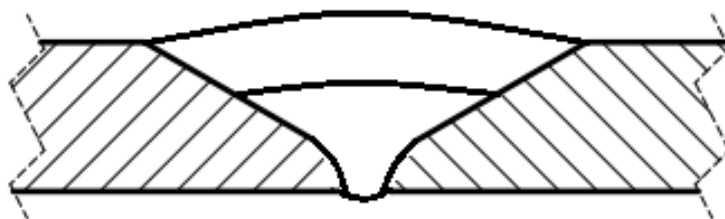
Slika 20. Prikaz uzdužnog zareza na površini korijena zavara zavarenog bez skošenja na unutarnjem rubu cijevi

Cijevi su zavarene u dva prolaza, kao što je prikazano na [Slika 22.]. Između prolaza napravljena je stanka od dva sata zbog hlađenja cijevi. U prvom prolazu izveden je provar korijena, dok je popuna žlijeba izvedena u drugom prolazu.

Na [Slika 21.] prikazano je zavarivanje cijevi u zavarivačkoj radionici Iskra brodogradilište Šibenik.



Slika 21. Zavarivanje cijevi u zavarivačkoj radionici Iskra brodogradilište Šibenik



Slika 22. Redoslijed zavarivanja

Na [Slika 23.] je prikazan je izgled zavarenog spoja nakon provedenog zavarivanja.



Slika 23. Izgled zavara nakon drugog prolaza

Na [Slika 24.] je prikazan korijen zavora s unutrašnje strane cijevi koji je zavaren s prethodnom obradom unutarnjeg ruba cijevi. Vidljivo je da je postupkom ovakve pripreme uvelike smanjen zarez ili ga na nekim mjestima uopće nema.



Slika 24. Prikaz korijena zavora zavarenog sa skošenjem na unutarnjem rubu cijevi

6.4.2. Priprema uzoraka za ispitivanje

Nakon izvršenog zavarivanja, radi potreba ispitivanja provedeno je rezanje uzorka. Rezanje se provodilo na tračnoj pili tvrtke Imet BS 350 GH na kojoj je izrezano 7 uzoraka za ispitivanje. Četiri uzorka korištena su za ispitivanje savijanjem, dva uzorka za statično-vlačni pokus te jedan za makroanalizu.

Na [Slika 25.] je prikazani su uzorci za ispitivanje izrezani na tračnoj pili



Slika 25. Uzorci za ispitivanje izrezani na tračnoj pili

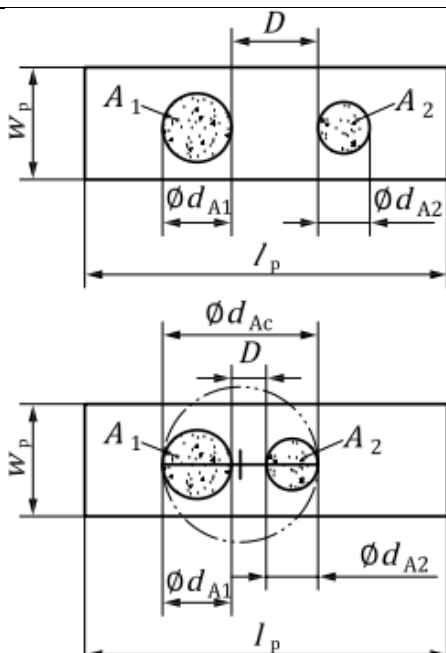
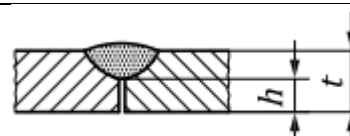
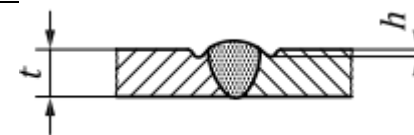
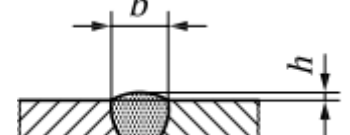
6.5. Ocjenjivanje kvalitete zavora [18]

Ocjenjivanje kvalitete zavora provedena je prema normi ISO 10042:2018(E).

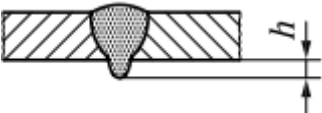
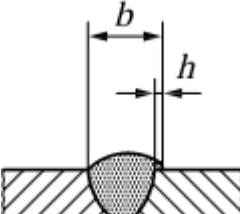
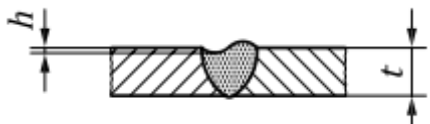
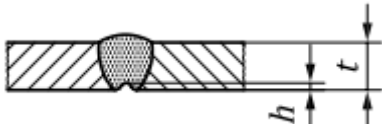
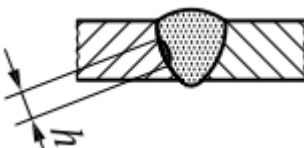
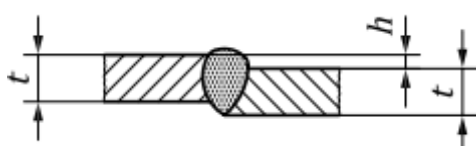
ISO 10042:2018(E) ima svrhu definirati veličine tipičnih nepravilnosti koje možemo očekivati unutar proizvodnje aluminijskih zavora elektrolučnim postupkom zavarivanja. Norma se odnosi na vizualni pregled zavora, a primjenjuje se na debljine materijala iznad 0,5 mm. Ocjenjivanje se provodi u 3 razine kvalitete koje su označene slovima B, C i D. Razina kvalitete B odgovara najvišoj kvaliteti zavora. [18]

U [Tablici 11.] i [Tablici 12.] provedeno je ocjenjivanje kvalitete zavora prema normi ISO 10042:2018(E).

Tablica 11. Ocjenjivanje kvalitete zavara [18]

Površinske nepravilnosti			Uzorak
Nepravilnosti	Napomene	Uvjet za razinu kvalitete B	1
			Razina kvalitete
Pukotina	-	Nije dopušteno	B
Krater pukotina	-	Nije dopušteno	B
Ravnomjerno raspoređena poroznost	-	$\leq 0,5 \%$	B
Lokalizirana poroznost		Nije dopušteno	B
Neprovareni korijen		Nije dopušteno	B
Ugorine		Nije dopušteno	B
Nadvišenje lica zavara		$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,1b \text{ max. } 6 \text{ mm}$	B

Tablica 12. Ocjenjivanje kvalitete zavara [18]

Površinske nepravilnosti			Uzorak
Nepravilnosti	Napomene	Uvjet za razinu kvalitete B	1
			Razina kvalitete
Nadvišenje korijena zavora		$h \leq 3 \text{ mm}$	B
Preklapanje		Nije dopušteno	B
Nedovoljno ispunjen žlijeb		$h \leq 0,05t$ max. 0,5 mm	B
Kokavnost korijena		$h \leq 0,05t$ max. 0,5 mm	B
Unutarnje nepravilnosti			
Nepotpuno staljivanje		Nije dopušteno	B
Nepravilnosti u geometriji spoja			
Linearno odstupanje		$h \leq 0,2t$ max. 2 mm	B

6.6. Radiografsko ispitivanje zavara

Radiografsko ispitivanje provedeno je kako bi dobili uvid u moguće unutarnje ili vanjske greške u zavaru.

Rendgenski uređaj postavljen je na udaljenosti od 700 mm od stražnje stijenke cijevi ispitnog predmeta, tj. stijenke koja se pregledava radiogramom, preporučena od proizvođača rendgenskog uređaja.

Parametri snimanja:

- Napon -125 kV
- Jakost struje -3 mA
- Vrijeme ekspozicije – 75 sek

Parametri skeniranja:

- Napon lasera – 15 V
- Napon fotomultiplikatora – 5,25V
- Rezolucija skeniranja – 50 um

Korištena oprema:

- RTG uređaj – Balteau 300 D
- Skener – VMI 5100
- Slikovna ploča – Kodak industrex flex Blue

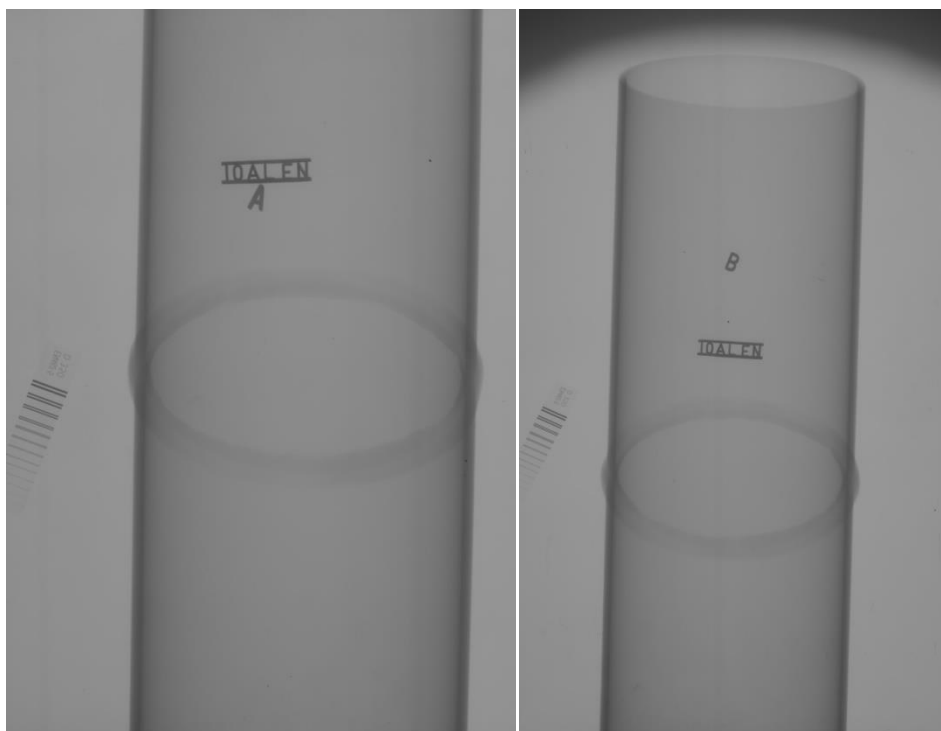


Slika 26. RTG uređaj – Balteau 300 D

Na [Slika 26.] i [Slika 27.] prikazani su RTG uređaj - Balteau 300D te priprema za radiografsko snimanje uzorka.



Slika 27. Priprema za radiografsko snimanje uzorka



Slika 28. Radiografska snimka uzorka

Nakon provedenog radiografskog ispitivanja zavora, na radiografskim snimkama uzorka [Slika 28.] uviđa se da u zavaru nema greški koje bi mogle utjecati na čvrstoću zavora.

6.7. Statički vlačni pokus

Statički vlačni pokus utvrđuje osnovna mehanička svojstva ispitnog uzorka, epruvete. Ispitivanje se vrši tako da se epruveta postavi u čeljusti kidalice i kontinuirano vlačno opterećuje do loma. Tijekom ispitivanja bilježi se sila na kojoj je došlo do tečenja materijala – granica razvlačenja (F_e , N) i maksimalno postignuta sila (F_m , N).

Uslijed djelovanja sile F u svim točkama poprečnog presjeka epruvete (S_0) nastaju vlačna naprezanja, σ (N/mm²). [16]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [\text{N /mm}^2]$$

Vlačna ili rastezna čvrstoća R_m - naprezanje kod maksimalne sile F_m je omjer maksimalne sile F_m i površine početnog presjeka S_0

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [\text{N /mm}^2]$$

Na [Slika 29.] je prikazana epruveta za statički vlačni pokus izrađena prema normi ISO 4136.



Slika 29. Epruveta za statički vlačni pokus

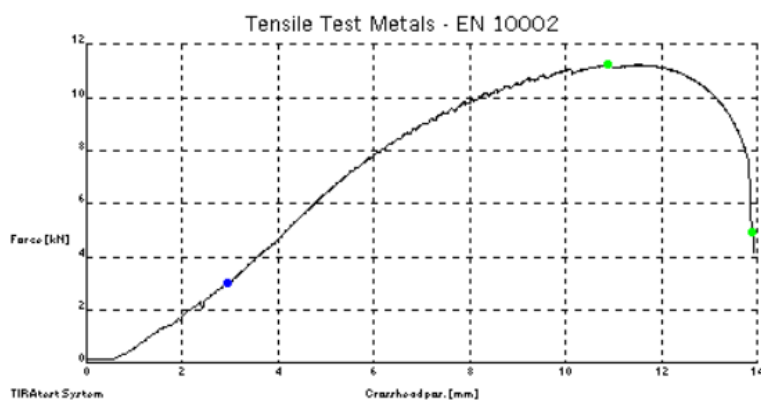


Slika 30. Epruveta ukliještena u kidalici

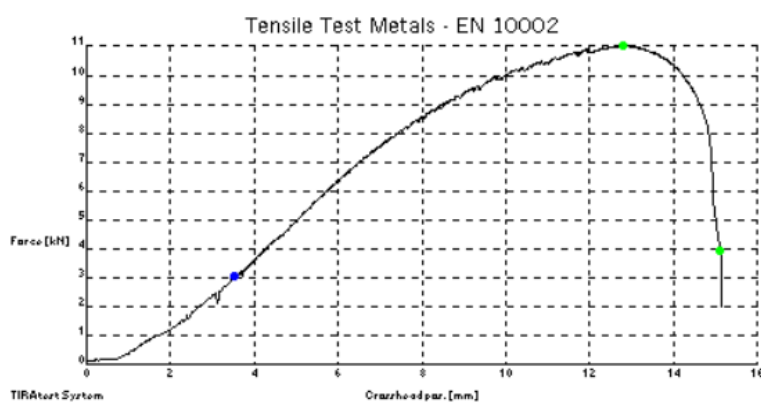
Statički vlačni pokus izveden je na kidalici EU 40 u Laboratoriju za mehanička ispitivanja materijala, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu [Slika 30.].

Tijekom ispitivanja kontinuirano se mjere sila i produljenje epruvete, te se pomoću računalnog programa dobiva dijagram “sila-produljenje” ($F - \Delta L$) [Slika 31.].

uz 1 $F_m = 11.2 \text{ kN}$, $F_k = 4.94 \text{ kN}$



uz 2 $F_m = 10.99 \text{ kN}$, $F_k = 3.92 \text{ kN}$



Slika 31. Dijagram sila-produljenje

U [Tablici 13.] prikazani su rezultati ispitivanja statičkim vlačnim pokusom.

Tablica 13. Rezultati statičko vlačnog pokusa

Epruveta	Vlačna čvrstoća R_m [N/mm ²]	Maksimalna sila F_m [kN]	Konačna sila F_k [kN]
1	111,91	11,2	4,94
2	109,81	10,99	3,92

Vlačna čvrstoća ZUT-a za osnovni materijal 6082 T6 prema normi EN ISO 15614-2:2005 , trebala bi iznositi 130,8 MPa , tj. 60% u odnosu na vlačnu čvrstoću osnovnog materijala.

Provedenim ispitivanjem na kidalici, te dobivenim vrijednostima vlačne čvrstoće za pojedine uzorke, izračunata su smanjenja vlačne čvrstoće u odnosu na osnovni materijal:

- Vlačna čvrstoća ZUT-a uzorka 1 iznosi 51,33 % vlačne čvrstoće osnovnog materijala
- Vlačna čvrstoća ZUT-a uzorka 2 iznosi 50,37 % vlačne čvrstoće osnovnog materijala

Izračunate vrijednosti vlačne čvrstoće u oba uzorka nisu zadovoljila minimalnu vrijednost od 60% vlačne čvrstoće osnovnog materijala.

Pregledom epruveta nakon ispitivanja vidljivo je da su lomovi na obje epruvete nastali u području ZUT-a što dokazuje dobar izbor dodatnog materijala te dobru čvrstoću zavara.

Mjesto loma u području ZUT-a prikazano je na [Slika 32.]

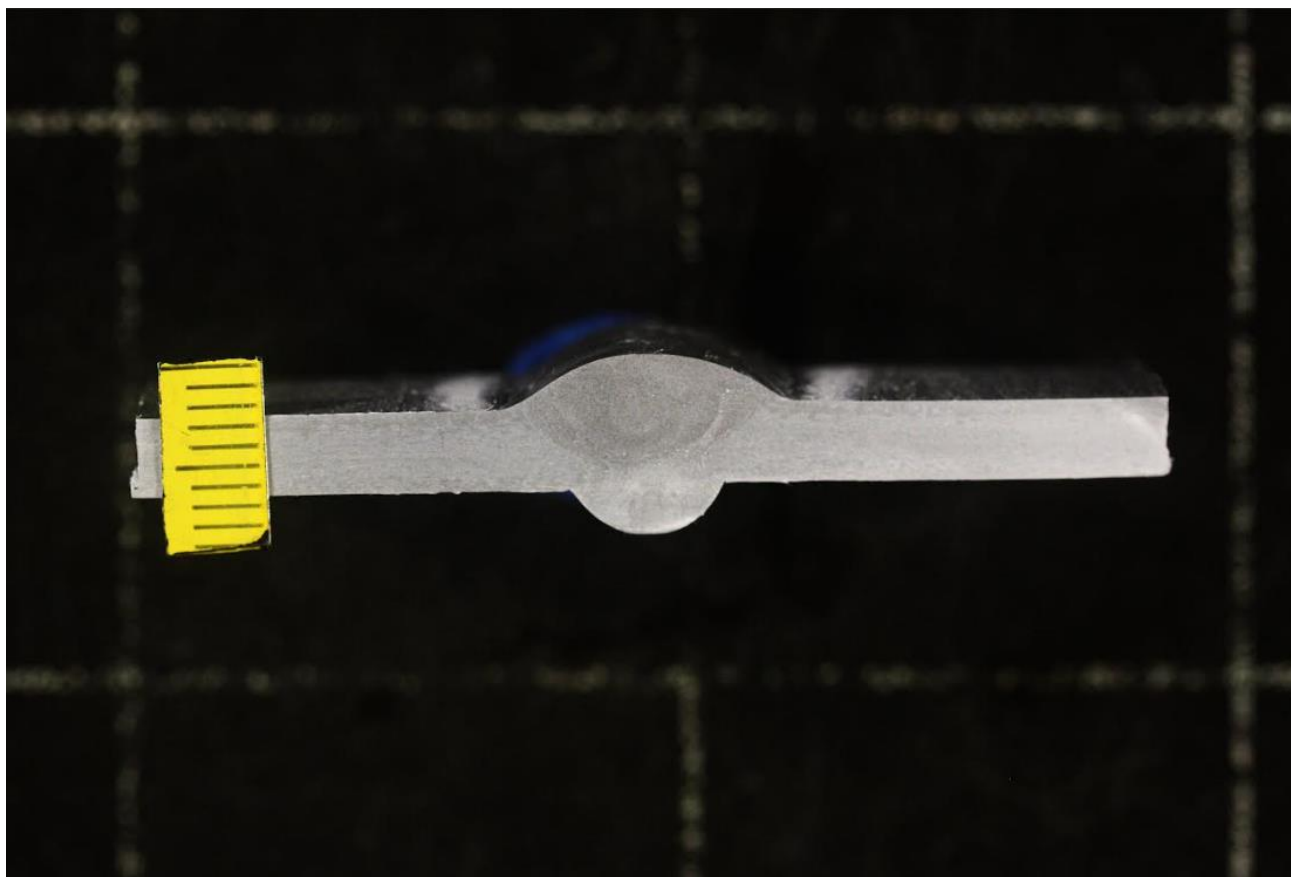


Slika 32. Epruveta ispitana statičkim vlačnim pokusom na kidalici

6.8. Makroskopska analiza

Kako bi uspješno proveli makroskopsku analizu bilo je potrebno provesti kvalitetnu obradu uzorka. Najprije je uzorak brušen na stupnoj brusilici, te je ručno poliran s 4 različite granulacije brusnog papira (150, 400, 600 i 800). Zatim je na uređaju za poliranje, brzinom od 300 okr/min, uzorak poliran s brusnim papirima granulacija 1200, 2000, i 4000. Nakon poliranja uzorci su isprani vodom i alkoholom, te je provedeno nagrivanje u kiselini da bi se vidjela struktura zavarivanja. Makroanalizom uzorka vidljive su karakteristike zavarivanja, dubina penetracije, linija staljivanja osnovnog i dodatnog materijala, veličina zone utjecaja topline, broj prolaza, veličina i raspodjela uključaka, te poroznost u zavarima.

Na [Slika 33.] je prikazana je makroskopska snimka metala zavarivanja i ZUT-a.



Slika 33. Makroskopska snimka metala zavarivanja i ZUT-a

6.9. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje sučeonih zavarenih spojeva na savijanje izvršeno je prema normi EN ISO 15614-2:2005. Prema normi EN ISO 15614-2:2005 izračunata je dimenzija trna za savijanje čiji promjer iznosi 32 mm. Međutim, ispitivanje savijanjem je obavljeno trnom promjera 25 mm kojim su zavari strože ispitani.

[Slika 34.] prikazuje postupak savijanja sučeonih zavarenih spojeva.



Slika 34. Prikaz ispitivanja savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u

Iz zavarenog komada izrezana su četiri uzorka za ispitivanje savijanjem. Po dva uzorka se ispituju licem zavara opterećenim na vlak, a korijen na tlak, dok se preostala 2 ispituju licem zavara opterećenim na tlak a korijen na vlak.



Slika 35. Rezultati ispitivanja savijanjem

Iz slike je vidljivo da su sva četiri uzorka izdržala test savijanjem što znači da zavari imaju dobru duktilnost. Na uzorcima nema tragova napuknuća niti u jednom dijelu zavarenog spoja.

7. ZAKLJUČAK

Aluminij je jedan od preferiranih materijala u brodogradnji. Karakterizira ga dobar omjer čvrstoće i težine uz razumnu cijenu. Za primjenu aluminija u brodogradnji moraju se poštovati preporuke o izboru materijala, obradi i proizvodnim postupcima spajanja aluminija te kasnijoj zaštiti objekata izrađenih od aluminija. TIG postupak zavarivanja koristi se za zavarivanje aluminija, posebice na mjestima gdje se traži kvalitetan spoj i veća kontrola nad postupkom zavarivanja, gdje brzina zavarivanja nije toliko bitna. Kako bi se postigla željena kvaliteta spoja treba imati odgovarajuću opremu za zavarivanje i odgovarajuće uvjete rada. Poroznost, oksidni sloj i uključci oksida, tople pukotine, smanjena čvrstoća u zavaru i ZUT-u, nepotpun provar samo su neke od mogućih grešaka na koja se mora obratiti posebna pažnja tijekom zavarivanja aluminija jer mogu uvelike doprinijeti gubitku kvalitete zavarenog spoja. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je zavarivanje AlMg cijevi TIG postupkom te je dana detaljna analiza postupka. Naime, primijećeno je da kod aluminijskih legura u provaru korijena nastaje uzdužni zarez te je bilo potrebno ispitati koliko utječe na mehanička svojstva zavara te pronaći način kako ga ili potpuno ukloniti ili barem smanjiti. Problemu se pristupilo da je priprema spoja izvedena strojnom obradom sukladno normi HRN EN ISO 9692-3, posebno se obratilo pažnju na izradu skošenja s unutarnje strane cijevi od 0,5 mm pod kutom od 50°, definirana je tehnologija zavarivanja s pratećim parametrima te je napravljen sučeoni zavar TIG AC postupkom. Korištena je aluminijska legura 6082 T6, u kombinaciji s dodatnim materijalom AlMg 4,5 Mn te se zavarivalo ručno bez upotrebe okretaljki za kružno zavarivanje. Nakon zavarivanja u Iskra brodogradilištu Šibenik provedena su razorna i nerazorna ispitivanja u Laboratoriju za zavarivanje FSB-a. Rezultati radiografskog ispitivanja pokazali su da u zavaru nema greški koje bi mogle utjecati na čvrstoću zavara. Makroanalizom uzorka vidljive su karakteristike zavara, dubina penetracije, linija staljivanja osnovnog i dodatnog materijala, veličina ZUT-a, broj prolaza. Makroanalizom je vidljivo da nema greški koje bi mogle utjecati na čvrstoću zavara. Četiri ispitna uzorka ispitana su savijanjem te su sva četiri izdržala test savijanjem što znači da zavari imaju dobru duktilnost. Na ispitnim uzorcima nema tragova napuknuća niti u jednom dijelu zavarenog spoja nakon ispitivanja savijanjem. Statičko vlačno ispitivanje pokazalo je da su lomovi nastali u području ZUT-a što dokazuje dobar izbor dodatnog materijala te dobru čvrstoću zavara. Prema normi EN ISO 15614-2:2005 vlačna čvrstoća ZUT-a za osnovni materijal 6082 T6 trebala bi iznositi

minimalno 60% u odnosu na vlačnu čvrstoću osnovnog materijala. Naime, dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće za pojedine uzorke iznose manje od 60% vlačne čvrstoće osnovnog materijala (uzorak 1. iznosi 51,33 %, dok uzorak 2. iznosi 50,37 % vlačne čvrstoće osnovnog materijala) te prema normi EN ISO 15614-2:2005 ispitni uzorci nisu zadovoljili ispitivanje.

Na kraju se može zaključiti da iako ispitni uzorci nisu zadovoljili statičko vlačno ispitivanje odabran je ispravan postupak zavarivanja. Rezultati statičko vlačnog ispitivanja poboljšali bi se ako bi se smanjio unos topline prilikom zavarivanja većom brzinom zavarivanja kako bi se izbjeglo smanjenje čvrstoće u ZUT-u. Nakon zavarivanja trebalo bi provesti toplinsku obradu kako bi se poboljšala čvrstoća u ZUT-u.

LITERATURA

- [1] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/aluminium-welding#HowcanAluminiumbeWelded> dostupno 13.1.2022.
- [2] Zbornik radova, Spajanje aluminija i magnezija: Smjernice za zavarivanje aluminija, F.Neessen, ing., EWE., V.van der Mee, Šibenik, Hrvatska, 2002.
- [3] Roger Lumley, : Fundamentals of aluminium metallurgy, Woodhead Publishing Limited, 2011
- [4] <https://matmatch.com/learn/material/cast-wrought-aluminium> dostupno 15.1.2022.
- [5] Mathers, G.: The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, 2002.
- [6] Lončar, Đ., Starčević, Z. : Zavarivanje u zaštiti plinova TIG, MIG, MAG Zagreb 1983.
- [7] Dubovečak, L.; Primjena aluminijskih legura u brodogradnji, Završni rad, Zagreb: FSB, 2021. slika
- [8] TIG - postupak zavarivanja <https://tsi.webador.com/tois-2-1-2-tig-postupak> dostupno 15.3.2022.
- [9] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D., : Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja
- [10] Zbornik radova, Spajanje aluminija i magnezija: Izbor uređaja i utjecaj na ekonomičnost zavarivanja aluminija, G.Buić, Šibenik, Hrvatska, 2002.
- [11] Inert Gas Welding of Aluminum Alloys, http://www.messergroup.cn/en/info/down/Inert_Gas_Welding_of_Aluminium_Materials.pdf dostupno 20.4.2022.
- [12] Guidelines For Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) <https://www.millerwelds.com/>
- [13] Welding - Recommendations for welding of metallic materials- Part 4: Arc welding of aluminium and aluminium alloys BS EN 1011-4:2000
- [14] Nisith R. Mandal; Ship construction and welding., Kharagpur, India 2016
- [15] Operating instructions, MagicWave 2500/3000, Fronius <file:///C:/Users/User/Downloads/42,0426,0027,HR.pdf> dostupno 14.1.2023.

-
- [16] Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala- razorne metode
<file:///C:/Users/User/Downloads/4%20Stati%C4%8Dki%20vla%C4%8Dni%20pokus.pdf> dostupno 14.1.2023.
- [17] Zavarivanje i srodni procesi – Preporuke za pripremu spoja – 3. dio: MIG i TIG zavarivanje aluminija i aluminijskih legura HRN EN ISO 9692-3
- [18] Zavarivanje – Elektrolučno zavareni spojevi aluminija i njegovih legura – Razine kvalitete s obzirom na nepravilnosti HRN EN ISO 10042
- [19] Hrvatski registar brodova- RULES FOR THE CLASSIFICATION OF SHIPS
file:///D:/Rules%20for%20the%20classification%20of%20ships,%20Pt.%2026,%20Welding,%202007_2021.pdf dostupno 25.1.2023.
- [20] Specifikacija proizvoda <https://www.ezg.hr/proizvodi/rod/EZTIGALMG45.html> dostupno 25.1.2023