Ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja aluminijske legure EN AW 5083 H111

Pavlović, Anđela

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:042693

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Anđela Pavlović

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing. Anđela Pavlović

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Ivici Garašiću i asistentu dr.sc. Matiji Bušiću, dipl.ing.stroj. na ukazanoj pomoći i strpljenju pri izradi ovoga rada.

Zahvaljujem se i svojim roditeljima, bratu, rodbini i prijateljima za potporu i pomoć tijekom studija te najveća zahvala Bogu na uspješnom završetku preddiplomskog studija.

Anđela Pavlović

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ANĐELA PAVLOVIĆ** Mat. br.: **0035196199**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA ZAVARENOG SPOJA ALUMINIJSKE LEGURE EN AW 5083 H111**

Naslov rada na engleskom jeziku: **TESTING OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOY EN AW 5083 H111 WELDED JOINT**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je proučiti primjenu aluminijevih legura iz serije 5000. Navesti i opisati tehnologije zavarivanja aluminijevih legura koje se primjenjuju u brodogradnji. Posebno detaljno analizirati MIG zavarivanje aluminijevih legura. Proučiti i analizirati normu HRN EN 9692-3 koja definira pripremu spojeva za zavarivanje aluminijevih legura.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati mehanička svojstva sučeljenog spoja limova aluminijske legure EN AW 5083 H111 prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2. Donijeti zaključak o primjenjenoj tehnologiji i utjecaju pripreme spoja na mehanička svojstva zavarenog spoja.

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

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.

Zadatak zadao:
Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA I KRATICA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
2. ALUMINIJEVE LEGURE, SVOJSTVA I PRIMJENA 2
2.1. Aluminijeve legure 2
2.1.1. Svojstva aluminijevih legura 3
2.1.2. Podjela aluminijevih legura [9] 5
2.1.3. Gnječene aluminijeve legure 5
2.1.3.1. Aluminijeve legure bez strukturnog očvršćavanja [9] 5
2.1.3.2. Aluminijeve legure sa strukturnim očvršćavanjem [9] 7
2.1.3.4. Primjena gnječenih aluminijevih legura 13
2.1.4. Lijevane aluminijeve legure [5] 13
2.1.4.1. Označavanje lijevanih aluminijevih legura [25] 14
2.1.4.2. Primjena lijevanih aluminijevih legura [26] 15
2.2. Aluminijeva legura EN AW 5083 H111 [3] 16
3. POSTUPCI ZAVARIVANJA ALUMINIJA I ALUMINIJEVIH LEGURA 19
3.1. Zavarljivost aluminija i aluminijevih legura [4] 19
3.1.1. Oksidacija 20
3.1.2. Poroznost 21
3.1.3. Pukotine 23
3.1.3.1. Tople pukotine 23
3.1.4. Smanjenje čvrstoće zavara u zoni utjecaja topline 24
3.2. Tehnologije zavarivanja aluminijevih legura u brodogradnji 25
3.2.1. TIG zavarivanje aluminija i aluminijevih legura [2] 25
3.2.1.1. Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja [7] 26
3.2.1.2. Izvori struje i zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja [2] 27
3.2.2. Plazma zavarivanje aluminija i aluminijevih legura [2] 28
3.3. MIG zavarivanje aluminija i aluminijevih legura [2] 29
3.3.1. Vrste žica za MIG zavarivanje i prijenos metala [2] 30
3.3.2. Prednosti i nedostaci MIG zavarivanja [7] 31
3.3.3. Komponente MIG sustava 32
4. RAZORNE METODE ISPITIVANJA ZAVARENOG SPOJA [4] 34
4.1. Statičko vlačno ispitivanje 34
4.2. Kemijske analize 36
4.3. Metalografska ispitivanja 36
4.4. Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenog spoja 36
4.5. Ispitivanje savijanjem 37

4.6. Ispitivanje lomljenjem ... 39
5. PRIMJENA NORMI U PODRUČJU ZAVARIVANJA ALUMINIJEVIH LEGURA ... 40
5.1. HRN EN 9692-3:2000 [17] ... 40
5.2. EN 573 – 3:2009 [16] ... 41
5.3. ISO 4136 – 2001 [15] ... 42
5.4. BS EN ISO 5173 – 2010 [23] ... 43
5.5. HRN EN ISO 15614 – 2:2005 [14] ... 43
6. EKSPERIMENTALNI DIO ... 45
6.1. Osnovni i dodatni materijal ... 45
6.1.1. Svojstva i kemijski sastav osnovnog materijala EN AW 5083 H111 ... 45
6.1.2. Mehanička svojstva i kemijski sastav dodatnog materijala ... 45
6.2. Izvor struje za MIG zavarivanje ... 46
6.3. Ostala oprema ... 47
6.4. Zavarivanje uzoraka ... 49
6.5. Makroanaliza ... 52
6.6. Statičko vlačno ispitivanje ... 54
7. ZAKLJUČAK ... 60
LITERATURA ... 61
PRILOZI ... 63

POPIS SLIKA

Slika 1. Utjecaj Mg na mehanička svojstva Al-Mg [8] 2
Slika 2. Prikaz općeg dijagrama stanja i strukturnog očvršćavanja [9] 8
Slika 3. Ovisnost čvrstoće o temperaturi i vremenu dozrijevanja [9] 9
Slika 4. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje i izmjenu topline [22] 21
Slika 5. Poroznost uslijed MIG zavarivanja aluminija [4] 22
Slika 6. Tople pukotine u leguri 5083 [4] 23
Slika 7. Zone zavarenog spoja [8] 24
Slika 8. Shema TIG zavarivanja [21] 26
Slika 9. Prikaz mjesta taljenja na materijalu kod MIG zavarivanja [7] 29
Slika 10. Prikaz automatiziranog postupka MIG zavarivanja [7] 30
Slika 11. Raspored izrezivanja epruveta iz sučeonog spoja [14] 34
Slika 12. Princip ispitivanja savijanjem [4] 37
Slika 13. Izgledi savijenih epruveta [4] 38
Slika 14. Ispitivanje lomljenjem [4] 39
Slika 15. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge [17] 40
Slika 16. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge (nastavak) 41
Slika 17. Izvor struje za impulsno MIG zavarivanje 46
Slika 18. Automatizirano vođenje pištolja 47
Slika 19. Keramička podloga 48
Slika 20. Bakrena podloga 48
Slika 21. Lice i korijen zavara uzorka A 51
Slika 22. Lice i korijen zavara uzorka B 52
Slika 23. Dimenzije uzorka A 53
Slika 24. Dimenzije uzorka B 53
Slika 25. Univerzalna kidalica 54
Slika 26. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje 55
Slika 27. Prikaz epruveta prije ispitivanja 55
Slika 28. Prikaz epruveta nakon ispitivanja 56
Slika 29. Dijagram sila - istezanje za epruvetu 0/2 56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva aluminijevih legura [8] 4
Tablica 2. Podjela gnječenih legura prema načinu očvrsnuća[9] 11
Tablica 3. Mehanička svojstva EN AW 5083 H111[13] 16
Tablica 4. Promjena mehaničkih svojstava legure 5083 H111 s porastom temperature [26] 17
Tablica 5. Vrste struje pri TIG zavarivanju [2] 27
Tablica 6. Decimalno mjesto masenih udjela legirnog elementa i nečistoća [16] 42
Tablica 7. Kemijski sastav legure EN AW 5083 H111 [13] 45
Tablica 8. Kemijski sastav dodatnog materijala [19] 46
Tablica 9. Mehanička svojstva dodatnog materijala u zavarenom spoju [20] 46
Tablica 10. Tehničke specifikacije izvora struje za MIG zavarivanje 47
Tablica 11. Specifikacije zavarivanja uzorka A 49
Tablica 12. Specifikacije zavarivanja uzorka B 50
Tablica 13. Specifikacije kidalice 54
Tablica 14. Numerički rezultati ispitivanja epruveta oznake 0 60
Tablica 15. Numerički rezultati ispitivanja epruveta oznake 1 59

POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka	**Opis**
Al	Aluminij
Al_2O_3	Aluminijev oksid
Mg	Magnezij
Zn	Cink
Si	Silicij
Cu	Bakar
Mn	Mangan
R_m	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	Granica razvlačenja
A_5	Istezljivost
ρ	Gustoća
EN	Oznaka za standardne materijale
A	Oznaka za aluminij prema EN 573
U	Napon zavarivanja [V]
I	Jakost struje [A]
v_z	Brzina zavarivanja [mm/min]
η	Stupanj iskoristivosti
Q	Unesena količina topline [kJ/mm]
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom

SAŽETAK

Aluminij je metal koji je nakon kisika i silicija najrasprostranjeniji element u Zemljinoj kori s udjelom od 8%. Na izložbi u Parizu 1855. godine prvi put je predstavljen u elementarnom stanju. Aluminij je srebrno-bijeli metal koji pripada skupini lakih metala i jedan je od najprimjenjivijih materijala. U Zemljinoj kori ne postoji u elementarnom stanju, nego se dobiva elektrolizom iz aluminijevog oksida (glinice) Al_2O_3. Karakteriziraju ga mala gustoća, nisko talište i jako dobra provodljivost električne i toplinske energije. [10]

Budući da je aluminij izuzetno mekan i krhak, u industriji se uglavnom koriste njegove legure. Najčešći legirni elementi aluminija su magnezij, mangan, silicij, bakar i cink. U nastavku će kroz poglavlja biti detaljnije objašnjena svojstva i primjena Al i Al legura, naročito Al legure EN AW 5083 H111. Detaljno će se razraditi svi postupci elektrolučnog zavarivanja koji su primjenjivi za zavarivanje Al i Al legura te način pripreme spoja i moguće pogreške.

U eksperimentalnom dijelu rada prikazani su i analizirani rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava sučeonog spoja limova aluminijeve legure EN AW 5083 H111 prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2:2007.

Ključne riječi: Aluminij, aluminijeve legure, elektrolučno zavarivanje, norma HRN EN ISO 15614-2

SUMMARY

Aluminum is a metal that, after oxygen and silicon, is the most abundant element in the Earth's crust with an 8% share. At the exhibition in Paris in 1855 it was presented for the first time in elementary shape. Aluminum is a silver-white metal that belongs to a group of light metals and is one of the most applicable materials.Aluminum does not exist in elementary shape in Earth's crust so it is obtained by electrolysis of aluminum oxide (alumina) Al_2O_3. It is characterized by low density, low melting point and a very good conductivity of electricity and heat. [10]

Since aluminum is exceptionally soft and fragile its alloys are mainly used in the industry. The most common alloying elements of aluminum are magnesium, manganese, silicon, copper and zinc. The properties and application of aluminum and aluminum alloys will be explained indetail especially aluminum alloy EN AW 5083 H111. All welding procedures of aluminum and aluminum alloys will be considered in detail.

According to the requirements of HRN EN ISO 15614-2:2007, in the experimental part will be presented and analyzed the results of testing mechanical properties of aluminum alloy EN AW 5083 H111.

Key words: Aluminum, aluminum alloys, arc welding, standard HRN EN ISO 15614-2

1. UVOD

Aluminij je laki metal koji se u elementarnom stanju ne nalazi u Zemljinoj kori, nego čini sastavni dio stijena i gline. Iako je prisutan u velikim količinama u obliku raznih silikatnih i oksidnih minerala, najčešća sirovina za dobivanje aluminija je boksit. Boksit je heterogena ruda koja se sastoji od jednog ili više aluminijevih hidroksida pri čemu je udio aluminija 20% do 30% ukupne mase. Dobiva se iz rude boksita na dva načina: reakcijom boksita i natrijevog hidroksida u uvjetima povišene temperature i tlaka te žarenjem boksita s vapnom i sodom. Kao produkt kemijskih reakcija nastaje aluminijev oksid, odnosno glinica Al_2O_3 koja se dalje podvrgava elektrolizi te se dobiva čisti aluminij. Čistoća aluminija bitno utječe na njegova mehanička i kemijska svojstva. Povećanjem stupnja čistoće raste i njegova otpornost na kemijske utjecaje, ali dolazi i do pada čvrstoće. Nakon čelika, aluminij je najprimjenjiviji metal u industriji. [11]

Aluminij ima jako dobra kemijska, toplinska i mehanička svojstva, ali se u industriji ipak najviše upotrebljavaju njegove legure. Legiranjem Al sa metalima poput magnezija, cinka, mangana postižu se bolja mehanička i kemijska svojstva materijala. Glavne značajke Al i Al legura su mala masa, izuzetno dobra toplinska i električna vodljivost, dobra korozijska postojanost, dobra obradivost te mogućnost recikliranja. [10]

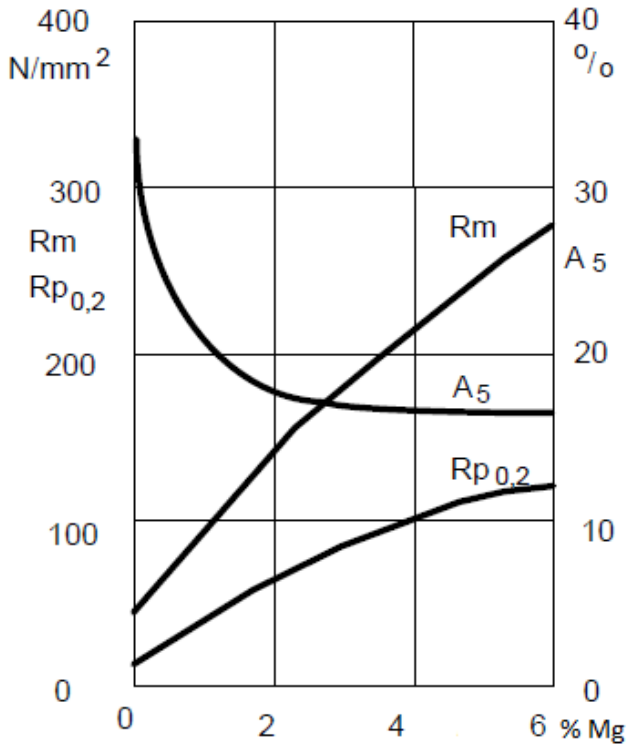
Zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava, Al i Al legure primjenjuje se u području strojarstva, zrakoplovstva, brodogradnje, građevinarstva, prehrambenoj industriji, vojnoj industriji te za izradu ambalaže. Koriste se kao prešani, valjani i lijevani materijali, poluproizvodi i gotovi proizvodi. [8]

2. ALUMINIJEVE LEGURE, SVOJSTVA I PRIMJENA

2.1. Aluminijeve legure

Legiranjem čistog aluminija s drugim elementima dobivaju se primarne aluminijske legure različitih mehaničkih i kemijskih svojstava. Čisti aluminij nije pogodan za uporabu u području strojarstva zbog relativno niske vlačne čvrstoće koja iznosi oko 40 MPa i ima granicu razvlačenja oko 10 MPa. Stoga se aluminij očvršćava i to najčešće legiranjem s drugim elementima. Legirni elementi koji se koriste za legiranje aluminija su mangan (Mn), magnezij (Mg), cink (Zn), bakar (Cu) i silicij (Si). [6]

Legiranjem aluminija postiže se mnogo veća vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, tvrdoća kao i druga svojstva poput žilavosti, krutosti i livljivosti, ali dolazi do smanjenja električne i toplinske vodljivosti. Utjecaj legirnih elemenata, u ovom slučaju Mg, na mehanička svojstva aluminija prikazan je na *Slika 1*. Povećanjem sadržaja Mg u Al dolazi do porasta vlačne čvrstoće i granice razvlačenja (R_m, $R_{p0,2}$), ali i do smanjenja istezljivosti (A_5). [8]



Slika 1. Utjecaj Mg na mehanička svojstva Al-Mg [8]

Dvokomponentne Al legure poput Al-Si, Al-Mg, Al-Zn mogu se dalje legirati nekim drugim legirnim elementima i na taj način dobivaju se kompleksnije legure s boljim mehaničkim i kemijskim svojstvima. U uvjetima dovoljno visoke temperature svi legirni elementi bit će potpuno topljivi u aluminiju. Topljivost legirnih elemenata u rastaljenom aluminiju je izuzetno važna budući da će legirni element stvarati vlastite faze ili intermetalne spojeve u uvjetima pri kojima nije osigurana potpuna topljivost. [9]

2.1.1. Svojstva aluminijevih legura

Aluminijeve legure imaju bolja mehanička i kemijska svojstva nego čisti aluminij. Prema [9], tri su najvažnije karakteristike aluminijevih legura:

- Povoljna specifična čvrstoća (omjer vlačne čvrstoće i gustoće, R_m/ρ). Aluminijeve legure imaju mnogo manju gustoću od čelika, a prisutnošću legirnog elementa u osnovnoj strukturi materijala, postiže se zadovoljavajuća čvrstoća.
- Izuzetno dobra korozijska postojanost
- Povoljan omjer električne vodljivosti i gustoće. Aluminijeve legure su odlični vodiči električne i toplinske energije te se sve više primjenjuju umjesto bakra.

Aluminijeve legure imaju jako dobru korozijsku postojanost u atmosferi zahvaljujući tankom oksidnom sloju Al_2O_3 koji se stvara na površini materijala. Oksidni sloj je debljine 0,01 μm i stvara se na zraku i vodenim otopinama. U medijima poput lužina oksidni sloj nije postojan i dolazi do njegovog razaranja. Glavna karakteristika oksidnog sloja je mogućnost obnavljanja, odnosno ukoliko dođe do njegovog oštećenja, oksidacijom se stvara novi sloj.

Zbog male gustoće, oko 2700 kg/m^3, i relativno visoke čvrstoće, primjenjuju se za izradu zrakoplova, svemirskih letjelica, brodova te industrijskih i motornih vozila.

Aluminijeve legure nisu namijenjene za visoke temperature budući da imaju jako nisko talište na 660 ℃. Stoga su primjenjive na temperaturama od 150 ℃ do 200 ℃. Aluminij kao i aluminijeve legure ima kubičnu plošno centriranu kristalnu rešetku (FCC) koja im omogućuje jako dobru oblikovljivost kako u toplom tako i u hladnom stanju. Prilikom oblikovanja u hladnom stanju mora se paziti na uvjete rada budući da hladnom deformacijom očvršćuju. Modul elastičnosti ovih legura je mnogo manji nego kod čelika (oko 70000 MPa) te su znatno elastičnije i gipkije. [9]

Najvažnija fizikalna svojstva aluminijevih legura prikazana su u *Tablica 1*.

Tablica 1. Svojstva aluminijevih legura [8]

Talište	660 °C
Gustoća pri 20 °C	2700 kg/m^3
Modul elastičnosti pri 20 °C	71 900 MPa
Koeficijent linearnog istezanja (0-100 °C)	$23{,}5 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
Specifični električni otpor pri 20 °C	0,0269 $Wmm^2\ m^{-1}$
Specifični toplinski kapacitet (0-100 °C)	920 $J\ kg^{-1}\ °C^{-1}$
Toplinska vodljivost (0-100 °C)	240 $J\ s^{-1}m^{-1}$

Aluminijeve legure nisu primjenjive za sve uvjete rada bez obzira na brojne prednosti koje posjeduju. Osim navedenih fizikalnih svojstava, ostale prednosti aluminijevih legura u odnosu na čelik su [8]:

- Oko 2,9 puta su lakše od čelika
- Dobra korozijska postojanost
- Nemagnetične su
- Vlačna čvrstoća iznosi i do 700 MPa uz dobru istezljivost
- Pogodne su za razne tehnološke obrade poput zavarivanja, ekstrudiranja te dubokog vučenja
- Jako dobra vodljivost toplinske energije; 12 puta veća nego kod nehrđajućeg čelika, a 4 puta veća od običnog čelika
- Jako dobra vodljivost električne energije; vodljivost je slična vodljivosti bakra
- Dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama
- Lijep izgled površine; postupcima lakiranja i anodizacije postiže se odličan dekorativni efekt površine

Neki od nedostataka aluminijevih legura su: imaju mnogo manji modul elastičnosti u odnosu na čelik, veliko smanjenje nosivosti u zoni utjecaja topline prilikom zavarivanja, osjetljive su na vrlo visoke temperature i probleme stabilnosti te im je cijena proizvodnje visoka. [6]

2.1.2. Podjela aluminijevih legura **[9]**

Aluminijeve legure možemo podijeliti prema više kriterija:

Podjela Al legura prema tehnološkoj preradi:

- Gnječene legure
- Lijevane legure

Podjela Al legura prema mogućnosti toplinske obrade:

- Toplinski neočvrstljive legure
- Toplinski očvrstljive legure

Toplinski neočvrstljive Al legure, odnosno nekaljive legure su: Al-Mg, Al-Mn, AlMgMn, a u skupinu toplinski očvrstljivih, odnosno kaljivih legura spadaju: AlMgSi, AlCuMg, AlLiCuZr itd.

2.1.3. Gnječene aluminijeve legure

Gnječene Al legure se prvo lijevaju u šipke ili ingote (poluproizvodi) da bi se kasnije postupcima hladnog ili toplog deformiranja izradile u gotovi proizvod. Komercijalne gnječene legure su podijeljene u pet osnovnih skupina prema načinu obrade i geometriji:

- Šipke, žice
- Pločasti valjani proizvodi (limovi, ploče, folije itd)
- Cijevi
- Kovani proizvodi
- Drugi razni oblici

Podskupinu gnječenih aluminijevih legura čine legure koje očvršćuju hladnom deformacijom (nekaljive) i legure koje očvršćuju toplinskom obradom (kaljive).

2.1.3.1. Aluminijeve legure bez strukturnog očvršćavanja [9]

Čvrstoća čistog aluminija nije dovoljno velika da bi se kao takav mogao primjenjivati u konstrukcijama. Stoga se aluminij mora očvršćavati, a to se može postići na sljedeća 4 načina:

- Legiranjem
- Toplinskom obradom

- Hladnom deformacijom
- Kombinacijom, npr. legiranjem i hladnom deformacijom

Budući da se legiranjem čistog aluminija postižu bolja mehanička svojstva, daljnjim postupkom toplinske obrade i oblikovanja, moguće je poboljšati postojeća mehanička svojstva aluminijeve legure.

Aluminijeve legure imaju FCC kristalnu rešetku te su sklone očvršćavanju pri hladnoj deformaciji. Očvrsnuće se temelji na umnožavanju dislokacija u mikrostrukturi materijala čime se koči gibanje pokretnih dislokacija i otežava se plastično tečenje materijala. Mikrostruktura većine Al legura koje ovako očvršćuju se sastoji od čvrste otopine bez intermetalnih faza. Aluminijeve legure bez strukturnog očvršćavanja su nekaljive legure, a ovoj skupini pripadaju sve legure čiji su legirni elementi magnezij, mangan, silicij, željezo itd. Kod ove skupine legura, očvršćavanje se postiže kombiniranjem postignutog učinka legiranjem sa hladnom deformacijom i žarenjem.

Postupkom očvršćavanja Al legura postižu se znatno bolja mehanička svojstva materijala. Postižu se maksimalna čvrstoća i granica razvlačenja, odlična korozijska postojanost te minimalna plastičnost. Glavni nedostatak im je da se mehanička svojstva materijala, proizvedenog na konačne dimenzije, ne mogu više mijenjati osim postupkom žarenja kada materijal mekša.

Prema europskoj normi EN 573 Al legure koje pripadaju ovoj skupini su: aluminij (1000), legure s manganom (3000) te legure s magnezijem (5000). Ukratko će biti opisana svaka serija Al legure iz ove skupine. [8]

Aluminij (1000)

Serija 1000 predstavlja nelegirani aluminij s različitim stupnjem čistoće, odnosno udjela nečistoća (Fe i Si) u strukturi materijala. Najvažnije karakteristike nelegiranog aluminija su:

- Odlična korozijska postojanost na atmosferilije zbog stvaranja tankog oksidnog sloja Al_2O_3 na površini metala
- Odlična električna i toplinska vodljivost
- Mala čvrstoća i granica razvlačenja
- Jako dobra zavarljivost
- Osjetljiv je na visoke temperature zbog niskog tališta

- Jako dobra plastičnost (mogućnost oblikovanja hladnom i toplom deformacijom)
- Velika primjenjivost u raznim područjima (kemijska industrija, elektroindustrija, građevinarstvo itd.)

Aluminijeve legure s manganom (3xxx)

Iz ove skupine aluminijevih legura posebno se izdvajaju legure AlMn (3003) i AlMgMn (3004). Najvažnije karakteristike ove skupine aluminijevih legura su:

- Odlična korozijska postojanost na atmosferilije
- Jako dobra zavarljivost
- Odlična mogućnost hladnog i toplog oblikovanja
- Izuzetno su dobre za postupke dubokog vučenja
- Primjenjuje se za izmjenjivače topline, limenke za pića itd.

Aluminijeve legure s magnezijem (5xxx)

Udio magnezija u ovoj skupini Al legura je uglavnom do 5% te im se najčešće dodaju i drugi legirni elementi poput kroma i mangana kako bi se poboljšala mehanička svojstva osnovne legure. Mehanička svojstva ove skupine Al legura nisu toliko dobra kao kod legura s manganom te im je i primjena ograničena na određena područja. Najvažnije karakteristike ove skupine Al legura su:

- Jako dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama
- Dobra zavarljivost
- Povećanjem udjela magnezija, pada im plastičnost, ali se poboljšavaju mehanička svojstva što im omogućava odlično ponašanje u morskom okruženju
- Primjenjuju se u brodogradnji, građevinarstvu, za razne uređaje za desalinizaciju morske vode itd.

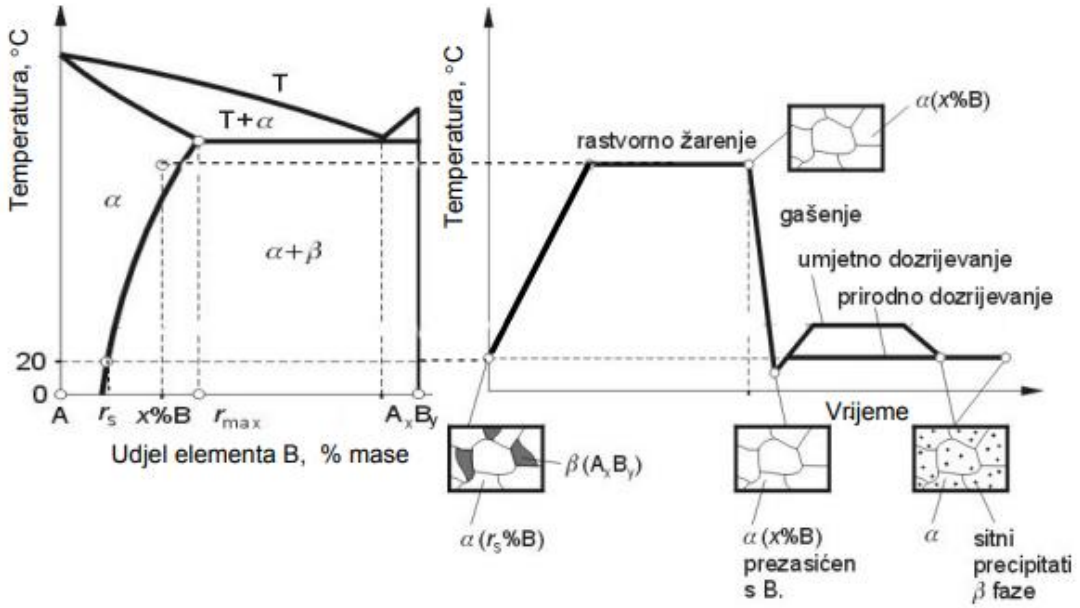
2.1.3.2. Aluminijeve legure sa strukturnim očvršćavanjem [9]

Strukturno odnosno percipitacijsko očvrsnuće je pojava koja se javlja kod svih legura u kojima dolazi do promjene topljivosti legirnog elementa u osnovnom metalu s promjenom temperature. Ostvaruje se kroz postupak rastvornog žarenja i dozrijevanja. Da bi uopće došlo do strukturnog očvršćavanja potrebno je ispuniti uvjete koji nužno slijede iz dijagrama stanja neke aluminijeve legure (*Slika 2.*).

Uvjeti potrebni za ostvarenje percipitacijskog očvrsnuća su:

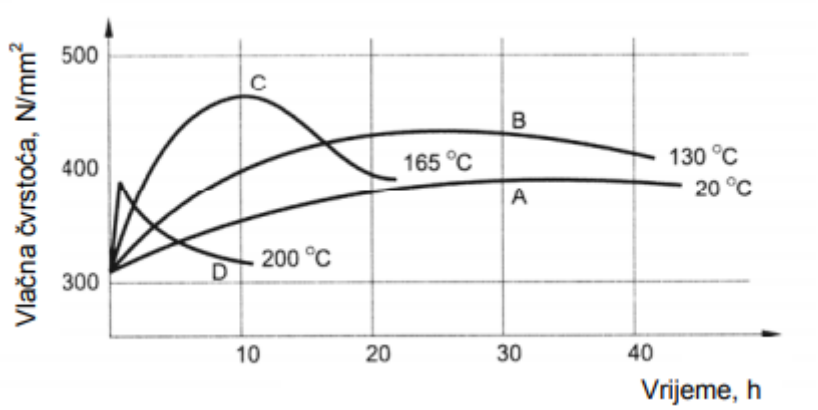
1. Struktura Al legure mora biti heterogena, odnosno mora sadržavati α kristale mješance aluminija i kristala druge faze
2. Maseni udio legirnih elemenata mora biti što više, ali ne smije preći granicu maksimalne topljivosti u α mješancu
3. Druga faza u polaznom stanju mora biti neki intermetalni spoj (npr. $CuAl_2$)

Postupak očvršćavanja provodi se na sljedeći način: U prvoj fazi provodi se postupak rastvornog žarenja koji će omogućiti otapanje barem jednog legirajućeg elementa u aluminiju na temperaturi 450 °C do 550 °C. Nakon toga slijedi naglo hlađenje materijala (gašenje) najčešće uranjanjem u hladnu vodu čime se omogućava da materijal zadrži strukturu kakvu ima u zagrijanom stanju. Budući da je u takvom stanju materijal nestabilan, dozrijevanje, odnosno treća faza procesa, nastavlja se na sobnoj ili povišenoj temperaturi. Žarenjem te gašenjem i dozrijevanjem materijalu se značajno povećavaju čvrstoća i tvrdoća. [9]



Slika 2. Prikaz općeg dijagrama stanja i strukturnog očvršćavanja [9]

Ukoliko se dozrijevanje materijala odvija na sobnoj temperaturi, riječ je o prirodnom dozrijevanju, a na povišenim temperaturama o umjetnom dozrijevanju. Prirodno dozrijevanje traje nekoliko dana do nekoliko mjeseci dok se umjetnim dozrijevanjem postižu veća čvrstoća, granica razvlačenja i tvrdoća te manja antikorozivnost i i istezljivost. Umjetno dozrijevanje provodi se na povišenim temperaturama (100 ℃ do 200 ℃) i traje nekoliko sati do nekoliko dana. Na *Slika 3.* prikazan je utjecaj temperature i vremena dozrijevanja na vlačnu čvrstoću strukturno očvršćene Al legure.



Slika 3. Ovisnost čvrstoće o temperaturi i vremenu dozrijevanja [9]

Krivulja A opisuje prirodno dozrijevanje na 20℃ pri kojem vlačna čvrstoća sporo raste te nakon približno 100 sati postiže svoj maksimum od približno 380 N/mm^2.

Krivulja B prikazuje umjetno dozrijevanje na temperaturi iznad 100 ℃. Postiže se veća vlačna čvrstoća u kraćem vremenskom periodu.

Optimalna temperatura umjetnog dozrijevanja je 165℃ u vremenu od oko 10 sati jer se tada postiže najveće očvrsnuće. Ukoliko se dozrijevanje provodi duže, doći će do pada čvrstoće što prikazuje krivulja C.

Krivulja D predstavlja dozrijevanje koje se provodi na temeperaturi iznad 200℃. U jako kratkom vremenu dolazi do pada čvrstoće.

Legirni elementi koji pripadaju ovoj skupini Al legura su: bakar (Cu), silicij (Si), magnezij(Mg), cink (Zn), litij (Li) i skandij (Sc). Legure koje spadaju u ovu skupinu su: legure s bakrom (2000), legure sa silicijem i magnezijem (6000) i legure sa cinkom i magnezijem (7000). [8]

Legure s bakrom (2xxx)

Ove legure imaju svojstva slična svojstvima mekih čelika. Poznati su pod nazivom durali. Najvažnija svojstva ove skupine legura su:

- Srednje dobra čvrstoća i tvrdoća
- Srednja ili slaba žilavost
- Loša antikorozivna svojstva te se prevlače čistim aluminijem kako bi se poboljšala otpornost na koroziju
- Dobra otpornost na višim temperaturama
- Dobra rezljivost
- Slaba livljivost
- Loša zavarljivost
- Primjenjuju se u zrakoplovstvu, za mehaničke dijelove (vijci, zakovice), naoružanju itd.

Legure sa silicijem i magnezijem (6xxx)

Kod ovih legura dva su legirna elementa: silicij (Si) i magnezij (Mg). Magnezij i silicij zajedno tvore magnezijev silicid Mg_2Si koji ih čini percipitacijski očvrstljivim. Najvažnija svojstva ovih legura su:

- Dobra zavarljivost
- Dobra čvrstoća i tvrdoća
- Pogodni su za anodizaciju i poliranje
- Dobra otpornost na koroziju
- Dobra oblikovljivost

Legure sa silicijem i manganom mogu se podijeliti u dvije skupine:

Legure s većim sadržajem silicija i magnezija. Imaju bolja mehanička svojstva: veću čvrstoću, granicu razvlačenja i tvrdoću. Primjenjuju se za nosive dijelove.

1. Legure s manjim sadržajem silicija i magnezija. Imaju lošija mehanička svojstva, ali jako dobru oblikovljivost. Primjenjuju se za izradu vagona, zavarene dijelove, vrata, prozore itd.

Legure sa cinkom i magnezijem (7xxx)

Legure sa cinkom i magnezijem imaju dobra mehanička svojstva koja se poboljšavaju ukoliko im se doda i treći legirni element, bakar (Cu). Poznati su pod nazivom konstruktali. Dijele se u dvije skupine:

1. Legure koje sadrže bakar. Imaju najbolja mehanička svojstva, ali su loše zavarljivi (samo u posebnim uvjetima) i imaju lošu korozijsku postojanost. Primjenjuju se u naoružanju, zrakoplovnoj i vojnoj industriji.
2. Legure koje ne sadrže bakar. Imaju lošija mehanička svojstva, ali bolju korozijsku postojanost od prethodne skupine. Primjenjuju se u naoružanju i za nosive dijelove.

U *Tablica 2.* dan je prikaz aluminijevih legura koje očvršćavaju hladnom deformacijom i percipitacijski.

Tablica 2. Podjela gnječenih legura prema načinu očvrsnuća [9]

Vrsta legure	Oznaka serije	Način očvrsnuća
Al-Mn	3xxx	**Hladnom deformacijom**
Al-Si	4xxx	
Al-Mg	5xxx	
Al-Fe	8xxx	
Al-Cu	2xxx	**Percipitacijsko očvrsnuće**
Al-Cu-Mg	2xxx	
Al-Mg-Si	6xxx	
Al-Zn	7xxx	
Al-Li-Cu-Mg	8xxx	

2.1.3.3. Označavanje gnječenih aluminijevih legura [25]

Gnječene aluminijeve legure označavaju se prema europskoj normi EN 573, prema sljedećem načinu označavanja:

- EN- oznaka za standardne materijale, a iza oznake ostavlja se slobodno mjesto
- A- označava aluminij
- W- označava gnječeni materijal

Sastav legure definira se:

a) Brojčanom oznakom- 4 znaka (npr. 5083)
b) Slovno-brojčanom oznakom (npr Al Mg_3)- ovaj dio oznako odjeljuje se crticama od ostatka oznake (-)

Iza oznake sastava legure slijedi slovo ili broj kojim se definira toplinska obrada gnječenih Al legura prema EN 515:

- F- primarno stanje
- O- žareno stanje
- H- očvrsnuto hladnom deformacijom
- W- rastvorno žareno stanje
- T- rastvorno žareno i dozrijevano stanje (percipitacijsko očvršćavanje)

Primjer : EN AW 5083 H111

U *Tablica 2.* na prethodnoj stranici prikazane su oznake pojedinih gnječenih aluminijevih legura prema američkim normama. Za primjer će se uzeti legura Al-Mg čija je serijska oznaka 5xxx. Prvi broj, u ovom slučaju 5, predstavlja osnovni legirni element, drugi broj označava čistoću ili modifikaciju osnovne legure dok treće i četvrto mjesto pobliže definiraju Al leguru ili označavaju čistoću aluminija.

2.1.3.4. Primjena gnječenih aluminijevih legura

Aluminijeve legure najviše se koriste u području zrakoplovstva i brodogradnje. Gnječene aluminijeve legure veliku primjenu našle su u avioindustriji zbog svoje male gustoće i izrazito dobrih mehaničkih svojstava. Dijelovi zrakoplova i drugih letjelica podnose velika dinamička naprezanja pa se ove legure primjenjuju za izradu trupa, krila, visokoopterećenih dijelova, kotača itd. [9]

Gnječene aluminijeve legure veliku primjenu nalaze u brodogradnji. Zbog jako dobrih mehaničkih svojstava kao i velike korozijske postojanosti u morskoj atmosferi, predstavljaju nezaobilazan materijal za izradu dijelova broda. Poznatije legure koje se koriste pri proizvodnji trupa broda su ploče i limovi numeričkih oznaka prema normi EN 573: 5083, 5086, 5454, 5456, a u novije vrijeme i 5059 te 5383. Koriste se najčešće u žarenom stanju, a u slučajevima kada se traži veća čvrstoća, koriste se očvrsnute hladnom deformacijom (npr. H111, H116).

Za dijelove iznad i ispod palube koriste se legure serije 5xxx te 6xxx u percipitacijski očvrsnutom stanju. Navedene legure mogu podnijeti jako niske temperature bez promjene mehaničkih svojstava te su najčešće mogu naći na plovilima polarnih regija. [24]

2.1.4. Lijevane aluminijeve legure **[5]**

Lijevane aluminijeve legure dobivaju se raznim postupcima lijevanja: lijevanjem u pijesak, lijevanjem u kokile i tlačnim lijevanjem. Legure koje pripadaju ovoj skupini Al-legura su: Al-Si, Al-Mg te Al-Cu. U nastavku će biti ukratko opisana svaka skupina.

Legure sa silicijem (4xxxx)

Legura sa silicijem Al-Si poznata je pod nazivom silumin i jedna je od najprimjenjivijih lijevanih aluminijevih legura. Zbog prisutnosti silicija (do 12%) ima jako dobro svojstvo livljivosti. Osim toga, silicij snižava temperaturu tališta, a da pritom ne dolazi do pojave krhkosti u materijalu. Upravo to je razlog zbog kojeg se iz ove legure izrađuju žice za zavarivanje koje se koriste kod lemljenja aluminija.

Legure sa magnezijem (5xxxx)

Aluminijeve legure čiji je osnovni legirni element magnezij spomenute su i u prethodnom podpodnaslovu kao skupina gnječenih legura. Iako se najčešće izrađuje kao poluproizvod, može se i oblikovati postupkom lijevanja. Glavni problem je njena loša livljivost koja je

posljedica loše žilavosti, stvaranja troske te pojave poroznosti. Prednosti su joj dobra korozijska postojanost i visoki sjaj.

Legure sa bakrom (2xxxx)

Aluminijeve legure sa bakrom kao i legure s magnezijem mogu biti i gnječene i lijevane. Baš kao i legura serije 5xxxx ima jako lošu livljivost i najslabiju korozijsku postojanost od svih aluminijevih legura. Imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva, dobro su rezljive i otporne su na višim temperaturama.

2.1.4.1. Označavanje lijevanih aluminijevih legura [25]

Lijevane aluminijeve legure označavaju se prema europskoj normi EN 1780, prema sljedećem načinu označavanja:

- EN- oznaka za standardne materijale, a iza se ostavlja slobodno mjesto
- A- označava aluminij
- C- označava lijevani proizvod

Sastav legure definira se:

a) Brojčanom oznakom- 5 znakova
b) Slovno-brojčanom oznakom- ovaj dio oznake se odjeljuje crticom od ostatka oznake

Iza oznake sastava legure definira se postupak lijevanja. Prvo slovo iza sastava legure predstavlja primjenjeni postupaka lijevanja:

- D- tlačno lijevanje
- K- lijevanje u kokile
- L- precizni lijev
- S- lijevanje u pijesak

Iza oznake za primijenjeni postupak lijevanja, slijedi slovna oznaka za stanje lijevanih aluminijevih legura:

- F- lijevano, toplinski neobrađeno stanje
- O- žareno stanje
- T1- kontrolirano hlađeno pri skrućivanju i prirodno dozrijevano
- T4- rastopno žareno i prirodno dozrijevano

- T5- kontrolirano hlađeno pri skrućivanju i umjetno dozrijevano
- T6- rastopno žareno i umjetno dozrijevano
- T64- rastopno žareno i umjetno pod-dozrijevano
- T7- rastopno žareno i umjetno pre-dozrijevano

2.1.4.2. Primjena lijevanih aluminijevih legura [26]

Serije lijevanih aluminijevih legura koje se koriste u brodogradnji su isključivo 4xxxx (Al-Si) te 5xxxx (Al-Mg).

Legure serije 4xxxx koje se preporučuju uporabi u brodogradnji:

- Legura 41000- za dijelove koji trebaju lijepo izgledati nakon poliranja i anodizacije
- Legure 42100 i 42200 - za visokoopterećene dijelove zbog dobrih mehaničkih svojstava
- Legura 44100 - za tanke i tvrdo lijevane dijelove

Legure serije 5xxxx koje se preporučuju uporabi u brodogradnji:

- Legura 51100 s 3% magnezija
- Legura 51300 s 6% magnezija

Legure serije 2xxxx se jako rijetko primjenjuju i nastoje se izbjegavati zbog loše korozijske postojanosti.

2.2. Aluminijeva legura EN AW 5083 H111 [3]

Legura oznake EN AW 5083 H111 pripada skupini gnječenih aluminijevih legura čiji je osnovni legirni element magnezij (Mg). Radi se o leguri očvrsnutoj hladnom deformacijom koja se najčešće primjenjuje u brodogradnji. Najvažnija mehanička svojstva legure 5083 H111 dana su u *Tablica 3.*

Tablica 3. Mehanička svojstva EN AW 5083 H111 [13]

Gustoća	2660 kg/m^3
Modul elastičnosti	71000 N/mm^2
Toplinska provodljivost	117 W/mK
Električna provodljivost	28,5 % IACS
Vlačna čvrstoća	300 N/mm^2
Tvrdoća	75 HB
Granica elastičnosti	190 N/mm^2

Legura 5083 H111 ima mnogo manju gustoću nego čelik te vrlo povoljan odnos čvrstoće prema specifičnoj težini u usporedbi s čelikom (omjer specifičnih težina je 1:3, a rasteznih čvrstoća 1:2) te je pogodan materijal za konstrukciju brodskog trupa.

Prednosti legure 5083 H111 za primjenu u brodogradnji su sljedeće:

- Mala gustoća, odnosno lagana je što omogućava veliku uštedu na težinama koje su visoko smještene i povoljno djeluje na stabilnost i nosivost broda
- Tri puta manji modul elastičnosti nego kod čelika što znači da imaju mnogo manju krutost, a veću istezljivost. Pri istom stupnju deformacije, podnosi manje naprezanje od čelika
- Nemagnetična je što je posebno važno u pomorstvu budući da brodovi koriste magnetski kompas
- Zadovoljavajuća mehanička svojstva, osobito pri niskim temperaturama pa su pogodne za prijevoz plinova u tekućem stanju

- Povećanjem sadržaja magnezija poboljšavaju se mehanička svojstva

Nedostaci legure 5083 H111:

- Veliki toplinski koeficijent istezanja koji uzrokuje veće probleme toplinske deformacije i naprezanja pri zavarivanju
- S povećanjem temeprature padaju vlačna čvrstoća i granica razvlačenja
- Potrebno je provoditi razne postupke zaštite od korozije
- Limovi i profili ne smiju imati nikakve pogreške koje bi mogle utjecati na njihovu primjenu, kao npr: mjehurići, pukotine, ljuske itd.
- Nije prikladna za nosive elemente broda

U *Tablica 4.* dan je prikaz ponašanja osnovnih mehaničkih svojstava legure EN AW 5083 H111 (vlačne čvrstoće, granice razvlačenja te istezljivosti) na temperaturama od -196 ℃ do 200 ℃ u žarenom stanju.

Tablica 4. Promjena mehaničkih svojstava legure 5083 H111 s porastom temperature [26]

Temperatura ℃	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]
−196	390	140	34
−80	280	120	26
−28	270	120	24
20	270	120	22
100	270	120	26
150	210	110	35
200	155	105	45

S porastom temperature padaju vlačna čvrstoća i konvencionalna granica razvlačenja te se i istezljivost smanjuje do sobne temperature (≈ 20 ℃), a onda postepeno raste.

Dijelovi broda koji se izrađuju od legure EN AW 5083 H111:

- Palubne kućice
- Unutarnje pregrade koje ne nose teret
- Kratke nadogradnje

- Tankovi goriva
- Unutarnje pregrade koje nose teret

Debljina limova legure 5083 H111 mora biti približno iste vrijednosti kao kod čeličnih limova, a momenti otpora barem 1,3 puta veći od momenata otpora čeličnih limova. Velika pozornost mora se dati zaštiti od korozije osobito na teško pristupačnim mjestima gdje lako može doći do početne korozije. Jedan od načina zaštite legure je premazivanje bojom koje se provodi u sljedećim fazama:

1. U prvoj fazi vrši se priprema površine; uklanjaju se nečistoće kako bi osnovna boja bolje prianjala uz površinu i da bi se povećala korozijska otpornost. Nečistoće s površine uklanjaju se posebnim otapalima ili postupcima poput eloksiranja.
2. U drugoj fazi na očišćenu površinu nanosi se osnovni premaz
3. U trećoj, zadnjoj, fazi nanosi se završni premaz

3. POSTUPCI ZAVARIVANJA ALUMINIJA I ALUMINIJEVIH LEGURA

3.1. Zavarljivost aluminija i aluminijevih legura [4]

Pri zavarivanju aluminija i aluminijevih legura javljaju se određeni problemi koji otežavaju da zavareni spoj postigne odnosno zadrži osnovna svojstva osnovnog materijala. Glavni problemi koji stvaraju poteškoće pri zavarivanju aluminija i aluminijevih legura su:

- Poroznost
- Tople pukotine
- Slaba difuzija
- Smanjena korozijska otpornost
- Smanjena električna otpornost
- Smanjena čvrstoća u području zone utjecaja topline (ZUT) i u području zavara
- Oksidacija

Navedene poteškoće pri zavarivanju Al i Al-legura posljedice su sljedećih utjecaja:

1. Oksidni sloj Al_2O_3

   Stvara se na površini materijala i debljine je oko 0,01 μm. Riječ je o tankom i gustom prirodnom filmu koji štiti materijal od kemijskih utjecaja iz atmosfere, prvenstveno korozije. Pri visokim temperaturama toplinske obrade ili zavarivanja aluminija ili aluminijevih legura na površini se stvara deblji sloj oksida. Budući da su na površini materijala prisutni uključci oksida, ne može se dobiti homogeni zavareni spoj. Kožica oksida prilikom zavarivanja ulazi u zavareni spoj i narušava mehanička svojstva zavara. Kako bi se spriječilo prodiranje oksida u zavareni spoj, prije i za vrijeme zavarivanja potrebno je odstraniti ili razoriti kožicu pomoću električnog luka u inertnoj atmosferi, praška za zavarivanje pri plinskom zavarivanju ili mehanički odstraniti.

2. Veliki koeficijent toplinskog istezanja

   Prilikom hlađenja materijala, zbog ovog svojstva, dolazi do većih deformacija i skupljanja materijala pa je povećana mogućnost pojave pukotina.

3. Dobra toplinska vodljivost

Zbog izuzetno dobre toplinske vodljivosti, pri zavarivanju potrebno je djelovati s velikim tokovima energije i unosom energije. Ukoliko su uložena energija i razvijena toplina pri zavarivanju nedovoljno velike, doći će do pojave poroznosti. Za deblje materijale prije zavarivanja potrebno je provesti postupak predgrijavanja.

4. Velika električna vodljivost

Potrebna je što veća jakost struje i u što kraćem vremenu obaviti elektrootporno zavarivanje da se izbjegne poroznost.

5. Pri zagrijavanju ne dolazi do promjene boje

Za razliku od čelika kod kojeg dolazi do promjene boje pri zagrijavanju, aluminij i njegove legure ne mijenjaju boju pa je teže odrediti, odnosno procijeniti temperaturu.

6. Omekšanje na mjestu zavarenog spoja

Na mjestu zavarenog spoja i u zoni utjecaja topline dolazi do znatnog pada čvrstoće osobito kod lijevanih aluminijevih legura.

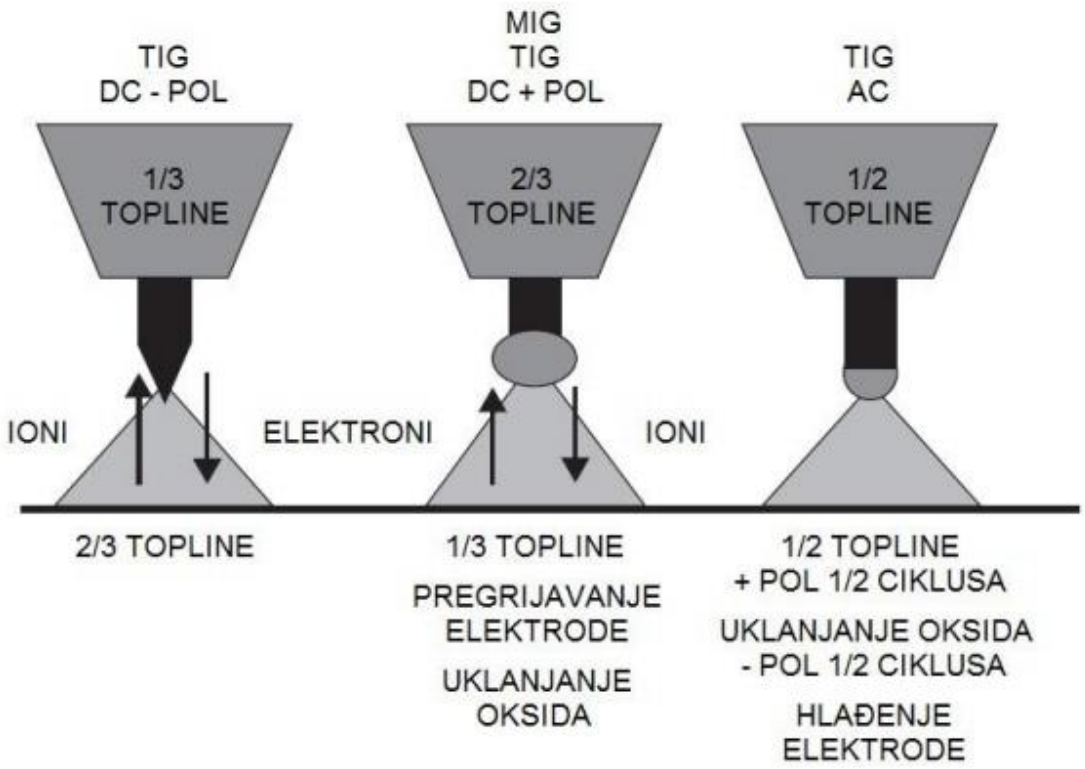
Svi navedeni utjecaji dovode do pogrešaka koje nastaju pri zavarivanju aluminija i aluminijevih legura. U nastavku će se detaljno opisati najčešće pogreške koje nastaju prilikom zavarivanja aluminija i njegovih legura.

3.1.1. Oksidacija

Stvaranje oksidnog sloja Al_2O_3 na površini metala je nepovoljno za zavarivanje jer u zavarenom spoju ostaju uključci oksida koji narušavaju zahtijevana mehanička svojstva spoja. Kao što je već prije navedeno, ti oksidi se moraju ukloniti prije ili tijekom zavarivanja. Najčešći način uklanjanja oksidnog filma iz zavarenog spoja pri elektrolučnom zavarivanju je katodno čišćenje. Elektroda je pozitivna, odnosno priključena je na + pol istosmjerne struje te se elektroni počinju gibati od radnog komada prema katodi, a ioni u suprotnom smjeru udarajući tako u površinu radnog komada i uklanjanja oksidnog sloja.

Kod MIG zavarivanja koristi se isključivo istosmjerni izvor struje, elektroda je priključena na pozitivan pol (DCEP), a u slučaju da se priključi na negativan pol (DCEN) , stvorio bi se nestabilan električni luk što bi rezultiralo lošim zavarom.

Za razliku od MIG-a, kod TIG postupka zavarivanja elektroda se priključuje na negativan pol što je izrazito nepovoljno za zavarivanje aluminija jer rezultira lošom kvalitetom zavara. Ukoliko se elektroda priključi na pozitivan pol izvora istosmjerne struje, doći će do pregrijavanja volframove elektrode te konačno do njegovog otapanja. Kao optimalno rješenje, u upotrebi je priključivanje na izvor izmjenične struje gdje se za vrijeme pozitivnog dijela ciklusa obavlja uklanjanje, odnosno razaranje oksida, a tijekog negativnog dijela ciklusa hlađenje elektrode. Na *Slika 4*. prikazano je koji je izvor struje primjenjiv za koji postupak, u kojem smjeru putuju ioni te koliki je utrošak energije .



Slika 4. Utjecaj polariteta na katodno čišćenje i izmjenu topline [22]

3.1.2. Poroznost

Poroznost nastaje kada oslobođeni mjehurići plina ostanu zarobljeni unutar metala zavara tijekom njegovog skrućivanja. Mjehurići su različitih veličina, od jako sitnih, oku nevidljivih, do jako velikih (3 do 4 mm u promjeru). Poroznost nastaje zbog vodika koji ima jako veliku topljivost u rastaljenom aluminiju i aluminijevim legurama. Tijekom hlađenja taline, plinovi

naglo izranjaju iz metala u obliku mjehurića. Ukoliko je brzina izlučivanja plinova manja od brzine hlađenja taline, doći će do pojave poroznosti. Pojavi poroznosti pogoduje i dodatni materijal, odnosno žica za zavarivanje. Na *Slika 5*. prikazana je poroznost nastala uslijed MIG zavarivanja aluminija.



Slika 5. Poroznost uslijed MIG zavarivanja aluminija [4]

Glavni uzročnici poroznosti u zavarenom spoju su:

- Nečistoće i vlaga na mjestu zavarivanja i u dodatnim materijalima
- Netočni parametri i tehnike rada
- Slaba zaštita procesa zavarivanja

Nečistoće u zavarenom spoju su najčešće hrđe i okujine, čestice oksida ili čestice od brušenja dok se masnoće najviše nakupljaju pri strojnoj obradi žlijeba. Vlaga je prisutna u električnom luku u svim elektrolučnim postupcima zavarivanja (REL, MIG, TIG...), oblozi elektrode, te u prašku i zaštitnom plinu. Tijekom zavarivanja vlaga se u električnom luku razlaže na vodik koji ostaje zarobljen unutar metala zavara i urokuje poroznost. Netočni parametri i tehnike rada također su česti uročnici pojave poroznosti u zavarenom spoju. Što je veća jakost struje, to je veća i temepratura metala zavara što će dovesti do povećane topljivosti vodika. Povećan napon ili duljina električnog luka također dovode do povećanja poroznosti. Prilikom uspostavljanja kontakta elektrode s materijalom koji se zavaruje i odmicanja elektrode radi uspostavljanja elektičnog luka, iz okoliša u talinu ulaze štetni plinovi. Količina zaštitnog plina također ima velik utjecaj na pojavu poroznosti. Što je ta količina veća, doći će do prejakih strujanja i vrtloženja plina čime se povlače štetni plinovi iz okoliša dok će premala količina slabo štiti talinu.

Kako bi se izbjegla pojava poroznosti, potrebno je slijediti nekoliko pravila:

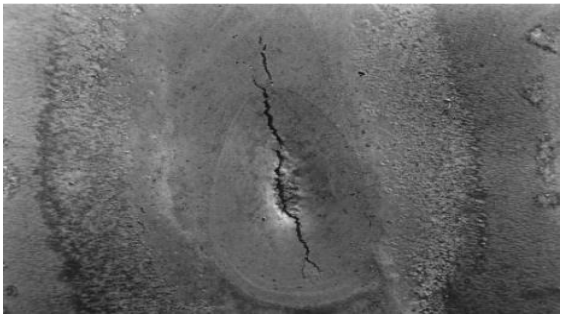
- Održavati čistoću na mjestu zavarivanja
- Ukloniti sve masnoće i nečistoće nesposredno prije zavarivanja
- Ukloniti oksidni sloj prije zavarivanja
- Dozirati ispravnu količinu zaštitnog plina
- Postaviti ispravne parametre rada
- Primijeniti ispravnu tehniku rada
- Pravilno uspostavljati i održavati električni luk

3.1.3. Pukotine

Pukotine su najopasnije pogreške u zavarenom spoju zbog mogućnosti brzog širenja i jer svojim dimenzijama značajno smanjuju nosivost spoja, odnosno čvrstoću. Mogu se pojaviti tijekom ili nakon zavarivanja. Dijele se na tople i hladne pukotine. Kako bi se izbjeglo nastajanje pukotine, potrebno je provoditi pravilan postupak zavarivanja, pravilan odabir parametara i tehnike rada i regulirati unos topline. Količina unesene topline ne smije biti prevelika jer će doći do pogrubljenja zrna, odnosno smanjenja žilavosti što će rezultirati pojavom toplih pukotina. Ukoliko je unesena premala količina topline nastat će hladne pukotine.

3.1.3.1. Tople pukotine

Tople pukotine nastaju na granicama zrna materijala na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline. Najčešće nastaju po sredini zavara i i šire se po dužini, ali su dosta česte i u zoni utjecaja topline. Na *Slika 6.* prikazano je kako izgleda topla pukotina nastala u završnom krateru zavara legure 5083.



Slika 6. Tople pukotine u leguri 5083 [4]

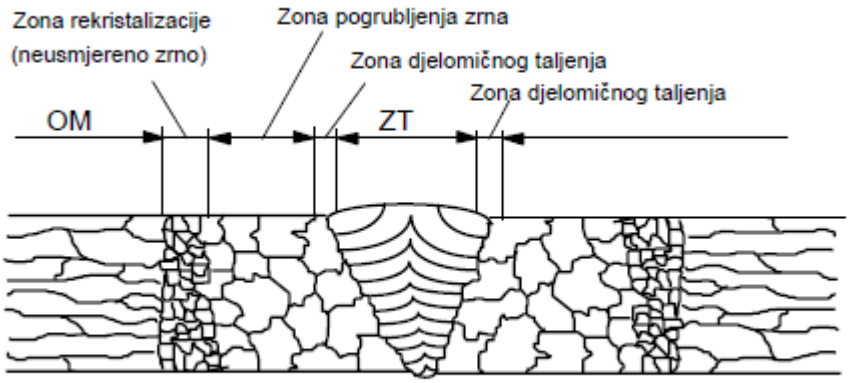
Nastaju kao posljedica nemogućnosti materijala da podnese velika toplinska naprezanja koja se javljaju u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Ne pojavljuju se kod čistih metala nego kod legura zbog promjene temperature solidifikacije koja rezultira pojavom različitih faza. Kod aluminijevih legura legirni elementi tvore veliku količinu eutektika koji ima značajno nižu temperaturu solidifikacije od osnovnog metala zbog čega nastaju velika toplinska naprezanja te u konačnici dolazi do pojave pukotine. Sve aluminijeve legure podložne su nastajanju toplih pukotina.

Postoji nekoliko načina na koje je moguće izbjeći pojavu toplih pukotina:

- Dodavanjem titana, cirkonija ili skandija omogućava se nastanak finog,usitnjenog zrna pri solidifikaciji
- Primjena odgovarajuće pripreme spoja
- Pravilnim izborom zavarivačkog postupka kojim će se minimizirati zaostala naprezanja
- Primjenom najveće brzine zavarivanja

3.1.4. Smanjenje čvrstoće zavara u zoni utjecaja topline

Tijekom zavarivanja, mjesto spoja se zagrijava na određenu temperaturu te se u zavaru pojavljuju tri osnovne zone: osnovni materijal koji je ostao nepromijenjen, zona utjecaja topline i zona materijala zavara (*Slika 7.*)



Slika 7. Zone zavarenog spoja [8]

Zona utjecaja topline podložna je naizmjeničnim toplinskim opterećenjima (ciklusima hlađenja i zagrijavanja) te su i njena svojstva znatno drukčija od svojstava osnovnog materijala. U zoni utjecaja topline i zoni taljenja dolazi do značajnog pada čvrstoće aluminijevih legura sa strukturnim ili bez strukturnog očvršćavanja. Jedino lijevane netretirane legure ili legure u žarenom stanju imaju ista svojstva osnovnog materijala i zone utjecaja topline.

3.2. Tehnologije zavarivanja aluminijevih legura u brodogradnji

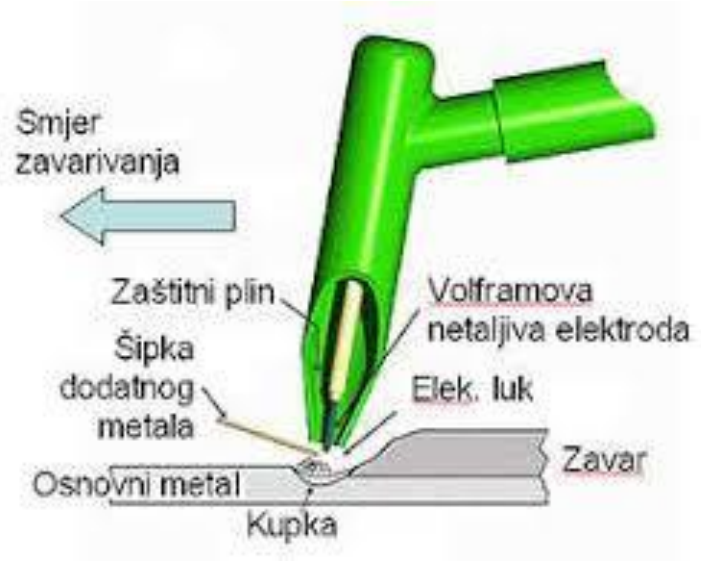
U području brodogradnje za izradu dijelova broda primjenjuju se gnječene i lijevane aluminijeve legure. Za konstrukciju broda primjenjuju se komponente prethodno izrezane (aluminijski limovi i ploče) i oblikovane (poput ekstrudata) koje se kasnije zavaruju određenim postupkom u konstrukcijski oblikovanu oplatu, ljusku koja je iznutra ojačana potpalubnim strukturama poput greda, pregrada itd. [24]

Najčešći postupci zavarivanja aluminija i aluminijevih legura su MIG, TIG, plazma zavarivanje, a u novije vrijeme sve se više primjenjuju i postupci zavarivanja laserom i trenjem. [7] Iako su svi ovi postuci relativno dobro zastupljeni u zavarivanju kostrukcijskih dijelova broda, najučestaliji i najpogodniji postupak zavarivanja je MIG. U nastavku će biti detaljno opisani svi navedeni postupci zavarivanja, dok će MIG zavarivanje zbog svoje važnosti biti objašnjeno u posebnom podnaslovu.

3.2.1. TIG zavarivanje aluminija i aluminijevih legura [2]

TIG (*eng. Tungsten Inert Gas*) je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Uspostavljanjem električnog luka između netaljive volframove elektrode i radnog komada tali se osnovni, a po potrebi i dodatni materijal. Kako bi se spriječile moguće pogreške nastale tijekom zavarivanja, za postupak se primjenjuje inertni plin koji štiti zavareni spoj od kontaminacije štetnim plinovima iz okoline kao i zagrijani vrh elektrode.

Oprema za TIG zavarivanje sastoji se od izvora struje, pištolja za zavarivanje, dodatnog materijala, izvora inertnog zaštitnog plina te rashladnog uređaja. Shematski prikaz cjelokupne opreme za TIG zavarivanje dan je na *Slika 8*.



Slika 8. Shema TIG zavarivanja [21]

Elektroda koja se primjenjuje za uspostavljanje električnog luka kod TIG zavarivanja izrađena je od čistog volframa ili legiranog sa torijevim ili cirkonijevim oksidom. Elektroda od čistog volframa danas se sve rjeđe koristi zbog prednosti koje nudi elektroda od volframovih legura. Legirni elementi olakšavaju uspostavljanje električnog luka, stabiliziraju luk, osobito pri malim strujama, povećavaju dozvoljeno strujno opterećenje itd.

Promjer elektrode kreće se u rasponu od 0,8 mm do 9,5 mm, a dužina joj je 200 mm. Ove elektrode nisu taljive, ali u situacijama nehotičnog kontakta s radnim komadom, postupno se troše. Prosječna trajnost jedne elektrode duljine 170 mm je 30 radnih sati.

3.2.1.1. Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja [7]

TIG zavarivanje nije uvijek pogodno za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura, a u kojim slučajevima će se uzeti kao optimalno rješenje, ovisit će o njegovim glavnim karakteristikama.

Prednosti TIG zavarivanja su:

- Primjenjiv je za zavarivanje svih materijala
- Visoka kvaliteta zavara
- Nema troske, dima i isparavanja
- Prikladan je za rad na terenu i u radionici

- Mogućnost zavarivanja u svim položajima
- Moguća je automatizacija postupka
- Nema rasprskavanja kapljica

Nedostaci TIG zavarivanja su:

- Manje brzine zavarivanja nego kod MIG postupka
- Neekonomičan je za veće debljine limova zbog male količine nataljenog materijala
- Potrebna je velika čistoća površine
- Potrebna je kvalitetna priprema spoja- uklanjanje nečistoća i masnoće
- Velik utjecaj čovjeka
- Ukoliko parametri nisu optimizirani, cijena plina je izrazito visoka

3.2.1.2. Izvori struje i zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja [2]

Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje. Izbor izvora struje temelji se na vrsti materijala koji će se zavarivati. Kako bi se izbjeglo stvaranje električnog luka kratkim spojem, izvori struje kod TIG zavarivanja dodatno su opremljeni visokonaponskim visokofrekventnim generatorima. U novije vrijeme primjenjuju se TIG uređaji s mogućnošću promjene impulsa struje. Vrste struja i materijali koji su pogodni za određeni izvor struje prikazani su u *Tablica 5.*

Tablica 5. Vrste struje pri TIG zavarivanju [2]

Vrsta struje	Zavarivani materijali	Napomena
Istosmjerna Elektroda (-) pol	**Svi materijali osim Al i Al legura**	**Mogućnost najvećeg opterećenja elektrode**
Izmjenična ili impulsna	**Al,Mg i njihove legure**	**Mogućnost uklanjanja oksida s površine**
Istosmjerna Elektroda (+) pol	**Posebni slučajevi**	**Vrlo malo dozvoljeno opterećenje elektrode**

Zaštitni plinovi imaju zadatak osigurati što prikladniju atmosferu, štititi vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. Kod TIG zavarivanja koriste se inertni plinovi koji neće reagirati sa rastaljenim metalom i plinovima iz okoline. Najčešći inertni zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja su argon (Ar) i helij (He).

3.2.2. Plazma zavarivanje aluminija i aluminijevih legura [2]

Plazma zavarivanje je postupak koji je jako sličan TIG postupku zavarivanja budući da se iz njega i razvio. Osnovna razlika između plazma zavarivanja i TIG-a je ta da kod ovog postupka postoje dvije vrste plinova: zaštitni inertni plin i plazmeni plin. Plazmeni mlaz dobiva se tlačenjem određenog plina kroz električni luk. Električni luk se uspostavlja između volframove elektrode spojene na negativan pol izvora struje i radnog komada ili sapnice pištolja samog uređaja. Za razliku od TIG postupka, plazmeni mlaz se ne širi. Kod plazma zavarivanja razlikujemo postupak taljenja i protaljivanja materijala. Taljenje se odnosi na tanke limove, a protaljivanje (*eng. keyhole*) nastaje kada plazmeni mlaz protali čitavu debljinu osnovnog materijala oblikujući otvor u materijalu oblika ključanice. Postupak protaljivanja primjenjuje se za materijale debljine 1,5 do 12 mm i može se izvoditi ručno ili mehanizirano. Kod plazma zavarivanja izvor struje je istosmjerni, a plazma pištolj za razliku od TIG pištolja ima dva kanala: jedan za plazmeni mlaz, a drugi za zaštitni plin. Kao plazmeni plin najčešće se koristi argon, a kao zaštitni argon ili helij.

Prednosti plazma zavarivanja:

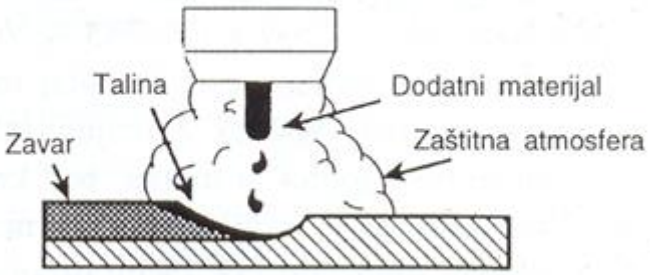
- Za istu jakost struje postiže veće brzine zavarivanja od TIG postupka
- Doboka penetracija i mogućnost potpunog protaljivanja u jednom prolazu
- Stabilan električni luk
- Razmak između pištolja i radnog komada nije kritična veličina
- Moguće je zavarivanje bez dodatnog materijala

Nedostaci plazma zavarivanja:

- Plazma pištolj je osjetljiviji na oštećenja nego TIG pištolj
- Obavezno je vodeno hlađenje pištolja i to destiliranom vodom
- Nužno je održavati točan razmak između vrha elektrode i sapnice.

3.3. MIG zavarivanje aluminija i aluminijevih legura [2]

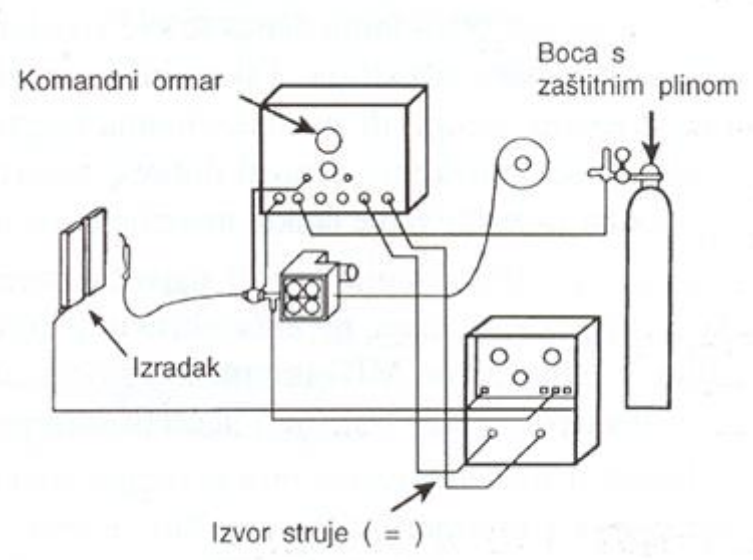
MIG (eng. Metal Inert Gas) je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Kod MIG zavarivanja električni luk se uspostavlja između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice i radnog komada. Elektroda je spojena na pozitivan pol izvora istosmjerne struje. Proces zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova kao što su argon (Ar) i helij (He). Postupak može biti ručni, poluautomatiziran ili automatiziran. Prikaz mjesta taljenja na materijalu kod MIG zavarivanja dan je na *Slika 9.*



Slika 9. Prikaz mjesta taljenja na materijalu kod MIG zavarivanja [7]

Zaštitni plinovi štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a na mjesto zavarivanja dovode se kroz posebnu sapnicu na pištolju koja je smještena oko kontaktne cjevčice. Primjenom inertnih zaštitnih plinova ne dolazi do kemijske reakcije plina s metalom te se koriste za zavarivanje osjetljivih materijala kao što su aluminij i njegove legure, bakar i njegove legure, krom-nikal čelici, titan i dr.

Poluautomatizirani postupak MIG zavarivanja je takav postupak kod kojeg je dodavanje žice mehanizirano, a pištolj se vodi ručno. Potpuno automatizirani postupak MIG zavarivanja ima mehanizirano dodavanje žice, ali i vođenje pištolja. Pogonski sustav konstantnom brzinom dodaje žicu kroz cijevni paket i pištolj u električni luk (*Slika 10.*).



Slika 10. Prikaz automatiziranog postupka MIG zavarivanja [7]

Ukoliko se zavarivanje obavlja na udaljenosti većoj od 5 metara od izvora struje, primjenjuje se dodatni pogon za dodavanje žice i smješten je u pištolju.

Osim za veće udaljenosti, dodatni pogon se primjenjuje i za jako tanke žice promjera 0,6 do 0,8 mm ili kada se radi sa žicama od mekših materijala kao što su aluminij i aluminijeve legure.

Kod MIG zavarivanja primjenjuju se dvije tehnike rada: lijeva i desna. Kod desne tehnike zavarivanja prvo ide električni luk, a iza luka rastaljeni dodatni materijal. Primjenjuje se za zavarivanje debljih limova. Kod lijeve tehnike prvo ide dodatni materijal, a iza njega električni luk. Lijeva tehnika se primjenjuje za zavarivanje tanjih limova.

Najučestalije greške koje se javljaju kod MIG zavarivanja su:

- Poroznost- posljedica je loše tehnike rada, velikog udjela nečistoća, loše kvalitete plina
- Štrcanje- posljedica je loših parametara zavarivanja
- Naljepljivanje- nastaje zbog loše tehnike rada

3.3.1. Vrste žica za MIG zavarivanje i prijenos metala [2]

Žice koje se koriste kao taljive elektrode pri MIG zavarivanju moraju imati jako glatko površinu, veliku točnost dimenzija i moraju biti uredno namotane na kolutove koji se nalaze u

uređaju za dodavanje. Postoji nekoliko vrsta žica koje se primjenjuju za MIG zavarivanje, a podijeljene su u sljedeće skupine:

a) Pune žice; izrađene su od čeličnih materijala, ali su poniklane i pobakrene kako bi imale veću toplinsku i električnu vodljivost i bolju korozijsku postojanost
b) Praškom punjene žice; primjenjuju se uz plinsku zaštitu iako postoje i druge vrste koje same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre. Jezgre mogu biti raznih presjeka, ovisno o načinu proizvodnje.

Obzirom na značajke električnog luka prijenos metala obavlja se na 4 načina [7,2]:

1. Prijenos metala kratkim spojem obavlja se pri malim strujama zavarivanja i malim naponima. Posljedica toga je mala količina rastaljenog metala te je prikladan za zavarivanje tanjih limova, korijena zavara itd. Struje su jakosti 50 do 170 A, napona 15 do 21 V sa žicama promjera 0,6 do 1,1 mm. Zbog niske unesene energije nije prikladan za zavarivanje aluminijevih legura.
2. Prijenos štrcajućim lukom obavlja se pri velikim strujama zavarivanja i velikim naponima što rezultira jako dobrom penetracijom pa je prikladan za zavarivanje debljih presjeka, ali samo u horizontalnom položaju. Struje su jakosti 200 do 600 A, napona 25 do 40 V. Kod ovog načina prijenosa metala metal se s vrha elektrode u obliku sitnih kapljica prenosi kroz atmosferu luka te elektroda ne dolazi u kontakt s osnovnim materijalom.
3. Prijenos metala prijelaznim lukom kombinacija je prijenosa metala kratkim spojem i štrcajućim lukom. Jakost struje se kreće u rasponu od 170 do 235 A, a napon od 22 do 25 V. Glavni problem je pojava prskanja.
4. Prijenos metala impulsnim zavarivanjem sa jakom impulsnom strujom (250 do 650 A), osnovnom strujom (20 do 45 A) i frekvencijom 20 do 300 Hz.

3.3.2. Prednosti i nedostaci MIG zavarivanja **[7]**

Prednosti MIG zavarivanja:

- Primjenjiv je za zavarivanje svih vrsta materijala
- Mogućnost potpune automatizacije procesa
- Pogodan je za zavarivanje različitih debljina

- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala
- Mogućnost primjene praškom punjene žice
- Mogućnost zavarivanja u radionici i na terenu

Nedostaci MIG zavarivanja:

- Problemi kod dovođenja žice (osobito aluminij)
- Mogućnost pogreške pri radu na otvorenom zbog loše zaštite
- Velik broj grešaka uslijed nepravilnog izbora parametara
- Štrcanje pri prijenosu metala kratkim spojem (veliki gubitci, potrebna je i naknadna toplinska obrada)
- Složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija)

3.3.3. Komponente MIG sustava

MIG sustav sastoji se od 4 osnovne komponente kako je prikazano na *Slika 10*.

- Izvor struje
- Pogonski sustav žice
- Pištolj za zavarivanje
- Boca sa zaštitnim plinom

Izvor struje kod MIG zavarivanja može biti istosmjerni ili izmjenični. Istosmjerni izvori struje su generatori istosmjerne struje i ispravljači. Izmjenični izvori struje su transformatori i pretvarači frekvencije. Klasični MIG uređaji najčešće su ispravljači sa izlaznom karakteristikom konstantnog napona.

Pogonski sustav žice služi za automatsko dodavanje žice. Brzina dodavanja žice može se regulirati i to je jedini parametar na koji se može direktno utjecati. Nalazi se u većini slučajeva izvan kučišta izvora struje čime je omogućena bolja preglednost namotaja žice u slučaju pogreške pri uvođenju. Može se nalaziti i u samom kućištu izvora struje kako bi se dobio manji volumen uređaja i niža cijena proizvodnje.

Pogonski sustavi koji se koriste za dodavanje žica aluminijevih legura su:

- Push sustav
- Push- Pull sustav

Pištolj za zavarivanje je polikabelom povezan sa dodavačem žice. Polikabel služi za prijenos dodatnog materijala, zaštitnog plina i električne energije. Pritiskom prekidača na pištolju električna energija se prenosi preko bakrenog vodiča na žicu dodatnog materijala uz istovremenu aktivaciju zaštitnog plina.

Zaštitni plinovi imaju utjecaj na:

- Električno- fizikalna svojstva električnog luka
- Metalurške procese u talini zavara
- Tehnološke parametre

Specifična gustoća zaštitnog plina ima jako velik utjecaj na zaštitu mjesta zavara. Što je zaštitni plin gušći (poput argona), to su mu bolja svojstva zaštite. Kod helija je potreban veći protok da bi se postigla ista kvaliteta zaštite koju daje argon, a razlog je sklonost turbulentnom strujanju pri izlazu iz sapnice. Djelovanje zaštitnog plina na rastaljeni metal može biti neutralno, reducirajuće i oksidirajuće. Na izlazu iz boce postavlja se regulator plina kojim se kontrolira protok, tlak u boci i preostala količina plina.

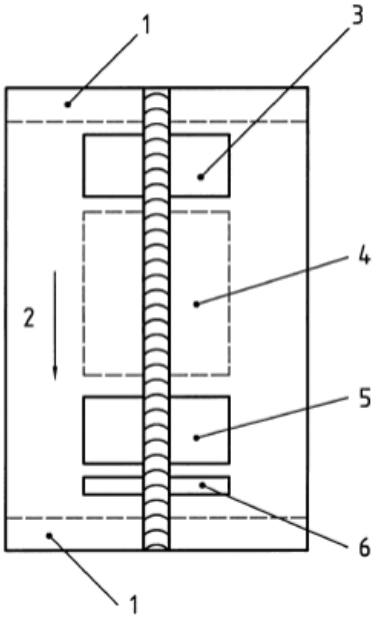
4. RAZORNE METODE ISPITIVANJA ZAVARENOG SPOJA [4]

Razorne metode provode se za određivanje čvrstoće, tvrdoće, kemijskog sastava i strukture zavarenih spojeva. Kao što im sam naziv kaže, radi se o metodama gdje se materijal prilikom ispitivanja razara, odnosno lomi. Materijal se opterećuje vlačno, savijanjem ili udarno toliko dugo dok ne dođe do njegovog loma. Kako bi se ispitala čvrstoća, žilavost i granica razvlačenja zavarenog spoja, provodi se nekoliko razornih metoda ispitivanja:

- Statičko vlačno ispitivanje
- Ispitivanje savijanjem
- Ispitivanje udarnog rada loma
- Ispitivanje lomljenjem
- Metalografska ispitivanja

4.1. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provodi se na ispitnim uzorcima, tzv. epruvetama, strojno izrađenim, normiranog izgleda i dimenzija. Epruvete se režu iz sučeonog ili kutnog zavarenog spoja prema rasporedu definiranom normom HRN EN ISO 15614-2 i opterećuju se vlačno na kidalici. Na *Slika 11.* prikazan je raspored izrezivanja epruveta iz sučeonog spoja.



Slika 11. Raspored izrezivanja epruveta iz sučeonog spoja [14]

1 - odbaciti 25 mm

2 - smjer zavarivanja

3 - područje za uzimanje:

- jednog uzorka za ispitivanje čvrstoće
- uzorka za ispitivanje savijanjem

4 - područje za uzorke za dodatna ispitivanja

5 –područje za uzimanje:

- jednog uzorka za ispitivanje čvrstoće
- uzorka za ispitivanje savijanjem

6 – područje za uzimanje:

- jednog uzorka za makroskopsko ispitivanje
- jednog uzorka za mikroskopsko ispitivanje

Mehaničkim ispitivanjem epruveta iz zavarenog spoja određuje se:

- Vlačna čvrstoća najslabijeg mjesta u zavarenom spoju na epruveti zavarenog spoja
- Granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, istezljivost i žilavost na epruveti metala zavara
- Homogenost svojstava po presjeku zavarenog spoja; mjeri se tvrdoća pojedinih zona na makroizbrusku

Dobiveni rezultati ispitivanja uspoređuju se sa svojstvima osnovnog materijala.

Statičko vlačno ispitivanje provodi se u kidalici gdje se epruveta vlačno opterećuje kontinuirano rastućom silom. Pri određenom iznosu vlačne sile, doći će do tečenja materijala, odnosno do granice razvlačenja. Postupak se nastavlja dalje, sila se dodatno povećava do određenog iznosa pri kojem epruveta više ne može podnijeti opterećenje i puca. Vrijednost čvrstoće koju je epruveta postigla u trenutku loma nazivamo vlačnom čvrstoćom.

Epruveta za statički vlačni pokus može se izrezati poprečno na os zavara tako da su u ispitivanju obuhvaćene sve zone zavarenog spoja. Ono što je prilično važno kod ovog ispitivanja je to da lom mora nastati u osnovnom metalu, a ne u zoni zavarenog spoja. Ukoliko se lom pojavio u osnovnom metalu, a ne u zoni zavarenog spoja kažemo da je zona zavarenog spoja superiorna u pogledu vlačne čvrstoće. U slučaju da dođe do loma na mjestu

zavara, potrebno je analizirati podatke o zahtijevanoj minimalnoj čvrstoći osnovnog materijala.

4.2. Kemijske analize

Kemijskim analizama utvrđuje se prisutnost i udio ugljika, nečistoća i legirnih elemenata u pojedinim zonama zavarenog spoja. Kemijska analiza provodi se uzimanjem uzorka strugotine (najčešće postupkom zabušivanja) na određenim mjestima zavarenog spoja.

Ispitivanja se provode u anorgansko-kemijskim laboratorijima kao i metodama poput spektroskopske analize.

4.3. Metalografska ispitivanja

Da bi se provelo metalografsko ispitivanje zavarenih spojeva, potrebna su dva uzorka: mikroizbrusak i makroizbrusak. Uzorci se dobivaju iz punog presjeka postupcima rezanja, brušenja i poliranja te nagrizanja.

Analiza uzoraka provodi se vizualnom kontrolom. Makroizbrusci se mogu pregledati golim okom dok je za mikroizbruske potreban mikroskop.

Ova ispitivanja su neophodna za istraživanje i potvrđivanje pojava koje se javljaju tijekom eksploatacije zavarenog spoja.

4.4. Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenog spoja

Za analizu makrostrukture zavarenog spoja izrađuje se makroizbrusak. Makroizbrusak se dobiva finim brušenjem iz poprečnog presjeka zavarenog spoja, a nakon brušenja površina se nastavlja brusiti brusnim papirom. Veličina brusnog zrna se postupno smanjuje i nakon svakog prolaza smjer brušenja se promijeni za 90°. Tako pripremljena površina spremna je za nagrizanje razblaženom dušičnom kiselinom. Nagrizanje se prekida kada se pojavi jasno izražena struktura temeljitim ispiranjem mlazom vode. Podaci koji se mogu dobiti iz ovog načina ispitivanja su:

- Je li zavar izveden uredno; popunjenost presjeka, ispupčenja, nadvišenje korijena...
- Broj, raspored i veličina slojeva daju uvid u tehnološki proces zavarivanja
- Izgled zone utjecaja topline daje podatke o potrebi naknadne toplinske obrade

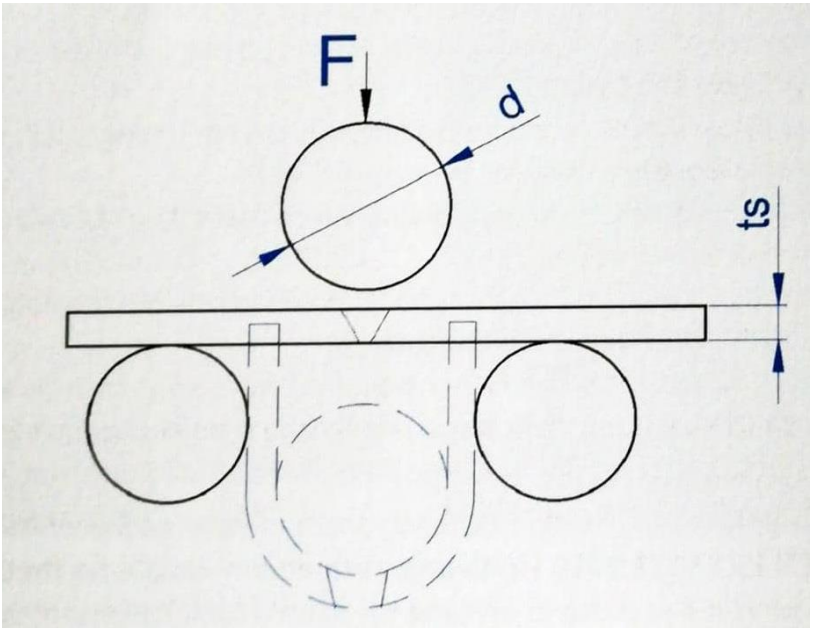
- Ukoliko je presjekom pogođeno mjesto prisutnosti pogreške, dobit će se rezultati o veličini i karakteru pogreške

4.5. Ispitivanje savijanjem

Postupak ispitivanja zavarenog spoja savijanjem provodi se tako da se iz zavarenog spoja izrežu (strojno ili plinski) trake na kojima se zavareni spoj nalazi oko sredine. Uglavnom se ispituju po dvije trake, a njihove dimenzije moraju odgovarati zahtjevanim pravilima. Širina traka ovisit će o debljini presjeka, a za čelik 1,5 puta debljina osnovnog materijala.

Brušenjem se uklanjaju nadvišenja zavara na obje strane presjeka te se uzdužni bridovi blago zaoble.

Daljnje ispitivanje provodi se u jednostavnoj napravi s hidrauličkom prešom i osloncem za savijanje s valjcima. Promjer trna uglavnom iznosi 4 puta debljina presjeka, a razmak bočnih upora mora biti dovoljno velik da se epruveta može potpuno saviti. Važno je da sredina zavara bude na vrhu trna te da jedna epruveta bude okrenuta na lice zavara u zoni istezanja, a druga s korijenom u zoni stezanja. Način ispitivanja savijanjem prikazan je na *Slika 12*.



Slika 12. Princip ispitivanja savijanjem [4]

Tijekom provođenja postupka savijanja obavezno treba promatrati zavareni spoj. U slučaju da dođe do otvorene pukotine, ispitivanje se zaustavlja, pukotina se analizira kako bi se saznao uzrok i tek nakon toga može se nastaviti ispitivanje. Maksimalni kut savijanja je 180°.

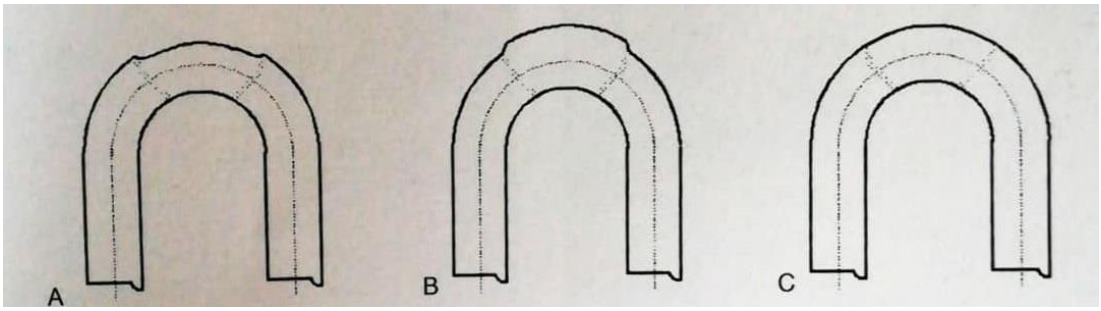
Pri ispitivanju savijanjem moguća su dva događaja:

a) Lom spoja ukazuje na grubu pogrešku u procesu zavarivanja ili loš odabir materijala; lom u zoni utjecaja topline nastaje zbog krivo odabranih parametara zavarivanja; krti lom u zoni utjecaja topline ukazuje na potrebu predgrijavanja

b) Savijanje može završiti bez pojave pukotine, ali ispitivanje još uvijek nije gotovo. Savijena epruveta se pregleda kako bi se uočio jedan od tri osnovna slučaja:

- Udubljeni zavar- nastaje kao posljedica primjene dodatnog materijala s nižim mehaničkim svojstvima od osnovnog materijala
- Ispupčeni zavar- nastaje kada dodatni materijal ima bolja mehanička svojstva od osnovnog materijala s jedinom razlikom da pri višoj čvrstoći ima manju žilavost nego osnovni materijal
- Oštri prijelazi na spojnici zavara i osnovnog materijala; nepovoljni parametri zavarivanja
- Blagi prijelaz iz osnovnog materijala u zavar; dobra kombinacija materijala i parametara zavarivanja

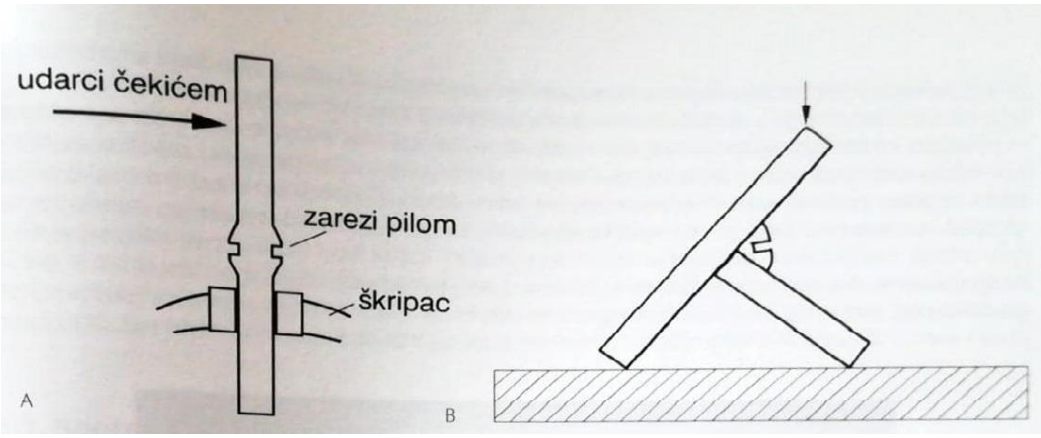
Mogući slučajevi savijene epruvete prikazani su na *Slika 13.*



Slika 13. Izgledi savijenih epruveta [4]

4.6. Ispitivanje lomljenjem

Ispitivanje lomljenjem provodi se prema normi HRN EN ISO 9017:2013. Radi se o jednostavnom ispitivanju kojim se dokazuje homogenost zavara. Ispitivanje se provodi upotrebom epruvete koja se izreže iz ispitne ploče u obliku trake, poprečno na zavareni spoj. Ne provodi se brušenje nadvišenja zavara, nego se na sredini zavara pilom obostrano zareže zarez čija dubina ovisi o izvedbi, bočni ili uzdužni zarez. Lom epruvete postiže se tako da se jedan kraj epruvete stegne u škripac, a udarcima čekića u slobodni kraj slomi epruveta ili se lom može izazvati prešom. Ispitivanje lomljenjem prikazano je na *Slika 14*.



Slika 14. Ispitivanje lomljenjem [4]

A - sučeoni zavar s uzdužnim zavarom; B – kutni zavar s uzdužnim zavarom

5. PRIMJENA NORMI U PODRUČJU ZAVARIVANJA ALUMINIJEVIH LEGURA

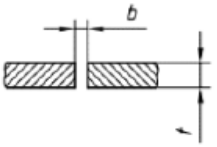
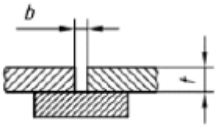
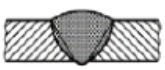
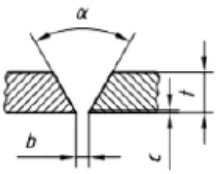
U ovom poglavlju bit će opisane norme koje definiraju oznake aluminijevih legura, pripremu sučeonog spoja za zavarivanje te pripremu ispitnih uzoraka sučeonog spoja aluminijevih legura.

5.1. HRN EN 9692-3:2000 [17]

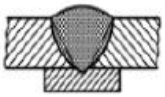
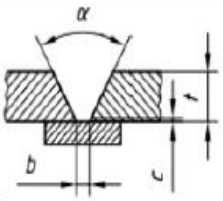
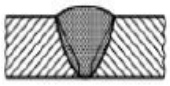
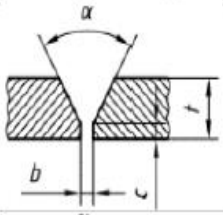
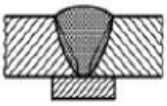
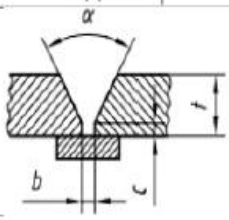
HRN EN 9692-3 je norma koja definira parametre za pripremu spojeva za elektrolučne postupke zavarivanja aluminija i aluminijevih legura (MIG i TIG). Koristi se za zavare s potpunim provarom. Rubovi zavara moraju biti mehanički obrađeni postupcima glodanja, piljenja ili rezanja pri čemu se mora paziti na kvalitetu površine osobito kod rezanja plazma postupkom.

Parametri poput razmaka, kuta ili visine grla definiraju se ovisno o debljini spoja, procesu zavarivanja i poziciji. Ukoliko je potreban veći razmak materijala ($\geq$ 1,5 mm), preporučuje se upotreba podloga (*Slika 15., Slika 16.*)

Potrebno je što više izbjegavati čišćenje površine legure sa sredstvom na bazi mineralnih ulja.

Debljina osnovnog materijala t	Oznaka	Ilustracija	Presjek	Kut α, β	Razmak b	Visina grla c
$t \leq 4$	‖			-	$b \leq 2$	-
$2 \leq t \leq 4$	‖ MR ‖ M			-	$b \leq 1,5$	-
$3 \leq t \leq 5$	V			$\alpha \geq 50°$	$b \leq 3$	$c \leq 2$
				$60° \leq \alpha \leq 90°$	$b \leq 2$	

Slika 15. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge [17]

Debljina osnovnog materijala t	Oznaka	Ilustracija	Presjek	Kut α, β	Razmak b	Visina grla c
3 ≤ t ≤ 5	MR M			60° ≤ α ≤ 90°	b ≤ 4	c ≤ 2
3 ≤ t ≤ 15	Y			α ≥ 50°	b ≤ 2	c ≤ 2
6 ≤ t ≤ 25	Y MR Y M			α ≥ 50°	4 ≤ b ≤ 10	c = 3

Slika 16. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge (nastavak)

5.2. EN 573 – 3:2009 [16]

Norma EN 573 pod općim nazivom Aluminij i aluminijeve legure – kemijski sastav i oblik gotovih proizvoda obuhvaća sljedeće dijelove:

- 1. dio- numerički sustav oznake
- 2. dio- oznaku na temelju kemijskog sastava
- 3. dio- kemijski sastav i oblik proizvoda
- 4. dio- oblike proizvoda
- 5. dio- kodifikaciju standardiziranih kovanih proizvoda

Norma EN 573 određuje granične vrijednosti kemijskog sastava kovanog aluminija i njegovih legura kao i gotovih proizvoda. Prilikom označavanja pojedine aluminijeve legure, u numeričku oznaku se stavljaju i maseni udjeli legirnih elemenata i nečistoća. Normirane granične vrijednosti legirnih elemenata i nečistoća, izražene u postotku mase, stavljaju se na sljedeća decimalna mjesta:

Tablica 6. Decimalno mjesto masenih udjela legirnog elementa i nečistoća [16]

Maseni udio legirnog elementa i nečistoća, %	Decimalno mjesto
< 0,001	**0,000X**
0,001< 0,01	**0,00X**
0,01< 0,1 - **Čisti aluminij, rafinirani** - **Ostali**	 **0,0XX** **0,0X**
0,1- 0,55	**0,XX**
> 0,55	**0,X; X,X; XX,X**

5.3. ISO 4136 – 2001 [15]

Norma ISO 4136 – 2001 primjenjuje se za statičko vlačno ispitivanje zavarenog spoja kako bi se odredila vlačna čvrstoća i mjesto loma zavarenog spoja. Ispitni uzorak, odnosno epruveta uzima se iz poprečnog presjeka zavarenog spoja. Ispitivanje se provodi na sobnoj temperaturi s kontinuirano rastućim opterećenjem. Norma se primjenjuje za sve postupke zavarivanja metala elektrolučnim postupcima. Epruveta kao i komad iz kojeg je izrezana epruveta moraju biti označeni, a epruveta izrezana tako da os zavara ostane u središtu duljine epruvete.

Ispitni uzorci se izrađuju na normirane dimenzije i geometrijski oblik. Za određivanje ostalih dimenzija epruvete potrebno je poznavati debljinu limova iz kojih se uzima uzorak. Na zavarenom spoju kao i na ispitnom uzorku ne smije se provoditi nikakva toplinska obrada osim u posebnim slučajevima. Također i prilikom rezanja epruvete iz limova, bilo da se radi o toplinskoj ili mehaničkoj obradi, ni na koji način ne smije se utjecati na promjenu mehaničkih svojstava zavarenog spoja.

Na kraju ispitivanja sastavlja se izvještaj u kojem se navode sljedeći podaci:

- Preporuke norme ISO 4136 – 2001
- Vrsta i lokacija ispitnog uzorka
- Temperatura ispitivanja

- Mjesto loma
- Vrsta i dimenzije pogrešaka

5.4. BS EN ISO 5173 – 2010 [23]

Ova norma primjenjuje se za ispitivanje mehaničkih svojstava spojeva zavarenih elektrolučnim postupcima zavarivanja. Definira razorne metode ispitivanja savijanjem korijena i lica zavara većih ili manjih presjeka. U slučajevima kada se osnovni i dodatni materijal značajno razlikuju po svojim fizikalnim i kemijskim svojstvima, norma preporučuje ispitivanje savijanjem korijena i lica zavara umjesto statičkog vlačnog ispitivanja. Ispitivanje se provodi na sobnoj temperaturi.

Norma također definira potrebnu geometriju i dimenzije epruveta kako bi postupak bio proveden ispravno. Za ispitivanje savijanjem, epruveta se uzima iz poprečnog presjeka zavarenog spoja ili iz dijela spoja kod kojeg os zavara prolazi središtem tog spoja. Za statičko vlačno ispitivanje epruveta se uzima iz uzdužnog presjeka zavarenog spoja.

Svaki ispitni uzorak kao i ispitni komad iz kojeg je uzet uzorak moraju biti označeni kako bi identificirali mjesto iz kojeg je uzet ispitni komad ili uzorak. Prije ispitivanja ne preporučuje se provođenje bilo kakve toplinske obrade osim u slučajevima kada je obrada neophodna i mora se navesti u izvještaju.

Debljina epruveta koje se primjenjuju za ispitivanje savijanjem korijena i lica zavara treba biti jednaka debljini komada iz kojeg je epruveta uzeta. Maksimalna debljina ispitnog komada je 30 mm. Ukoliko je debljina ispitnog komada veća od 10 mm, debljinu epruvete je moguće smanjiti strojnom obradom s jedne strane na 10 ± 0,5 mm. U posebnim slučajevima dozvoljava se izrada epruveta debljine veće od 10 ± 0,5 mm.

5.5. HRN EN ISO 15614 – 2:2005 [14]

Norma HRN EN ISO 15614:2005 pod općim nazivom Svojstva i vrste postupaka zavarivanja metala definira postupke ispitivanja zavarenog spoja.

Ovdje će biti prikazan samo drugi dio norme koji se odnosi na elektrolučno zavarivanje aluminija i aluminijevih legura i to za sljedeće postupke zavarivanja: MIG, TIG i plazma zavarivanje.

Norma definira uvjete koje je potrebno ispuniti za pravilno provođenje ispitivanja zavarenih spojeva i provodi kvalifikaciju postupaka zavarivanja.

Na ispitnom uzorku, normiranih dimenzija, određuju se svojstva zavarenog spoja (vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, dopušteno naprezanje itd.). Svi ispitni uzorci (osim za ispitivanje kutnog spoja ili račvastih spojeva) trebali bi imati istu debljinu. Priprema i zavarivanje ispitnih uzoraka trebaju biti takvi da uključuju dozvoljena odstupanja parametara i stvarne uvjete u kojima će se provoditi zavarivanje materijala kojeg predstavljaju. Provode se dvije vrste ispitivanja: razorna i nerazorna. Ukoliko se provode razorna ispitivanja, ispitni uzorci (epruvete) režu se iz točno određenih područja zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti ispitivanja koje će se provoditi. Jedan takav primjer prikazan je na *Slika 11.* gdje je prikazan raspored rezanja epruveta na sučeonom spoju aluminijeve legure. Raspored rezanja epruveta ovisi o vrsti spoja na kojem će se provoditi ispitivanje. Kod nerazornih ispitivanja, nema rezanja ispitnih uzoraka nego se pomoću metoda kao što su vizualna kontrola, magnetska, metoda prozvučivanja i prozračivanja otkrivaju moguće pogreške i mjesta na kojima se pojavljuju. Ispitivanjem se mjere svojstva zavarenog spoja koja se kasnije uspoređuju sa dopuštenim vrijednostima i ocjenjuje se zadovoljava li zavar definirane zahtjeve.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada ispitivana su mehanička svojstva sučeonog spoja limova aluminijeve legure EN AW 5083 H111 prema zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-2:2007. Pri zavarivanju uzorka aluminijeve legure primijenjen je MIG impulsni način zavarivanja sa ili bez uporabe keramičke podloge. Iz zavarenog spoja izrezani su uzorci za makroanalizu i statičko vlačno ispitivanje.

6.1. Osnovni i dodatni materijal

6.1.1. Svojstva i kemijski sastav osnovnog materijala EN AW 5083 H111

Mehanička svojstva aluminijeve legure EN AW 5083 H111 prikazana su u *Tablica 3*. dok je kemijski sastav legure dan u *Tablica 7.*

Tablica 7. Kemijski sastav legure EN AW 5083 H111 [13]

Al	92,4 - 95,6 %
Cr	0,05 – 0,25 %
Cu	< 0,10 %
Fe	< 0,40 %
Mg	4,0 – 4,9 %
Mn	0,4 – 1,0 %
Si	< 0,40 %
Zn	< 0,25 %

6.1.2. Mehanička svojstva i kemijski sastav dodatnog materijala

Kao dodatni materijal korištena je žica izrađena od aluminijeve legure EN AW 5183, promjera 1,2 mm tvorničkog naziva AUTOROD 5183 tvrtke ESAB. Kemijski sastav i mehanička svojstva dodatnog materijala u zavarenom spoju dani su u nastavku.

Tablica 8. Kemijski sastav dodatnog materijala [19]

Al	Mg	Zn	Fe	Cu	Ti	Si	Mn	Cr
94,2	4,9	0,01	0,13	0,01	0,1	0,04	0,65	0,08

Tablica 9. Mehanička svojstva dodatnog materijala u zavarenom spoju [20]

Vlačna čvrstoća [MPa]	Granica elastičnosti [MPa]	Istezanje [%]	Gustoća [g/cm^3]
275, min	125, min	17	2,66

6.2. Izvor struje za MIG zavarivanje

Zavarivanje sučeonog spoja limova aluminijeve legure provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje FSB, postupkom impulsnog MIG zavarivanja pri čemu je Welbee P400 korišten kao izvor struje (*Slika 17.*).



Slika 17. Izvor struje za impulsno MIG zavarivanje

Tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje prikazane su tablično.

Tablica 10. Tehničke specifikacije izvora struje za MIG zavarivanje

Broj faza	3
Frekvencija [Hz]	50
Nazivni ulazni napon [V]	400 +/- 15%
Ulazna snaga [kW]	17,4
Nazivna struja zavarivanja [A]	400
Nazivni napon opterećenja [V]	34
Raspon struje zavarivanja [A]	30 - 400
Raspon napona za zavarivanje [V]	12 - 34
Masa [kg]	62
Dimenzije [visina, debljina, širina]	395 x 710 x 592
Statička karakteristika	CV

6.3. Ostala oprema

Zavarivanje je izvedeno na uređaju za automatizirano gibanje pištolja uz primjenu keramičke i bakrene podloge. Keramička podloga korištena je pri zavarivanju uzorka A, a bakrena pri zavarivanju uzorka B. Pištolj je nagnut u smjeru suprotnom od smjera zavarivanja kako bi se pospješilo čišćenje oksidne prevlake.



Slika 18. Automatizirano vođenje pištolja

Prikaz keramičke i bakrene podloge



Slika 19. Keramička podloga

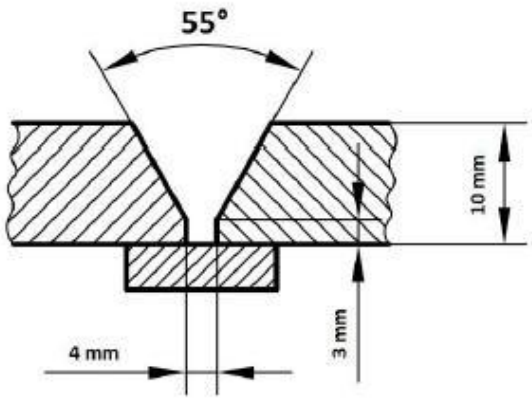
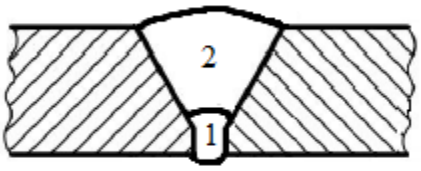


Slika 20. Bakrena podloga

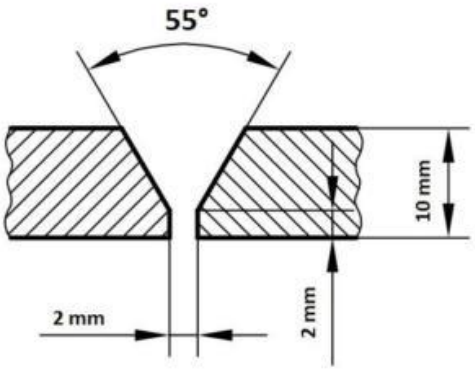
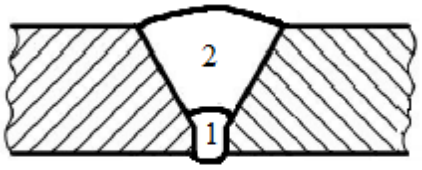
6.4. Zavarivanje uzoraka

Specifikacije postupka zavarivanja uzoraka A i B prikazane su tablično.

Tablica 11. Specifikacije zavarivanja uzorka A

<table>
<tr><td colspan="5">Mjesto: Zagreb
Oznaka uputstva za zavarivanje (WPS): 09/2018
Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR):
Poduzeće:
Ime zavarivača:
Postupak zavarivanja: 131
Vrsta zavara i spoj: sučeoni
Pojedinosti pripreme žlijeba: V- priprema, keramička podloga</td><td colspan="4">Ispitno mjesto: FSB, Zagreb
Način pripreme rubova i čišćenje:
Specifikacija osnovnog materijala: AW 5083
HRN EN ISO 18273:2016
Debljina osnovnog materijala: 10 mm
Položaj zavarivanja: PA
Tehnika zavarivanja: Neutralna</td></tr>
<tr><td colspan="5">Oblikovanje zavarenog spoja</td><td colspan="4">Redoslijed zavarivanja</td></tr>
<tr><td colspan="5">
</td><td colspan="4">
</td></tr>
<tr><td>Slo j</td><td>Postupak zavarivanja</td><td>Promjer dodatnog materijala [mm]</td><td>Jakost struje zavarivanja [A]</td><td>Napon zavarivanja [V]</td><td>Vrsta struje, polaritet</td><td>Brzina dodavanja žice [m/min]</td><td>Brzina zavarivanja [mm/min]</td><td>Unos topline [kJ/mm]</td></tr>
<tr><td>1</td><td>131</td><td>1,2</td><td>163</td><td>21,5</td><td>DC +</td><td>9</td><td>290</td><td>0,58</td></tr>
<tr><td>2</td><td>131</td><td>1,2</td><td>197</td><td>23,2</td><td>DC +</td><td>11,5</td><td>290</td><td>0,756</td></tr>
<tr><td colspan="5">Dodatni materijal: ESAB, Autorod 5183
Zaštitni plin/prašak: 100% Argon
Protok plina: 16 l/min
Temperatura predgrijavanja: -</td><td colspan="4">Dodatne informacije:
1. Postaviti limove tako da kut između bude 55 °
2. Razmak između limova mora biti 4 mm
3. Zalijepiti keramičku podlogu tako da mjesto zavara bude iznad podloge</td></tr>
</table>

Tablica 12. Specifikacije zavarivanja uzorka B

<table>
<tr><td colspan="5">Mjesto: Zagreb
Oznaka uputstva za zavarivanje (WPS): 09/2018
Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR):
Poduzeće:
Ime zavarivača:
Postupak zavarivanja: 131
Vrsta zavara i spoj: sučeoni
Pojedinosti pripreme žlijeba: V- priprema, bakrena podloga</td><td colspan="4">Ispitno mjesto: FSB, Zagreb
Način pripreme rubova i čišćenje:
Specifikacija osnovnog materijala: AW 5083
HRN EN ISO 18273:2016
Debljina osnovnog materijala: 10 mm
Položaj zavarivanja: PA
Tehnika zavarivanja: Neutralna</td></tr>
<tr><td colspan="5">Oblikovanje zavarenog spoja</td><td colspan="4">Redoslijed zavarivanja</td></tr>
<tr><td colspan="5">
</td><td colspan="4">
</td></tr>
<tr><td>Sloj</td><td>Postupak zavarivanja</td><td>Promjer dodatnog materijala [mm]</td><td>Jakost struje zavarivanja [A]</td><td>Napon zavarivanja [V]</td><td>Vrsta struje, polaritet</td><td>Brzina dodavanja žice [m/min]</td><td>Brzina zavarivanja [mm/min]</td><td>Unos topline [kJ/mm]</td></tr>
<tr><td>1</td><td>131</td><td>1,2</td><td>160</td><td>21,5</td><td>DC +</td><td>9</td><td>290</td><td>0,569</td></tr>
<tr><td>2</td><td>131</td><td>1,2</td><td>183</td><td>22,5</td><td>DC +</td><td>11,5</td><td>290</td><td>0,681</td></tr>
<tr><td colspan="5">Dodatni materijal: ESAB, Autorod 5183
Zaštitni plin/prašak: 100% Argon
Protok plina: 16 l/min
Temperatura predgrijavanja: -</td><td colspan="4">Dodatne informacije:
1. Postaviti limove tako da kut između bude 55 °
2. Razmak između limova mora biti 2 mm</td></tr>
</table>

Količina topline koja se unese pri zavarivanju računa se iz izraza:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_z \cdot 1000} \cdot \eta, \qquad [\mathrm{kJ/mm}]$$

Gdje je:

U - napon zavarivanja [V]

I – jakost struje zavarivanja [A]

v_z – brzina zavarivanja [mm/min]

η- stupanj iskoristivosti (prema HRN EN 1011-1 za MIG postupak iznosi 0,8)

Prikaz lica i korijena zavara uzoraka A i B



Lice zavara uzorka A Korijen zavara uzorka A

Slika 21. Lice i korijen zavara uzorka A

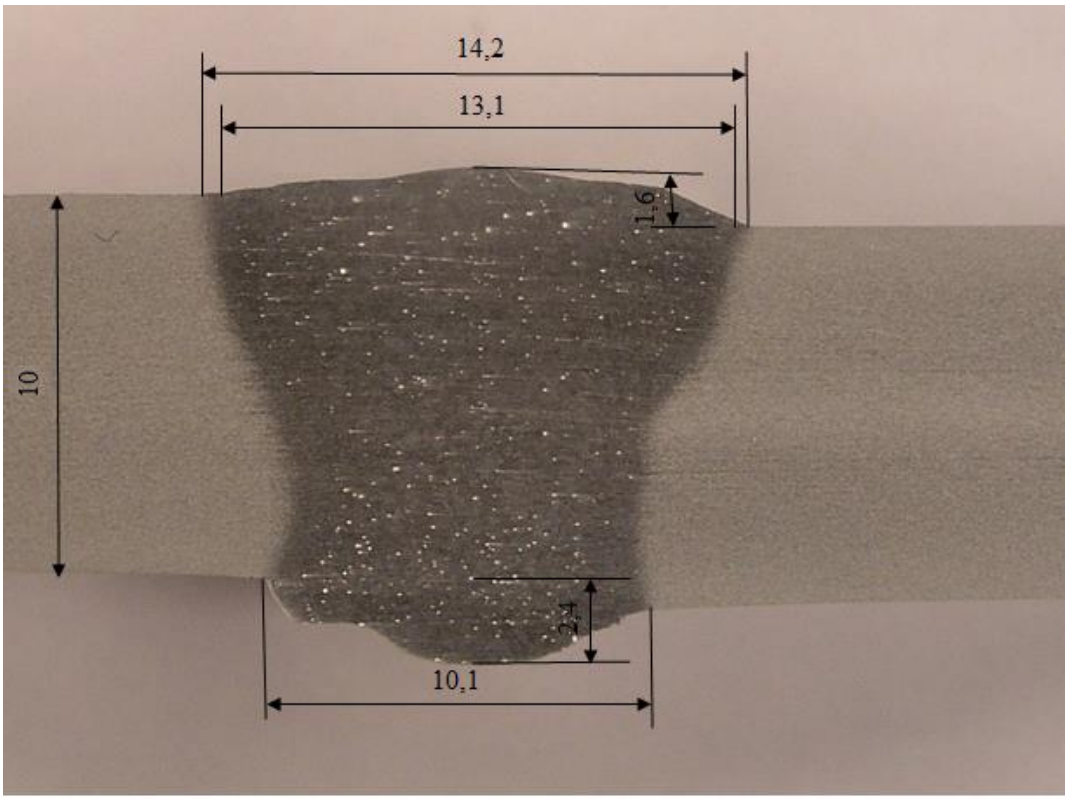


Lice zavara uzorka B Korijen zavara uzorka B

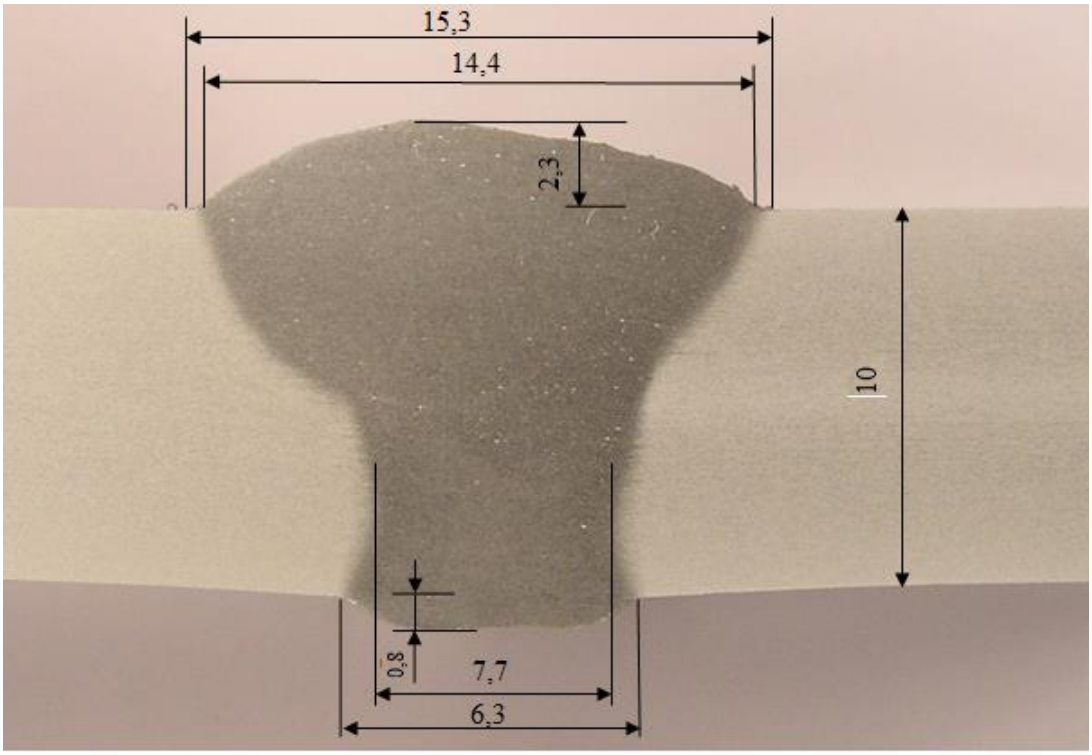
Slika 22. Lice i korijen zavara uzorka B

6.5. Makroanaliza

Uzorci za makroanalizu izrezani su u Laboratoriju za zavarivanje, FSB na stroju VANAD Proxima plazma postupkom rezanja. Rezano je pri struji od 80 A i brzini rezanja od 70 cm/min. Nakon rezanja, uzorci su brušeni brusnim papirima sljedećim redoslijedom zrnatosti: P180, P240, P500, P1000. Kako bi pojedine zone zavarenog spoja bile vidljivije, provedeno je kemijsko nagrizanje površine epruvete. Nagrizanje predstavlja namjerno kratkotrajno otapanje aluminija. Nakon nagrizanja, makroizbrusci se ispiru u vodi kako bi se spriječilo daljnje otapanje aluminija. Za kemijsko nagrizanje korištena je otopina 5% fluorovodične kiseline, 20% dušične kiseline i 20% klorovodične kiseline u vodi. Nagrizanje se provodilo u trajanju od oko 40 sekundi. Mjerenje geometrije uzorka A i uzorka B provedeno je u programu ImageJ (*Slika 23.* i *Slika 24.*)



Slika 23. Dimenzije uzorka A



Slika 24. Dimenzije uzorka B

6.6. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala, FSB, na univerzalnoj hidrauličnoj kidalici.



Slika 25. Univerzalna kidalica

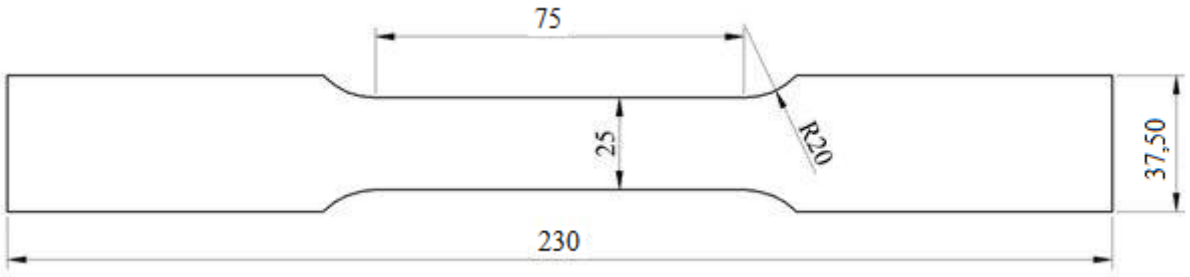
Specifikacije kidalice

Tablica 13. Specifikacije kidalice

Vrsta kidalice	univerzalna, hidraulična
Proizvođač	WPM, Njemačka
Model	EU 40 MOD
Serijski broj	990–06–83-35
Radno područje	0 - 400 kN

Ispitivanje je provedeno na epruvetama koje su izrezane iz sučeonog spoja limova aluminijeve legure AW EN 5083 H111 prema HRN EN ISO 15614-2 kako je to već ranije

prikazano na *Slika 11*. Epruvete su obrađene postupkom glodanja na normirane dimenzije i geometrijski oblik prema normi ISO 4136-2001. Dimenzije epruvete dane su na *Slika 26.*



Slika 26. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje

Ispitivanje se provodilo na 4 epruvete s ugraviranim oznakama 0 i 1 (*Slika 27.*).



Slika 27. Prikaz epruveta prije ispitivanja

Provedena su 4 ispitivanja, a brzina ispitivanja je za sva 4 slučaja bila jednaka i iznosila je 4 mm/min. Epruveta je postavljena u stezne čeljusti kidalice i opterećena je silom koja kontinuirano raste.

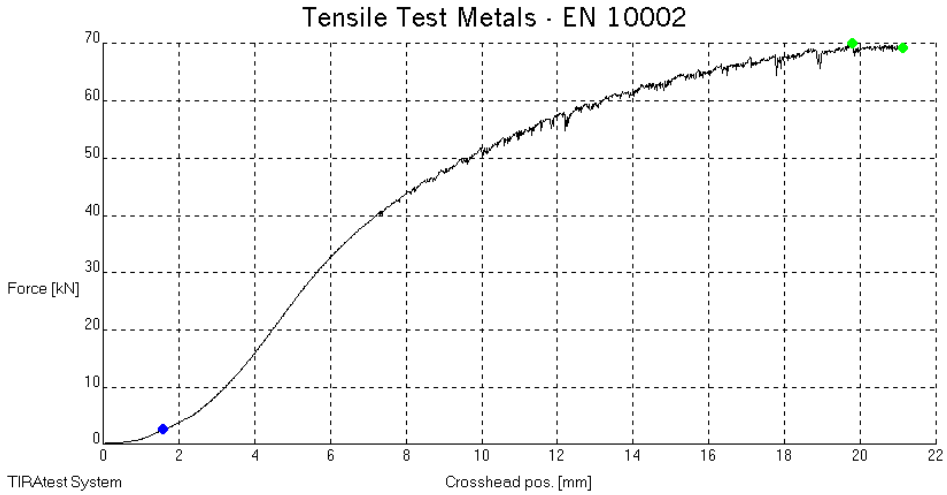
U početnim trenutcima, dok je sila još mala, na epruveti se ne uočavaju nikakve promjene. Kada sila dođe do određenog iznosa, na epruveti se počinje stvarati „vrat“ pri čemu se definira granica razvlačenja R_e. Nakon toga, sila nastavlja kontinuirano rasti sve dok opterećenje postane toliko veliko da ga epruveta više ne može podnijeti te naglo pukne. Na *Slika 28.* prikazano je kako izgledaju epruvete nakon ispitivanja.



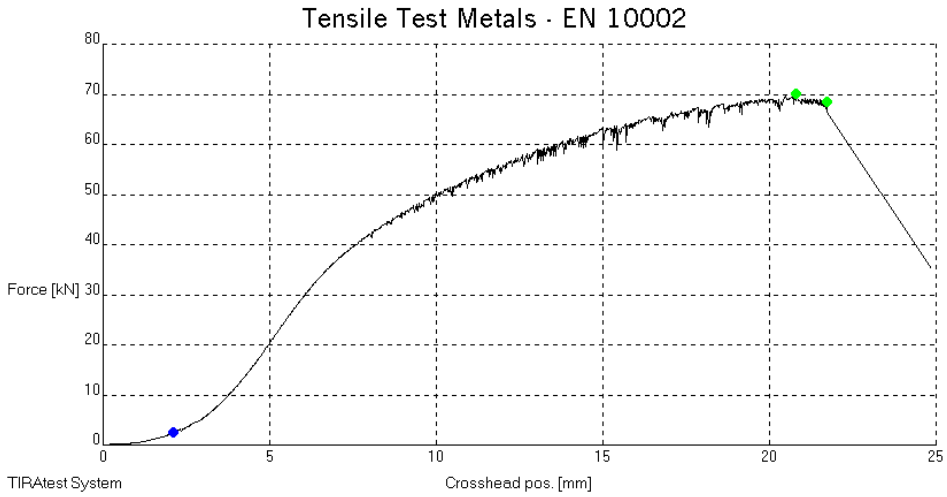
Slika 28. Prikaz epruveta nakon ispitivanja

Cjelokupan proces ispitivanja praćen je u softverskom programu TIRAtest System u kojem se mogu očitati točni rezultati ispitivanja, odnosno maksimalna sila koju epruveta može podnijeti te vlačna čvrstoća koju materijal ima u tom trenutku. Rezultati su prikazani numerički i grafički (dijagrami).

Za epruvete s oznakom 0 grafički prikaz rezultata za dva ispitivanja dan je na slikama.



Slika 29. Dijagram sila - istezanje za epruvetu 0/1



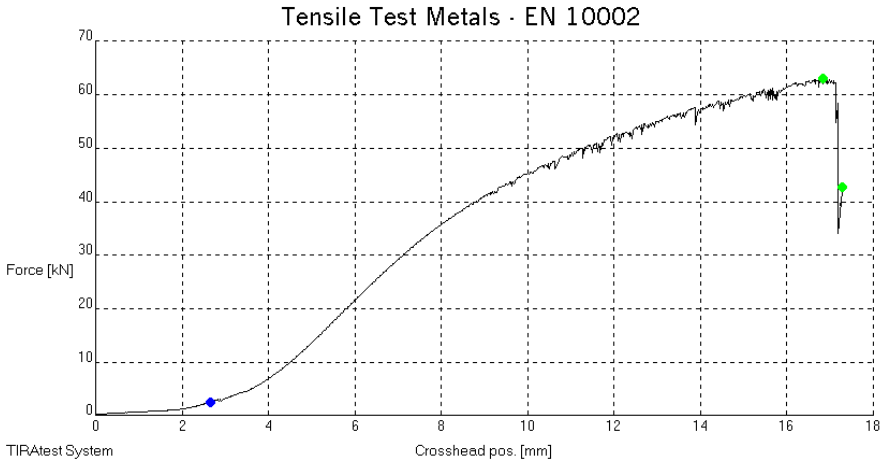
Slika 30. Dijagram sila – istezanje za epruveti 0/2

Rezultati ispitivanja epruveta oznake 0 numerički su prikazani u *Tablica 14.*. Maksimalnu silu koju epruveta može podnijeti moguće je očitati i s prikazanih dijagrama.

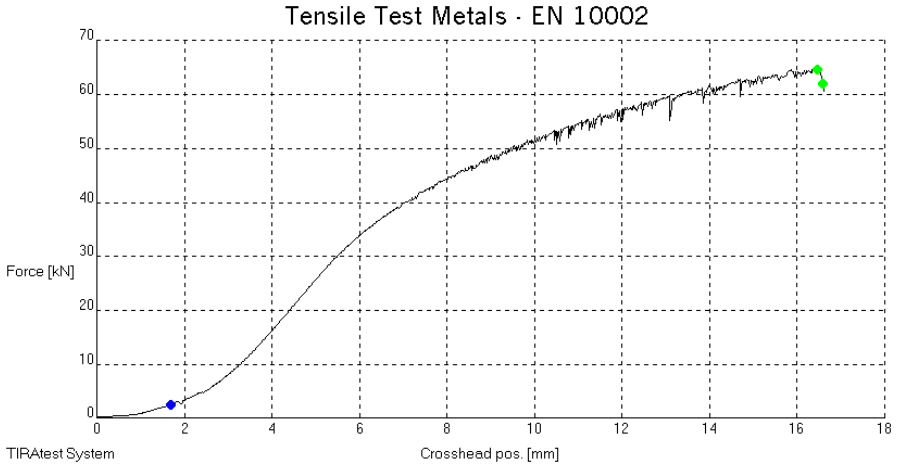
Tablica 14. Numerički rezultati ispitivanja epruveta oznake 0

Epruveta/ispitivanje	Maksimalna sila F_m, [kN]	Maksimalna vlačna čvrstoća R_m, [N/mm^2]
0/1	69,98	274,16
0/2	70,02	277,45

Za epruvete s oznakom 1 grafički prikaz rezultata ispitivanja dan je na slikama



Slika 31. Dijagram sila - istezanje za epruvetu 1/1



Slika 32. Dijagram sila - istezanje za epruvetu 1/2

Rezultati ispitivanja epruveta oznake 1 numerički su prikazani u Tablica 15. Maksimalnu silu koju epruveta može podnijeti moguće je očitati s prethodnih dijagrama.

Tablica 15. Numerički rezultati ispitivanja epruveta oznake 1

Epruveta/ispitivanje	**Maksimalna sila F_m, [kN]**	**Maksimalna vlačna čvrstoća R_m, [N/mm²]**
1/1	62,88	251,26
1/2	64,63	257,91

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da epruvete oznake 1 imaju manju vlačnu čvrstoću te u skladu s tim mogu podnijeti manju silu nego epruvete s oznakom 0. Epruveta 0/1 ima jako lošu granicu razvlačenja što se može uočiti i na slici te je došlo do relativno jakog i naglog loma. Manja vlačna čvrstoća može biti posljedica prisutnosti raznih uključaka poput oksida i nečistoća u materijalu. Važno je napomenuti da se lom dogodio na osnovnom materijalu, a ne na zavaru što je izuzetno bitna karakteristika za zavarene spojeve.

7. ZAKLJUČAK

Vlačna čvrstoća čistog Al iznosi oko 40 MPa što i nije najbolje rješenje za odabir čistog Al u strojogradnji. Stoga se najviše primjenjuju Al legure koje legiranjem s određenim metalima poput Mg, Cu, Si dobivaju mnogo bolja mehanička svojstva.

Eksperimentalni dio sastoji se od zavarivanja limova Al legure EN AW 5083 H111 i ispitivanja mehaničkih svojstava sučeonog spoja limova prema normi HRN EN ISO 15614-2.

Limovi su izrađeni od legure EN AW 5083 H111 čiji je osnovni legirni element Mg, a najveću primjenu nalazi u brodogradnji zbog dobre vlačne čvrstoće (oko 300 MPa), male gustoće i svojstva nemagnetičnosti. Zavarivanje je provedeno MIG postupkom kako bi se postigla što bolja kvaliteta zavara. Za ispitivanje mehaničkih svojstava sučeonog spoja limova provedene su dvije razorne metode: statičko vlačno ispitivanje i makroanaliza. Kod statičko vlačnog ispitivanja iz zavarenog spoja izrezane su 4 epruvete normiranih dimenzija. Prema [27], vlačna čvrstoća Al lima 5083 H111 iznosi 275 MPa. Analizom rezultata ispitivanja uočava se da je samo jedna epruveta imala vlačnu čvrstoću veću od minimalne dok ostale tri nisu zadovoljile uvjet čvrstoće što može ovisiti o specifikacijama proizvoda pojedinog proizvođača i anizotropnosti materijala. Budući da se lom na svakoj epruveti dogodio na osnovnom, a ne na dodatnom materijalu, zaključuje se da je vlačna čvrstoća dodatnog materijala u zavarenom spoju bila iznad minimalne vrijednosti od 275 MPa. Iz sučeonog spoja limova izrezani su i uzorci za makroanalizu tako da obuhvaćaju sve zone zavarenog spoja. Makroanalizom je ustanovljeno da je struktura zavara homogena te da su u zavaru prisutne sitne pore (μm) koje nastaju upijanjem plinova iz okoline preko elektrode ili iz nečistoća na površini osnovnog materijala. Nisu uočene pogreške poput pukotina ili uključaka, korijen zavara je dobro provaren i nema nalijepljenih slojeva taline. Visina nadvišenja lica i korijena zavara nije znatno velika u odnosu na rub osnovnog metala što potvrđuje da je zavarivanje izvedeno s odgovarajućim parametrima i dobrom tehnikom rada. Zaključno, kvaliteta zavara ovisit će o pravilnom izboru parametara, dobroj zaštiti procesa zavarivanja, pripremi spoja i tehnici rada.

LITERATURA

[1] Ćurić, T.: MIG zavarivanje Al legura, završni rad, FSB, Zagreb, 2017.

[2] Kralj, S., Andrić, Š., Kožuh, Z.: Zavarivački i srodni postupci, FSB, Zagreb, 2015.

[3] Grubišić, M.: Brodske konstrukcije, FSB, Zagreb, 1992.

[4] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M., Garašić, I.: Pogreške u zavarenim spojevima, FSB, Zagreb, 2015.

[5] Kovačiček, F., Indof, J., Filetin, T.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb,, 2009.

[6] Skejić, D., Boko, I., Torić, N.: Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije, Građevinar, 2015.

[7] Garašić, I.: Zavarivanje, predavanja, FSB, 2016.

[8] Garašić, I.: Aluminij i aluminijeve legure, FSB, Zagreb, pdf, 2016.

[9] Filetin, T., Ćorić D.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, pdf, 2010.

[10] https://hr.wikipedia.org/wiki/Aluminij – dostupno 25. 8. 2018.

[11] http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html. – dostupno 25.8.2018.

[12] http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html. – dostupno 25. 8. 2018.

[13] http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bd6317b19dd94faf8bff851e4f339e88 – dostupno 3.9.2018.

[14] Norma HRN EN ISO 15614 - 2, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – 2. dio: Elektrolučno zavarivanje aluminija i njegovih legura, pdf, 2007.

[15] Norma ISO 4136 - 2001, Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test, pdf, 2001.

[16] Norma BS EN 573 - 3:2009, Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - 3. dio: Chemical composition and form of wrought products, pdf, 2009.

[17] Norma HRN ISO 9692 - 3:2000, Zavarivanje i srodni procesi – Preporuke za pripremu spoja – 3. dio: MIG i TIG zavarivanje aluminija i aluminijskih legura

[18] Sinanović, A.: Primjena keramičkih podloga kod MIG zavarivanja aluminija, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2016.

[19] http://www.esab.co.uk/gb/en/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410938&tab=2 – dostupno 24. 10. 2018.

[20] http://www.eurocardis.com/hojastecnicas/hilosaluminio/OKAutrod5183.pdf – dostupno 24.10. 2018.

[21] http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml - dostupno 2.9.2018.

[22] Mathers, G.: The welding of aluminium and its alloys, Cambridge, 2002.

[23] Norma BS EN ISO 5173:2010, Destructive tests on welds in metallic materials – Bend tests

[24] Skillingberg, M.: Aluminum st sea: Speed, endurance and afordability. The Aluminum association, 2009.

[25] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426843813-0-im_oznacivanje-al.ppt - dostupno 31.8.2018.

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

[27] http://ba.signi-aluminio.com/aluminum-plate-sheet/marine-aluminum-plate-sheet/5083-mmarine-grade-aluminum-plate-sheet.html - dostupno 25.1.2019.

PRILOZI

I. CD-R disc