

Zavarivanje aluminijevih legura u brodogradnji

Horvat, Stela

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:722311>

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

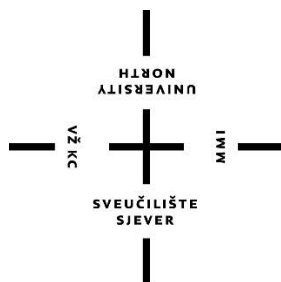
Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





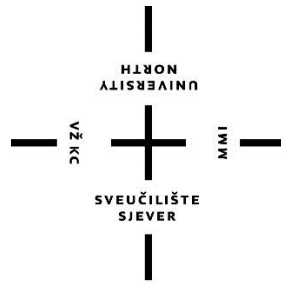
**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 042/STR/2021

Zavarivanje aluminijevih legura u brodogradnji

Stela Horvat, 1375/336D

Varaždin, rujan 2021. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Strojtarstvo

Diplomski rad br. 042/STR/2021

Zavarivanje aluminijevih legura u brodogradnji

Student

Stela Horvat, 1375/336D

Mentor

Matija Bušić, doc.dr.sc.

Varaždin, rujan 2021. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Stela Horvat

JMBAG 1375/336D

DATUM 12.07.2021.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA Zavarivanje aluminijevih legura u brodogradnji

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Welding of aluminium alloys in shipbuilding industry

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, predsjednica povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, član povjerenstva
4. prof. dr. sc. Milan Kijajin
- 5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 042/STR/2021

OPIS

U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati podjelu i svojstva aluminijevih legura. Posebnu pozornost posvetiti aluminijevim legurama koje se koriste u brodogradnji. Opisati primjenu i razloge primjene aluminijevih legura za pojedine segmente u brodskoj konstrukciji. Opisati TIG i MIG zavarivanje, te objasniti njihovu primjenu za zavarivanje aluminijevih legura u brodogradnji. Objasniti odabir dodatnog materijala pri zavarivanju aluminijevih legura.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je automatiziranim TIG postupkom zavarivanja kroz različita stanja pokusa razjasniti utjecaj jakosti struje zavarivanja na oblik i svojstva zavarenog spoja aluminijeve legure EN AW 5754 debljine 2 mm. Navesti sve utjecajne parametre u svim stanjima eksperimenta. Na provedenim zavarenim spojevima provesti ispitivanje savijanjem u 3 točke prema važećoj normi i ispitati makrostrukturu na poprečnom presjeku zavarenog spoja. Prema rezultatima ispitivanja donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

15.09. 2021.

PODPIS MENTORA

M. Bušić



Predgovor

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Matiji Bušiću na stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada. Isto tako zahvaljujem se svim profesorima i djelatnicima Sveučilišta Sjever.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i svom dečku Vanji na podršci i pomoći tijekom studija.

Sažetak

Tema ovog diplomskog rada je „Zavarivanje aluminijevih legura u brodogradnji“. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu je navedena podjela na gnječene i lijevane aluminijeve legure te njihovo označavanje, upotreba u brodogradnji i problematika zavarivanja. Nadalje, ukratko su opisani postupci kojima se najčešće zavaruju aluminijeve legure u brodogradnji, TIG i MIG. Također, opisana je problematika zavarivanja raznorodnih aluminijevih legura.

U eksperimentalnom dijelu je provedeno zavarivanje tri sučeljena spoja aluminijeve legure EN AW 5754. Za zavarivanje limova korišten je automatizirani TIG postupak zavarivanja. Zatim je provedeno ispitivanje savijanjem lica i korijena zavara i mikroskopska analiza uzorka u svrhu uvida strukture i svojstava zavarenih spojeva. U konačnici, temeljem dobivenih rezultata doneseni su zaključci.

Ključne riječi: aluminijeve legure, brodogradnja, EN AW 5754, TIG zavarivanje, MIG zavarivanje

Abstract

The topic of this graduate thesis is "Welding of aluminium alloys in shipbuilding industry". The paper consists of a theoretical and an experimental part.

The theoretical part presents the classification into wrought and casting aluminium alloys and their designation, usage in shipbuilding and problems associated with the welding of aluminium and its alloys. Furthermore, the most commonly used welding procedures for aluminium alloys in shipbuilding, TIG and MIG are briefly described. Also, it is described the problematic of welding of dissimilar aluminium alloys.

In the experimental part, it was performed welding of three butt joints of aluminium alloy EN AW 5754. For welding sheet metal it was used an automated TIG welding process. Welds were tested using face and root bend test and microscopic analysis in order to see the structure and properties of the welded joints. Ultimately, the conclusions were drawn based on the obtained results.

Keywords: aluminium alloys, shipbuilding, EN AW 5754, TIG welding, MIG welding

Popis oznaka

Oznaka	Opis	Jedinica
α	toplinska rastezljivost	K ⁻¹
λ	toplinska vodljivost	W/mK
ρ	gustoća	kg/m ³
A	istezljivost	%
E	modul elastičnosti	MPa
G	električna vodljivost	m/Ωmm ²
I	električna struja	A
k	koeficijent iskoristivosti električnog luka	
m	masa	kg
Q	unos topline	kJ/mm
T	temperatura	K
Re	granica razvlačenja	MPa
Rm	vlačna čvrstoća	MPa
t	vrijeme	s
U	napon struje	V
v	brzina zavarivanja	mm/min

Popis kratica

AC	Istosmjerna struja
CV	Constant Voltage (ravna statička karakteristika konstantnog napona električne struje)
DC	Izmjenična struja
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
PTFE	politetrafluoretilen (teflon)
PA	poliamid
REL	ručno elektrolučno zavarivanje
TIG	Tungsten Inert Gas
ZUT	Zona utjecaja topline

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Aluminijske legure.....	3
2.1. Gnječene aluminijske legure.....	4
2.1.1. Označavanje gnječanih legura aluminija.....	6
2.2. Lijevene aluminijske legure.....	9
2.2.1. Označavanje lijevanih legura aluminija.....	9
2.3. Primjena aluminijskih legura u brodogradnji.....	12
2.3.1. Primjena gnječanih aluminijskih legura u brodogradnji.....	14
2.3.2. Primjena lijevanih aluminijskih legura u brodogradnji.....	17
3. Zavarivanje aluminija i aluminijskih legura.....	19
3.1. Zavarljivost aluminija.....	19
3.1.1. Utjecajna svojstva aluminija na zavarljivost.....	19
3.1.2. Pogreške kod zavarivanja aluminija.....	23
3.1.2.1. Poroznost.....	23
3.1.2.2. Tople pukotine.....	24
3.1.2.3. Smanjenje čvrstoće.....	27
3.2. TIG zavarivanje.....	29
3.2.1. Zaštitni plinovi.....	33
3.2.2. Pištolj za ručni TIG postupak zavarivanja.....	34
3.2.3. Volframova elektroda.....	35
3.2.4. Parametri TIG zavarivanja.....	36
3.3. MIG zavarivanje.....	38
3.3.1. Tehnike rada.....	40
3.3.2. Pogonski sustav dodavanja žice.....	41
3.3.3. Pištolj za zavarivanje.....	43
3.3.4. Zaštitni plinovi.....	43
3.3.5. Izvor struje.....	44
3.3.6. Parametri kod MIG postupka zavarivanja.....	45
3.4. Dodatni materijal.....	48
3.5. Zavarivanje raznorodnih aluminijskih legura.....	50
4. Eksperimentalni dio.....	54
4.1. Osnovni materijal.....	54
4.2. Izvor za zavarivanje.....	55
4.3. Automat za zavarivanje.....	57
4.4. Parametri zavarivanja.....	58
4.5. Zavarivanje uzoraka.....	58
4.6. Ispitivanje savijanjem.....	63
4.7. Mikroskopska analiza.....	66
5. Zaključak.....	69
6. Literatura.....	71

1. Uvod

Aluminij je iza kisika s udjelom od 8% najzastupljeniji element u zemljinoj kori. Jedino se čelik više upotrebljava u strojarstvu od aluminija. Sirovina iz koje se dobiva aluminij je boksit koji se potom prerađuje u tzv. glinicu Al_2O_3 , a iz koje se odvaja procesom elektrolize. [1]

Talište čistog aluminija je pri $660\text{ }^\circ\text{C}$. Aluminijske legure imaju niže talište koje je ovisno o vrsti legure od 482 do $660\text{ }^\circ\text{C}$. [2]

Dobra svojstva kao što su mala masa, velika čvrstoća, dobra električna vodljivost, otpornost na koroziju, dobra zavarljivost, dobra mehanička svojstva, čine aluminij široko upotrebljivim konstrukcijskim materijalom. Pogodan je za primjenu u brodogradnji, zrakoplovstvu, automobilskoj industriji, vojnoj industriji i svemirskoj industriji.

Tablica 1.1. Prikaz fizikalnih i mehaničkih svojstava aluminija [3]

Gustoća	kg/m^3	2700
Talište	$^\circ\text{C}$	660
Modul elastičnosti	MPa	69000
Toplinska rastezljivost	$10^{-6}/\text{K}$	23,8
Električna vodljivost	$\text{m}/\Omega\text{mm}^2$	36...37,8
Granica razvlačenja	MPa	20...120
Vlačna čvrstoća	MPa	40...180

Fizikalna kao i mehanička svojstva aluminija prikazana su u tablici 1.1.

Neka od preostalih svojstava aluminija i njegovih legura su i [1] :

- lakši je od čelika za 2,9 puta;
- dobrih mehaničkih svojstava kod nižih temperatura;
- dobra toplinska vodljivost, 4 puta je veće vrijednosti od običnog čelika i čak 13 puta veće od nehrđajućeg (inox) čelika;
- dobra istezljivost;
- električna vodljivost bliska bakru, ali kod iste težine duplo veća od bakra;
- dobra refleksija svjetlosti i topline;

- otporan na koroziju i dobra dekorativnost površine. Prirodno se zaštićuje oksidnim slojem što stvara samozaštitu pri normalnoj atmosferi. Izvrstan dekorativni učinak se postiže anodizacijom i lakiranjem;
- nije magnetičan;
- dobra obradljivost, pogodan je naročito za proizvodnju ekstruzijom složenih i punih presjeka;
- pogodan za zavarivanje i duboko vučenje.

Postupcima legiranja i precipitacijskim očvrnućem proizvode se legure kojima je iznos čvrstoće kao kod većine čelika. Aluminij se najčešće legira bakrom, magnezijem, silicijem, manganom, kromom, cinkom i drugima u svrhu postizanja što veće čvrstoće i tvrdoće. Legiranje aluminija ima negativan utjecaj na otpornost na koroziju, posebno legiranje bakrom. [3]

Aluminij i njegove legure se spajaju gotovo svim zavarivačkim postupcima. Zavarivanje aluminija u odnosu na zavarivanje čelika se provodi uz strogo kontrolirane radne uvjete te zahtijeva posebnu opremu i tehnologiju. TIG i MIG su najčešće korišteni postupci zavarivanja u brodogradnji gdje se MIG postupkom zavaruje struktura i oplata broda. Svrha ovog diplomskog rada je detaljan pregled MIG i TIG postupaka zavarivanja aluminijevih legura u brodograđevnom sektoru.

U eksperimentalnom dijelu rada izvršit će se TIG automatizirano zavarivanje limova aluminijeve legure EN AW 5754. Također će biti izvršeno ispitivanje savijanjem i mikroskopska analiza zavarenih spojeva.

2. Aluminijeve legure

Aluminijeve legure su u uporabi u lijevanom i gnječenom stanju. Precipitacijskim očvrnućem mogu se poboljšati mehanička svojstva.

Lijewane legure oblikuju se osnovnim metodama: lijevanje u pijesak, lijevanje u kokile i tlačno lijevanje, međutim kod gnječenih legura prvo slijedi lijevanje u šipke ili ingote koje se zatim obrađuju toplom ili hladnom deformacijom. [4]

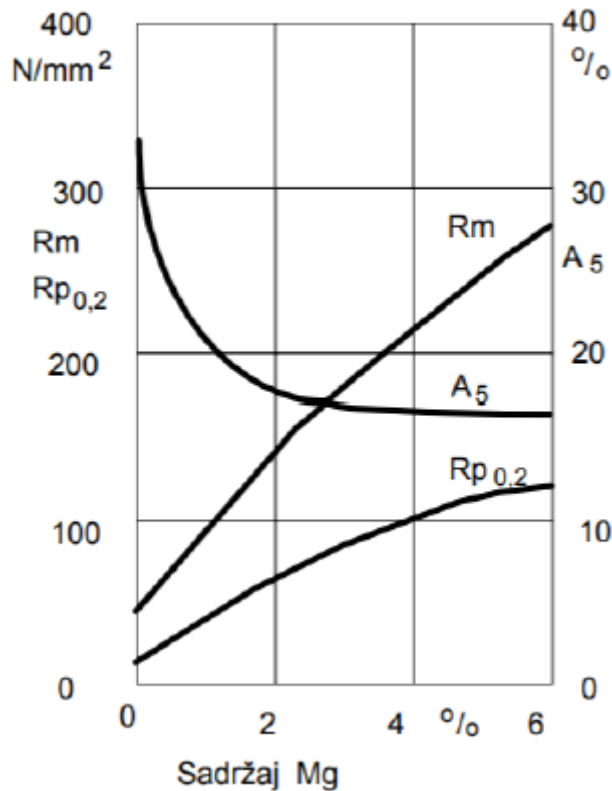
Cilj legiranja je poboljšati mehanička svojstva, naročito vlačnu čvrstoću i tvrdoću, nadalje krutost, rezljivost, žilavost i livljivost. [5]

Najvažniji legirajući elementi su: silicij (Si), mangan (Mn), bakar (Cu), magnezij (Mg) i cink (Zn). Kao dodaci ili nečistoće u manjem udjelu se pojavljuju: titan (Ti), željezo (Fe) i krom (Cr). Složenije legure nastaju njihovim međusobnim kombiniranjem i uz dodatak ostalih legiranih elemenata koji poboljšavaju svojstva osnovne legure. Dodaci za posebne primjene su: nikal (Ni), kadmij (Cd), litij (Li), bizmut (Bi), vanadij (V), olovo (Pb), kositar (Sn), cirkonij (Zr), kobalt (Co) i srebro (Ag). Natrij (Na), bor (B), berilij (Be) i stroncij (Sr) dodaju se u izrazito malim količinama. U rastaljenom aluminiju pri dovoljno visokim temperaturama svi su elementi u potpunosti topljivi. U kristalima mješancima je ograničena topljivost elemenata. Elementi koji nisu otopljeni tvore intermetalne spojeve ili vlastite faze. Topljivost legirajućih elemenata u aluminiju određuju kemijska, fizikalna i proizvodna svojstva legura, kao i udio, oblik, veličina i raspodjela intermetalnih spojeva. [5]

Bakar kao legirni element povisuje čvrstoću i tvrdoću aluminijevih legura. Uz prisutnost istog, raste obradljivost, ali se smanjuje korozivna postojanost te kod određenih aluminijevih legura povećava se osjetljivost na napetosnu koroziju. [4]

Legiranje aluminija magnezijem doprinosi poboljšanju karakteristika aluminija za hladnu oblikovljivost te značajnom povećanju čvrstoće, zavarljivosti i korozivne postojanosti. (Slika 2.1.) [4]

Silicij je jedan od najvažnijih legirajućih elemenata aluminijevih legura u lijevanom stanju. Prvenstveno je zaslužan za dobru livljivost aluminijevih legura te ga i karakterizira mala gustoća ($2,34 \text{ g/cm}^3$) što može biti prednost prilikom potrebe za manjom masom aluminijeve legure. Slabo je topljiv u aluminiju pa precipitira kao čisti silicij te leguru čini tvrdom te joj daje bolju otpornost na abrazivno trošenje. Također smanjuje i koeficijent toplinske dilatacije Al-Si legura. Smanjena obradljivost legura se vodi kao negativna posljedica legiranja aluminija silicijem. [4]



Slika 2.1. Povećanje čvrstoće aluminija legiranjem magnezijem [4]

2.1. Gnječene aluminijeve legure

Primarna podjela gnječenih legura aluminija temeljena je na kemijskom sastavu i mogućnošću precipitacijskog očvrnuća. Prema tome, dijele se na one očvrsnute hladnom deformacijom i na precipitacijski očvrstljive legure što je prikazano u tablici 2.1. [5]

Zahtjevi za legure koje su očvrsnute hladnom deformacijom su dostatna čvrstoća i krutost u hladnom stanju, a i dobra korozijska otpornost. Mikrostruktura većine ovih legura se sastoji od čvrste otopine. To je značajni faktor koji ide u prilog dobroj duktilnosti i velikoj korozijskoj otpornosti. Legure višeg udjela magnezija su dobro postojane u morskoj vodi i pomorskoj atmosferi te su zbog toga u primjeni za brodsku nadgradnju. Zahtjevana mehanička svojstva ostvaruju se stupnjem ugnječenja korištenim u posljednjoj fazi hladnog oblikovanja deformiranjem pa se legure u većini slučajeva isporučuju u mekom stanju ili nakon odgovarajućeg stupnja hladnog ugnječenja. Najveći nedostatak jest da su mehanička svojstva materijala koji je proizveden na konačne dimenzije nepromjenjiva, osim mekšanjem postupkom žarenja. [5]

Precipitacijski očvrstljive legure imaju dobar omjer čvrstoće i gustoće što je prednost. Osnovni legirni elementi legura očvrstnutih precipitacijom su bakar, magnezij, cink i silicij koji tvore intermetalne spojeve s aluminijem (bakar) ili međusobno (magnezij, silicij i cink). Očvrstnuće koje se postiže precipitacijom veće je od očvrstnuća hladnom deformacijom. Osnovni postupak kojim se povisuje čvrstoća i tvrdoća prethodno gnječeni aluminijevih legura je precipitacijsko očvrstnuće. Ostali elementi poboljšavaju neka svojstva: titan se koristi kao dodatak za sitnije zrno, bizmut i olovo povećavaju rezljivost, dok krom pospješuje precipitacijsko očvrstnuće. [3]

U osnovi komercijalne gnječene legure dijele se u pet grupa prema postupku izrade te geometrijskim karakteristikama. To su: [1]

- pločasti valjani profili (limovi, ploče, folije...);
- žice, šipke;
- kovani proizvodi;
- cijevi;
- razni oblici.

Tablica 2.1. Podjela i način očvrstnuća gnječeni aluminijevih legura [5]

Vrsta legure	Način očvrstnuća	R_m [MPa]
Al-Mn	deformiranje u hladnom stanju	200...350
Al-Mg		
Al-Mg-Mn		
Al-Mg-Si	precipitacija	~ 330
Al-Cu-Mg		~ 450
Al-Zn-Mg		~ 400
Al-Zn-Mg-Cu		~ 550
Al-Li-Cu-Mg		~ 500

2.1.1. Označavanje gnječenih legura aluminija

Gnječene legure aluminija označavaju se prema normi „HRN EN 573-1:2008“ i „HRN EN 573-2:2008“ prema sljedećem načinu [6,7]:

- EN – za standardne materijale
- slovo A – označava aluminij
- slovo W – označava gnječeni materijal

Sastav legure je specificiran [8]:

- a) brojčanom oznakom - 4 brojke (5754)
- b) slovno-brojčanom oznakom - kemijskim simbolima (Al Mg₃) - taj dio oznake odvojen je crticama od preostale oznake (-)

Nakon toga slijedi slovo i/ili broj kojim je određena toplinska obrada gnječene legure aluminija („HRN EN 515:2017“) [9]:

- F – oznaka za sirovo stanje poslije prerade. Upotrebljava se za proizvode dobivene plastičnom deformacijom, a da postupci toplinske ili mehaničke obrade nisu izvedeni pod posebnim nadzorom. Granične vrijednosti mehaničkih svojstava ovih legura nisu precizno specificirane.
- O - oznaka za žareno stanje legura (eng. annealed). To je stanje najveće oblikovljivosti koje može biti ostvareno zadržavanjem legure na umjerenoj temperaturi neko određeno vrijeme.
- H - oznaka za stanje materijala koje je očvrsnuto hladnom plastičnom deformacijom i djelomično omekšano (eng. strain hardened). Koristi se za legure koje su očvrsnute plastičnom deformacijom, s naknadnim zadržavanjem ili bez naknadnog zadržavanja na temperaturi koja uzrokuje djelomično omekšavanje metala. H stanja koriste se za toplinski neočvrstljive aluminijske legure tj. serije legura 1000, 3000 i 5000. Iza ove oznake uvijek se nalaze minimalno dva broja. Prvi broj označava vrstu toplinske obrade, a drugi stupanj očvrstnuća deformacijom. Meko stanje označava se nulom, a posebno tvrdo stanje brojem 9.
 - H1 - oznaka za hladno deformirano
 - H2 – oznaka za hladno deformirano i djelomično žareno
 - H3 – oznaka za hladno deformirano i stabilizirano
 - H4 – oznaka za hladno deformirano i zaštićeno prevlakom
- W – oznaka za homogenizacijski žareno stanje, metalurški nestabilno stanje. Primjenjuje se jedino za legure koje poslije rastopnog žarenja spontano otvrdnjavaju

kod sobne temperature. Oznaka je važeća samo u slučaju kada joj se pridruži vrijeme koje je prošlo od rastopnog žarenja do temperature na kojoj se proizvod zadržava, npr. vrijeme 60 minuta do 15 °C (W/60 min/15 °C). Nakon oznake W obično ne dolaze brojčani simboli.

- T – oznaka za proizvode koji stabilno stanje ostvaruju toplinskom obradom, s ili bez hladnog očvrnuća. Označava toplinski očvrtnuto stanje ostvareno toplinskom obradom za postizanje stanja različitih od F, O ili H. To znači da se ovo stanje primjenjuje samo za toplinski očvrstljive legure aluminija, tj. serije legura 2000, 6000, 7000. Nakon oznake T uvijek slijede jedan ili više brojeva koji označuju specifični redoslijed različitih postupaka.

Primjeri : EN AW 5754-O, EN AW Al Mg₃-O

Tablica 2.2. Brojčano označavanje sastava gnječanih Al legura [8]

Aluminij 99,00% i više	1XXX
Aluminijeve legure svrstane prema glavnom legirajućem elementu	
Bakar	2XXX
Mangan	3XXX
Silicij	4XXX
Magnezij	5XXX
Magnezij i silicij	6XXX
Cink	7XXX
Ostali elementi (npr. Fe, Li...)	8XXX
Neiskorišteno	9XXX

Tablicom 2.2. je prikazano brojčano označavanje gnječanih legura aluminija. Prva znamenka ukazuje na glavni legirni element. Drugi znak ukazuje na modifikaciju osnovne legure ili na njezinu čistoću. Treća i četvrta znamenka pobliže označavaju leguru u seriji ili ukazuju na čistoću aluminija. [8]

Osnovne značajke aluminijevih legura koje su očvrstnute hladnom deformacijom [10]:

- **Čisti aluminij (1XXX)** - glavne prisutne nečistoće su željezo (Fe) i silicij (Si). Pri aluminiju visoke čistoće, nečistoće su prisutne u tako malim koncentracijama da se u cijelosti otope. Ima izvrsnu zavarljivost. Ako je u sastavu prisutna mala količina željeza relativno je korozijski postojan, najniže je čvrstoće u odnosu na ostale aluminijeve legure.

- **Legura aluminija i mangana (3XXX)** - karakterizira ih dobra otpornost na koroziju, dobra čvrstoća ako je udio mangana do 1,5%, dobre je zavarljivosti kao i čisti aluminij, legure koje sadrže bakar ili magnezij imaju sklonost nastanka toplih pukotina pri zavarivanju.

- **Legura aluminija i silicija (4XXX)** - udio silicija je do 12%, dobro su zavarljive i imaju dobru livljivost. Moguće je smanjenje otpornosti na koroziju pri zavarivanju. Zbog prisutnosti silicija dolazi do smanjenja tališta.

- **Legura aluminija i magnezija (5XXX)** - karakterizira ih dobra korozijska postojanost, vrlo dobra zavarljivost i dobra čvrstoća. Legure kojima je udio magnezija između 1% i 2,5% su sklone nastanku toplih pukotina pri zavarivanju. Primjenjuje se u brodogradnji, za izradu ploča, limova, kod spremnika za kemikalije.

Osnovne značajke precipitacijski očvrnutih legura [10]:

- **Legura aluminija i bakra (2XXX)** – drugi naziv je durali. Skloni su pojavi toplih pukotina, loše su zavarljivi, visoke su čvrstoće.

- **Legura aluminija, magnezija i silicija (6XXX)** – karakterizira ih dobra zavarljivost, srednja čvrstoća. Legure s višim udjelom silicija primjenjuju se za nosive elemente, a legure koje su siromašne silicijem i magnezijem u uporabi su za karoseriju, dekoraciju vrata i prozora.

- **Legura aluminija, cinka i magnezija (7XXX)** – drugi naziv je konstruktali. Karakterizira ih visoka čvrstoća, dobra obradljivost, otpornost na koroziju, primjenjuju se u zrakoplovnoj industriji. Pri zavarivanju nastaje cinkov oksid čime se povisuje opasnost od naljepljivanja.

- **Legure s ostalim elementima (8XXX)** – u ove legure se ubrajaju nove legure aluminija i litija. Dodatkom svakih 1% litija smanjena je masa za otprilike 3% pa se sve češće koristi umjesto legure aluminija i bakra u zrakoplovstvu.

2.2. Lijewane aluminijeve legure

Podjela lijevanih legura je u tri osnovne skupine: Al-Si, Al-Mg i Al-Cu. Kombinacijom ovih grupa dobivaju se legure poboljšanih osnovnih svojstava. [5]

- Al-Si legure – osnovni element koji pridonosi vrlo dobroj livljivosti je silicij (od 10% do 13% Si). Dodavanjem silicija smanjuje se temperatura tališta bez pojave krhkosti. Iz toga razloga iz ovih legura se proizvode žice za zavarivanje koje su u uporabi i za lemljenje kod spajanja aluminijske pošto ispunjavaju potrebu za nižim talištem od baznog materijala. [5]

- Al-Mg - glavna karakteristika ovih aluminijskih legura jest dobra korozivna postojanost čime se pri ovim legurama postiže visoki sjaj. Neke legure su otporne i na udarna opterećenja pa se upotrebljavaju kod umjereno opterećenih dijelova u brodogradnji. Legura s 10% Mg ima odličan omjer čvrstoće i žilavosti. Međutim, ista je i jedna od najteže livljivih aluminijskih legura radi loše žitkosti, stvaranja troske i pojave poroznosti. Iz toga razloga, najviše se upotrebljavaju legure s 3% i 5% Mg. [5]

- Al-Cu legure – pripadaju grupi toplinski očvrstljivih legura s dobrom otpornošću pri višim temperaturama, srednje visokom čvrstoćom, dobrom rezljivošću i srednjom ili slabom udarnom otpornošću. Najveći nedostatak je što su slabe livljivosti, dok im je korozivna postojanost najslabija među aluminijskim legurama. [5]

2.2.1. Označavanje lijevanih legura aluminijske

Lijewane legure aluminijske označavaju se prema normama „HRN EN 1780-1:2008“ i „HRN EN 1780-2:2008“ prema sljedećem [11, 12]:

- EN – za standardne materijale
- slovo A – predstavlja aluminij
- slovo C – predstavlja lijevani proizvod

Sastav legure je specificiran:

a) Brojčanom oznakom – 5 znakova („HRN EN 1780-1:2008“)

Tablica 2.3. Brojčano označavanje lijevanih aluminijevih legura [11]

Grupa legure prema glavnom legirajućem elementu	1. znak	2. znak	Generičko ime
Bakar (Cu)	2XXXX	21XXX	AlCu
Silicij (Si)	4XXXX	41XXX	AlSiMgTi
		42XXX	AlSi7Mg
		43XXX	AlSi10Mg
		44XXX	AlSi
		45XXX	AlSi5Cu
		46XXX	AlSi9Cu
		47XXX	AlSi(Cu)
		48XXX	AlSi5CuNiMg
Magnezij (Mg)	5XXXX	51XXX	AlMg
Cink (Zn)	7XXXX	71XXX	AlZnMg

Tablica 2.3. Prikazuje brojčano označavanje lijevanih aluminijevih legura. Treći znak označava modifikaciju legure, četvrti znak je u većini slučajeva nula, dok je peti znak 0, osim kod avio – legura. [11]

b) slovno-brojčanom oznakom - kemijskim simbolima („HRN EN 1780-2:2008“)

Primjeri označavanja sastava kemijskim simbolima: EN AC-Al Si7Mg0,3, EN AC-Al Si10Mg(Cu), EN AC-Al Si7Mg0,6. [12]

Nakon simbola Al je prazno mjesto te nakon toga slijedi simbol glavnog legirajućeg elementa i maseni udio istog. Slijede simboli preostalih legiranih elemenata prema masenim udjelima u padajućem nizu, a kod istih masenih udjela abecednim redom. Kod slučaja sličnog sastava naznačuje se nominalni sadržaj elemenata ili nečistoća u zagradama. [12]

Oznaka postupka lijevanja [8]:

Prvo slovo nakon oznake kemijskog sastava (brojčano ili kemijskim simbolima) upućuje na korišteni postupak lijevanja:

- 1) D – oznaka tlačnog lijevanja
- 2) K – oznaka lijevanja u kokile ili trajne kalupe
- 3) L – oznaka preciznog ili tlačnog lijeva
- 4) S – oznaka lijevanja u pješčane kalupe

Primjer: EN AC-42000K

Nakon oznake za primjenjeni postupak lijevanja predstoji oznaka za stanje lijevanih aluminijskih legura prema normi „HRN EN 1706:2020“ [13]. Označavanje stanja lijevanih legura prikazano je u tablici 2.4.

Tablica 2.4. Oznake za stanje lijevanih legura [13]

Oznaka	Stanje
F	Oznaka za lijevano stanje, toplinski neobrađeno
O	Oznaka za žareno
T1	Oznaka za gašeno s temperature tople deformacije hladeno i prirodno dozrijevano
T4	Oznaka za rastvorno žareno i prirodno dozrijevano
T5	Oznaka za gašeno s temperature tople deformacije i umjetno dozrijevano
T6	Oznaka za rastvorno žareno i umjetno dozrijevano
T64	Oznaka za rastvorno žareno i umjetno poddozrijevano
T7	Oznaka za rastvorno žareno i umjetno predozrijevano (stabilizirano)

2.3. Primjena aluminijevih legura u brodogradnji

Danas je aluminij u širokoj uporabi te se primjenjuje u skoro svim dijelovima industrije, posebno zbog korozijske postojanosti u mnogo medija. [14]

Ono što aluminij čini posebno pogodnim za upotrebu u brodogradnji je mala gustoća, dobra mehanička svojstva i korozijska postojanost. Prva plovila izgrađena su 1890.-ih s početkom razvoja primjene aluminijske legure u industriji. Francuz, Comte Jacques de Chabannes de la Palicen uložio je novac za izgradnju prvog plovila od aluminijske legure pod nazivom „Le Vendenesse“. Dužina plovila je bila 17,4 m, istisnina od 15 tona, vanjska oplata bila je izrađena od 2 mm debljine aluminijskog lima koji je bio spojen zakovicama na okvir od čelika. Takvom konstrukcijom osigurala se ušteda od 40% mase trupa broda. [15]

1920.-ih je došlo do značajnije uporabe aluminijevih legura u brodogradnji kao konstrukcijskog materijala, predstavljanjem gnječanih Al-Mg legura. [15]

Od druge polovice 19. stoljeća aluminijske legure su se počele koristiti u raznim pomorskim konstrukcijama [15]:

- brodica i jedrilica,
- teretnih brodova,
- radnih brodova,
- putničkih brodova,
- ribarskih brodova,
- patrolnih brodova (Slika 2.2.),
- pomorskih platformi,
- obalne instalacije i luke.



Slika 2.2. Aluminijski patrolni brod (25 m) za Royal Gibraltar Police [15]

Ipak, u najvećoj mjeri aluminij se počeo koristiti tek posljednjih četrdesetak godina, najprije za izgradnju ratnih i putničkih plovila (Slika 2.3.). Zbog male mase, kao i ostalih navedenih karakteristika izvrstan je materijal za brodogradnju. Prvenstveno, to se odnosi na legure aluminija s magnezijem, manganom i još neke elemente koji su razvijeni specifično za brodogradnju. [14]



Slika 2.3. Aluminijski brod „Benchijigua Express“ dužine 127 m [16]

Bitno svojstvo koje određuje uporabu aluminija u brodogradnji je to što će brodski trup od aluminijske legure biti čak 2,9 puta lakši od čeličnog trupa. Zbog niske gustoće, visoke čvrstoće, dobre žilavosti osigurana je ušteda mase broda 30 do 40% u odnosu na čelične i kompozitne konstrukcije. Kod brodskog trupa i nadgradnje, aluminijske legure osiguravaju uštedu mase od čak 60% u odnosu na čelik. Zbog toga smanjenja mase, moguća je izgradnja užih brodova bolje stabilnosti. Također, to ima niz drugih prednosti kao ušteda goriva, povećanje brzine itd. Nadalje, smanjenje mase utječe i na ekonomske (manji troškovi proizvodnje) i energetske aspekte (energetska učinkovitost, manji ugljični otisak). U usporedbi sa stakloplastikom, aluminij ima manju masu kod izrade brodica duljih od 10 m, i ova prednost se povećava s veličinom broda. [14]

Druga bitna karakteristika je relativno velika otpornost na koroziju usprkos tome što aluminij ima visoki afinitet prema kisiku. Zbog ove karakteristike aluminijski brod nije potrebno premazati bojama, osim za svrhu postizanja estetskog učinka. Nadalje, aluminijske konstrukcije se ne smiju predimenzionirati da ne bi došlo do gubitka čvrstoće do čega dolazi zbog korozije, kao što se to radi kod čelika. Bojanje trupa se izvodi samo ispod vodne linije

antivegetativnim premazima. Poželjne aluminijske legure za primjenu u morskom okruženju su iz serija 5XXX i 6XXX. [14]

Također, važno je spomenuti visoku reciklabilnost aluminija. Otprilike 40% aluminija koji se danas koristi proizvedeno je od otpada koristeći razne proizvodne procese. Recikliranje aluminija dovodi do smanjenja otpada, uštede energije i očuvanja prirodnih resursa. [17]

Aluminij i aluminijske legure skuplje su od čelika, ali njihov izvrstan omjer čvrstoće i mase te otpornost na koroziju čini ih dobrom zamjenom za čelik, posebno kod primjene u brodogradnji. Različite prednosti aluminijskih legura mogu se ekonomično iskoristiti u svakom koraku dizajniranja i gradnje broda. Toplinski neobradive aluminijske legure u usporedbi s toplinski obradivim aluminijskim legurama pokazale su se kao jeftinije u proizvodnji i mogu osigurati do 10% uštede u odnosu na čelik. [17]

Stoga, može se sažeti da su aluminij i aluminijske legure široko rasprostranjen materijal za različite primjene, uključujući brodogradnju, zbog njihove raspoloživosti, izvrsnog omjera čvrstoće i mase, korozijske otpornosti i dobrih mehaničkih svojstava. U sljedećim poglavljima bit će navedena primjena gnječanih i lijevanih aluminijskih legura u brodogradnji. [17]

2.3.1. Primjena gnječanih aluminijskih legura u brodogradnji

Gnječane aluminijske legure koje se koriste u brodogradnji su iz serija 5XXX (Al-Mg) i 6XXX (Al-Mg-Si).

Aluminijske legure serije 5XXX su očvršćuju hladnom deformacijom i imaju dobru otpornost na koroziju u slanoj vodi. Lako su zavarljive raznim tehnikama zavarivanja do debljine 20 mm. Ovu seriju karakterizira izvrsna čvrstoća i otpornost na koroziju u usporedbi na ostale aluminijske legure. Visoka čvrstoća ove legure pripisuje se magneziju kao glavnom legirnom elementu. Općenito se označuju određenim oznakama toplinske obrade. Za Al-Mg legure kojima je udio magnezija veći od 3% preporučena stanja toplinske obrade su H321 i H116. Slična mehanička svojstva i razina otpornosti na koroziju postižu se ovim stanjima toplinske obrade. [17]

Najviše korištena aluminijska legura iz serije 5XXX je 5083. Posjeduje visoku otpornost na koroziju i čvrstoću i lako je obradljiva. Kako se primjena aluminija i njegovih

legura sve više povećava u pomorstvu, raste i potražnja za novim aluminijskim legurama s poboljšanim svojstvima. Poboljšanje u željenim svojstvima moglo se postići promjenom kemijskog sastava legure. Tako je razvijena nova legura 5383 s nižim udjelom silicija i željeza te višim udjelom bakra, magnezija, mangana, cinka i cirkonija u odnosu na tradicionalnu leguru 5083. Ta legura je veće čvrstoće, bolje otpornosti na koroziju i oblikovljivosti. Daljnje promjene kemijskog sastava legura s visokim udjelom Mg, Mn, Zr i nešto nižim Cu i Cr u usporedbi s 5083 dovele su do razvoja legure 5383NG. Slično tome, razvijene su ostale aluminijske legure koje se koriste u pomorskim primjenama: 5059, 5052, 5086, 5454, 5456 itd. [17]

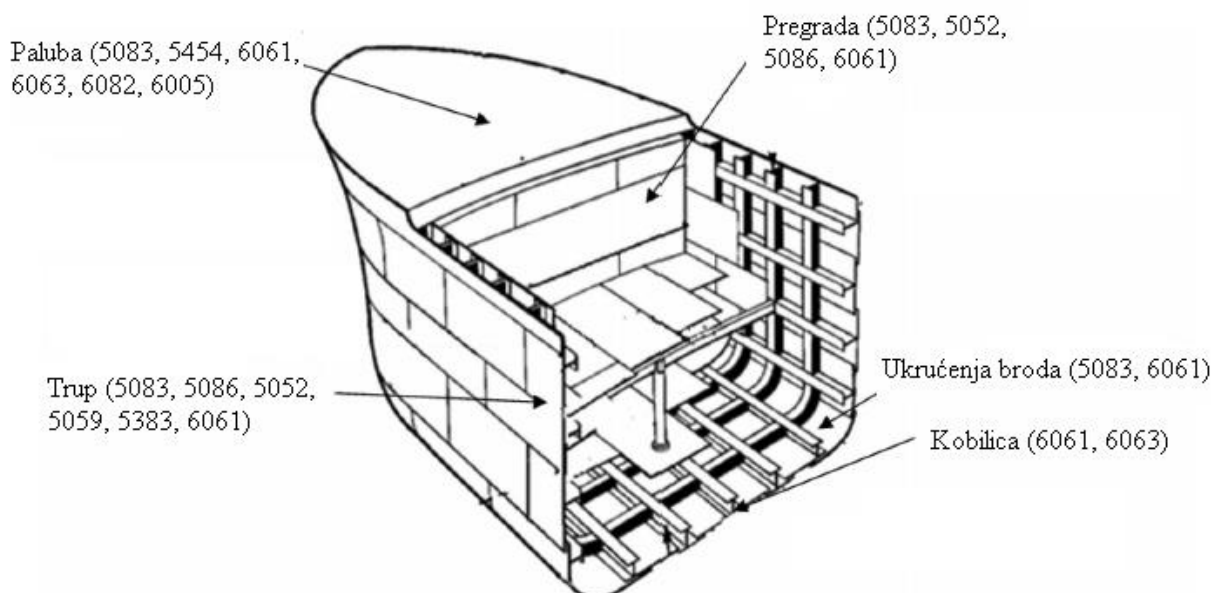
Legure koje se primjenjuju za proizvodnju trupa su ploče i limovi oznake 5083, 5086, 5454, 5456, a od nedavno 5059 i 5383 (Slika 2.4.). Te legure koriste se u žarenom stanju, a kada je potrebna veća čvrstoća one se koriste očvrstnute hladnom deformacijom kao H111, H112, H116 i H321. Legura 5086-H 32 debljine od 4,5 do 12,7 mm postala je široko prihvaćeni materijal za trupove. Kabine, spremnici za gorivo i pregrade su također od istog materijala kao i trup, iako se može upotrijebiti i 5052. Legura 5086 isto tako se često koristi za oplatu trupa. Legura 5754 također ima izvrsnu otpornost na koroziju, osobito na morsku vodu i industrijski zagađenu atmosferu. Dobro je zavarljiva i u primjeni je u obliku ploča i limova. [17]

Legure iz serije 6XXX su legure u precipitacijski očvrstnutom stanju i također su dobre čvrstoće i otpornosti na koroziju. Ove legure moguće je ekstrudirati. Lako su zavarljive i široko se koriste u ekstrudiranom obliku u brodogradnji. Glavni legirni elementi ove legure su magnezij i silicij koji imaju umjereno nižu otpornost na koroziju i gotovo ekvivalentnu čvrstoću u usporedbi s 5XXX serijom. Serija 6XXX ekstrudiranih legura s kompleksnim poprečnim presjekom ima široku primjenu za razne brodske konstrukcije, pregrade, rebra, poprečne grede, namještaj, stepeništa itd. Najčešće korištene legure 6XXX u morskom okruženju su 6061, 6063 i 6082. [17]

Tablica 2.5. prikazuje najčešću primjenu aluminijskih legura u brodogradnji.

Aluminijske legure, posebno serije legura 5XXX i 6XXX, moguće je podvrgavati niskim temperaturama, a da ne dođe do bitne promjene mehaničkih svojstava. Iz toga razloga, aluminijske legure je moguće upotrebljavati u plovilima koja su namjenjena za mora polarnih regija. Sposobnost aluminijskih legura za elastičnom deformacijom ne pada kod kriogenih temperatura i produženo držanje na niskim temperaturama ne rezultira promjenom njihovih svojstava nakon vraćanja na temperaturu okoline. [16]

Na temperaturi iznad 100 °C mehanička svojstva Al legura zavise o visini temperature i vremenu držanja na nekoj određenoj temperaturi. Porastom temperature dolazi do smanjenja vlačne čvrstoće R_m i konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0.2}$, a istezljivost A % raste. [15]



Slika 2.4. Upotreba aluminijevih legura kod glavnih strukturnih dijelova broda [17]

Tablica 2.5. Primjena aluminijevih legura 5XXX i 6XXX u brodogradnji [17]

Aluminijeva legura	Toplinska obrada	Primjena
5083	H111, H321, H323	Paluba, trup broda, ukrućenja trupa, nadgradnja
5052	H321	Manji trupovi, pregrade, spremnici za gorivo, kabine
5059	H116, H321	Trup broda
5086	H116, H321	Trup broda, oplata trupa, pregrade, kabine
5383	O, H111, H116, H321	Trup broda
5454	O, H112, H32, H34	Gornje palube
5456	O, H32, H112, H116, H321	Trupovi trajekta
6005	T6	Ukrućenja palube
6061	T6	Trup, kabina, kobilice, šine (ukrasni dijelovi), oplata palube, brodski okviri
6063	T6	Rebrasti nosači, kobilice, šine (ukrasni dijelovi)
6082	T6	Ukrućenja palube

2.3.2. Primjena lijevanih aluminijskih legura u brodogradnji

Lijewane aluminijske legure koje su u uporabi u brodogradnji su iz 4XXXX (Al-Si) i 5XXXX (Al-Mg) serija. Al-Cu legure (2XXXX serija) se nastoji izbjegavati u pomorskoj okolini, osim ako su vrlo dobro zaštićene. [15]

Od Al-Si lijevanih legura koriste se: [15]

- Legura 41000 – Koristi se za komponente koje moraju biti izgledom lijepe poslije mehaničkog poliranja te anodiziranja.
- Legura 42100 i 42200 – Upotrebljavaju se za kompleksne komponente koje zahtjevaju visoka mehanička svojstva. Moraju očvrnuti dozrijevanjem u svrhu postizanja željenih visokih mehaničkih svojstva.
- Legura 44100 – Za tanke tvrdo lijevane komponente.

Od Al-Mg lijevanih legura koriste se: [15]

- Legura 51100 (3 % magnezija)

- Legura 51300 (6 % magnezija)

Tablica 2.6. Prikaz pogodnosti preporučenih lijevanih aluminijskih legura u inženjerske svrhe [15]

Legura	41XXX	421XX	422XX	441XX	511XX	513XX
Livljivost	2	3	3	4	2	2
Sklonost pukotinama	2	3	3	4	1	1
Tanke komponente	2	4	4	4	1	2
Dimenzijska stabilnost	3	3	2	4	3	3
Obradivost	3	2	3	1	4	4
Zavarljivost (TIG, MIG)	3	3	3	4	4	4
Poliranje	4	3	3	2	4	4
Anodiziranje radi zaštite	4	4	4	4	4	4
Anodiziranje radi dekoracije	4	0	0	0	4	3
Korozijska postojanost u morskoj okolini	3	3	3	3	4	4

0 – nije prikladno, 1 – slabo, 2 – prosjek, 3 – dobro, 4 – izvrsno

Tablica 2.6. prikazuje važne karakteristike određenih lijevanih aluminijskih legura za brodogradnju.

3. Zavarivanje aluminija i aluminijevih legura

3.1. Zavarljivost aluminija

Većina aluminijevih legura koje pripadaju serijama 1000, 3000, 5000 i 6000 se mogu zavariti TIG i MIG postupcima zavarivanja. MIG postupak je zastupljeniji jer je jeftiniji, produktivniji i pogodan za automatizaciju, a TIG postupak je sporiji i manje produktivniji. Većina strukturnih komponenti kao što su oplata, predgrađe i paluba može biti zavarena MIG postupkom zavarivanja, ovisno o vrsti plovila. Pritom treba paziti na popratne toplinske deformacije i metalurške poteškoće koji će biti spomenuti u sljedećem poglavlju.

3.1.1. Utjecajna svojstva aluminija na zavarljivost

Zavarljivost je ovisna o postupku zavarivanja, sadržaju legiranih elemenata i o stanju legure. Utjecajna svojstva aluminija na zavarljivost su:

1. Aluminijev oksid Al_2O_3

Aluminijev oksid je debljine od 50 do 100 nanometara. [8] Daje dobru korozijsku otpornost, bezbojan je i vrlo tvrd. U prirodi se pojavljuje obojen od nazočnosti nekih drugih metala i u malim količinama kao safir, rubin, korund ili glinica. Temperatura tališta aluminijevog oksida je visoka i iznosi $2050\text{ }^\circ\text{C}$, dok je temperatura tališta aluminija na $660\text{ }^\circ\text{C}$. To stvara problem pri zavarivanju jer pri zagrijavanju aluminija do točke tališta rezultira rastaljenim aluminijem koji je zatvoren ispod postojanog sloja oksida (Slika 3.1.). [1]

Pri višim temperaturama toplinske obrade ili prilikom zavarivanja krutog ili rastaljenog Al stvara se deblji sloj oksida na površini. Nemoguće je ostvariti homogeni zavareni ili lemljeni spoj radi uključaka oksida. [1]

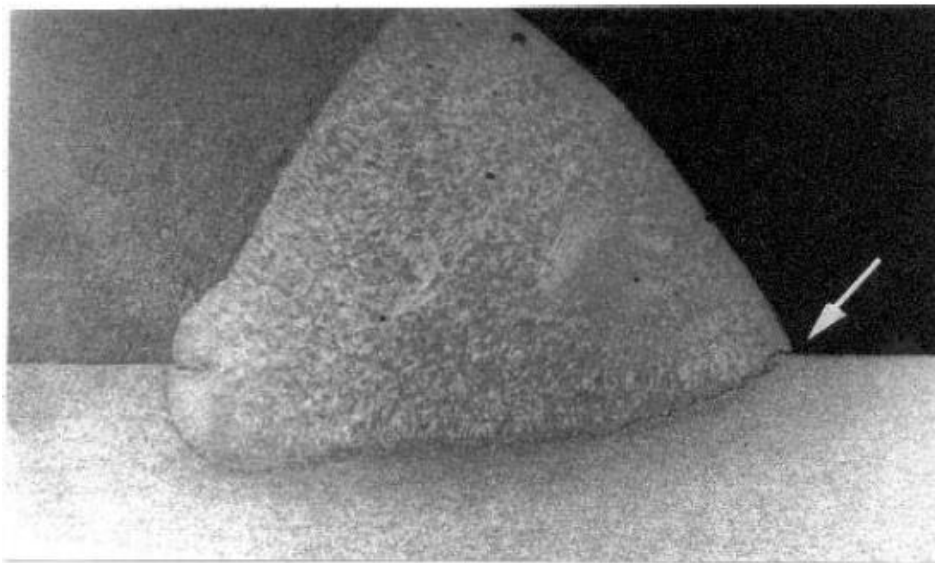
U zavareni spoj uključuje se kožica oksida kao nemetalni uključak. Da bi zavarivanje bilo uspješno treba odstraniti ili razoriti kožicu oksida što se može postići utjecajem električnog luka u inertoj atmosferi („+“ pol na elektrodi), prašcima za zavarivanje pri plinskom zavarivanju i lemljenju, kemijskim nagrizanjem radne površine osnovnog i dodatnog materijala ili pak mehaničkim odstranjivanjem. [1]

Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom žicom pod zaštitnim plinom javlja se fenomen pod nazivom katodno čišćenje čijom primjenom se uspješno uklanja oksidni sloj. Elektroda,

koja je istovremeno i taljiva žica, spojena je na pozitivan (+) pol izvora struje i nastaje tok istosmjernje struje i ionsko bombardiranje radnog dijela površine. Prestankom ionskog bombardiranja oksidni sloj je uklonjen s radne površine aluminijske čime je osigurana difuzija taline dodatnog materijala s osnovnim (Slika 3.2.). [10]

Kod MIG zavarivanja primarno se primjenjuje istosmjerni izvor struje (DC) s elektrodom koja je spojena na pozitivan pol struje. Elektroda spojena na negativan pol izvora struje dovodi do nestabilnog električnog luka, nepravilnog prijenosa metala i loše kvalitete zavara. [10]

Kod TIG zavarivanja konvencionalno se koristi istosmjerni izvor struje, a elektroda se spaja na negativan pol izvora struje. Kod aluminijske to može rezultirati lošom kvalitetom zavarenog spoja. Kada je elektroda spojena na pozitivan pol nastaje pregrijavanje volframove (W) elektrode do razine gdje je 60-70% generirane topline rezultat pregrijavanja. Pregrijavanjem volframove elektrode može doći do njenog otapanja. Rješenje je upotreba izmjenične struje (AC) gdje tokom pozitivnog dijela ciklusa dolazi do uklanjanja oksidnog sloja, a tijekom negativnog dijela ciklusa se odvija hlađenje elektrode. [10]



Slika 3.1. Oksidni sloj (Al₂O₃) „zatvoren“ unutar zavara [10]



Slika 3.2. Prikaz sloja razbijenog oksida uz zavar [18]

2. Dobra toplinska vodljivost

Iznos toplinske vodljivosti za čisti aluminij je 240 W/mK. Za aluminijeve legure iznos toplinske vodljivosti je između 117 W/mK i 155 W/mK. Zbog dobre toplinske vodljivosti aluminija dolazi do bržeg odvođenja topline s mjesta zavarivanja. To utječe na smanjenje brzine zavarivanja i na dubinu protaljivanja. Bržim odvođenjem topline ubrzano je skrućivanje taline zavora, smanjena je mogućnost otplinjavanja i povećana je izglednost nastanka poroznosti i naljepljivanja. Snažni koncentrirani tokovi energije i visoki toplinski input potrebni su za zavarivanje usprkos niskoj temperaturi tališta. Kod zavarivanja sa slabim i nedostatno koncentriranim tokovima energije, nastat će široka zona utjecaja topline (ZUT) s omekušanom strukturom. Velika je vjerojatnost pojave poroznosti jer čisti aluminij ima visoku toplinsku vodljivost. Da bi se spriječila pojava poroznosti, potrebno je povećanje unosa topline ili predgrijavanje. Predgrijavanje se provodi elektrootporno, plameno, indukcijski, u pećima i drugim postupcima, ovisno o dostupnoj opremi. Unos topline povećava se povećanjem struje zavarivanja ili tako da se koristi adekvatna zaštitna atmosfera (na primjer mješavina argona i helija). [1]

3. Jaka električna vodljivost

Velika jakost struje i kratko vrijeme elektrootpornog zavarivanja su potrebni zbog jake električne vodljivosti aluminijskog materijala. Kod zavarivanja sa slabim i nedostatno koncentriranim tokovima energije, nastaje široka zona utjecaja topline niske čvrstoće. [1]

4. Veliki koeficijent toplinskog rastezanja

Veliki koeficijent toplinskog istezanja uzrokuje veća stezanja i deformacije pri hlađenju, stoga postoji mogućnost pojave pukotina. [1]

5. Velika rastvorljivost vodika u rastaljenom stanju materijala

Pri kristalizaciji dolazi do oslobađanja mjehurića vodika zbog iznenadnog pada rastvorljivosti koji mogu prouzročiti poroznost. [1]

6. Ne mijenja boju kod zagrijavanja

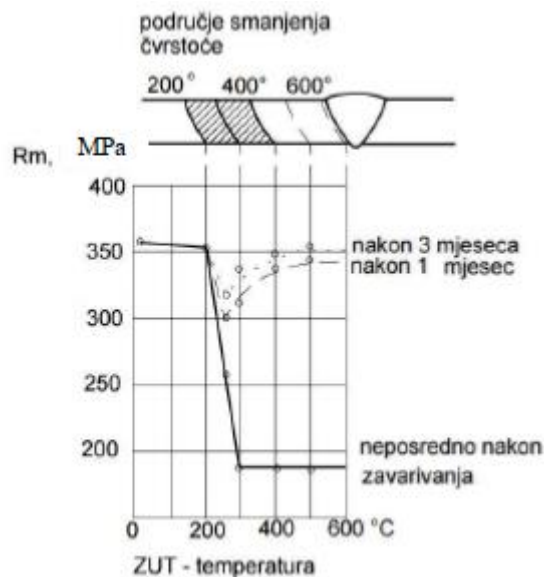
Kod zagrijavanja aluminij ne mijenja boju kao čelik pa je nemoguće procijeniti temperaturu na temelju boje prilikom zagrijavanja do temperature tališta, što je uzrok poteškoća kod zavarivanja. [1]

7. Sklonost vrućim i u manjoj mjeri hladnim pukotinama

Skлонost vrućim i u manjoj mjeri hladnim pukotinama zavisi o kemijskom sastavu legura i o uvjetima zavarivanja. [1]

8. Omekšanje na mjestu zavarenog spoja

Čvrstoća aluminijskih materijala povisuje se postupkom hladne deformacije. Iznos čvrstoće je najmanji na mjestu zavarivanja metala zbog ljevačke strukture kao kod meko žarenog stanja (Slika 3.3.) Zbog toga se u zrakoplovnoj industriji koriste zakovični spojevi na mjestima koje je moguće spojiti zavarivanjem. [1]



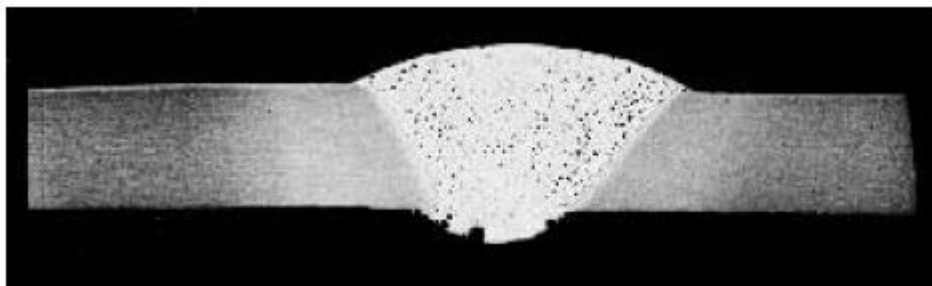
Slika 3.3. Utjecaj topline na mjestu zavarenog spoja [1]

3.1.2. Pogreške kod zavarivanja aluminija

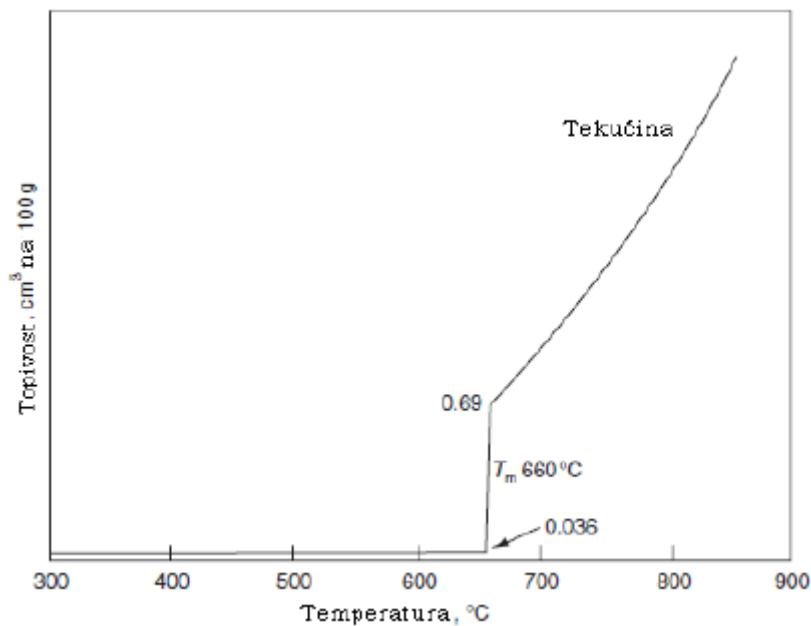
Uključci u zavaru u obliku tankog sloja oksida koje uzrokuje aluminijeva sklonost stvaranju prevlaka aluminijevog oksida na površini, utječu na poroznost, tople pukotine i smanjenje čvrstoće.

3.1.2.1. Poroznost

Poroznost se može definirati kao šupljikavost koja nastaje u strukturi metala zavara pri zavarivanju raznovrsnih materijala (Slika 3.4.). Poroznost uzrokuje otopljeni vodik u talini zavarenog metala koji tokom hlađenja ostaje „zarobljen“ u obliku mjehurića u ohlađenom i skrućenom metalu. U krutom aluminiju topljivost vodika je približno 20 puta manja nego topljivost u rastaljenom stanju (Slika 3.5.). U područje zavara vodik dolazi preko različitih nečistoća, okolnoga zraka, zaštitnih plinova i drugo. Jedan od primarnih izvora vodika jest aluminijev oksid. On je porozan i dobro apsorbira vlagu. Smatra se da je pojava poroznosti neizbježna pri zavarivanju aluminija i aluminijevih legura zbog stvaranja aluminijeva oksida. Poroznost se reducira smanjenom brzinom zavarivanja i legiranjem magnezijem. Do 6% magnezija dvostruko smanjuje apsorpciju vodika. S druge strane, poroznost zavarenog spoja se povećava legiranjem bakrom, silicijem i povećanjem duljine električnog luka. Zavar koji je zavaren TIG postupkom zavarivanja ima nižu poroznost od zavara zavarenog MIG postupkom. Razlog tome su veća mogućnost kontaminacije žice dodatnoga materijala i veća brzina zavarivanja. [10]



Slika 3.4. Poroznost kod sučeljenog spoja aluminija (TIG zavarivanje) [10]

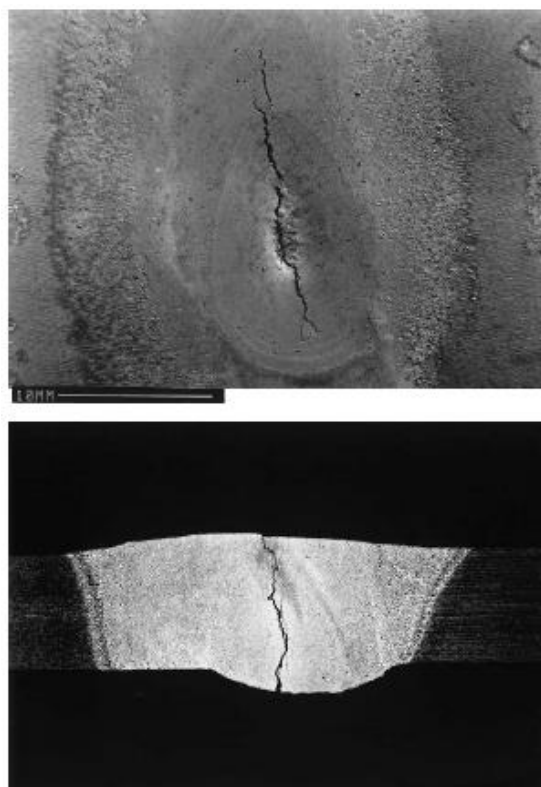


Slika 3.5. Prikaz topivosti vodika u aluminiju [10]

3.1.2.2. Tople pukotine

Vrlo čest problem pri zavarivanju aluminija i njegovih legura jesu tople ili solidifikacijske pukotine. Nastaju na temperaturi 1200 – 900 °C. Posljedica su poprečnih reakcijskih naprezanja tokom hlađenja taline do čvrstoga stanja. Pukotine nastaju na granicama zrna materijala, češće po dužini zavara, no mogu nastati i u ZUT-u. Nečistoće u materijalu, legiranje, parametri zavarivanja, nepovoljni oblik žlijeba i nepravilni izbor dodatnog materijala povezani su s pojavom toplih pukotina. [10]

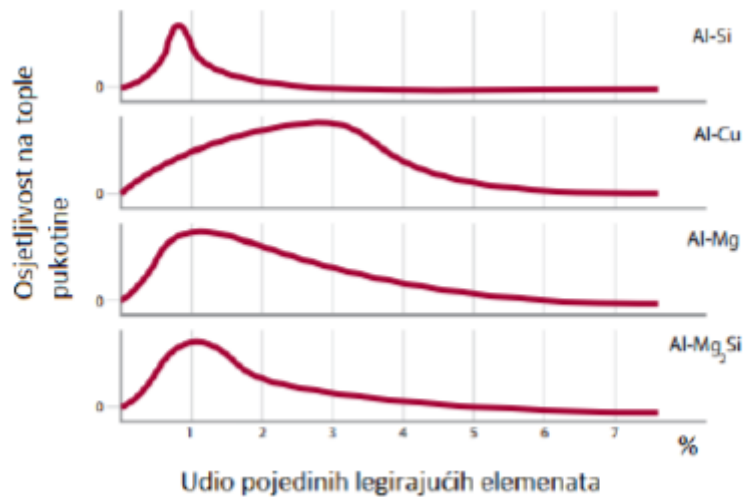
Na slici 3.6. su vidljive tople pukotine u sučeljenom spoju 3 mm debelih ploča aluminijeve legure A6082 s dodatnim materijalom 4043. Primjenjeni postupak zavarivanja je TIG. Gornja slika prikazuje unutarnju toplu pukotinu koja nije otvorena prema površini, a na donjoj slici pukotina prolazi kroz cijelu površinu zavarenog spoja. [10]



Slika 3.6. Tople pukotine u sučeljenom spoju aluminijske legure A6082 s dodatnim materijalom 4043 (3 mm debljina ploča) [10]

Kod zavarivanja Al-Si legura osjetljivost na pukotine je izražena kod sadržaja Si od 0,5 do 2%. Pri sadržaju silicija preko 3%, osjetljivost na pukotine je relativno niska. Kod zavarivanja Al-Cu legura, izražena je osjetljivost kod sadržaja bakra oko 1,5 do 3,5%. Preko 6% sadržaja bakra osjetljivost je relativno niska. Pri udjelu magnezija od 0,5 do 3% metal zavara postaje osjetljiv na pukotine. Također, uz sadržaj magnezija manjeg od 2,8%, Al-Mg leguru moguće je zavariti s Al-Si (4XXX) žicom ili Al-Mg (5XXX) žicom, ovisno o potrebnim performansama. Pri sadržaju magnezija višim od 2,8%, nije moguće dobro zavarivanje Al-Si žicom jer se stvara suviše Mg_2Si koji smanjuje žilavost i povećava osjetljivost na pukotine. Treba pripaziti i pri zavarivanju Al-Mg-Si legura kod kojih je dopušteno do 1% Mg_2Si radi osjetljivosti na pukotine. Iz tog razloga poželjno je koristiti dodatne materijale serija Al-Si ili Al-Mg. [19]

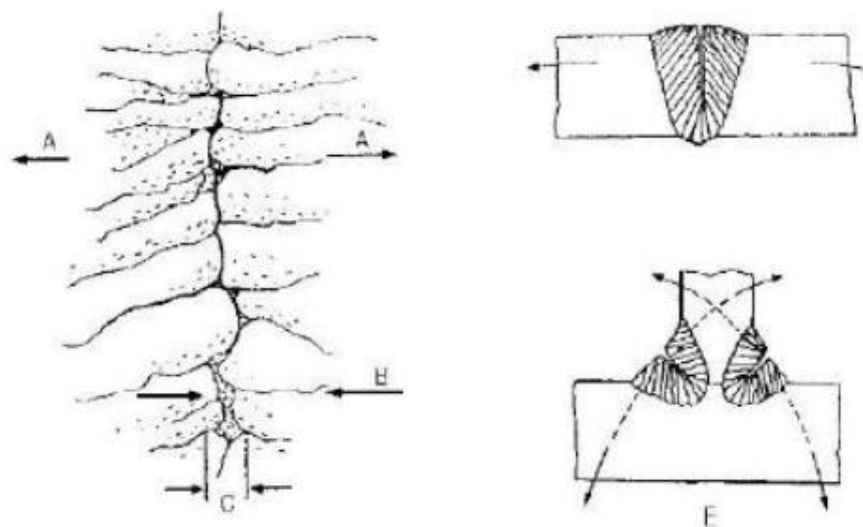
Na slici 3.7. je prikazan utjecaj legirajućih elemenata na pojavu toplih pukotina u aluminiju.



Slika 3.7. Utjecaj legirnih elemenata na nastanak toplih pukotina [20]

Mehanizam nastanka toplih pukotina (Slika 3.8.) [20]:

- Skrućivanje metala zavara započinje od hladnih strana žlijeba prema središtu zavara, a razdvojeni dio se popunjava talinom (B)
- Kod završne faze skrućivanja, tanki film taline preostaje između zrna skrućenog metala zavara (C)
- Područje skrućenog metala se skuplja u smjeru suprotno od smjera skrućivanja te tako stvara velika naprezanja (A)
- Ukoliko pri procesu između skupljanja i skrućivanja, prevlada skupljanje, zrna materijala ostaju odvojena, u toplom stanju- tople pukotine (E).



Slika 3.8. Mehanizam nastanka toplih pukotina [20]

Nastanak toplih pukotina može se izbjeći [20]:

- Smanjenjem veličine kristalnog zrna. Kao jezgra za razvoj sitnog, finog kristalnog zrna kod solidifikacije služe titan, cirkonij ili skandij (do 0,1%) kao dodatak.
- Kontrolom sastava taline zavara dodatkom primjerenog dodatnog materijala kojim se postiže sastav legure koji nema sklonost nastanku toplih pukotina.
- Odgovarajućom pripremom spoja i razmakom između komada za ostvarenje dovoljnog dodavanja dodatnog materijala.
- Zavarivanjem najvećom mogućom brzinom. Velikim brzinama zavarivanja smanjuje se vrijeme u kojem se zavar nalazi u rasponu velikih temperatura pri kojima nastaju tople pukotine. Velika brzina zavarivanja smanjuje zonu utjecaja topline i naprezanja uslijed kontrakcije prilikom hlađenja zavara.
- Odabirom postupka zavarivanja i montažnoga niza koji smanjuje zaostala naprezanja na minimum.
- Uporabom vanjske sile koja omogućava tlačno naprezanje zavara kad je u intervalu visokih temperatura koje pogoduju pojavi toplih pukotina.
- Izborom dodatnog materijala koji ima talište slično osnovnom metalu.

3.1.2.3. Smanjenje čvrstoće

Za spajanje komponenata zavarivanjem neophodno je mjesto spoja, koje je ranije odgovarajuće pripremljeno, zagrijati na visoku temperaturu. Najčešće do temperature tališta osnovnog materijala. Područja zavarenog spoja dijele se u tri distinktivne zone: zona materijala zavara, zona utjecaja topline i nepromijenjen osnovni materijal. [10]

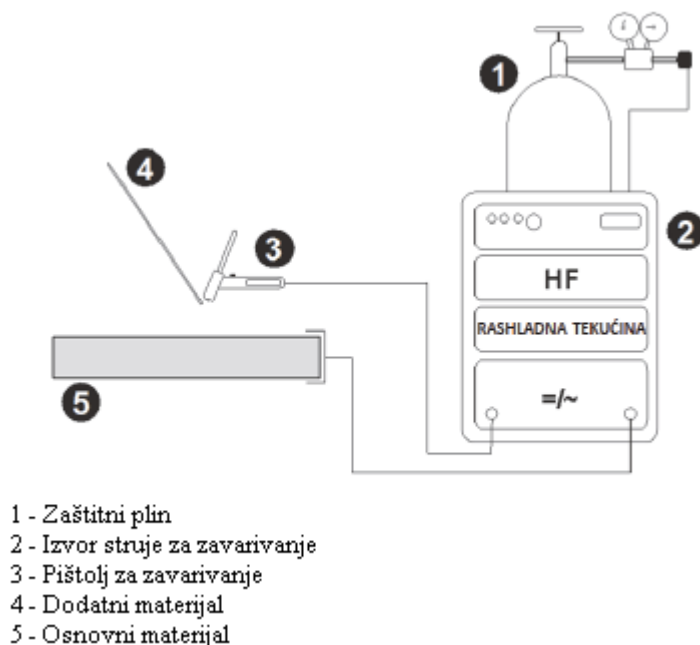
Pošto zona utjecaja topline (ZUT) doživljava barem jedan ili više ciklusa zagrijavanja i hlađenja njezina svojstva mogu se uvelike razlikovati od svojstava neizmjenjenog osnovnog materijala. Takav je slučaj čest s legurama aluminija koje očvršćuju hladnom deformacijom ili precipitacijom. [10]

Važan faktor je velika širina zone utjecaja topline kod određenih aluminijskih legura koja je uzrokovana velikom toplinskom vodljivošću legura i posljedice velike širine ZUT-a u kojoj dolazi do smanjenja čvrstoće. Netretirane lijevane legure ili legure u žarenom stanju su izuzetci kod kojih svojstva zone utjecaja topline odgovaraju svojstvima osnovnog materijala. [10]

U svrhu poboljšanja svojstva zavarenog spoja nije moguće puno toga učiniti. Većoj čvrstoći metala zavara mogu značajno doprinjeti očvršnuće uslijed otopljenih atoma u krutoj otopini i izbor adekvatnog dodatnog materijala. Problem koji se javlja u zoni utjecaja topline, ali i metalu zavara, je potencijal gubitka legirnih elemenata (npr. magnezij s niskom točkom vrelišta ili litij koji je veoma reaktivan s kisikom što ih čini sklonim nestajanju). [10]

3.2. TIG zavarivanje

TIG (eng. Tungsten Inert Gas) zavarivanje je postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom (ili volfram s dodacima) elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova. Električni luk koji nastaje između radnog komada i netaljive volframove elektrode daje energiju potrebnu za zavarivanje. Zavarivanje je moguće sa a ponekad i bez dodatnog materijala prilikom čega se upotrebljava inertni (neaktivni) zaštitni plin koji služi kao zaštita zagrijane zone, taline metala, zagrijanog i rastaljenog vrha žice i zagrijanog vrha elektrode od utjecaja štetnih plinova iz atmosfere. [21]

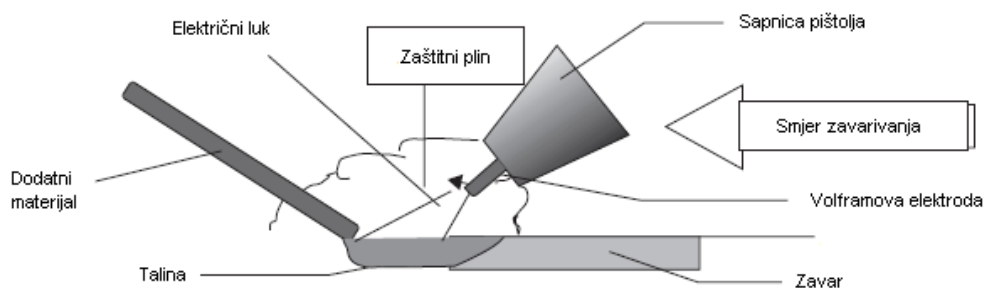


Slika 3.9. Shematski prikaz TIG opreme za zavarivanje [22]

TIG postupak zavarivanja pretežno se upotrebljava kao ručni postupak zavarivanja, ali moguća je automatizacija i poluautomatizacija. Standardna oprema za TIG postupak zavarivanja se sastoji od: izvora struje za zavarivanje, sustava za dovod zaštitnog plina, pištolja za zavarivanje, dodatnog materijala te u nekim slučajevima i rashladnog sustava (Slika 3.9.). [23]

Postupak zavarivanja se odvija na sljedeći način (Slika 3.10.). Dovođenje električne struje se ostvaruje kabelom s izvora struje na pištolj kao i na kontaktnu cjevčicu na kojoj se nalazi volframova elektroda. Frekvencija struje na volframovoj elektrodi je visoka. U isto vrijeme, prije početka procesa zavarivanja zaštitni plin se dovodi iz čelične boce s gumenim crijevom sve do pištolja za zavarivanje. Nadalje, pomoću sapnice u pištolju se taj plin šalje na mjesto zavarivanja. Kod TIG ručnog zavarivanja nužne su obje ruke pošto se u jednoj ruci

drži pištolj, a u drugoj ruci žica dodatnog materijala koja se potom dodaje u zonu taljenja zavarenog spoja. Neposredno pred zavarivanje zavarivač mora pritisnuti prekidač da bi potekla struja kroz volframovu elektrodu i zaštitni plinovi kroz mlaznicu. Pištolj i elektroda se pridržavaju na udaljenosti od osnovnog materijala 2 do 5 mm. Pri toj udaljenosti električni luk tali osnovni materijal. Rastaljeni osnovni materijal nakon hlađenja formira zavareni spoj. Ako ima potrebe u isti se u obliku žice unosi dodatni materijal. On se zatim rastali u talini i s osnovnim materijalom tvori zavareni spoj. Za uspješan postupak zavarivanja zavarivač u jednom smjeru pomiče pištolj i tvori zavareni spoj zbog dodatnog taljenja osnovnog materijala. Prestankom zavarivanja otpušta se prekidač na pištolju čime dolazi do prekida strujnog kruga i dovoda zaštitnog plina. Kod prestanka zavarivanja najbitnije je da se pištolj drži još nekoliko sekundi iznad zavarenog spoja jer prekidom strujnog kruga istovremeno ne dolazi do prekida dovoda zaštitnog plina. Zaštitni plin nakon prekida strujnog kruga struji još nekoliko sekundi da bi se omogućila zaštita zavarenog spoja sve do formiranja i djelomičnog hlađenja. [23]



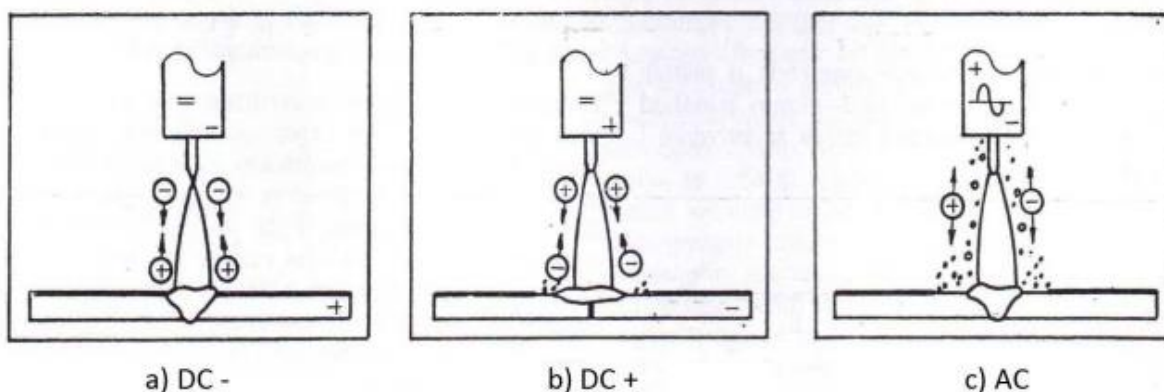
Slika 3.10. Shema TIG zavarivanja [10]

TIG zavarivanje obično se upotrebljava za debljine materijala do 6 mm. Postupak je pogodan za zavarivanje u svim položajima. Ovaj postupak karakterizira visoka kvaliteta zavara. U većini slučajeva zavarivanje materijala TIG postupkom upotrebljava se istosmjerna struja sa spojenom elektrodom na minus pol (DC-). Pritom, kod zavarivanja aluminija oksid s površine Al se loše uklanja. U slučaju elektrode spojene na plus pol javlja se pregrijavanje i taljenje iste. Zbog toga se koristi izmjenična struja (AC) za TIG postupak zavarivanja aluminija. [21]

Električni luk izmjenične struje upotrebljava se za zavarivanje magnezija i aluminija, prilikom čega se u samo djeliću sekunde mijenja pravac kretanja naboja, ovisno o zadanoj frekvenciji. To bi značilo, koliki broj puta u sekundi je elektroda na negativnom polu, toliki broj puta u sekundi će biti na pozitivnom polu izvora struje. Kod elektrode spojene na plus

pol ostvaruju se dobra razaranja oksida s površine, a kod elektrode na minus pol dobra protaljivanja pri manjem omjeru elektrode (Slika 3.11.). Zaključak je da je električna struja oba pola tj. izmjenična električna struja najbolja kombinacija za zavarivanje lakih metala. Do razaranja površinskih oksida dolazi protokom elektrona prema elektrodi, a protokom na radni komad nastaje duboko protaljivanje i dobiva se dobro protaljen i čist zavar. Na taj način elektrodi je moguće opteretiti velikom strujom. Koliko će se jako zagrijati prolaskom elektrona prema njoj, toliko će se manje zagrijati kad elektroni teku od nje. [24]

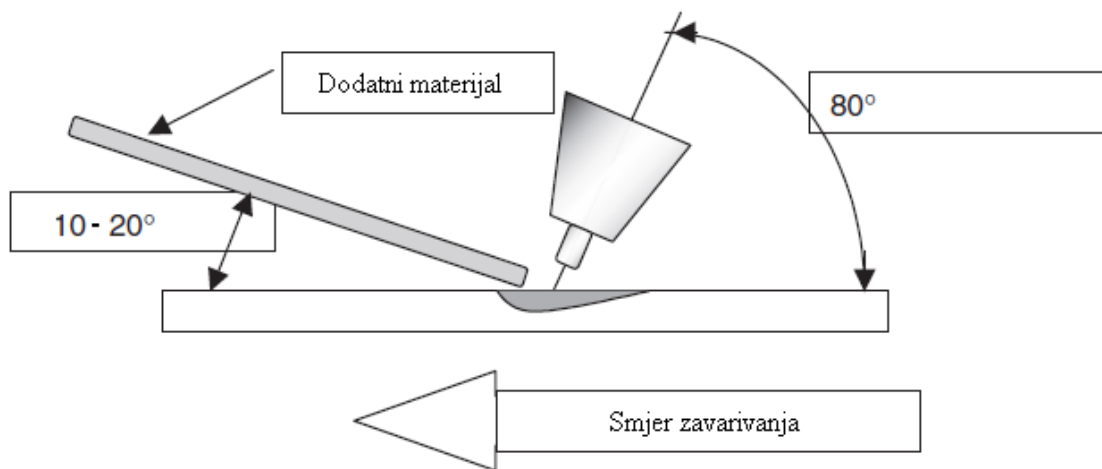
Do „gašenja“ i „paljenja“ električnog luka izmjenične struje dolazi promjenom smjera tečenja čestica što čini električni luk nestabilnim. Iz tog razloga izvoru struje zavarivanja dodaje se uređaj koji proizvodi visokonaponsku visokofrekventnu električnu struju (VF generator). Takva struja u svakom nultom periodu daje jake izboje i dolazi do poboljšanja stabilnosti električnog luka. [24]



Slika 3.11. Utjecaj polariteta na dubinu protaljivanja i razaranja površinskih oksida na aluminiju [24]

Impulsno zavarivanje omogućava tehnologija kojom su opremljeni noviji TIG uređaji. Takvi uređaji imaju mnogo prednosti nad starijim uređajima. Prednjače što se tiče zavarivanja tanjih materijala i omogućavaju jednostavnije zavarivanje u prisilnim položajima. Odgovarajuća količina taljenja osnovnog materijala omogućava se trajanjem i amplitudom impulsa. Prednosti impulsnog TIG zavarivanja u usporedbi sa standardnim su: stabilniji električni luk, preciznija kontrola penetracije, širi izbor parametra zavarivanja, manja količina taline zavarenog spoja i onemogućavanje akumulacije površinskog oksida. Smanjenim unosom topline u osnovni materijal dolazi do manjih deformacija materijala i manjeg utjecaja na veličinu zrna. Dobiva se zavareni spoj boljih mehaničkih svojstava. [23]

Volframova elektroda se u pištolj namjesti tako da vrh izvan sapnice izlazi 3 do 5 mm, ovisno o jakosti struje i obliku zavarenog spoja. Udaljenost sapnice od površine taline iznosi 6 do 10 mm, a ovisno o jakosti struje može biti i veća. [23]



Slika 3.12. Položaj pištolja za zavarivanje i dodatnog materijala kod TIG ručnog zavarivanja [10]

Tehnika TIG postupka zavarivanja slični tehnici plinskog zavarivanja. Pištolj se drži blago nagnut sve dok se rubovi ne počnu taliti. Zatim se u talinu pridodaje žica i rastaljuje se nužan dio. Hlađenje pištolja vodom se izvodi pri strujnim opterećenjima iznad 150 A. Zbog stabilnosti električnog luka postoji mogućnost odvajanja dodavanja topline i dodatnog materijala te je moguće praćenje procesa taljenja. Tako se osigurava najkvalitetnije zavarivanje korijena zavara. [23]

U vodoravnom položaju zavarivati se može sa ili bez dodatnog materijala. Kod zavarivanja s dodatnim materijalom, uvodi se izravno u talinu. Dodatni materijal se s obzirom na vodoravnu os drži pod kutom od 10 do 20°, dok nagib pištolja iznosi 80° (Slika 3.12.) [23]

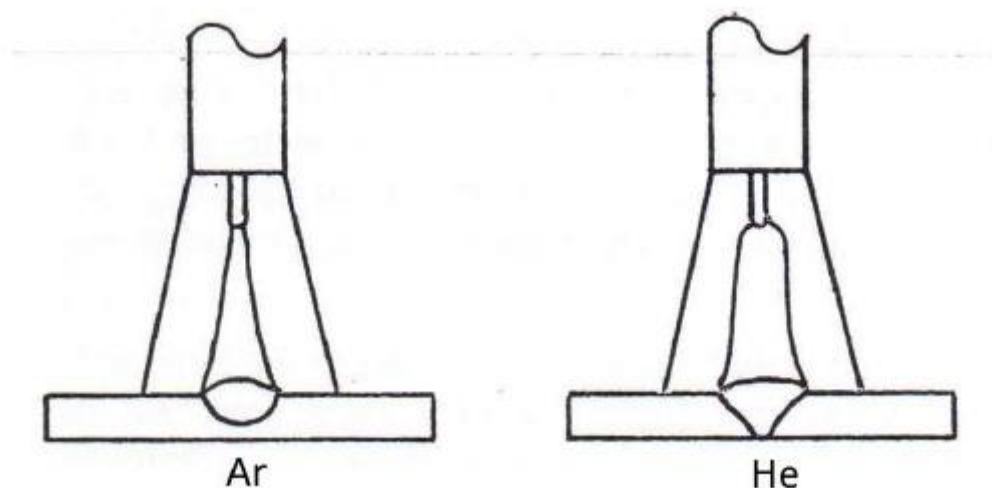
Kod zavarivanja sučeljenih spojeva u smjeru odozdo prema gore položaj pištolja je pod kutom od 90° u odnosu na okomitu ravninu. Vođenje pištolja je ravno, a uvođenje dodatnog materijal u talinu izvodi se s gornje strane. [23]

Kao prednost kod TIG postupka zavarivanja ističu se kvalitetno zavareni spojevi, pogodnost za sve metale, sve položaje zavarivanja i sve oblike radnih komada. Također, ne dolazi do rasprskavanja kapljica metala, nema čišćenja troske i dima. Zavareni spoj izgledom je lijep, čist i gladak.

Neki od nedostataka TIG postupka zavarivanja su neekonomičnost kod zavarivanja materijala većih debljina (iznad 6 mm), otežan rad na otvorenom (veće strujanje zraka), veliki zahtjevi prema kvaliteti, čistoći i stanju kod pripreme zavarenog spoja [23].

3.2.1. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi koji se upotrebljavaju pri TIG zavarivanju aluminija su argon, helij i mješavina argon-helija. U usporedbi s helijem, argonom se osigurava stabilniji električni luk i manja dubina protaljivanja pri istoj jakosti i vrsti električne struje zavarivanja. Nadalje, uporabom argona osigurano je najjednostavnije paljenje luka i najstabilniji električni luk. Slika 3.13. prikazuje oblik i utjecaj električnog luka kod argona i helija. [24]



Slika 3.13. Oblik i utjecaj električnog luka kod argona i helija [24]

Isto tako, korištenje helija kod zavarivanja dovodi do proširivanja električnog luka. Helij kao zaštitni plin odlikuje visoka temperaturna provodljivost, a u odnosu na argon, nužna je veća protočnost plina. Kod zavarivanja helijem potreban je veći napon nego kod zavarivanja argonom. Također, poboljšana je prijenos topline s luka na radni komad i taljenje metala kod zavara. Povećanjem udjela helija dolazi do poteškoća pri uspostavi električnog luka. Prednost korištenja helija je mogućnost veće brzine zavarivanja, a nedostatak je visoka cijena [10,24].

3.2.2. Pištolj za ručni TIG postupak zavarivanja

Za TIG ručno zavarivanje upotrebljavaju se pištolji različitih oblika i veličine. Podijeljeni su u dvije skupine: sa i bez hlađenja rashladnom tekućinom koja može biti voda ili antifriz. Oni koji se hlade isključivo zrakom, u primjeni su za manje jakosti struje zavarivanja (od 150 do 200 A) i kraća vremenska opterećenja. [10]

Najčešći dijelovi pištolja za zavarivanje [18]:

- držač za ruku (na/u njemu se nalaze prekidač, provodnici plina, rashladnog sredstva) (Slika 3.14. br.13),
- vodilica volframove elektrode (Slika 3.14. br. 5,9),
- raspršivač plina (Slika 3.14. br. 6, 10),
- kape pištolja (Slika 3.14. br. 1, 2, 3),
- keramičke sapnice za plin (Slika 3.14. br. 7, 8, 11, 12),
- volframova elektroda (Slika 3.14. br. 4).

Završetak provodnika električne struje za zavarivanje, električne struje za komande, dovod i odvod vode te dovod plina nalazi se u držaču za ruku. Prekidač za električne komande se također nalazi na držaču za ruku. Na pištolj je spojen snop provodnika ("polikabel") duljine od 5 do 8 m koji se priključuje na komandni ormarić ili izvor struje zavarivanja [10].



Slika 3.14. Najčešći dijelovi pištolja za TIG postupak zavarivanja [18]

3.2.3. Volframova elektroda

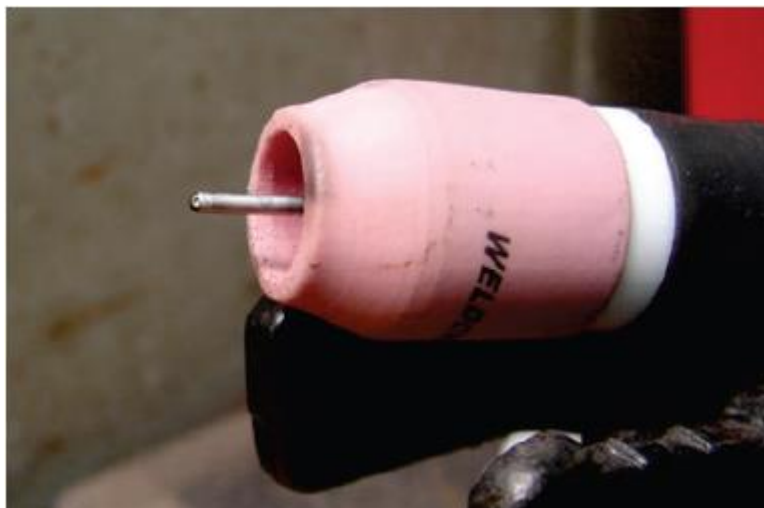
Kod TIG zavarivanja koriste se elektrode od čistog volframa i volframa legiranog torijem ili cirkonijem. Dodavanje ovih elemenata je u svrhu poboljšanja karakteristika uspostavljanja električnog luka, stabiliziranja električnog luka i produljenje vijeka elektrode. Kod izmjenične struje upotrebljavaju se elektrode legirane cirkonijem jer su višeg tališta u odnosu na elektrode od čistog volframa ili elektrode legirane torijem. Također, moguće ih je koristiti pri većoj struji zavarivanja, a i otpornije su na onečišćenja. [21]

Odabir promjera elektrode ovisi o debljini i vrsti zavarivanog materijala i jakosti struje zavarivanja. Za zavarivanje aluminija elektrode su većeg promjera nego kod čelika jer se aluminij zavaruje izmjeničnom strujom i dolazi do većeg zagrijavanja elektrode nego kod zavarivanja istosmjernom s elektrodom na minus polu. [21]

Kod volframove elektrode ispravno opterećene istosmjernom strujom, na vrhu elektrode se formira vrlo mala kapljica u obliku kuglice kroz koju se održava stabilni električni luk. Vrh volframove elektrode pri zavarivanju aluminija izmjeničnom strujom je zaobljen (Slika 3.15.). Samo krajnji vrh volframove elektrode je vidljivo zagrijan prilikom zavarivanja. [21]

Volframove elektrode koriste se u sljedećim promjerima: 0,5; 1,0; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0; 6,4 i 8,0 mm. Dužine elektroda su 50, 75, 150 i 175 mm [21].

Označavanje volframovih elektroda vrši se po standardu „HRN EN ISO 6848“. [25]



Slika 3.15. Prikaz oblika vrha volframove elektrode za zavarivanje aluminija [18]

3.2.4. Parametri TIG zavarivanja

Vrsta i debljina osnovnog materijala utječu na jakost struje zavarivanja i pripremu spoja za zavarivanje. Jakost struje zavarivanja je u rasponu od 40 do 400 A. Npr. kod sučeljenog spoja u vodoravnom položaju za aluminij jakost struje iznosi 45 A po mm debljine lima [24].

Početak i prekid zavarivanja bitni su kod TIG zavarivanja. Netom prije početka zavarivanja preporuka je provjera parametara na pomoćnoj bakrenoj pločici (prilikom čega se pištolj osuši od potencijalne vlage). Prilikom uspostave električnog luka, početno mjesto je prije dodatka žice potrebno dobro pretaliti. Mogućnost postupnog smanjivanja struje električnog luka karakterizira suvremene TIG uređaje. Prekidom električnog luka pa sve do prestanka dovoda zaštitnog plina pištolj ostaje na mjestu završetka zavarivanja (oko 3-10 sekundi). [23]

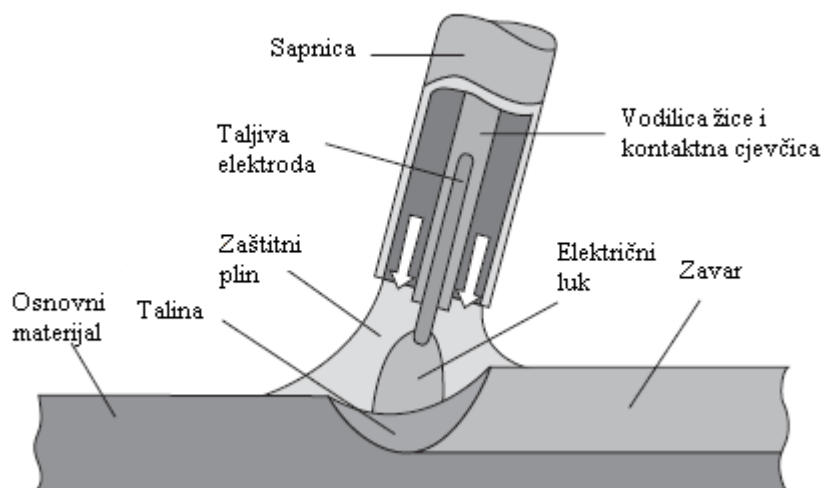
TIG zavarivanje pretežno se upotrebljava kod tankih limova od 0,5 do 6 mm debljine. Za debljine lima od 1 do 1,5 mm upotrebljava se spoj s povinutim rubom koji se pretaljuje bez dodatnog materijala. Zatim za 2 - 4 mm upotrebljava se I-spoj bez razmaka, a za debljine lima od 4 do 6 mm I-spoj s većim razmakom u grlu žlijeba ili pak V-spoj. Za ostvarenje kvalitetnog zavarenog spoja, površine koje se spajaju trebaju biti u potpunosti čiste. To uključuje odmašćivanje i struganje površinskih oksida kod Al legura. [23]

Dobro zavarivanje čistog aluminija i aluminijskih legura s manganom, magnezijem, silicijem i cinkom ostvaruje se odgovarajućim izborom dodatnog materijala. Poželjno je da su dodatni i osnovni materijal iz iste grupe, ali dodatni materijal mora biti većeg udjela istih legiranih elemenata. Bakar utječe na povećanje tvrdoće zone taljenja pa se kod Al-Cu legura javlja mogućnost pojave toplih pukotina. Dodatni materijal od čistog aluminija se ne smije koristiti kod zavarivanja aluminijskih legura jer u zoni taljenja dolazi do pojave pukotina. U načelu, teži se zavarivanju većim brzinama, to jest stvaranju manje količine taline zavara. Hlađenje prevelike količine taline u zavaru je sporije prilikom čega dolazi do porasta zrna i smanjene čvrstoće [23].

Prednosti TIG postupka kod zavarivanja aluminija i Al legura su dobra zaštita taline plinom argonom, stabilan električni luk i ne dolazi do pojave rasprskavanja kapljica metala. [24]

3.3. MIG zavarivanje

Zavarivanje aluminija i njegovih legura se najčešće provodi MIG postupkom zavarivanja (eng. Metal Inert Gas). Kod ovog postupka zavarivanja, električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice koja je u načelu spojena na pozitivan pol istosmjerne struje. Postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova, argona, helija ili njihove mješavine. Zaštitni plinovi služe za zaštitu rastaljenog metala od štetnih utjecaja iz atmosfere. Na mjesto zavarivanja se dovode kroz sapnicu na pištolju za zavarivanje (Slika 3.16.). Zbog primjene inertnog plina nema reakcije rastaljenog metala s plinom. Zbog toga se upotrebljavaju kod zavarivanja osjetljivih materijala na učinak plinova iz atmosfere, kao što su aluminijeve legure. [26]

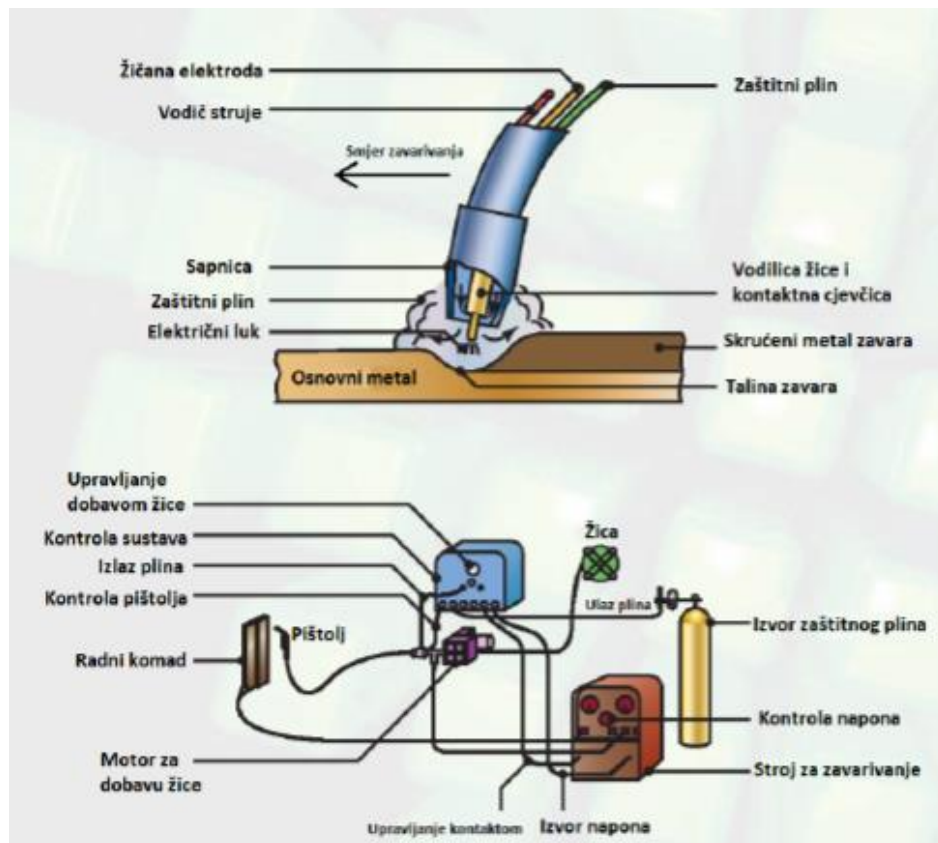


Slika 3.16. Shematski prikaz MIG zavarivanja [10]

Iz izvora struje priključenog na električnu mrežu dolazi električna struja. Struja zavarivanja se iz izvora zavarivanja dovodi uz pomoć vodiča. Jedan vodič je spojen na radni komad, dok je drugi preko razvoda upravljačkog ormara priključen na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom za zavarivanje koja se kontinuirano i automatski odmatava s koluta uz pomoć pogonskog elektromotora. Na mjesto zavarivanja zaštitni plin iz čelične boce dolazi preko upravljačkog ormara kroz sapnicu pištolja. U atmosferu električnog luka se upuhuje zaštitni plinski omotač kroz sapnicu pištolja. Pištoljem je moguće istovremeno odsisavanje dimnih plinova nastalih zavarivanjem. Svrha kontaktne vodilice pištolja je vođenje elektrode i prijenos struje zavarivanja na elektrodu, a svrha

sapnice je dovod zaštitnog plina. Kontaktna vodilica pištolja i sapnica su lako zamjenjivi potrošni dijelovi pištolja. Hlađenje pištolja za zavarivanje je moguće zrakom ili vodom. [21]

Netom prije zavarivanja potrebno je uključiti izvor struje, namjestiti količinu protoka plina i parametre zavarivanja. Kod poluautomatskog zavarivanja zavarivač približi pištolj radnom komadu i uključuje proces zavarivanja pritiskom sklopke na pištolju. Otvara se magnetni ventil za protok zaštitnog plina, uključi se izvor struje te se aktivira elektromotor za dovod žice. Prvo poteče zaštitni plin, a nakon toga izlazi žica. Kada žica dodirne radni komad, zatvara se strujni krug i uspostavlja električni luk. Pištolj se pomiče odgovarajućom brzinom u smjeru zavarivanja i zavaruje se određenom tehnikom rada. Zbog utjecaja električnog luka dolazi do taljenja žice i osnovnog materijala koji se spajaju u talinu i nakon toga skrućuju u zavareni spoj. [27]



Slika 3.17. Prikaz MIG postupka zavarivanja [28]

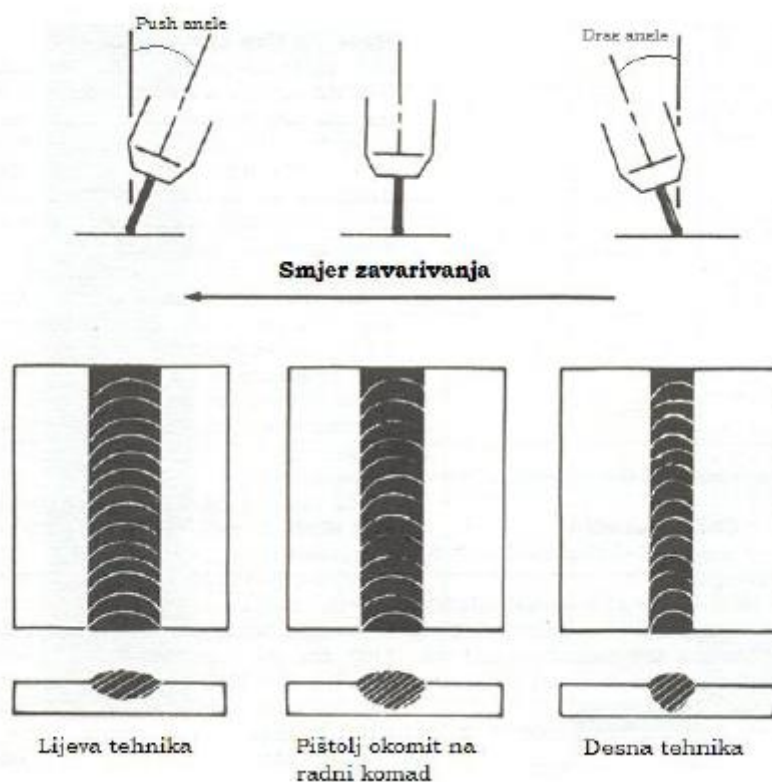
Da bi se dobio kvalitetni zavareni spoj, žica mora zadovoljiti određene uvjete u vidu kemijskog sastava, kvalitete površine i odmatanja s koluta tokom zavarivanja. Površina žice treba biti glatka, vrlo točnih dimenzija i uredno namotana na kolut postavljen u uređaj za dodavanje. [27]

3.3.1. Tehnike rada

Tehnike rada koje postoje su lijeva i desna tehnika (slika 3.18.). Lijeva tehnika (prvo napreduje dodatni materijal, a za njim slijedi plamen) koristi se kod zavarivanja tanjih limova (do 3 mm), dok se za deblje limove upotrebljava desna tehnika. [26]

Kod zavarivanja aluminijevih legura nužno je održavati tzv. „push angle“ 5-10°. Održavanjem pištolja pod „drag angle“, to jest zavarivanjem desnom tehnikom, moguća je odsutnost zaštitnog plina kod taline. Rezultat toga će biti površinski crni ili sivi zavar. [29]

Pri kraju zavarivanja moguće je očekivano onečišćenje na površini ili rubovima zavara zbog otapanja oksida aluminija i magnezija. Posebno je očekivana korištenjem dodatnog materijala iz 5XXX serije jer je udio magnezija velik, a koji je pogodan za stvaranje tih onečišćenja. Nastanak onečišćenja može značiti da je potrebno podesiti tehniku zavarivanja. [29]



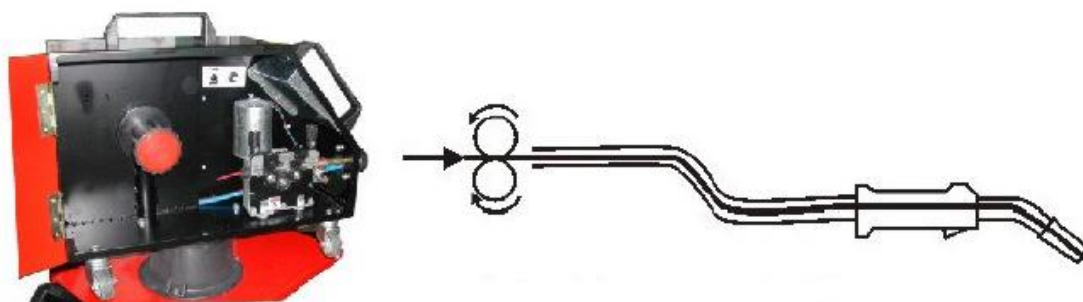
Slika 3.18. Prikaz širine i penetracije zavara kao posljedica pozicije elektrode i tehnike zavarivanja [30]

3.3.2. Pogonski sustav dodavanja žice

Postoje tri načina pogonskog sustava dodavanja žice:

1. Dodavanje žice guranjem („push“)

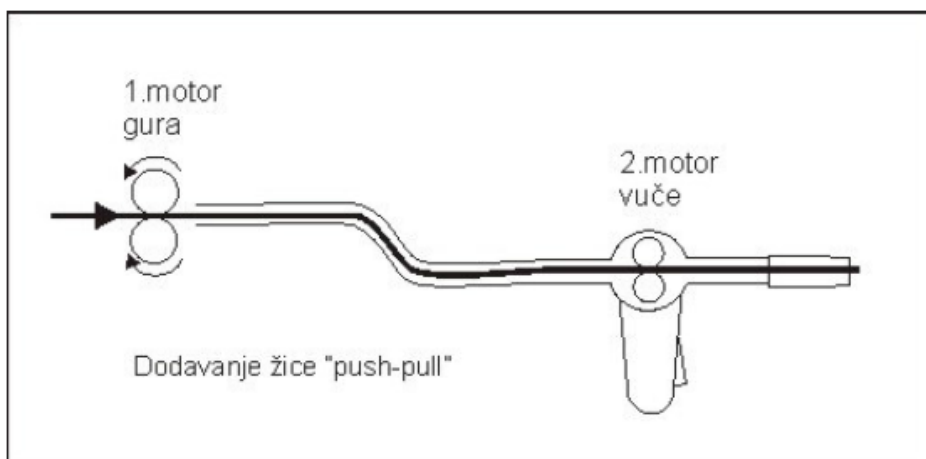
Do mjesta zavarivanja žica se gura kontroliranom brzinom uz pomoć pogonskih kotača preko vodilice žice u pištolju. Ovaj pogonski sustav se naziva „push“, a poznat je i pod nazivom A10 (Slika 3.19.). Pomoću elektronički reguliranog istosmjernog motora osigurava se kontrolirana brzina. Siguran pogon se osigurava s dva ili četiri pogonska kotača (valjka) koji kroz kalibrirane utore (specijalni U ili V za aluminiј) guraju i vode žicu. Dimenzije utora kao i oblik ovise o promjeru i materijalu žice. Kod modularnih uređaja pogonski sustav se ugrađuje u zasebno kućište za dodavanje žice, a kod kompaktnih uređaja u zajedničko kućište. Na ovakav način omogućen je učinkovit rad sa žicama promjera u raponu od 1,2 do 2,4 mm za aluminiј i aluminiјeve legure. U tom sustavu vodilice su većinom izrađene od teflona (PTFE), poliamida (PA) ili grafita. Sigurno dodavanje s udaljenošću do 3 metra od izvora postiže se dodavanjem žice guranjem i taj se postupak najviše koristi u praksi. [31]



Slika 3.19. Dodavanje žice guranjem („push“) [31]

2. Dodavanje žice „push-pull“

Žica se gura kontroliranom brzinom („push“) uz pomoć pogonskih valjaka kroz vodilicu žice sve do pogonskih valjaka u pištolju (Slika 3.20.). Zatim ih pištolj vuče („pull“) do mjesta zavarivanja. Kod ovog slučaja se u rukohvatu pištolja nalazi drugi pogonski motor, dok po izvedbi može biti zračni ili električni. Ovaj sustav se naziva „push-pull“, a kod nas je poznat naziv A9. U ovom sustavu prednost je stalna napetost žice u vodilici čime je osigurano sigurno dodavanje žica manjih promjera (0,8 mm) na udaljenošću do 15 metara od izvora. Nedostatak ovog sustava je visoka cijena i težina sistema pištolj/kabel, posebice kod većih udaljenosti i visokih struja. Iz tog razloga danas se većinom primjenjuje pri zavarivanju aluminiја i aluminiјevih legura kod konstrukcija gdje nema drugih rješenja. [31]



Slika 3.20. Dodavanje žice („push-pull“) [31]

3. Dodavanje žice izvedbom pištolja „spool gun“

Upotrebljavajući specifičnu izvedbu pištolja „spool gun“, kod kojeg je pogon u rukohvatu pištolja (kao pri „push-pull sistemu), kao i žica koja je na manjem kolutu (Slika 3.21.). Promjer koluta sa žicom iznosi 100 mm te može imati do 0,5 kilograma žice. Iz tog je jasno vidljivo da je ovaj sistem primjenjiv u slučaju malih promjera žice i to najvećim dijelom za aluminij (od 0,6 do 1 mm). Ovim sistemom se bez većih poteškoća omogućuju udaljenosti od izvora do 15 metara. Koristeći ovaj način omogućeno je zavarivanje mekim žicama (AlSi5), i malim promjerima od 0,8 mm. [31]



Slika 3.21. „Spool gun“ pištolj za zavarivanje [31]

3.3.3. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za MIG/MAG postupak zavarivanja (Slika 3.22.) je povezan s pogonskim sistemom žice polikabelom. On se upotrebljava kao vod za dodatni materijal, zaštitni plin i električnu struju. Unutrašnja građa polikabela ovisna je o konfiguraciji izvora struje za zavarivanje, tj. korištenjem pištolja za zavarivanje koji je hlađen vodom ili samo zrakom. Veću fleksibilnost polikabela omogućavaju fino namotana sitna vlakna. Uz dovod i odvod vode za hlađenje polikabel sadrži dovod za plin, žicu i nove funkcije kao što je zaslon i kontrola kod modernih zavarivačkih pištolja. [26]



Slika 3.22. Pištolj za MIG postupak zavarivanja [32]

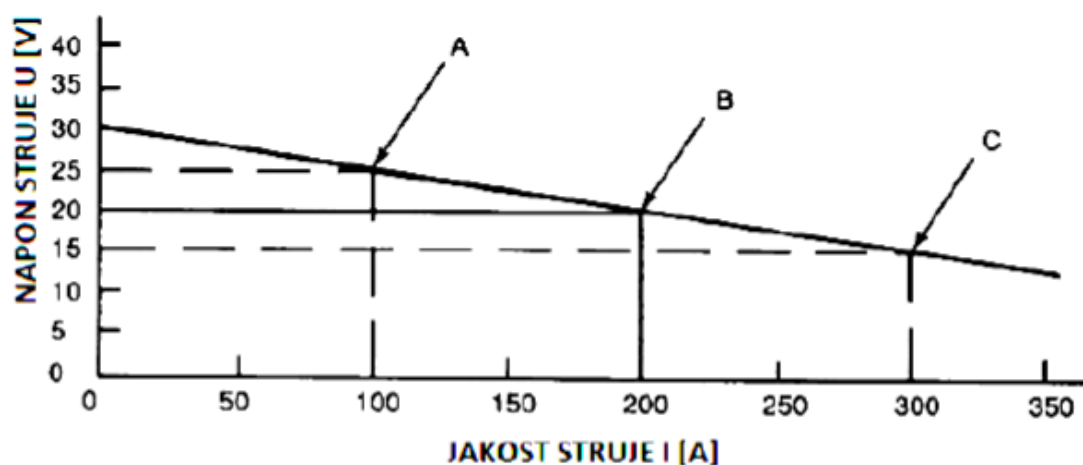
3.3.4. Zaštitni plinovi

Argon ili mješavine argona te helija su zaštitni plinovi koji se upotrebljavaju kod zavarivanja aluminijskih i aluminijevih legura. Zaštitni plin koji se preporučuje kod zavarivanja aluminijskih i Al legura čija je debljina do 12,7 mm jest čisti 100%-tni argon. Pri zavarivanju dijelova čija je debljina veća od 12,7 mm, a gdje je potreban veći toplinski input za taljenje metala, većinom se upotrebljavaju mješavine 75% argon i 25% helij ili 75% helij i 25% argon. [33]

Argon se upotrebljava jer omogućava korištenje električnog luka bez štrcanja. Šav zbog argona koji je uvjetovan niskom toplinskom vodljivošću je širok u gornjem dijelu, dok je u donjem dijelu zavarenog spoja uzak. Osim argona koristi se i helij. Kod njega ostaje širok šav zavarenog spoja i postiže se bolja penetracija. Čisti helij se pri MIG postupku zavarivanja ne upotrebljava često nego se više koriste mješavine s njegovim sadržajem 30-70%. U zaštitnom plinu sadržaj helija ovisi o potrebnoj penetraciji. Kod tankih materijala nije potrebna velika penetracija stoga je manji sadržaj helija, a svojstva poput niže toplinske vodljivosti i većeg toplinskog kapaciteta osiguravaju veću brzinu zavarivanja i veću učinkovitost. [33]

3.3.5. Izvor struje

Električni luk kod zavarivanja se može održavati izmjeničnom ili istosmjernom strujom, sukladno tome postoje istosmjerni i izmjenični izvori struje. Kod standardnog MIG zavarivanja načelno se upotrebljava istosmjerna struja s elektrodom spojenom na plus pol izvora struje. Da bi se omogućila bolja uspostava stabilnog električnog luka kod zavarivanja aluminija uspostavljen je izvor ravne statičke karakteristike konstantnog napona električne struje (engl. „*Constant Voltage*“, CV), (Slika 3.23.). Primjena ravne statičke karakteristike je povezana s poluautomatskim postupkom poput MIG zavarivanja. Za impulsno MIG zavarivanje upotrebljavaju se specijalni izvori sa sinergijskom kontrolom. Takav se sistem temelji na kontroli uz pomoć jednog parametra, dok su ostali parametri automatski odabrani. [34].



Slika 3.23. Prikaz konstantne ravne statičke izlazne karakteristike napona struje, CV [34]

Uz ravnu izlaznu karakteristiku tu je i strmopadajuća statička karakteristika (engl. „*Constant Current*“, CC). Takav način izvedbe izvora struje razvijen je da održava iznos jakosti električne struje otprilike istim dok je iznos napona električne struje promjenjiv zajedno s visinom električnog luka. Stoga, suprotno od ravne statičke karakteristike konstantnog napona električne struje, CV. [34]

Strmopadajuća statička karakteristika je prikladna za izvore struje primjenjive za ručno zavarivanje te se zbog varijacija geometrije luka koja ima negativan utjecaj na kvalitetu zavara ne primjenjuje kod zavarivanja aluminija. [34]

3.3.6. Parametri kod MIG postupka zavarivanja

Izbor parametara kod MIG zavarivanja je ponekad kompliciran. On ovisi o debljini zavarivanog materijala, raspoloživoj opremi, uvjetima u kojima se odvija zavarivanje, tehnološkim zahtjevima, iskustvu zavarivača, mogućem stupnju mehanizacije itd. Stručna literatura, zavarivačke programske aplikacije i standardi primjene većinom određuju parametre za određene primjene, a kod kojih se treba provesti atestacija. [31]

Najbitniji parametri kod MIG/MAG postupaka zavarivanja su sljedeći [31]:

- jakost struje zavarivanja (određena brzinom i promjerom žice, ima utjecaj na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena),
- napon električnog luka (utječe na vrstu prijenosa metala, širinu i izgled zavarenog spoja i protaljivanje),
- induktivitet (toplina električnog luka),
- brzina zavarivanja (količina toplinskog inputa, učinkovitost),
- dužina slobodnog kraja žice,
- količina zaštitnog plina.

Optimalna jakost struje zavarivanja ovisi o obliku spoja, promjeru žice, debljini i vrsti zavarivanog materijala i položaju zavarivanja. Rastom jakosti struje zavarivanja dolazi do povećanja penetracije i protaljivanja. Zbog toga nije preporučeno preveliki porast jakosti struje zavarivanja jer dolazi do većeg rasprskavanja kod procesa zavarivanja. [31]

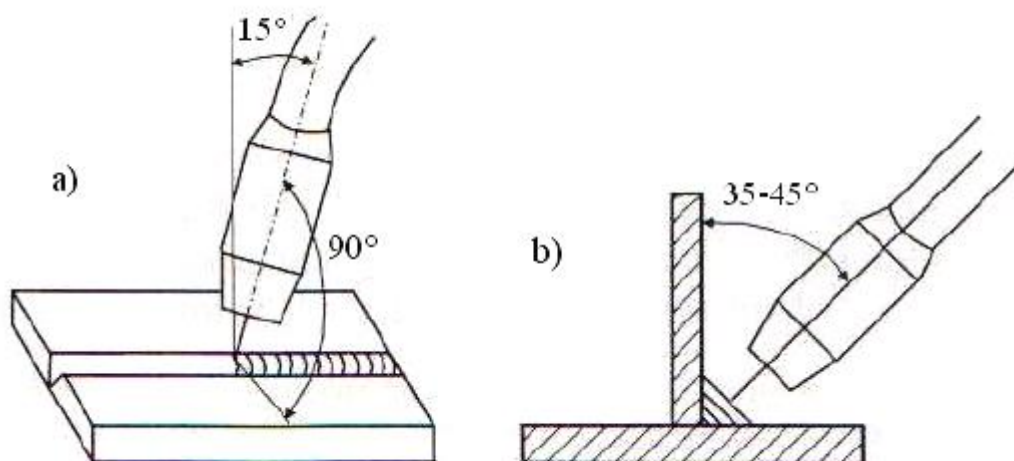
Korištenjem većeg promjera žice bolje je i protaljivanje i potrebna je veća jakost struje zavarivanja. Pri konstantnoj jakosti struje zavarivanja penetracija i protaljivanje materijala biti će veće kod korištenja žica manjih promjera. Širi zavar se dobije upotrebom većeg promjera žice. [31]

Za zadanu jakost struje zavarivanja određuje se optimalni napon električnog luka. Niskim iznosom napona nastaje ispupčen i uzak zavar, a previsokim naponom širok i plitak zavar uz veliko štrcanje i loša mehanička svojstva. Napon električnog luka zavarivanja ovisan je o dužini luka, veća dužina električnog luka znači i veći napon. Dužina električnog luka kod izjednačavanja brzine taljenja žice i dobave se ustaljuje. Malom promjenom dužine električnog luka nastaje velika promjena jakosti struje zavarivanja te brzina taljenja elektrode.

Prevelikim porastom napona ili dužine električnog luka smanjena je zaštita rastaljenog materijala, što rezultira lošijim mehaničkim svojstvima zavarenog spoja. [31].

Uspostava optimalnog odnosa između brzine zavarivanja i količine taline je važna. Mala brzina zavarivanja i prevelika količina taline i obrnuto rezultiraju pojavom naljepljivanja koja je karakteristična za zavarivanje aluminija. [31]

Pri zavarivanju sučeljenog spoja, nagib pištolja je pod kutem od 15° u odnosu na okomitu os, dok pri zavarivanju kutnog spoja iznosi od 35 do 45° (Slika 3.24.). Takvim nagibom pištolja za zavarivanje osigurano je dobro taljenje žice i kontrola taline. Prevelik nagib pištolja za zavarivanje rezultira manjim provarom i većim štrcanjem materijala. Prilikom čega postoji mogućnost kontakta rastaljenog materijala sa zrakom, što dovodi do pojave poroznosti. [31]



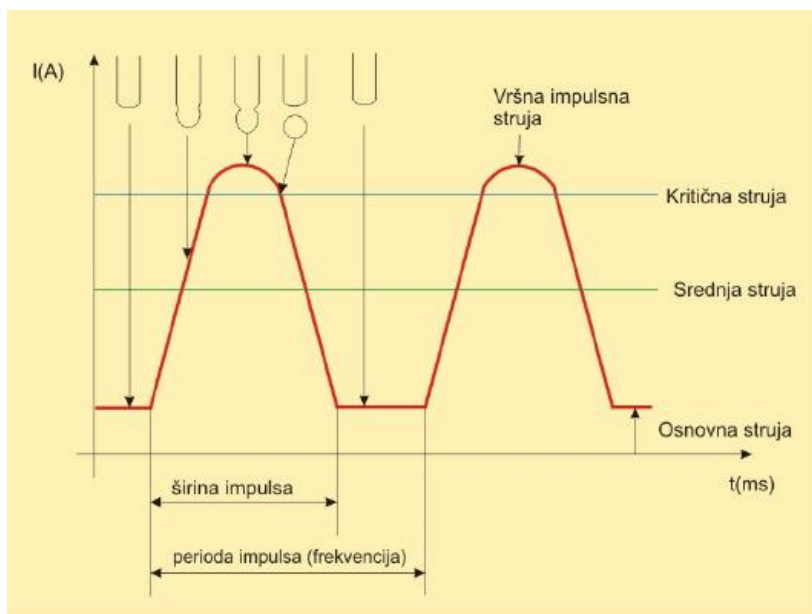
Slika 3.24. Nagib pištolja kod a) sučeljenog i b) kutnog zavarivanja [23]

3.3.1. Impulsno MIG zavarivanje

Kod impulsnog zavarivanja prijenos metala s elektrode na talinu postiže se slobodnim letom kapljica kod nižih struja. Impulsi jake struje zavarivanja u određenom trenutku utječu na odvajanje pojedinog broja i veličine kapljice kod čega je poželjna jedna kapljica po impulsu, približno veličini promjera žice (Slika 3.25.). U preostalom dijelu struja zavarivanja je niže vrijednosti, koja se zove osnovna i čiji je primarni zadatak održavanje električnog luka. Taj iznos teoretski je moguće sniziti na 15 A. Za ispravno odvijanje takvog procesa zavarivanja, izvori za zavarivanje trebaju biti adekvatno podešeni, a uz to potrebno je i optimalno uskladiti povećani broj parametara kao što su brzina dodavanja žice, osnovna struja i

period njezina trajanja. Veliki problemi nastaju kada se taj proces izvršava ručno. Danas je taj problem uklonjen ugrađenim mikroprocesorom u izvor koji na temelju jedne izabrane veličine optimalno prilagođava preostale veličine („Synergic program“). Rukovanje takvim uređajima je jednostavnije nego klasičnim, dok njihovim uvođenjem u proizvodnju, usprkos višoj cijeni, donosi neke prednosti. Zbog prosječno manjeg toplinskog inputa moguće je zavarivati tanje materijale. [26]

Prosječna vrijednost struje zavarivanja za promjer žice 1,2 mm smanjena je na 60 A u usporedbi s minimalnih 130 A za standardni MIG postupak zavarivanja, to jest na 80 A za promjer žice 1,6 mm u usporedbi s 180 A kod standardnog postupka. Time je žicom većeg promjera moguće zavarivanje tankih presjeka čime se smanjuju problemi dodavanja žice (manja osjetljivost deblje žice). Vjerojatnost pojave poroznosti je smanjena pošto veći promjer žice uz isti obujam u talinu unosi manje oksida. [26]



Slika 3.25. Grafički prikaz načina otkidanja kapljice impulsnim postupkom zavarivanja [31]

3.4. Dodatni materijal

Za odabir dodatnog materijala kod zavarivanja aluminija i aluminijevih legura potrebno je određivanje osnovnog materijala i debljine istog, postupka zavarivanja, vrste spoja i zahtjeva na zavareni spoj. Poželjno je da su dodatni i osnovni materijal iz iste grupe, ali da dodatni materijal ima viši sadržaj istih legiranih elemenata. [10]

Pri TIG zavarivanju za dodatni materijal upotrebljavaju se šipke duljine 1000 mm u sljedećim promjerima: 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0 mm. Dodatni materijal kod MIG zavarivanja je žica u obliku žičanog koluta koja je usto i anoda u električnom luku. Raspon promjera je od 0,8 do 3,2 mm što dovodi do velikog depozita rastaljenog dodatnog materijala. Žice se čuvaju u čistim, suhim uvjetima i u neotvorenoj ambalaži ako je moguće. Pojava poroznosti koja može nastati tokom zavarivanja može biti uzrok apsorbirane vlage u oksidnom sloju na površini žice. [10]

Dodatni materijal mora odgovarati kemijskom sastavu legure koja se zavaruje i mora omogućiti dobru zavarljivost. Odabir dodatnog materijala ovisi i o mehaničkim svojstvima i otpornosti na koroziju zavarenog spoja. [15]

Za Al legure koje se upotrebljavaju u brodogradnji, a i drugim pomorskim primjenama, najčešće korišteni dodatni materijali su [15]:

- Al-Si legure, uglavnom 4043A, 4045 i 4047A
- Al-Mg legure, uglavnom 5356, 5183, 5556A.

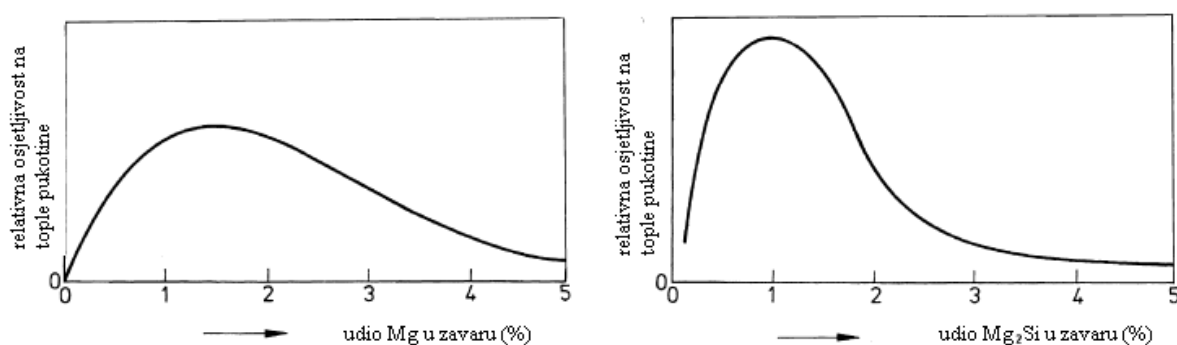
Kemijski sastav dodatnih materijala prikazan je tablicom 3.1. prema normi „HRN EN 573-3:2019“. [35]

Tablica 3.1. Kemijski sastav dodatnih materijala [15]

Legura	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Zn [%]	Ti [%]
4043A	4,5 6,0	0,6	0,30	0,15	0,20		0,10	0,15
4045	9,0 11,0	0,5	0,30	0,03	0,05		0,10	0,20
4047A	11,0 13,0	0,6	0,30	0,15	0,10		0,20	0,15
5356	0,25	0,40	0,10	0,05 0,20	4,5 5,5	0,05 0,20	0,10	0,06 0,20
5183	0,40	0,40	0,10	0,50 1,0	4,3 5,2	0,05 0,25	0,25	0,15
5556A	0,25	0,40	0,10	0,6 1,0	5,0 5,5	0,05 0,20	0,20	0,05 0,20

3.5. Zavarivanje raznorodnih aluminijevih legura

Brojne aluminijeve legure su osjetljive na tople pukotine. Sklonost nastanku toplih pukotina uvelike ovisi o kemijskom sastavu legura. Legure 6XXX serije su osjetljivije na tople pukotine od legura 5XXX serije. Relativna osjetljivost na tople pukotine predočena je slikom 3.26. Sklonost nastanka solidifikacijskih pukotina se može smanjiti odabirom odgovarajućeg dodatnog materijala. Iz tog razloga, legure Al- Mg se često zavaruju dodatnim materijalom ER5356 (AlMg5). Kod zavarivanja različitih aluminijevih legura veću pozornost treba posvetiti sklonosti nastanku toplih pukotina, nego kod zavarivanja istih aluminijevih legura. [36]



Slika 3.26. Dijagram utjecaja legiranja na nastanak toplih pukotina [36]

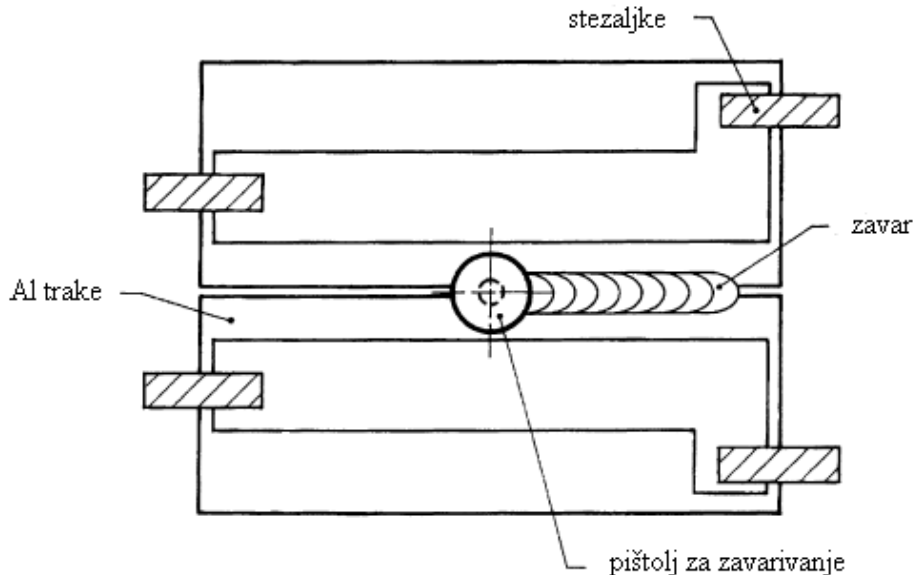
Pošto su legure serija 5XXX i 6XXX najčešće korištene u brodogradnji, u daljnjem poglavlju bit će riječi o zavarivanju ovih aluminijevih legura.

Kombinacije korištenih legura prikazane su tablicom 3.2. Zavarivanje je izvedeno standardnim TIG postupkom zavarivanja pomoću volframove elektrode promjera 3,2 mm, a kao zaštitni plin upotrebljen je čisti argon. Zavarivanje ploča aluminijevih legura debljine 1,5 mm i 3 mm moguće je bez uporabe dodatnog materijala. Korištene su aluminijske trake duljine 250 mm i širine 100 mm (Slika 3.27.). [36]

Tablica 3.2. Kombinacija legura, debljina materijala i dodatni materijal [36]

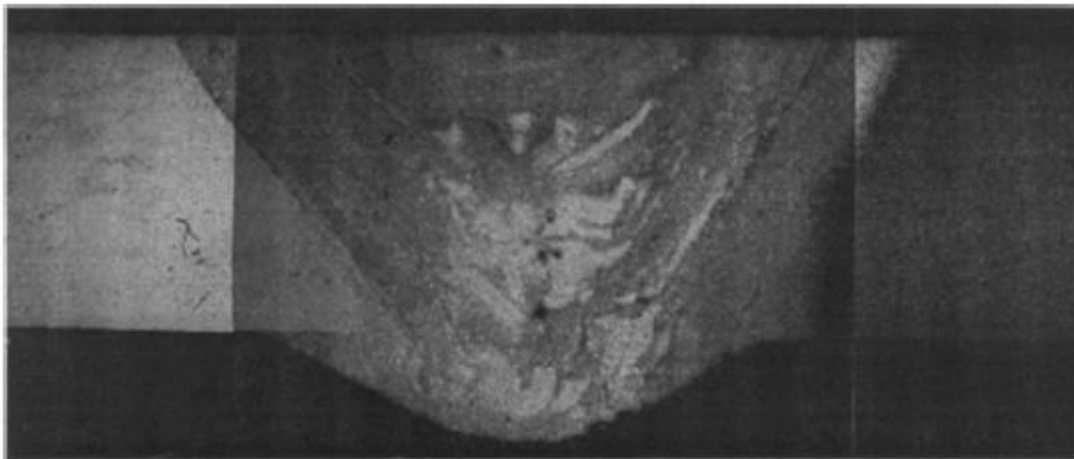
Kombinacija legura	Debljina materijala [mm]	Dodatni materijal
AA5083 O - AA5754 H32	1,5 – 3 i 5	ER5356 (AlMg5)
AA5083 O - AA6060 T6	3 - 5	ER5356 i ER4043 (AlSi5)
AA5083 O - AA6061 T4	1,5; 1,5	ER5356 i ER4043
AA6082 T6 – AA6060 T6	3 - 5	ER5356 i ER4043

Kod zavarivanja različitih aluminijskih legura može doći do nepovoljnog sastava zavara koji je osjetljiv na tople pukotine. Da se izbjegne pojava toplih pukotina, koriste se dodatni materijali oznaka ER5356 i ER4043 za sve debljine materijala. [36]



Slika 3.27. Shematski prikaz zavarivanja aluminijskih traka [36]

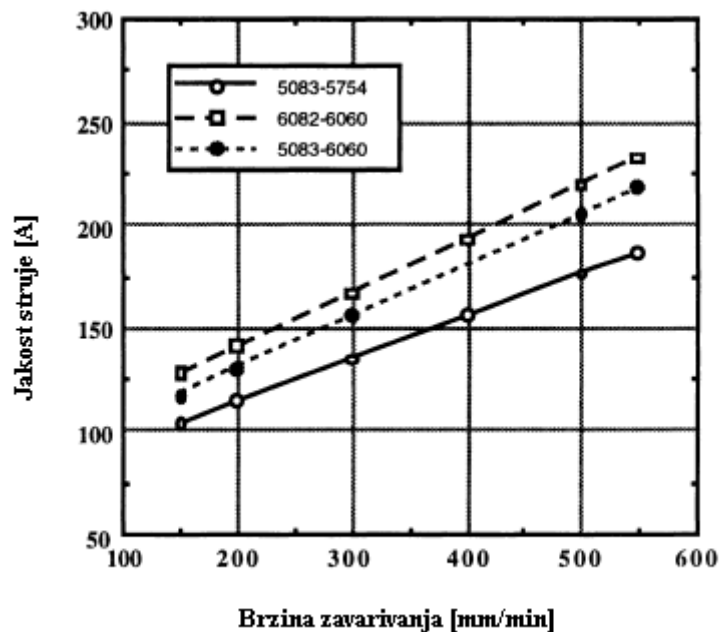
Zbog razlike u toplinskoj vodljivosti aluminijskih legura teško je ostvariti istodobno taljenje žlijeba oba materijala. Kada se pištolj za zavarivanje postavi na sredinu utora, aluminijska legura niže toplinske vodljivosti će se taliti prije nego legura više toplinske vodljivosti. Da bi se riješio ovaj problem, elektroda se postavlja točno iznad ruba materijala s većom toplinskom vodljivošću. Na slici 3.28. je prikazan poprečni presjek zavara kombinacije aluminijskih legura AA5083 – AA6060 s dodatnim materijalom ER4043. Iz ove slike jasno se vidi da je taljenje legure AA6060, koja ima veću toplinsku vodljivost, problematično unatoč asimetričnom položaju pištolja za zavarivanje. Sljedeći problem koji ovdje treba spomenuti je taj da se javlja nedovoljno protaljivanje legure AA6060 na korijenu zavara. U zavarenom spoju zbog izostanka čvrste strukturne veze dolazi do pojave naljepljivanja. Samo na mikroskopskoj razini vidljive su metalne veze između metala zavara i osnovnog metala. Tokom postupka vlačnog ispitivanja ne dolazi do pucanja korijena zavara. [36]



Slika 3.28. Poprečni presjek zavora legura AA5083 (lijevo) i AA6060 (desno) [36]

Povećanjem debljine ploča aluminijskih legura, potrebno je smanjiti brzinu zavarivanja. Za debljinu ploče 1,5 mm koristi se brzina zavarivanja od 300 do 525 mm/min, dok se za debljinu ploče 5 mm koristi brzina zavarivanja od 100 do 300 mm/min.

Povećanjem toplinske vodljivosti materijala potrebno je povećati i toplinski input. Na slici 3.29. je prikazana ovisnost jakosti struje zavarivanja o brzini zavarivanja za debljinu materijala 3 mm. Kod brzine zavarivanja od 300 mm/min za kombinaciju legura AA5083 - AA5754 jakost struje zavarivanja iznosi oko 135 A. Za kombinaciju legura AA6082 – AA6060 veće toplinske vodljivosti potrebna je veća jakost struje zavarivanja (170 A). To je povećanje od 25% zbog razlike u toplinskoj vodljivosti. [36]



Slika 3.29. Dijagram ovisnosti jakosti struje zavarivanja o brzini zavarivanja [36]

Zavarivanje legura očvrsnutih hladnom deformacijom će rezultirati smanjenjem čvrstoće u ZUT-u. Zagrijavanjem hladno deformiranih legura nekoliko sekundi iznad temperature oko 350 °C će dovesti do znatnog smanjenja čvrstoće. Također, kod precipitacijski očvrsnutih legura dolazi do znatnog smanjenja čvrstoće. Smanjenje čvrstoće u ZUT-u hladno deformiranih legura 5XXX serije je manje od 25%, dok je za precipitacijski očvrsnute legure serije 6XXX smanjenje čvrstoće veće od 25%. [36]

4. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada izvršeno je automatizirano TIG zavarivanje tri sučeljena spoja aluminijske legure EN AW 5754. Eksperimentalni dio je izveden u laboratoriju na Sveučilištu Sjever. Jedini promjenjiv parametar zavarivanja jest jakost struje zavarivanja, dok su ostali konstantni.

Potom su izrađene epruvete za ispitivanje savijanjem i uzorci za mikroskopsku analizu. Dvije epruvete za ispitivanje savijanjem lica i korijena i jedan uzorak za mikroskopsku analizu za svaki sučeljeni spoj.

4.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal je aluminijska legura EN AW 5754 H22. U tablici 4.1. prikazan je kemijski sastav aluminijske legure.

Tablica 4.1. Kemijski sastav aluminijske legure EN AW 5754 [37]

Mn	0,50 %
Fe	0,40 %
Mg	2,60 – 3,60 %
Si	0,40 %
Cr	0,30 %
Cu	0,10 %
Mn+Cr	0,10 – 0,60 %
Ti	0,15 %
Zn	0,20 %
Ostalo	0,15 %
Al	Ostatak

Tablica 4.2. Prikaz fizikalnih i mehaničkih svojstava aluminijske legure EN AW 5754 H22

[37]

Gustoća	2660 kg/m ³
Talište	600 °C
Modul elastičnosti	68 GPa
Toplinska vodljivost	147 W/mK
Toplinska rastezljivost	24·10 ⁻⁶ /K
Vlačna čvrstoća	220 – 270 MPa
Tvrdoća	63 HB

Tablicom 4.2. su prikazana fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure EN AW 5754 H22 za limove i ploče debljine od 0.2 do 40 mm.

4.2. Izvor za zavarivanje

Za eksperimentalni dio korišten je uređaj za TIG zavarivanje VARTIG 2005 AC/DC. Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje prikazane su u tablici 4.3. Na slici 4.1. je vidljiv ekran uređaja.

Tablica 4.3. Tehničke karakteristike Vartig 2005 AC/DC [38]

TIP	Vartig 2005 AC/DC (G i W)
Priključni napon:	1 x 230 V
Osigurač (spori):	20 A
Područje zavarivanja TIG DC:	5 – 170 A
Područje zavarivanja TIG AC/DC:	5 – 200 A
Područje zavarivanja REL:	5 – 170 A
Intermitencija TIG AC/DC:	40% - 200 A 60% - 160 A/ 170 A 100% - 130 A/ 130 A
Napon zavarivanja REL/TIG:	20 – 26,8 V/ 10 – 16,8 V
Promjer elektrode:	1,5 – 4 mm
Hlađenje izvora:	Prisilno-ventilator
Masa:	18 kg
Dimenzije:	440 x 222 x 480 mm

G – hlađenje pištolja za zavrivanje zrakom; W – hlađenje pištolja za zavarivanje vodom

Karakteristike izvora za zavarivanje Vartig 2005 AC/DC:

- izvrsna kvaliteta zavara,
- digitalni prikaz svih funkcija,
- HF – visokofrekventno paljenje bez kontakta,
- 2. i 4. taktno zavarivanje,
- HOT START – pri početku zavarivanja je povećana struja,
- ANTI STICKING – automatsko isključenje struje zavarivanja nakon lijepljenja elektrode. [38]



Slika 4.1. VARTIG 2005 AC/DC

4.3. Automat za zavarivanje

Za pravocrtno zavarivanje korišten je automat Rail Bull tvrtke Promotech koji zapravo vodi pištolj za zavarivanje putem vodilice. Upotrebljava se za zavarivanje i rezanje ploča i limova i kružno zavarivanje većih radijusa. Ugrađen mu je sustav za njihanje pištolja za zavarivanje čime su omogućeni mali pokreti pištolja lijevo-desno kod zavarivanja. Osim na ravnu, vodilicu za Rail Bull je moguće postaviti na zakrivljenu površinu. Na slici 4.2. je prikazan ekran Rail Bull automata. [39]

Neka svojstva automata Rail Bull [39]:

- Male dimenzije
- Brzostežući mehanizam za prihvat pištolja promjera od 16 do 22 mm s mogućnošću prilagođenog prijvata za promjere do 35 mm
- Moguće precizno namještanje pištolja odvijačem
- Rad u horizontalnom i vertikalnom položaju
- Automatsko uključivanje i isključivanje električnog luka omogućuje neometan put i zavarivanje
- Operater nije izložen toplini i plinovima
- Oscilator omogućuje različite zavare.



Slika 4.2. Ekran automata Rail Bull

4.4. Parametri zavarivanja

Za zavarivanje osnovnog materijala EN AW 5754 H22, limova debljine 2 mm, korišten je automatizirani TIG postupak zavarivanja koristeći čeličnu podlogu sa žlijebom. Dimenzije limova su 300 x 150 mm. Za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura koristi se izmjenična struja. Zavarivanje je napravljeno u jednom prolazu. Brzina zavarivanja iznosi 60 cm/min.

Zaštitni plin koji je korišten pri zavarivanju je argon 4.8 (99.998% Ar) prema normi „HRN EN ISO 14175:2008“. [40] Hlađenje pištolja za zavarivanje je tekućinom za hlađenje. Korištena je keramička sapnica NW10 promjera 10 mm. Protok plina je 12 l/min.

Korištena je volframova elektroda WLa 15 promjera 2,4 mm koja je legirana lantanovim oksidom (La_2O_3). Udaljenost vrha elektrode od lima iznosi 4 mm. Kut nagiba elektrode iznosi 85° .

4.5. Zavarivanje uzoraka

Prije samog početka eksperimenta, uzorci su pripojeni s obje strane kako ne bi došlo do pomicanja pri zavarivanju. Zatim je brusnim papirom površina pobrušena i alkoholom uklonjena prašina i površinske nečistoće. Korištena je čelična podloga sa žlijebom, bez korijenske zaštite. Udaljenost vrha elektrode od lima iznosila je 4 mm. Na slici 4.3. je prikazan pripremljen radni komad za zavarivanje.



Slika 4.3. Pripremljen radni komad za zavarivanje

Zavarena su tri sučeljena spoja. Promjenjiv parametar je jakost struje zavarivanja, dok su ostali parametri konstantni. U svim slučajevima brzina zavarivanja je 60 cm/min. Duljina svih zavara je 110 mm. Tablica 4.4. prikazuje parametre zavarivanja za sva tri sučeljena spoja.

Tablica 4.4. Parametri zavarivanja za pojedine uzorke

Uzorak	Jakost struje zavarivanja I [A]	Brzina zavarivanja v [cm/min]	Napon električnog luka U [V]	Unos topline Q [kJ/cm]
1.	120	60	14,8	1,0656
2.	130	60	15,2	1,1856
3.	140	60	15,6	1,3104

Prema normi „HRN EN 1011-1:2009“ unos topline izračunava se prema formuli [40]:

$$Q = \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \text{ [kJ/cm]}$$

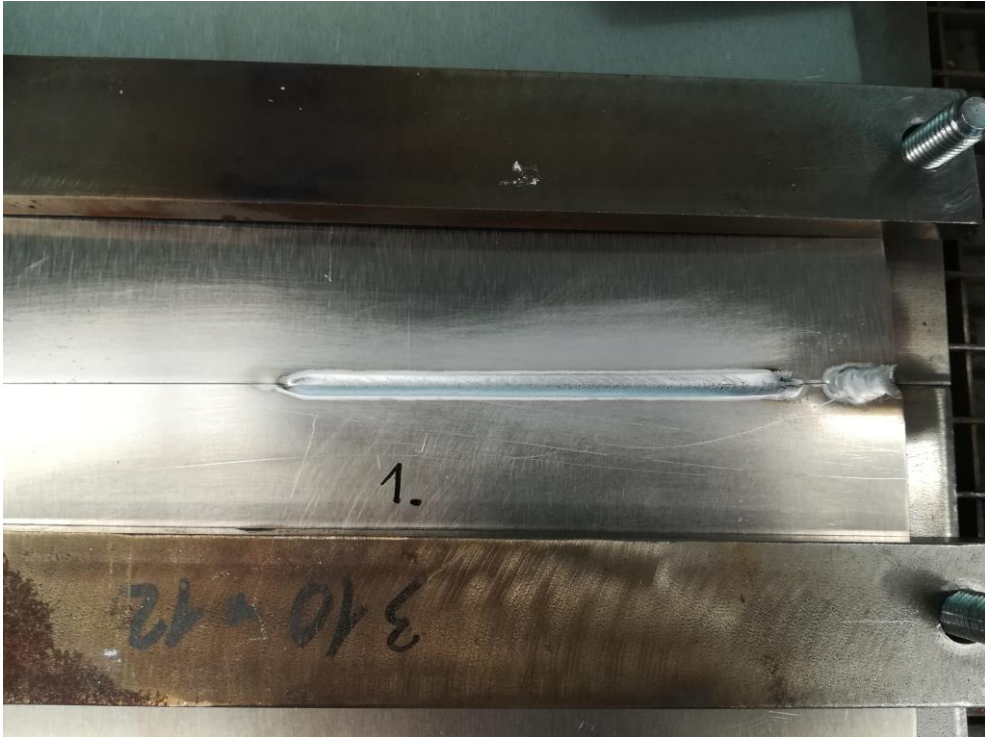
k – koeficijent iskoristivosti električnog luka; 0,6 za TIG

U – napon električnog luka [V]

I – jakost struje zavarivanja [A]

v – brzina zavarivanja [cm/min]

Na slikama 4.4. – 4.9. prikazani su lice i korijen zavara za sva tri sučeljena spoja.



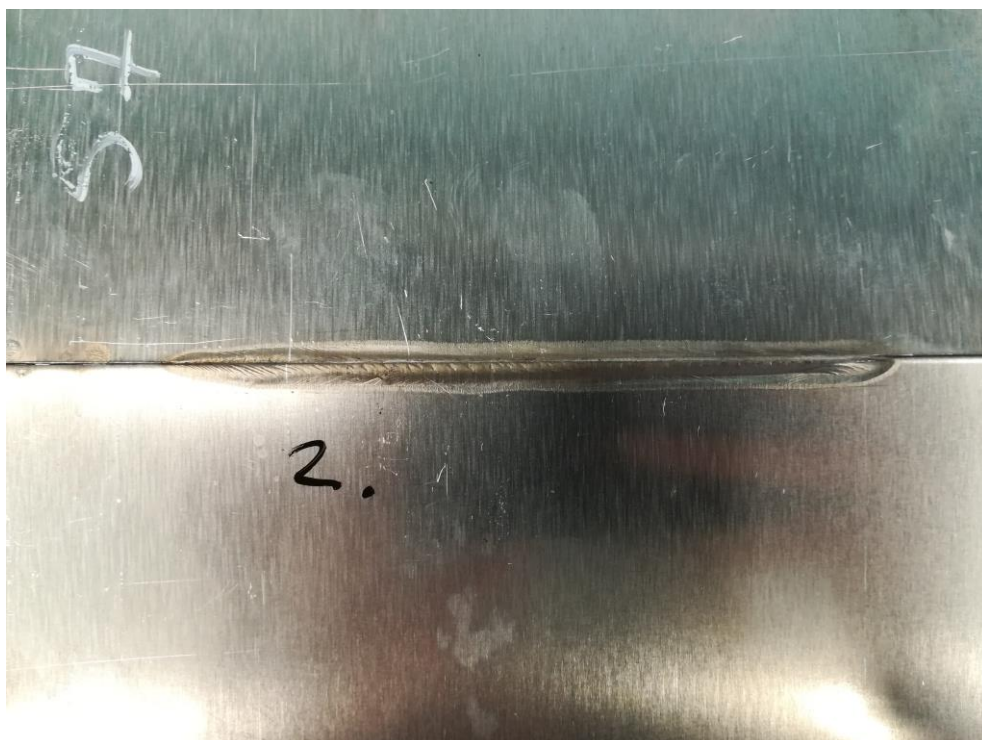
Slika 4.4. Lice zavara prvog uzorka



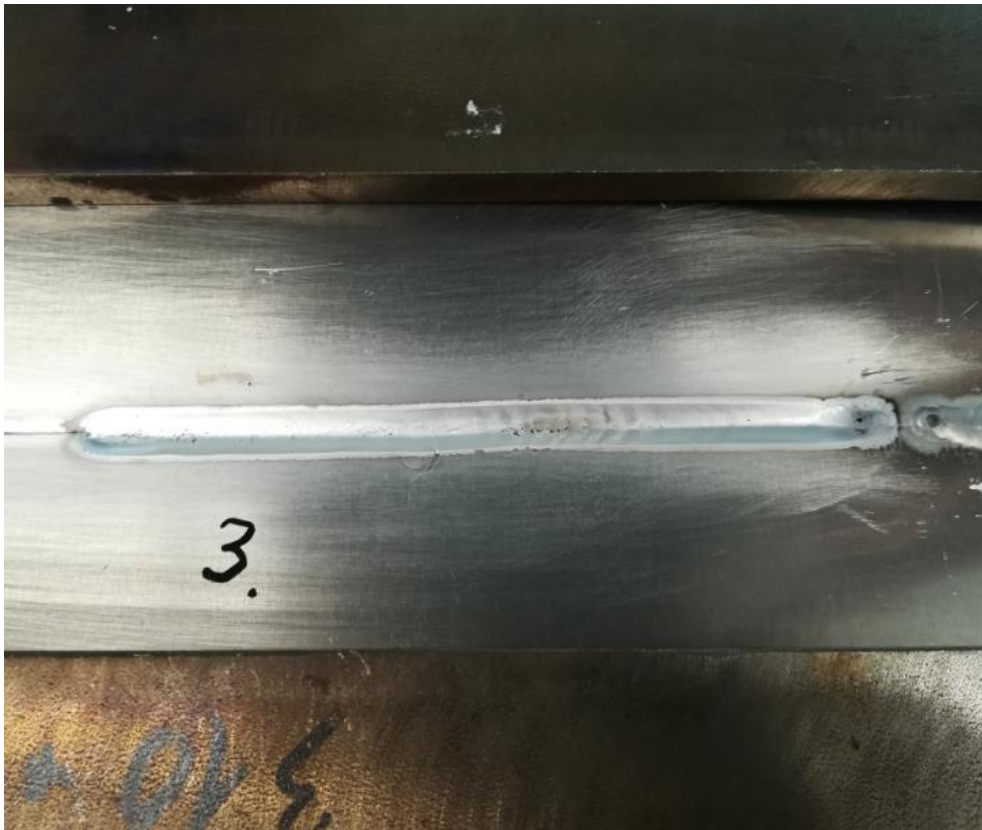
Slika 4.5. Korijen zavara prvog uzorka



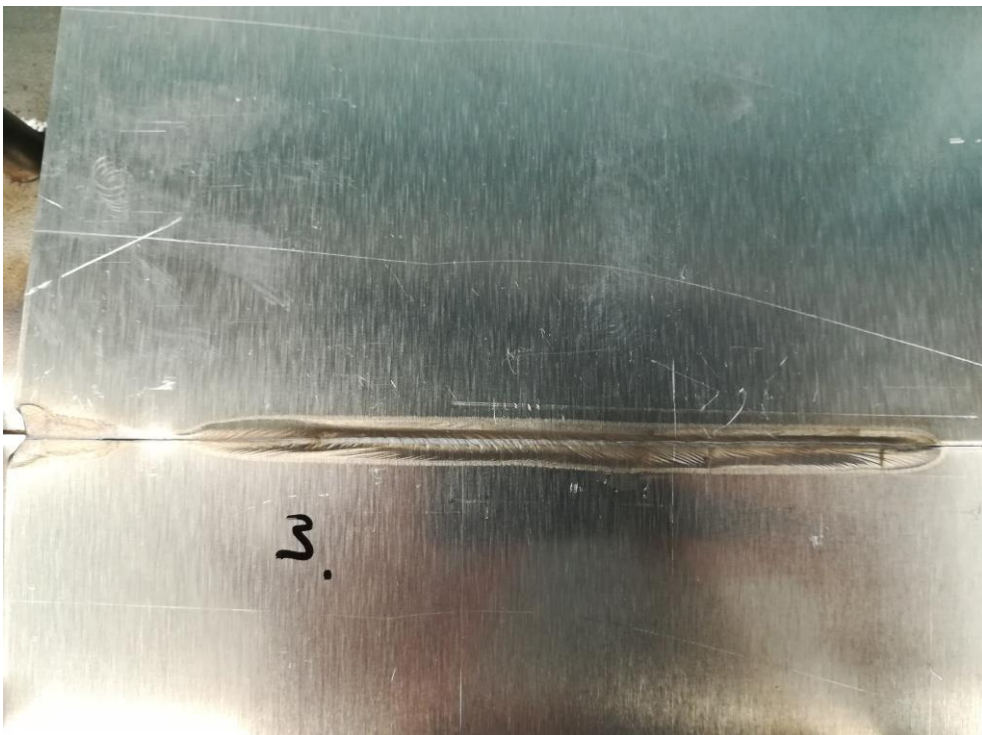
Slika 4.6. Lice zavara drugog uzorka



Slika 4.7. Korijen zavara drugog uzorka



Slika 4.8. Lice zavara trećeg uzorka

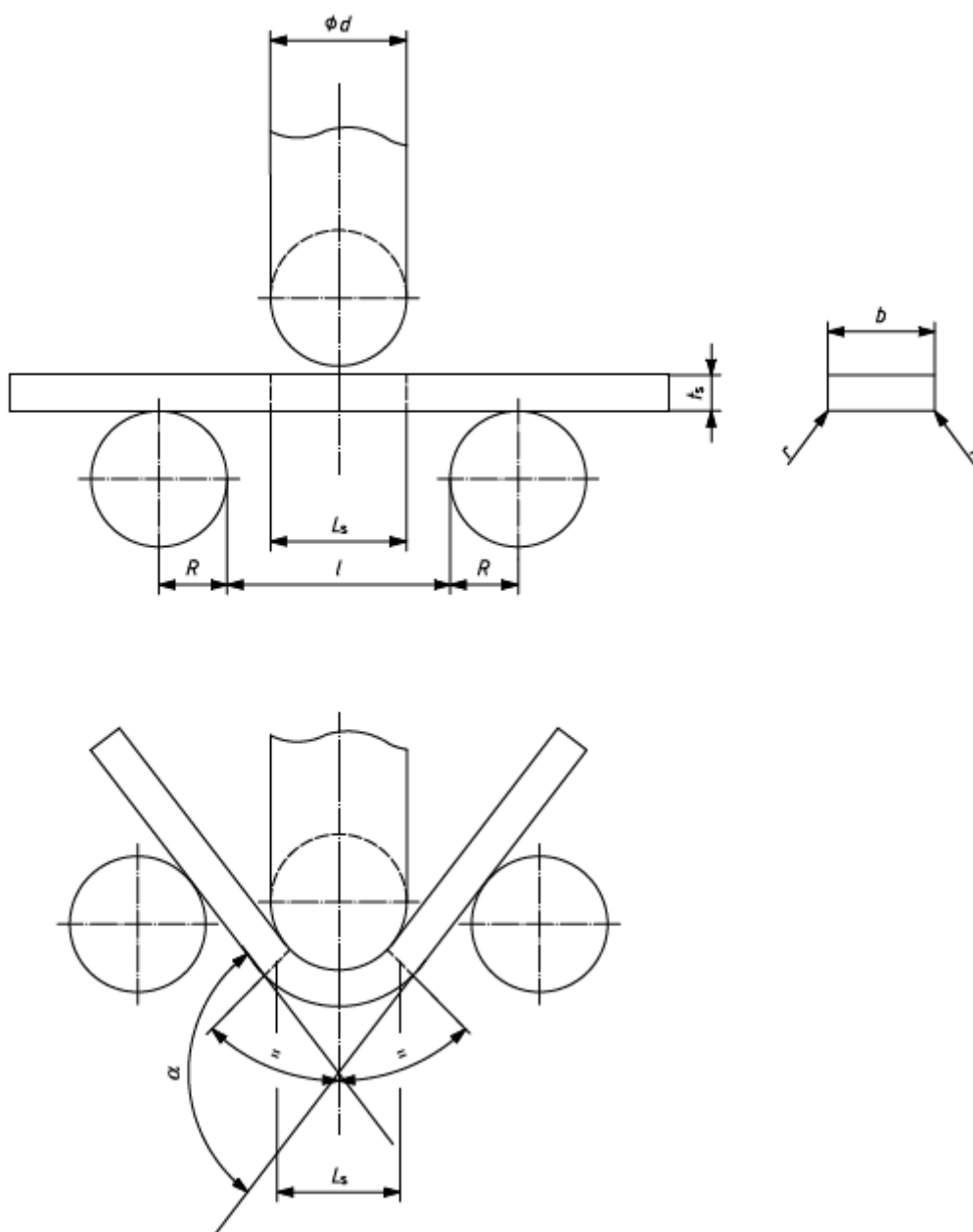


Slika 4.9. Korijen zavara trećeg uzorka

4.6. Ispitivanje savijanjem

Iz svakog zavora izrezane su po dvije epruvete za ispitivanje savijanjem širine 40 mm. Ispitivanje savijanjem je provedeno prema normi „HRN EN ISO 5173“, što je i prikazano slikom 4.10. [42] Pri ispitivanju trn mora prolaziti sredinom zavarenog spoja da bi na tom mjestu nastale eventualne pukotine. Svaka epruveta ispitivala se na isti način, podvrgavala se opterećenju do pojave pukotina ili do potpunog savijanja od 180° bez pojave pukotine.

Promjer trna je 6 mm, promjer valjka 55 mm, a razmak između valjaka bio je 65 mm. Slika 4.11. prikazuje test na savijanje koji je proveden na hidrauličnoj preši.



Slika 4.10. Shematski prikaz ispitivanja savijanjem zavarenog spoja



Slika 4.11. Ispitivanje savijanjem na hidrauličnoj preši

Slike 4.12., 4.13. i 4.14. prikazuju izgled epruveta nakon provedenog savijanja do 180 °.



Slika 4.12. Prikaz rezultata ispitivanja savijanjem lica i korijena epruvete 1.



Slika 4.13. Prikaz rezultata ispitivanja savijanjem lica i korijena epruvete 2.



Slika 4.14. Prikaz rezultata ispitivanja savijanjem lica i korijena epruvete 3.

Na svakoj slici epruveta lijevo prikazuje savijanje lica zavara, a epruveta desno prikazuje savijanje korijena zavara. Prijelom zavara vidljiv je na korijenu zavara 1. i zavara 3. Početak prijeloma vidljiv je na licu zavara 1. i zavara 3. te na korijenu zavara 2.

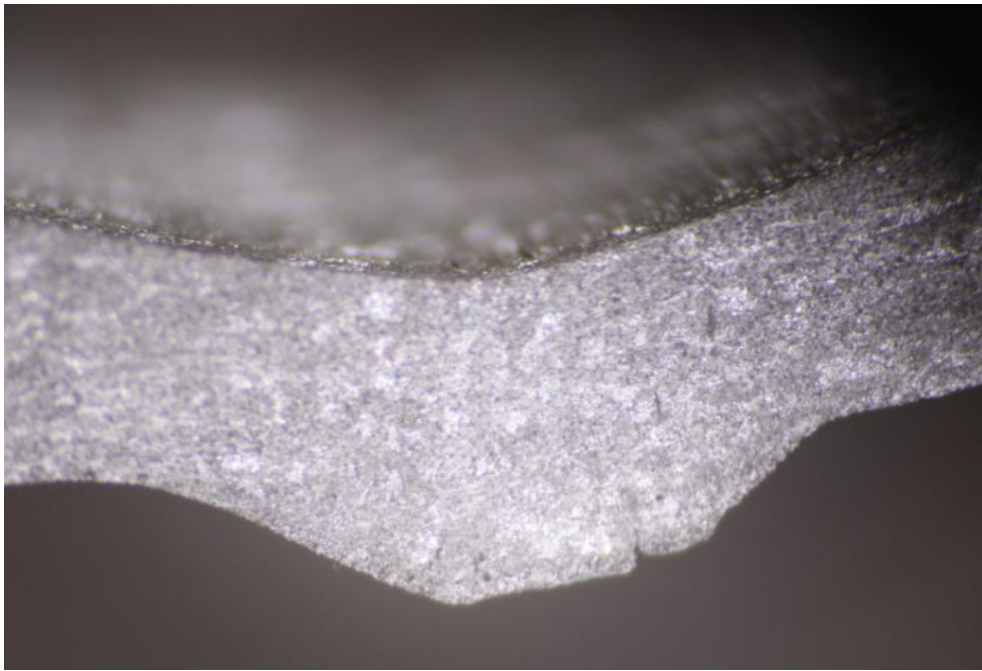
4.7. Mikroskopska analiza

Za potrebe mikroskopske analize, na tračnoj pili su izrezani uzorci dimenzija 40 x 15 mm. Također je provedena potrebna kvalitetna obrada uzoraka. Uzorci su brušeni pomoću brusnog papira s tri različite granulacije brusnog papira. Ponajprije s P180, P240 i P600. Potom je provedeno nagrizanje u 19 % solnoj kiselini (HCl) u trajanju od 60 sekundi.

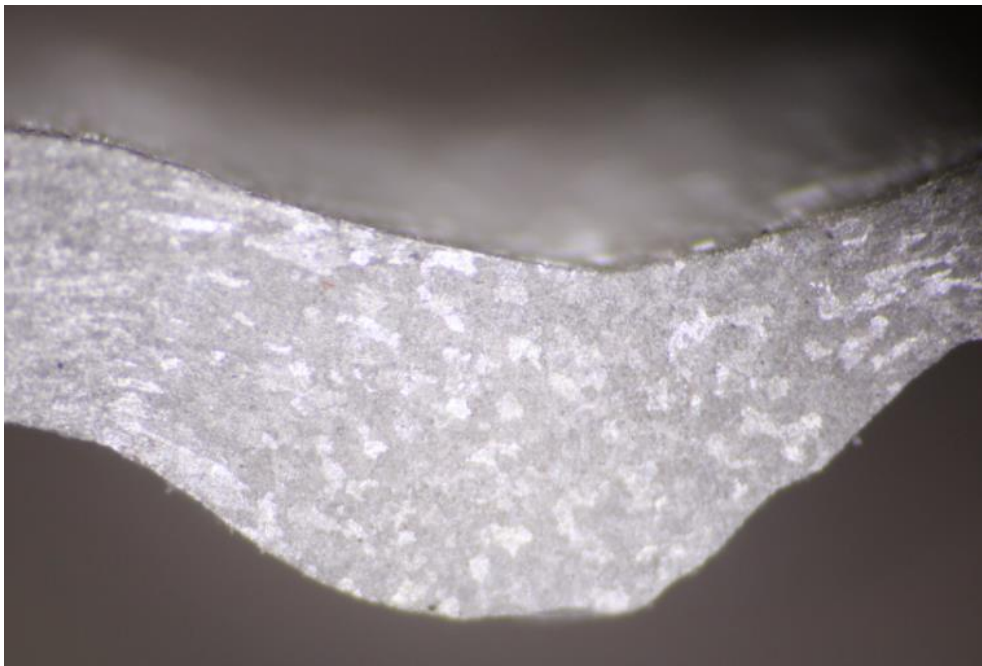
Ispitivanje mikrostrukture zavarenih spojeva izvršeno je na svjetlosnom mikroskopu BTC opremljenom s CANON EOS 200d digitalnom kamerom. Dobiveni uzorci prikazani su na slikama 4.15., 4.16. i 4.17.



Slika 4.15. Mikroskopska analiza uzorka 1.



Slika 4.16. Mikroskopska analiza uzorka 2.



Slika 4.17. Mikroskopska analiza uzorka 3.

Na uzorku 1. (Slika 4.15.) jasno je vidljiva pojava poroznosti. Poroznost uzrokuje otopljeni vodik u talini zavarenog metala koji tijekom hlađenja ostaje „zarobljen“ u obliku mjehurića u ohlađenom i skrućenom metalu. U područje zavara vodik dolazi preko različitih nečistoća, okolnoga zraka, zaštitnih plinova i drugo. Uz poru vidljiv je i početak pukotine. Pojava pukotine može se pripisati uporabom neprikladnih parametara zavarivanja. Također je vidljiva pogreška oblika korijena zavara, povlačenja taline pri skrućivanju (eng. „suck-back“).

Kod uzorka 2. (Slika 4.16.) također je došlo do pojave povlačenja taline pri skrućivanju. Uzrok ove nesavršenosti može biti prevelika struja zavarivanja, prevelika dužina električnog luka ili premalo nadvišenje korijena zavara. Može se izbjeći smanjenjem jakosti struje zavarivanja, održavanjem odgovarajuće duljine električnog luka ili odgovarajućom pripremom spoja za zavarivanje.

Na uzorku 3. (Slika 4.17.) najbolje se vidi grubozrnata mikrostruktura karakteristična za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura.

5. Zaključak

Može se zaključiti da su aluminij i aluminijeve legure široko rasprostranjen materijal za različite primjene, uključujući brodogradnju, zbog njihove raspoloživosti, izvrsnog omjera čvrstoće i mase, korozijske otpornosti i dobrih mehaničkih svojstava. Važno svojstvo koje određuje uporabu aluminija u brodogradnji je to što će brodski trup od aluminijske legure biti čak 2,9 puta lakši od čeličnog trupa. Poželjne aluminijeve legure za primjenu u morskom okruženju su gnječene aluminijeve legure iz serija 5XXX i 6XXX.

Postupci koji se najviše upotrebljavaju za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura su TIG i MIG. Zbog svojih svojstava, aluminij je specifičan za zavarivanje iako ga odlikuje dobra zavarljivost. Bitna utjecajna svojstva koja treba uzeti u obzir pri zavarivanju aluminija i aluminijevih legura su aluminijev oksid (Al_2O_3), dobra toplinska vodljivost i sklonost nastanku toplih pukotina. Smatra se da je pojava poroznosti neizbježna pri zavarivanju aluminija i aluminijevih legura zbog stvaranja aluminijeva oksida. Ostale pogreške koje stvaraju poteškoće kod zavarivanja aluminija i aluminijevih legura su tople pukotine i smanjenje čvrstoće zavarenog spoja. Međutim, dobra kvaliteta zavarenog spoja postiže se primjenom odgovarajućih parametara i tehnologije zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada izvršilo se automatizirano TIG zavarivanje limova debljine 2 mm aluminijeve legure EN AW 5754 H22. Zavarivala su se tri sučeljena spoja kod kojih su svi parametri bili konstantni, osim jakosti struje zavarivanja. Brzina zavarivanja za svaki slučaj iznosila je 60 cm/min. Za prvi zavareni spoj jakost struje zavarivanja iznosila je 120 A, za drugi 130 A, a za treći spoj 140 A. Potom su za svaki sučeljeni spoj na pili izrezane po dvije epruvete za ispitivanje savijanjem lica i korijena i jedan uzorak za mikroskopsku analizu. Nakon provedenog ispitivanja savijanjem i mikroskopske analize doneseni su sljedeći zaključci.

Kod prvog sučeljenog spoja na testu savijanja došlo je do prijeloma korijena zavara, dok je kod lica zavara vidljiv početak prijeloma. Kod mikroskopske analize jasno je vidljiva pora, uz koju se nalazi početak pukotine. Došlo je i do pogreške oblika zavara, povlačenja taline pri skrućivanju (eng. „suck-back“).

Na licu zavara druge epruvete nije došlo do prijeloma, već je on vidljiv na korijenu zavara. Mikroskopskom analizom vidljivo je povlačenje taline pri skrućivanju kao i kod prve epruvete.

Kod treće epruvete na licu zavara vidljiv je početak prijeloma, dok je kod korijena došlo do prijeloma epruvete. Kod mikroskopske analize trećeg uzorka najbolje je uočljiva grubozrnata mikrostruktura koja je karakteristična za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura.

Iz rezultata eksperimenta može se zaključiti da je drugi zavareni spoj najuspješniji te da je optimalna struja zavarivanja za ovaj sučeljeni spoj 130 A.

6. Literatura

- [1] „Z. Lukačević: „Zavarivanje“, Slavonski Brod 1998.“
- [2] „Šanko, Z.: Odabir dodatnog materijala kod zavarivanja aluminija, 5. SEMINAR, Aluminij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.“
- [3] „Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.“
- [4] „Više autora: ASM Handbook, Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous alloys and special – purpose materials, ASM International, 1992.“
- [5] „Kovačiček, F., Indof, J., Filetin, T.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2009.“
- [6] „HRN EN 573-1:2008, Aluminij i aluminijeve legure – Kemijski sastav i oblici gnječenih proizvoda – 1. dio: Sustav brojčanog označavanja (EN 573-1:2004)“
- [7] „HRN EN 573-2:2008, Aluminij i aluminijeve legure, - Kemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda - 2. dio: Sustav označavanja na temelju kemijskih simbola (EN 573-2:1994)“
- [8] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426843813-0-im_oznacivanje-al.ppt, dostupno 1.9. 2021.
- [9] „HRN EN 515:2017, Aluminij i aluminijeve legure - Gnječeni proizvodi - Označivanje stanja materijala (EN 515:2017)“
- [10] „Mathers, G., The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002.“
- [11] „HRN EN 1780-1:2008, Aluminij i aluminijeve legure -- Označivanje legiranih aluminijevih ingota za pretaljivanje, predlegure i odljevke -- 1. dio: Sustav brojčanog označavanja (EN 1780-1:2002)“

[12] „HRN EN 1780-2:2008, Aluminij i aluminijeve legure - Označivanje legiranih aluminijevih ingota za pretaljivanje, predlegure i odljevke - 2. dio: Sustav označivanja kemijskim simbolima (EN 1780-2:2002)“

[13] „HRN EN 1706: 2020, Aluminij i aluminijeve legure - Odljevci - Kemijski sastav i mehanička svojstva (EN 1706:2020)“

[14] <https://www.sigmat.hr/zavarivanje/>, dostupno 1.9.2021.

[15] „Više autora: Aluminium and the sea, Alcan aerospace, transportation and industry, 2004.“

[16] „Skillingberg, M.,: Aluminum at sea: Speed, endurance and affordability. The Aluminum Association, 2009.“

[17] Wahid, M.A., Siddiquee, A.N. & Khan, Z.A. Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint. *Mar Syst Ocean Technol* 15, 70–80 (2020): <https://doi.org/10.1007/s40868-019-00069-w>

[18] „Samardžić, I., Bogovac, D., Jorgić, T. i Kovačić, K. (2015.). Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija. *Tehnički glasnik*, 9 (2), 202-208“

[19] „Vručinić, G.: Zavarivanje i zavarljivost aluminija i legura, 5. SEMINAR, Aluminij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.“, <https://www.dtzi.hr/upload/pdf/5.%20SEMINAR/1.%20RAD.pdf>, dostupno 1.9.2021.

[20] „Juraga, I., Ljubić, K., Živičić, M.: Pogreške u zavarenim spojevima, Zagreb, 2007.“

[21] „Živičić, M.: TIG zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Časopis Zavarivanje, 28 (1): 39-46., 1985.“

[22] „Horvat, M., Kondić, V. i Brezovački, D. (2014). Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja. *Tehnički glasnik*, 8 (4), 426-432.“ , <https://hrcak.srce.hr/131573>, dostupno 1.9.2021.

- [23] „Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.“
- [24] „Živčić, M.: TIG zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Časopis Zavarivanje, 28 (2): 99-107., 1985.“
- [25] „HRN EN ISO 6848:2015, Elektrolučno zavarivanje i rezanje – Volframove elektrode – Razredba (ISO 6848:2015; EN 6848:2015)“
- [26] „Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Zavarivački i srodni postupci, FSB, Zagreb, 2015.“
- [27] „Levačić, D: *Zavarivanje aluminijske legure AlMg4,5Mn*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.“
- [28] „Kalpakjian; Schmid: Manufacturing Processes for Engineering Materials 5th ed, Pearson Education 2008.“
- [29] http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_AluminumMIGGMA_WWires-SuperGlaze-SuperGlaze5356TM/c8100.pdf, dostupno 1.9.2021.
- [30] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt, dostupno 1.9.2021.
- [31] „Rudan, M.: MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova, 5. SEMINAR, Aluminij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.“
- [32] <https://www.lumbertrans.com/proizvodi/zavarivanje-i-rezanje/oprema-za-zavarivanje/pistolj-za-mig-mag-varenje.html>, dostupno 1.9.2021.
- [33] „Kovačević B.; Živčić M.: Zavarivanje aluminjskih materijala (šesti dio): Znanstveno stručni časopis Zavarivanje br 1/2 2015.“
- [34] https://www.fsb.unizg.hr/atlantist/upload/newsboard/19_11_2013_19842_STROJEVI_I_OPREMA_ZA_ZAVARIVANJE_ZK.pdf, dostupno 1.9. 2021.

[35] „HRN EN 573-3:2019, Aluminij i aluminijeve legure - Kemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda - 3. dio: Kemijski sastav i oblik proizvoda (EN 573-3:2019)“

[36] Luijendijk, T., Welding of dissimilar aluminium alloys, Journal of Materials Processing Technology 103 (2000) 29-35, preuzeto s:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600004155>, dostupno 1.9.2021.

[37] https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5754-H22-Sheet-and-Plate_153.ashx, dostupno 1.9.2021.

[38] https://servus.hr/wp-content/uploads/2017/10/Vartig_1705-2005.pdf, dostupno 1.9.2021.

[39] <https://www.promotech.eu/en/products/welding-cutting-track-carriage-with-oscillation/>, dostupno 1.9. 2021.

[40] „HRN EN ISO 14175:2008 – Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke (ISO 14175:2008; EN ISO 14175:2008)“

[41] „HRN EN 1011:2009 – Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje (EN 1011-1:2009)“

[42] „HRN EN ISO 5173:2010 – Ispitivanje razaranjem zavara metalnim materijalima - Ispitivanja savijanjem (ISO 5173:2009; EN ISO 5173:2010)“



**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Stela Horvat pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom „Zavarivanje aluminijevih legura u brodogradnji“ te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Stela Horvat

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Stela Horvat neopozivo izjavljujem da sam suglasna s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom „Zavarivanje aluminijevih legura u brodogradnji“ čija sam autorica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Stela Horvat

(vlastoručni potpis)

Popis slika

Slika 2.1. Povećanje čvrstoće aluminija legiranjem magnezijem [4]	4
Slika 2.2. Aluminijski patrolni brod (25 m) za Royal Gibraltar Police [15].....	12
Slika 2.3. Aluminijski brod „Benchijigua Express“ dužine 127 m [16]	13
Slika 2.4. Upotreba aluminijevih legura kod glavnih strukturnih dijelova broda [17]	16
Slika 3.1. Oksidni sloj (Al_2O_3) „zatvoren“ unutar zavora [10]	20
Slika 3.2. Prikaz sloja razbijenog oksida uz zavar [18]	21
Slika 3.3. Utjecaj topline na mjestu zavarenog spoja [1]	23
Slika 3.4. Poroznost kod sučeljenog spoja aluminija (TIG zavarivanje) [10].....	24
Slika 3.5. Prikaz topivosti vodika u aluminiju [10].....	24
Slika 3.6. Tople pukotine u sučeljenom spoju aluminijeve legure A6082 s dodatnim materijalom 4043 (3 mm debljina ploča) [10]	25
Slika 3.7. Utjecaj legirnih elemenata na nastanak toplih pukotina [20].....	26
Slika 3.8. Mehanizam nastanka toplih pukotina [20].....	26
Slika 3.9. Shematski prikaz TIG opreme za zavarivanje [22].....	29
Slika 3.10. Shema TIG zavarivanja [10]	30
Slika 3.11. Utjecaj polariteta na dubinu protaljivanja i razaranje površinskih oksida na aluminiju [24].....	31
Slika 3.12. Položaj pištolja za zavarivanje i dodatnog materijala kod TIG ručnog zavarivanja [10]	32
Slika 3.13. Oblik i utjecaj električnog luka kod argona i helija [24]	33
Slika 3.14. Najčešći dijelovi pištolja za TIG postupak zavarivanja [18]	35
Slika 3.15. Prikaz oblika vrha volframove elektrode za zavarivanje aluminija [18]	36
Slika 3.16. Shematski prikaz MIG zavarivanja [10]	38
Slika 3.17. Prikaz MIG postupka zavarivanja [28]	39
Slika 3.18. Prikaz širine i penetracije zavora kao posljedica pozicije elektrode i tehnike zavarivanja [30].....	40
Slika 3.19. Dodavanje žice guranjem („push“) [31]	41
Slika 3.20. Dodavanje žice („push-pull“) [31].....	42
Slika 3.21. „Spool gun“ pištolj za zavarivanje [31]	42
Slika 3.22. Pištolj za MIG postupak zavarivanja [32].....	43
Slika 3.23. Prikaz konstantne ravne statičke izlazne karakteristike napona struje, CV [34] ...	44
Slika 3.24. Nagib pištolja kod a) sučeljenog i b) kutnog zavarivanja [23]	46

Slika 3.25. Grafički prikaz načina otkidanja kapljice impulsnim postupkom zavarivanja [31]	47
.....	47
Slika 3.26. Dijagram utjecaja legiranja na nastanak toplih pukotina [36]	50
Slika 3.27. Shematski prikaz zavarivanja aluminijskih traka [36]	51
Slika 3.28. Poprečni presjek zavara legura AA5083 (lijevo) i AA6060 (desno) [36]	52
Slika 3.29. Dijagram ovisnosti jakosti struje zavarivanja o brzini zavarivanja [36]	52
Slika 4.1. VARTIG 2005 AC/DC	56
Slika 4.2. Ekran automata Rail Bull	57
Slika 4.3. Pripremljen radni komad za zavarivanje	58
Slika 4.4. Lice zavara prvog uzorka	60
Slika 4.5. Korijen zavara prvog uzorka	60
Slika 4.6. Lice zavara drugog uzorka	61
Slika 4.7. Korijen zavara drugog uzorka	61
Slika 4.8. Lice zavara trećeg uzorka	62
Slika 4.9. Korijen zavara trećeg uzorka	62
Slika 4.10. Shematski prikaz ispitivanja savijanjem zavarenog spoja	63
Slika 4.11. Ispitivanje savijanjem na hidrauličnoj preši	64
Slika 4.12. Prikaz rezultata ispitivanja savijanjem lica i korijena epruvete 1.	64
Slika 4.13. Prikaz rezultata ispitivanja savijanjem lica i korijena epruvete 2.	65
Slika 4.14. Prikaz rezultata ispitivanja savijanjem lica i korijena epruvete 3.	65
Slika 4.15. Mikroskopska analiza uzorka 1	66
Slika 4.16. Mikroskopska analiza uzorka 2	67
Slika 4.17. Mikroskopska analiza uzorka 3	67

Popis tablica

Tablica 1.1. Prikaz fizikalnih i mehaničkih svojstava aluminijske legure [3]	1
Tablica 2.1. Podjela i način očvrscavanja gnječenih aluminijskih legura [5]	5
Tablica 2.2. Brojčano označavanje sastava gnječenih Al legura [8].....	7
Tablica 2.3. Brojčano označavanje lijevanih aluminijskih legura [11].....	10
Tablica 2.4. Oznake za stanje lijevanih legura [13]	11
Tablica 2.5. Primjena aluminijskih legura 5XXX i 6XXX u brodogradnji [17]	17
Tablica 2.6. Prikaz pogodnosti preporučenih lijevanih aluminijskih legura u inženjerske svrhe [15].....	18
Tablica 3.1. Kemijski sastav dodatnih materijala [15].....	49
Tablica 3.2. Kombinacija legura, debljina materijala i dodatni materijal [36]	50
Tablica 4.1. Kemijski sastav aluminijske legure EN AW 5754 [37].....	54
Tablica 4.2. Prikaz fizikalnih i mehaničkih svojstava aluminijske legure EN AW 5754 H22 [37]	55
Tablica 4.3. Tehničke karakteristike Vartig 2005 AC/DC [38]	55
Tablica 4.4. Parametri zavarivanja za pojedine uzorke.....	59