

MIG zavarivanje aluminijskih legura primjenom dvostrukog pulsa

Valenta, Fran

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:797320>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Fran Valenta

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Fran Valenta

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Ivici Garašiću i asistentici dr.sc. Maji Jurici na stručnoj pomoći i strpljenju u izradi ovog rada.

Također se zahvaljujem laborantima Katedre za zavarene konstrukcije koji su pružili stručnu pomoć prilikom izrade ovog rada te omogućili kvalitetno izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Fran Valenta



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: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Fran Valenta** Mat. br.: 0035211453

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MIG zavarivanje aluminijskih legura primjenom dvostrukog pulsa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Double pulse MIG welding of aluminium alloys**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je proučiti primjenu i zavarljivost aluminijskih legura, te navesti i opisati tehnologije zavarivanja primjenjive za zavarivanje aluminijskih legura. Potrebno je navesti načine prijenosa metala u električnom luku za različita područja parametara zavarivanja kod MIG postupka s posebnim naglaskom na impulsni način prijenosa metala.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno definirati utjecaj parametara MIG zavarivanja dvostrukim pulsom na kvalitetu i oblik zavarenog spoja. Dobiveni zavareni spoj potrebno je podvrgnuti razornom i nerazornom ispitivanju, te na temelju dobivenih podataka ocijeniti adekvatnost odabrane tehnologije.

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

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:


Izv.prof.dr.sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE.....	3
2.1. Aluminij	3
2.1.1. Proizvodnja aluminija	3
2.1.1.1. Boksit	3
2.1.1.2. Glinica.....	4
2.2. Aluminijske legure	6
2.2.1. Podjela aluminijskih legura.....	7
2.2.1.1. Lijewane legure.....	7
2.2.1.1.1. Osnovne značajke lijevanih legura.....	8
2.2.1.2. Gnječene legure	9
2.2.1.2.2. Osnovne karakteristike precipitacijski očvrstivih legura	10
2.3. Zavarljivost	13
2.3.1. Poroznost.....	13
2.3.2. Uklanjanje oksidnog sloja.....	14
2.3.3. Redukcija čvrstoće u području zavara i zone utjecaja topline	16
2.3.4. Tople pukotine	17
2.4. Primjena	19
2.4.1. Primjena u autoindustriji.....	20
2.4.2. Primjena u brodogradnji	21
2.4.3. Primjena u zrakoplovnoj industriji.....	22
3. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ALUMINIJSKIH LEGURA.....	24
3.1. MIG postupak zavarivanja	24
3.1.1. Oprema	26
3.1.1.1. Pištolj za zavarivanje	26
3.1.1.2. Dodavač žice	26
3.1.2. Zaštitni plinovi	28
3.1.3. Prijenos metala.....	29
3.1.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima.....	29
3.1.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom	30
3.1.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom.....	30
3.1.4. Impulsni način prijenosa metala	31
3.1.4.1. Zavarivanje dvostukim pulsom.....	34
3.2. TIG postupak zavarivanja	36
3.3. Plazma postupak zavarivanja	38

3.4. Zavarivanje laserom	40
3.5. Elektrootporno zavarivanje	41
4. EKSPERIMENTALNI RAD	43
4.1. Oprema za zavarivanje	43
4.2. Osnovni i dodatni materijal	44
4.3. Postupak izrade	46
4.4. Analiza zavara	47
4.5. Analiza makroizbrusaka	49
5. ZAKLJUČAK	56
LITERATURA	58

POPIS SLIKA

Slika 1.	Dijagram Bayerovog postupka [5]	5
Slika 2.	Grafički prikazana topljivost vodika u aluminiju [1]	14
Slika 3.	Ponašanje elektrode u ovisnosti o polu spajanja i vrsti struje [1]	15
Slika 4.	Promjene tvrdoće kod konstantnih unosa topline u ZUT-u [10].....	17
Slika 5.	Utjecaj legirnih elemenata na pojavu pukotina u zavarenom spoju [10]	18
Slika 6.	Utjecaj određenih legirnih elemenata na stvaranje pukotina kod legura s više legirnih elemenata [10].....	19
Slika 7.	Najnoviji model Range Rover-a s aluminijskom karoserijom [12]	20
Slika 8.	Poznati njemački cepelin Graf Zeppelin [12].....	22
Slika 9.	Najveći teretni zrakoplov na svijetu, Antonov An-124 Ruslan [12].....	23
Slika 10.	Prikaz dijelova sapnice i zavara kod MIG postupka [1]	25
Slika 11.	Pištolj za zavarivanje MIG postupkom u poprečnom presjeku [19].....	26
Slika 12.	„Push“ sustav dodavanja žice [20]	27
Slika 13.	„Push-pull“ sustav dodavanja žice [20].....	28
Slika 14.	Usporedba utjecaja helija i argona na širinu te profil zavara [21].....	29
Slika 15.	Prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [19]	30
Slika 16.	Prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [19].....	31
Slika 17.	Grafički prikaz faza u prijenosu metala kod impulsnog zavarivanja [18]	32
Slika 18.	Grafički prikazan impulsni postupak zavarivanja i otkidanje kapljice [9].....	33
Slika 19.	Krivulja struje ovisno o vremenu kod zavarivanja dvostrukim pulsom [25].....	34
Slika 20.	Promjena dobavne brzine žice ovisno o promjeni iznosa struje zavarivanja kod postupka zavarivanja dvostukim pulsom [26].....	35
Slika 21.	Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [24]	36
Slika 22.	Shematski prikaz uređaja za TIG postupak zavarivanja [25].....	37
Slika 23.	Učinak i oblik električnog luka kod helija i argona [26].....	38
Slika 24.	Shematski prikaz plazma postupka zavarivanja [14]	39
Slika 25.	Shematski prikaz elektrootpornog točkastog zavarivanja [32]	42
Slika 26.	Uređaj za zavarivanje, Welbee P500L, Daihen Varstroj.....	43
Slika 27.	Karakteristike žice dodatnog materijala od AlMg5 [34].....	45
Slika 28.	Položaj uzorka te smjer zavarivanja [35]	46

Slika 29.	Zavar napravljen MIG postupkom duplim pulsom	47
Slika 30.	Četkom očišćeni zavar.....	47
Slika 31.	Sredstva korištena za ispitivanje penetrantima	48
Slika 32.	Zavar sa nanesenim penetrantom i razvijlačem.....	48
Slika 33.	Tračna pila korištena za strojno rezanje makroizbrusaka	49
Slika 34.	Brusilica.....	50
Slika 35.	Dio laboratorija za provedbu nagrizanja	51
Slika 36.	Područje za slikanje makroizbrusaka	52
Slika 37.	Makroizbrusak nakon postupka nagrizanja	53
Slika 38.	Detalj zavara.....	53
Slika 39.	Prikaz kontrure zavara te poroznosti u zavaru	54
Slika 40.	Geometrija zavara.....	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba svojstava konstrukcijskih čelika i aluminijskih legura [2].....	2
Tablica 2. Glavna svojstva lijevanih aluminijskih legura [3].....	7
Tablica 3. Osnovna podjela i značajke gnječenih aluminijskih legura [3].....	9
Tablica 4. Karakteristične gnječene aluminijske legure [3].....	12
Tablica 5. Tehničke karakteristike uređaja Welbee P500L, Daihen Varstroj [33]	44
Tablica 6. Kemijski sastav legure 5086.....	44
Tablica 7. Svojstva legure 5086	45
Tablica 8. Parametri zavarivanja	46
Tablica 9. Izmjerene geometrijske veličine na uzorku.....	55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>E</i>	MPa	Modul elastičnosti
<i>G</i>	S	Električna vodljivost
<i>I</i>	A	Jakost struje
<i>P</i>	W	Snaga
<i>Q</i>	J	Unos topline
<i>q</i>	l/min	Protok plina
<i>R_m</i>	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
<i>R_{p0,2}</i>	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
<i>T_{ok}</i>	°C	Temperatura otapanja aluminijskog oksida
<i>T_t</i>	°C	Temperatura tališta
<i>U</i>	V	Napon struje
<i>v</i>	m/s	Brzina zavarivanja
<i>α</i>	10 ⁻⁶ /K	Koeficijent linearnog istežanja
<i>λ</i>	W/mK	Toplinska vodljivost
<i>ρ</i>	kg/m ³	Gustoća

SAŽETAK

Tema ovog rada je „MIG zavarivanje aluminijskih legura primjenom dvostrukom pulsa“. Rad je podijeljen u dva dijela, prvi dio je teorijski te drugi eksperimentalni.

U teorijskom dijelu su opisana svojstva i značaj aluminijskih legura s posebnim naglaskom na impulsni način prijenosa metala kod MIG postupka. Objasnjena je ukratko zavarljivost te primjena aluminijskih legura te su navedeni i objašnjeni postupci zavarivanja koji se koriste za zavarivanje aluminijskih legura. To su MIG, TIG, lasersko zavarivanje, plazma zavarivanje i elektrootporno zavarivanje. Od nabrojanih postupaka detaljnije je opisan MIG postupak zavarivanja s fokusom na impulsni način prijenosa metala.

U eksperimentalnom dijelu rada izveden je kutni zavar aluminijskih ploča legure 5086 u vertikalnom položaju sa smjerom zavarivanja prema gore prema normi EN ISO 6947. Zavar je izveden inačicom MIG zavarivanja duplim pulsom. Nakon toga su na zavaru provedena razorna i nerazorna ispitivanja prema normi HRN EN ISO 15614-2. Na temelju dobivenih rezultata zaključena je adekvatnost odabrane tehnologije za odabrane parametre zavarivanja.

Ključne riječi: Aluminijske legure, MIG zavarivanje, impulsno zavarivanje, zavarivanje duplim pulsom

SUMMARY

The topic of this paper is „MIG welding of aluminium alloys using a double pulse“. The paper is divided into two parts, the first part is theoretical and the second is experimental.

The theoretical part describes the properties and significance of aluminium and aluminium alloys with special emphasis on the pulse mode of metal transfer in the MIG process. The weldability and application of aluminium and its alloys are briefly explained, and the welding procedures used for welding aluminium alloys are listed and explained. These are MIG, TIG, laser welding, plasma welding and resistance welding. Of the listed processes, the MIG welding process with a focus on the pulse mode of metal transfer is described in more detail.

In the experimental part of the paper, fillet weld of aluminum plates of alloy 5086 was performed in a vertical position with the welding direction upwards. The weld is performed by the double pulse welding version of MIG. After that, destructive and non-destructive tests were performed on the weld according to the standard HRN EN ISO 15614-2. Based on the obtained results, the adequacy of the selected technology for the selected welding parameters was concluded.

Key words: Aluminum alloys, MIG welding, pulsed welding, double pulsed welding

1. UVOD

Metal koji je nakon kisika najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori je upravo aluminij kojeg ima 8%. Prvom pojavom aluminija može se smatrati svjetska izložba 1855.godine u Parizu što ga čini jednim od mlađih metala u uporabi. Danas se od aluminija više koristi samo čelik. Aluminij se dobiva iz rude boksita koja se još mora preraditi u glinicu Al_2O_3 iz koje se tada izdvaja elektrolizom pritom trošeći puno električne energije. Aluminij i njegove legure koriste se kao proizvodi, poluproizvodi te valjani, prešani i lijevani materijali. Njihova primjena je veoma široka te se primjenjuju u bijeloj tehnici, prehrambenoj industriji, kriogenoj tehnici, građevinarstvu, za izradu ambalaže i za izradu posuda pod tlakom u vojnoj tehnici. U većini nabrojanih slučajeva primjene aluminij nije korišten u svom čistom obliku zbog nedovoljno dobrih svojstava kao što je slaba čvrstoća. Upravo zbog te slabe čvrstoće te u svrhu dobivanja veće čvrstoće čisti aluminij je u pravilu legiran s metalima kao što su magnezij, cink, bakara, mangnan te silicij [1].

Neka dobro poznata svojstva aluminija i njegovih legura su [1]:

- Dobra prekidna čvrstoća od maksimalnih 700 MPa uz malu gustoću koja je oko 2,9 puta manja od čelika
- Dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama
- Toplinska vodljivost koja je čak 13 puta veća od one koju možemo naći kod nehrđajućeg čelika i 4 puta veća od običnog čelika
- Dobra elektroprovodljivost slična bakru
- Dobra refleksija svjetline i topline
- Odlična otpornost na koroziju i dekorativnost površine
- Jako dobra obradljivost na razne načine
- Nemagnetičan metal

Usporedba svojstava aluminijskih legura i konstrukcijskih čelika može se vidjeti u tablici 1. te su iz nje veoma jasne već navedene prednosti aluminijskih legura nad konstrukcijskim čelicima.

Tablica 1. Usporedba svojstava konstrukcijskih čelika i aluminijskih legura [2]

Svojstva	Aluminijeve legure	Konstrukcijski čelici
Gustoća [kg/m ³]	2700	7850
Youngov modul elastičnosti [MPa]	72000	205000
Toplinska vodljivost [W/mk]	235	79
Temperatura taljenja [°C]	550 – 650	~ 1500
Temperatura otapanja oksida [°C]	2060 (Al ₂ O ₃)	800 – 900 (FeO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄)
Električna vodljivost [Ω cm]	~ 2,65 × 10 ⁻⁶	~ 10 × 10 ⁻⁶
Relativna magnetska permeabilnost	~ 1 (paramagnetičan)	80 – 160 (feromagnetičan)
Kristalna struktura	Jednofazni (FCC)	BCC - FCC

Zbog svih navedenih dobrih svojstava aluminijske legure su često korišteni materijali u industriji te se kao takvi moraju moći zavariti na što bolji i brži način. Kod aluminijske legure postoji Al₂O₃ prirodna oksidna kožica koja je na hladnom materijalu debljine oko 0,01mm. Taj aluminijski oksid daje dobru kemijsku otpornost, ali zbog visoke temperature taljenja (2060 °C) čini prave poteškoće pri zavarivanju što uvelike utječe na izbor tehnologija zavarivanja koje su dostupne za zavarivanje aluminijskih legura. Od svih mogućih tehnologija zavarivanja za zavarivanje aluminijske legure u ovom radu biti će obrađeni TIG, lasersko, elektrootporno, plazma i MIG zavarivanje. MIG postupak zavarivanja je najčešći i najproduktivniji postupak zavarivanja aluminijskih legura te je ujedno i glavni postupak kojim će se baviti ovaj završni rad [2].

2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

2.1. Aluminij

U zemljinoj kori nalazi se mnoštvo sastojaka korisnih za čovjeka. Jedan od najvažnijih i najkorisnijih je aluminij. U prirodi se ne nalazi u elementarnom stanju kao i većina metala nego je najčešće u obliku oksida pomiješan s oksidima nekih drugih elemenata kao što su silicij, željezo, titan, itd.

Metal aluminijske se iz smjese oksida izdvaja elektrolitičkim postupkom koji je sam po sebi dosta skup. Danski kemičar H.C. Ørsted 1825. godine prvi je uspio proizvesti aluminij uporabom skupog redukcijskog sredstva u obliku metalnog kalija [3].

Tek se 1866. godina smatra početkom aluminijske industrije jer je upravo te godine Werner Siemens izumio dinamo stroj kojime je prvi put omogućena uporaba struje proizvoljne jakosti i napona što je ubrzalo napredak elektro-metalurških postupaka. Iste godine su Charles M. Hall i Poul T. Heroult objavili postupak dobivanja aluminijske elektrolitičkim putem iz rastopljene otopine aluminijskog oksida u kriolitu i to su napravili nezavisno jedan od drugog [1].

2.1.1. *Proizvodnja aluminijske*

Kako se aluminij oksid nalazi u tragovima u skoro svim stijenkama i mineralima, ali kao takav nema značajno ekonomsko značenje morala se pronaći ruda iz koje je moguća isplativa eksploatacija aluminijske. Jedina takva ruda za ekonomičnu eksploataciju je boksit koja je dobila ime po mjestu Les Baux u Francuskoj gdje su pronađene jako velike naslage boksita. Sve druge rude približno sličnog mineralnog sastava su kasnije dobile to isto ime [4].

2.1.1.1. *Boksit*

Zahvaljujući jako visokoj koncentraciji aluminijske u boksitu, lakoći kojom se boksit može rudariti i aluminijski spojevi odvojiti, boksit ostaje najrašireniji čisti materijal za proizvodnju aluminijskog oksida (Al_2O_3). Većina boksita pronađena je u tropskim regijama i relativno blizu same površine. Ovi boksiti uobičajeno sadrže između 30 i 60% aluminijske oksida dok ostatak sadrži silicij, željezo i titan. Sama fizička svojstva boksita i mineralni sastav boksita jako varira zbog čega je klasifikacija boksita teška te najčešće zahtijeva

obogaćivanje i oporavak kao i dodatne procese prerade kako bi se prilagodili specifičnom resursu [5].

Boksiti su složena polikomponentna sirovina koji nastaju u prirodi vremenskim trošenjem sedimentnih ili eruptivnih stijena.

Tehnologija suvremene proizvodnje aluminija sadrži dvije faze [4]:

- Prerada aluminijskih ruda u čisti aluminijev oksid
- Redukcija aluminijskoga oksida elektrolitičkim postupkom u aluminij

Boksitov sastav za dobivanje aluminija varira u određenim rasponima [4]:

- aluminijev oksid (Al_2O_3) → 55 do 65%
- željezni oksid (Fe_2O_3) → do 28%
- gubitak žarenjem → 12 do 30%
- silicijev dioksid (SiO_2) → do 7%
- titanov dioksid (TiO_2) → do 4%

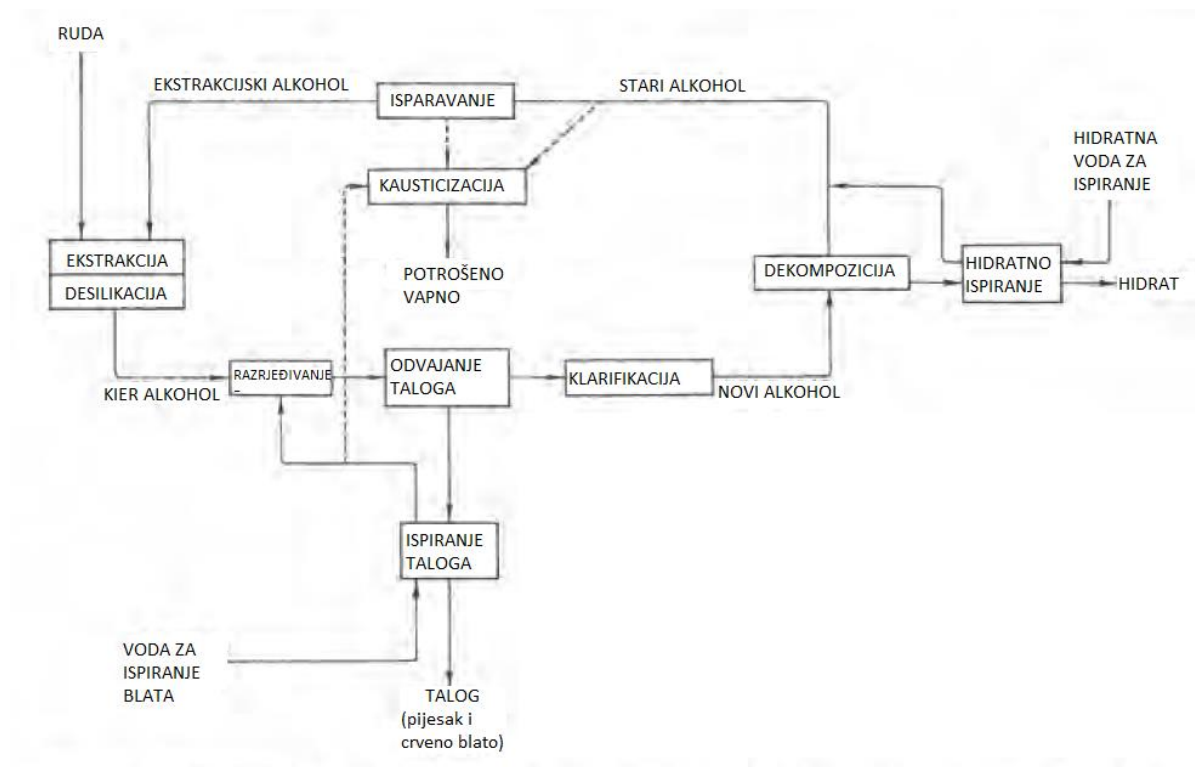
2.1.1.2. Glinica

Otpriblike 90% svjetske proizvodnje boksita, namjenjenog preradi u aluminij, upotrebljava se za proizvodnju Al_2O_3 (glinica ili aluminijev oksid). U današnje vrijeme gotovo sva proizvodnja glinice iz boksita se vrši mokrim alkalijским postupkom po Bayeru.

Bayerov postupak, prikazan u obliku dijagrama na slici 1, može se raditi u širokom rasponu uvjeta temperature, alkoholne koncentracije, itd. U pravilu se glinica koja se javlja u boksitu u trihidratnom obliku lako napada na niskim temperaturama s alkoholima relativno niske koncentracije sode, dok se monohidratna glinica ekonomski vadi samo na višim temperaturama pomoću alkohola veće koncentracije sode. Za ekonomsko korištenje potrebno je gledati na Bayerov postupak kao usko integrirani krug kod kojeg svaki odjeljak utječe na proces u cjelini [5].

Proces započinje drobljenjem i mljevenjem boksita te rastvaranjem u natrijevoj lužini. Pri rastvaranju dolazi do prelaska glinice u otopinu natrijeva aluminata (NaAlO_2) dok netopivi sastojci boksita ostaju u lužnatom zaostatku kao tzv. crveni mulj. Zatim se crveni mulj odvaja dekantacijom od rastvora aluminatne lužine te kada se bistra aluminatna lužina dovoljno

ohladi, razrijedi i cijepi dodatkom aluminijskoga hidroksida iz nje se izlučuje aluminijev hidroksid ($\text{Al}(\text{OH})_3$) koji onda filtriran, ispran i kalciniran konačno daje glinicu.



Slika 1. Dijagram Bayerovog postupka [5]

Specifični kemijski sastav boksita utječe na dobivenu kvalitetu glinice, a tako i na normative. Kao primjer može se uzeti sadržaj SiO_2 koji u boksitima za prerađivanje Bayerovim postupkom ne smije preći 1% dok se većinski dio boksitnih ruda, koje se globalno prerađuju ovim postupkom, ne prelazi 7% SiO_2 [4].

2.2. Aluminijske legure

Aluminij kao čisti metal nema dovoljno dobra svojstva za komercijalnu upotrebu. Zbog toga se aluminij legira sa mnoštvo različitih elemenata ovisno o potrebnim svojstvima.

Prvenstveni cilj legiranja je poboljšanje upravo mehaničkih svojstava koje su najbitnije u industriji. Glavna svojstva koja se poboljšavaju legiranjem aluminija su prije svega vlačna čvrstoća i tvrdoća te nakon njih rezljivost i krutost, a ponekad i livljivost i žilavost. Kao nečistoće i dodaci dodaju se u manjoj količini i krom (Cr), željezo (Fe) te titan (Ti) [3].

Najbitniji legirni elementi kod aluminijskih legura su [3]:

- Magnezij (Mg)
- Bakar (Cu)
- Cink (Zn)
- Silicij (Si)
- Mangan (Mn)

Magnezij (Mg) kao legirni element aluminiju donosi povećanje čvrstoće, zavarljivosti i korozijske otpornosti uz poboljšanje aluminijevih karakteristika za hladno oblikovanje.

Legiranje bakrom (Cu) daje povećanje čvrstoće i tvrdoće aluminijske legure. Uz prisutnost bakra smanjuje se korozijska postojanost i kod nekih legura se povećava osjetljivost na napetosnu koroziju, ali i raste obradljivost.

Još jedan od važnijih legirnih elemenata aluminijevih legura je silicij (Si) koji je prije svega odgovoran za odličnu livljivost aluminijevih legura i uz to daje i nisku gustoću od $2,34 \text{ g/cm}^3$ što se može pokazati kao definitivna prednost kada postoji potreba za manjom masom aluminijeve legure. Zbog slabe topljivosti u aluminiju precipitira kao čisti silicij što onda leguru čini tvrdom i daje joj bolju otpornost na abrazijsko trošenje. Još jedan efekt silicija je taj da smanjuje koeficijent termičke dilatacije Al-Si legura. Glavna negativna strana legiranja aluminija silicijem je smanjenje obradivosti legura [6].

2.2.1. Podjela aluminijskih legura

Aluminijske legure mogu se prema namjeni podijeliti na dvije glavne skupine:

- Legure za preradu gnječenjem
- Legure za preradu lijevanjem

Prerada gnječenjem obuhvaća aluminij i njegove legure dok prerada lijevanjem u tehnici obuhvaća samo tzv. ljevačke legure.

Lijevane legure se mogu podjednako dobro oblikovati s tri osnovne metode: lijevanjem u kokile, lijevanjem u pijesak te tlačnim lijevanjem .

Gnječene legure se prvo lijevaju u ingote ili šipke te se zatim hladno ili toplo deformiraju željenim postupkom [7].

2.2.1.1. Lijevane legure

Lijevane aluminijske legure mogu se svrstati u tri osnovne skupine: Al-Si, Al-Mg i Al-Cu.

Njihovom kombinacijom mogu se dobiti legure s boljim karakteristikama što je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Glavna svojstva lijevanih aluminijskih legura [3]

Vrste legura	Livljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Mehanička otpornost	Grupa materijala	
Al-Mg	Srednja	Dobra	Vrlo dobra	Mala	AlMg ₃ , AlMg ₅	
Al-Si-Mg					AlSi ₁₀ Mg AlSi ₇ Mg ₁	Mg omogućuje toplinsko očvršnuće
Al-Si	Vrlo dobra	Slaba	Dobra	Mala	AlSi ₁₂	
Al-Si-Cu					AlSi ₅ Cu ₁ AlSi ₆ Cu ₂	Si negativno utječe na rezljivost, Cu omogućuje smanjenje Si, ali pogoršava otpornost na koroziju
Al-Cu	Slaba	Vrlo slaba	Vrlo slaba	Osrednja	AlCu ₄ MgTi	Ti i Mg usitnjuju zrno

2.2.1.1.1. Osnovne značajke ljevačkih legura

Al-Si legure: Osnovni element za dobivanje dobre livljivosti aluminijskih legura je silicij pa su zato upravo Al-Si legure najrasprostranjenije legure unutar skupine lijevanih legura. Ovo je posebno istinito za one legure sa 10 do 13% silicija te rijetko s manjom količinom bakra. Takve legure su približno eutektičkog sastava zbog čega su posebno prikladne za tlačni lijev jer imaju uzak interval skrućivanja. Kod pješčanog lijeva nastaje poprilično gruba eutektička mikrostruktura koju je moguće usitniti postupkom modifikacije ili cijepljenja. Neposredno prije ulijevanja taline u kalupe se izvodi cijepljenje dodavanjem sitne količine natrija u obliku soli s ciljem odgode nukleacije silicija kad se postigne eutektička temperatura i pomak eutektičke točke sastava prema desno u dijagramu stanja Al-Si. Zbog toga može biti prisutno iznad 14% silicija u cijepljenoj leguri bez ikakve pojave primarnih kristala silicija u mikrostrukturi. Pretpostavka je da se natrij nakuplja u talini na međupovršini s novonastalim silicijskim kristalima što usporava i odgađa njihov rast. Zatim dolazi do pothlađivanja koje ubrzava nastanak velikog broja klica silicija što konačno rezultira prilično sitnozrnatom eutektičkom mikrostrukturom [3].

Al-Si-Cu legure: Ujedno su zapravo Al-Si legure kojima se dodaje bakar radi poboljšanja čvrstoće i rezljivosti, ali uz cijenu gubitka otpornosti na koroziju i livljivosti povećavanjem udjela bakra naspram udjela silicija. Daljnje poboljšanje tvrdoće i čvrstoće može se postići precipitacijom i rastvornim žarenjem. Legure očvrsnute precipitacijskim žarenjem postižu vrijednosti konvencionalne granice tečenja ($R_{p0,2}$) i do 200 N/mm². Ako se želi postići dobra žilavost, dobra obradljivost odvajanjem čestica i otpornost na udarce dodaje se titan kojim se postiže sitnozrnata mikrostruktura takvih legura. [3].

Al-Cu legure: Toplinski očvrstljive legure sa srednje dobrom čvrstoćom, dobrom rezljivošću i dobrom otpornošću na višim temperaturama te slabom ili srednje dobrom udarnom otpornošću. Mogu podnijeti radne temperature do 300 °C, korozijska postojanost im je najgora od svih aluminijskih legurama te su izrazito slabe livljivosti. Dodaje im se magnezij (do 0,3%) i/ili titan (do 0,2%) zbog sklonosti da im se pri skrućivanju pogrupe zrna [3].

Al-Mg legure: Zbog dobre korozijske postojanosti ovih legura može se postići visoki sjaj. Mogu se upotrijebiti za srednje opterećene dijelove u pomorstvu zbog dobre otpornosti na koroziju i otpornosti na udarce. Jedna od najteže livljivih legura je ona s 10 % magnezija koja zauzvrat ima najbolju kombinaciju žilavosti i čvrstoće. Teško je livljiva zbog pojave poroznosti i stvaranja troske, te ima lošu viskoznost zbog čega su u uporabi najviše legure s 3 do 5% magnezija [3].

Al-Si-Mg legure: Ove legure su precipitacijski očvrstljive eutektičke legure koje imaju dodatak od 0,2 do 0,5% magnezija. Glavna odlika im je dobra livljivost koja se pogoršava sa smanjenjem udjela silicija u leguri. Imaju malo linearno skupljanje od 1% te uzak temperaturni interval skrućivanja do 30 °C. Tlačni odljevci se nikako ne mogu zavarivati zbog većeg sadržaja plinova, kokilni odljevci mogu ograničeno, dok se pješčani odljevci mogu normalno zavarivati. Ako se lijevaju u pijesku obavezno se moraju i cijepiti. Radna uporabna temperatura odljevaka je 200 °C [3].

2.2.1.2. Gnječene legure

Gnječene aluminijske legure osnovno se dijele prema mogućnosti precipitacijskog očvrstnuća što je prikazano u tablici 3.

Tablica 3. Osnovna podjela i značajke gnječenih aluminijskih legura [3]

Vrsta legure	Način očvršćivanja	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²
Al-Mn	Deformiranjem u hladnom stanju	200-350
Al-Mg		
Al-Mg-Mn		
Al-Mg-Si	Precipitacijom	~330
Al-Cu-Mg		~450
Al-Zn-Mg		~400
Al-Zn-Mg-Cu		~550
Al-Li-Cu-Mg		~500

Kad su u pitanju legure koje se očvršćuju hladnim deformiranjem mora se reći da se od njih zahtjeva dobra čvrstoća i krutost u hladnom stanju te dobra korozijska postojanost. U

prilog velikoj duktilnosti i dobroj korozivskoj postojanosti ovakvih legura ide i činjenica da većina ima mikrostrukturu koja se sastoji samo od čvrste otopine. Legure koje sadrže veći udio magnezija imaju jako dobru postojanost u morskoj vodi i atmosferi te se zbog toga koriste u brodogradnji. Mehanička svojstva koja su željena će se postići stupnjem ugnječenja primjenjenim u konačnoj fazi hladnog oblikovanja deformiranjem. Zbog toga se legure najčešće isporučuju nakon određenog stupnja hladnog ugnječenja ili u mekom stanju. Glavna mana ovih legura je nemogućnosti mijenjanja mehaničkih svojstava materijala, proizvedenog na konačne dimenzije, osim mekšanja postupkom žarenja.

Očvršnuće koje se postiže participacijom je veće od onog postignutog hladnim oblikovanjem pa je zbog toga to glavni postupak za povećanje tvrdoće i čvrstoće već ugnječenih legura. Legure koje su participacijski očvrstive posjeduju prednost kada je potreban povoljan odnos čvrstoće i gustoće. Osnovu ovakvih legura čine legirni elementi magnezij, silicij, bakar i cink koji međusobno (Mg, Si, Zn) ili sa aluminijem (bakar) stvaraju intermetalne spojeve. Drugi legirni elementi poboljšavaju određena svojstva. Krom pospješuje precipitacijsko očvršnuće, titan služi kao dodatak za dobivanje sitnijeg zrna, dok se poboljšavanje rezljivosti dobiva dodavanjem olova i bizmuta [3].

2.2.1.1.2. Osnovne karakteristike precipitacijski očvrstivih legura

Al-Mg-Si legure: Tzv. „antikorodal“ legure koje imaju vlačnu čvrstoću R_m manju od 330 N/mm^2 te se umjetnim dozrijevanjem može postići konvencionalna granica tečenja $R_{p0,2}$ oko 240 N/mm^2 i oko 110 N/mm^2 prirodnim dozrijevanjem. Ove legure su pogodne za zavarivanje, anodizaciju i poliranje te su otporne koroziju. Koriste se za prijenos električne energije jer imaju jako velik omjer čvrstoće i električne vodljivosti u precipitacijski očvrstnutom stanju te hladno deformiranom očvrstnutom stanju [3].

Al-Cu-Mg legure: Tzv. „dural“ legure koje ovisno o načinu dozrijevanja nakon gašenja s temperature rastvornog žarenja mogu imati vrijednosti konvencionalne granice tečenja $R_{p0,2}$ do 290 N/mm^2 i vlačne čvrstoće R_m do 450 N/mm^2 . Povećani udio bakra u ovoj leguri utječe negativno na otpornost na koroziju pa zbog toga imaju samo umjerenu otpornost na koroziju. Ta mana se uklanja platiranjem valjanih limova ili prešanih profila čistim aluminijem ili legurama koje su otporne na koroziju. Dodavanjem magnezija postiže se ubrzanje očvršnuća stvaranjem intermetalnih spojeva.

Al-Zn-Mg legure: Ove legure ne mogu doseći punu čvrstoću Al-Zn-Mg legura, ali zauzvrat imaju bolju otpornost na kemijske utjecaje. Također imaju zadovoljavajuću zavarljivost uz dobar odnos čvrstoće i korozijske postojanosti.

Al-Zn-Mg-Cu legure: Legure koje imaju u precipitacijski očvrnutom stanju najveću čvrstoću od svih precipitacijski očvrnutih legura od oko 550 N/mm². Njihov glavni nedostatak je osjetljivost na napetosnu koroziju. Za sprječavanje napetosne korozije je razvijeno mnoštvo termomehaničkih postupaka zbog potrebe za pouzdanom i sigurnom primjenom u zrakoplovnoj industriji.

Al-Cu-Mg-Li i Al-Li-Cu-Mg legure: Razvijene su 1970.-ih godina te se 90-ih godina istog stoljeća agresivno nastavio razvoj aluminijskih legura s litijem. Osnovni nedostatak ovih legura su problemi koji se javljaju kod lijevanja zbog reaktivnosti litija. Unatoč tome, ove legure se koriste prije svega u zrakoplovnoj industriji zbog ostalih dobrih svojstava. Glavne prednosti koje imaju naspram konvencionalnih aluminijskih legura su [3]:

- 7 do 10% manja gustoća
- 10% viši modul elastičnosti
- Mehaničko-proizvodna svojstva slična legurama Al-Cu-Mg i Al-Zn-Mg-Cu

Prikaz karakterističnih gnječenih aluminijskih legura sa određenim područjem primjene dan je u tablici 4.

Tablica 4. Karakteristične gnječene aluminijske legure [3]

Područje primjene	Vrsta legure
-Tlačne posude -Plinske tlačne posude i cjevovodi -Izmjenjivači topline	AlMn1, AlMg3, AlMg2Mn0.8, AlMg4.5Mn AlMn, AlMg3, AlMg2Mn0.8, AlMg4.5Mn, AlMgSi0.5 AlMn, AlMgSi0.5, AlMgSi1
Graditeljstvo: -nosive konstrukcije -krovni pokrovi, fasadne obloge -vrata, prozori, rolete -rudarstvo	AlMg3, AlMg2Mn0.8, AlMg4.5Mn, AlMgSi0.5, AlZn4.5Mg1 AlMn, AlMn1Mg0.5, AlMg1, AlMg3, AlMg2Mn0.8 AlMgSi0.5 AlMn1Mg0.5, AlMn1Mg1, AlMgSi0.5, AlMgSi1 AlMgSi1, AlZnMgCu0.5
Elektrotehnika	E-AlMgSi (DIN 48 500/6), E-AlMgSi0.5 (DIN 40 501/2 i 3)
Vozila	AlMn, AlMg1, AlMg3, AlMg2Mn0.8, AlMg4.5Mn, AlMgSi0.5, AlMgSi1, AlZn4.5Mg1
Strojogradnja i izrada kalupa	AlMg3, AlMg4.5Mn, AlMgSi0.5, AlMgSi1, AlCuBiPb, AlCuMg1, AlCuMg2, AlZn4.5Mg1, AlZnMgCu0.5, AlZnMgCu1
Građevinski okovi, posuđe, reflektori	legure visokog sjaja dobivenog poliranjem: AlMn, AlMg1, AlMg3, AlMgSi0.5, AlMgSi1
Namještaj i oprema za kampiranje	AlMg1, AlMg3, AlMg2Mn0.8, AlMgSi0.5, AlMgSi1
Prehrambena industrija	AlMn, AlMg1, AlMg3, AlMg2Mn0.3, AlMg4.5Mn, AlMgSi1
Optika	AlMg5, AlMgSiPb, AlCuMgPb
Brodogradnja	AlMg3, AlMg2Mn0.8, AlMg4.5Mn, AlMgSi0.5, AlZn4.5Mg1
Putokazi i prometni znakovi	AlMg2.5, AlMg2Mn0.3
Spojni elementi – vijci i zakovice	AlMg3, AlMg5, AlMg4.5Mn, AlMgSi1, AlMgCu2, AlZnMgCu1.5, AlMn, AlMg3, AlMg5, AlMgSi1, AlCu2.5Mg0.5, AlCuMg2
Pakiranje	AlFeSi, AlMnCu, AlMn0.5Mg0.5, AlMn1Mg0.5, AlMn1Mg1, AlMg1, AlMg2.5, AlMg3, AlMg4.5

2.3. Zavarljivost

Idealni zavareni spoj, uzimajući u obzir i metal zavara, osnovni materijal i zonu utjecaja topline, mora imati jednaka svojstva kao sami osnovni materijal. Sposobnost nekog materijala, u našem slučaju aluminijskog i njegovih legura, da ostvari kontinuirani homogeni zavareni spoj pri nekim povoljnim uvjetima zavarivanja naziva se zavarljivost. Zavarljivost aluminijskog i aluminijskih legura se najviše povezuje sa poteškoćama pri njihovom zavarivanju kao što su sklonost stvaranju toplih pukotina i prevlaka aluminijskog oksida. Talište aluminijskog oksida je pri 2060 °C dok je aluminijska pri 660 °C što je mnogo niže od tališta aluminijskog oksida pa se zato on mora ukloniti pri zavarivanju. Ako se ne ukloni, pri taljenju osnovnog materijala aluminijski oksid u zavaru uzrokuje uključke u obliku tankog oksidnog sloja, što u konačnici utječe na smanjenje čvrstoće zavara [1].

Defekti i značajke koje doprinose i pokazuju gubitak svojstava su sljedeći [1]:

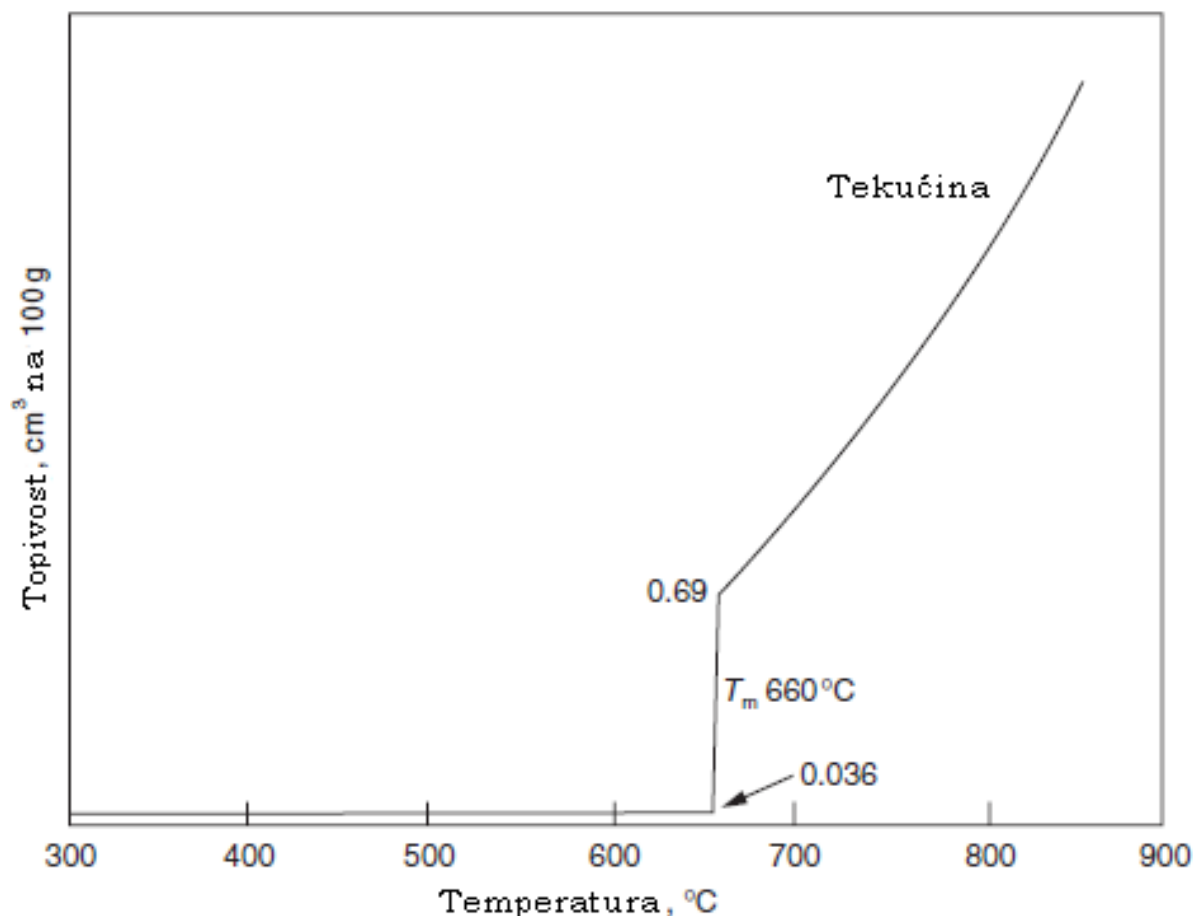
- Poroznost
- Uklanjanje oksidnog sloja
- Slaba difuzija
- Reducirana čvrstoća u području zavara i zone utjecaja topline
- Tople pukotine
- Reducirana električna otpornost
- Reducirana korozivna otpornost

2.3.1. Poroznost

Osnovna i sveprisutna nepravilnost kod zavarivanja aluminijskog i njegovih legura je upravo poroznost. Problem poroznosti je ograničen na metal zavara. Pri hlađenju uzrokuje ju zarobljeni i otopljeni plin vodik u talini zavarenog metala jer ostaje zarobljen u obliku mjehurića u krutom i ohlađenom metalu [1].

Aluminijski oksid je porozan i apsorbira vlagu te je jedan od glavnih izvora vodika. Ukoliko se zona spoja čisti temeljito, osnovni uzrok poroznosti je vodik unesen elektrodnom žicom [9].

Na slici 2. je vidljiv nagli rast topljivosti vodika iznad temperature taljenja.



Slika 2. Grafički prikazana topljivost vodika u aluminiju [1]

2.3.2. Uklanjanje oksidnog sloja

Sloj aluminijske oksida je taj koji aluminiju daje jako dobru korozivnu postojanost, ali zbog puno veće temperature taljenja od samog aluminija mora se ukloniti odgovarajućim postupkom.

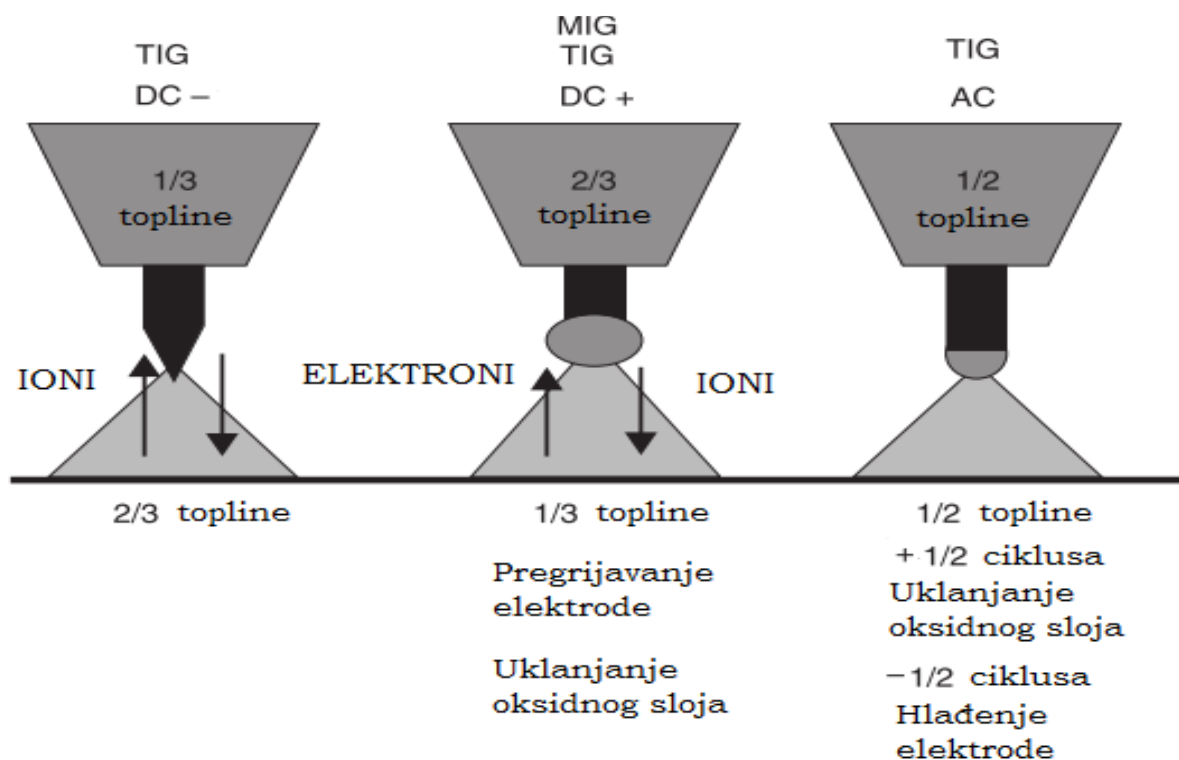
Oksidni sloj se može ukloniti na dva načina [8]:

- Prvi način je u obliku talila koje otapa oksidnu prevlaku te ju prevodi u lakšu trosku koja pliva na površini rastaljenog metala sa talištem nižim od tališta aluminija. Zbog velikog kemijskog afiniteta prema aluminiju talilo može uzrokovati koroziju pa se nakon zavarivanja mora potpuno i brzo ukloniti. To zahtijeva veliku pažnju i uzrokuje velike troškove. Ovaj način se u praksi primjenjuje samo kod plinskog zavarivanja.

- Drugi način se koristi kod zavarivanja pod zaštitnim plinom te se kod njega oksidna prevlaka uklanja u toku procesa koji se zasniva na toplinskoj disocijaciji. U ovom slučaju nema potrebe za talilom. Taj proces zvan „čišćenje“ izvodi se na dva načina. Prvi je uporaba izmjenične struje dok je drugi spajanje žice proizvoda na negativni pol, a elektrodne žice na pozitivni pol. Uz ove uvjete se uklanja oksid djelomično disocijacijom kada nastali elektroni sudjeluju u ukupnoj struji putujući od radnog dijela prema elektrodi, a djelomično mehničkim bombardiranjem površine Ar^+ ionima podržanih visokom temperaturom.

Za MIG postupak zavarivanja koristi se samo istosmjerni smjer struje s elektrodom spojenom na pozitivan pol zbog nestabilnog električnog luka koji nastaje spajanjem elektrode na negativni pol. Ta nestabilnost rezultira nepravilnim prijenosom metala te time i lošom kvalitetom metala [1].

Kod TIG postupka uobičajeno se koristi istosmjerni smjer struje s elektrodom spojenom na negativni pol što može uzrokovati lošu kvalitetu zavara. Spajanjem elektrode na pozitivni pol dolazi do pregrijavanja elektrode volframa što može uzrokovati otapanje iste elektrode. Stoga se koristi kompromis u obliku uporabe izmjenične struje kod koje se uklanjanje oksida odvija tijekom pozitivnog, a hlađenje tijekom negativnog dijela ciklusa što je pokazano na slici 3. [1]



Slika 3. Ponašanje elektrode u ovisnosti o polu spajanja i vrsti struje [1]

2.3.3. Redukcija čvrstoće u području zavara i zone utjecaja topline

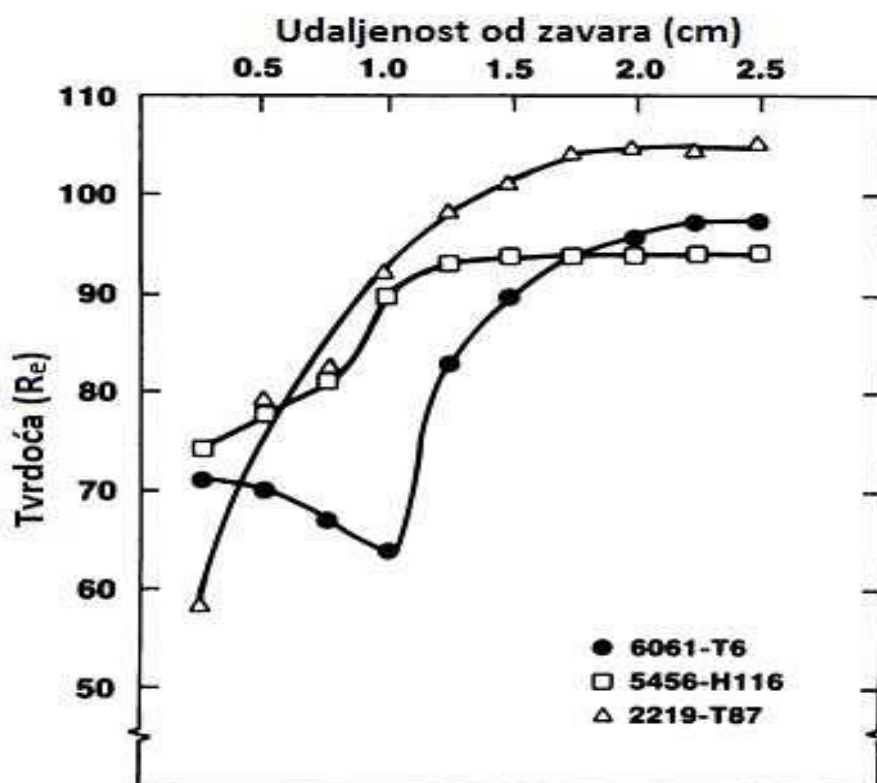
Područja zavarenog spoja dijele se na tri zone: nepromijenjen osnovni materijal, zona utjecaja topline i zona metala zavara. Mjesto spoja mora biti prethodno odgovarajuće pripremljeno, zagrijano do dovoljno visoke temperature koja je najčešće temperatura taljenja osnovnog materijala kako bi se zavarivanjem komponente uspješno spojile [1].

Svojstva materijala u zoni utjecaja topline mogu biti značajno drugačija od onih u nepromijenjenom osnovnom materijalu. To je slučaj zato što zona utjecaja topline prolazi kroz jedan ili više ciklusa zagrijavanja i hlađenja. Ovo je često tako s legurama aluminija koje se očvršćavaju precipitacijskim očvršćivanjem ili hladnom deformacijom.

Kod nekih aluminijskih legura važan faktor je velika širina zone utjecaja topline koja je uzrokovana njihovim svojstvom velike toplinske vodljivosti. Kao posljedicu te velike širine zone utjecaja topline dolazi do velikog smanjenja čvrstoće. Postoje iznimke kod kojih se svojstva osnovnog materijala poklapaju sa svojstvima zone utjecaja topline, a to se vidi kod legura u žarenom stanju i netretiranih lijevanih legura [1].

Ne postoji puno toga što se može napraviti za dobivanje boljih svojstava metala zavara. Izbor prigodnog dodatnog materijala i očvršćivanje postignuto uslijed otopljenih atoma u krutoj otopini mogu uvelike utjecati na povećanje čvrstoće metala zavara [1].

Na slici 4. mogu se vidjeti promjene tvrdoće u zoni utjecaja topline kod konstantnih unosa topline za dvije toplinski obradive legure: 2219-T87 i 6061-T6. Također su prikazane i promjene tvrdoće toplinski neobradive legure 5456-H116 za usporedbu [10].



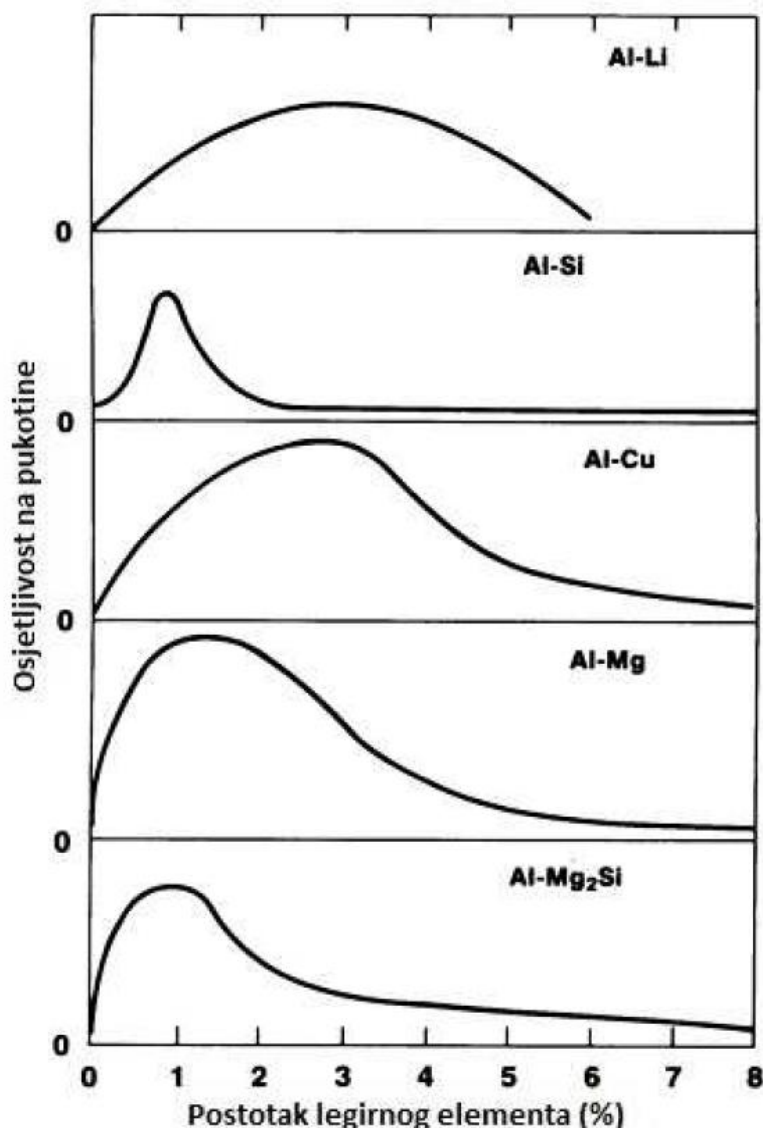
Slika 4. Promjene tvrdoće kod konstantnih unosa topline u ZUT-u [10]

2.3.4. Tople pukotine

U zavarima aluminijskih legura dolazi do pukotina zbog poprilično visokog toplinskog rastezanja, širokog raspona temperatura skrućivanja tijekom hlađenja te zbog velike volumenske promjene prilikom skrućivanja. Kod toplinski obradivih aluminijskih legura posebno je istaknuta osjetljivost na pukotine zbog velike količine legirnih elemenata koje se koriste. Zavarljivost aluminijskih legura se definira kao otpornost zavara na stvaranje pukotina zbog jako štetnog utjecaja pukotina na svojstva zavarenih spojeva [10].

Tople ili solidifikacijske pukotine nastaju zbog skupljanja tokom skrućivanja taline i visokih toplinskih napreznja. Kombinacija toplinskih, mehaničkih i metalurških čimbenika utječu na osjetljivost legura aluminija na pojavu toplih pukotina. Tople pukotine stvaraju se u metalu zavara te se u pravilu pojavljuju uzduž sredine ili na kraju zavara. Parametri zavarivanja i metal zavara najviše utječu na pojavu pukotina. Male brzine zavarivanja i korištenje visokih struja uzrokuju visoke unose topline koji uvelike doprinose stvaranju pukotina. Iz te činjenice se može doći do zaključka da postupci s manjim unosom topline smanjuju osjetljivost na samu pojavu stvaranja pukotina.

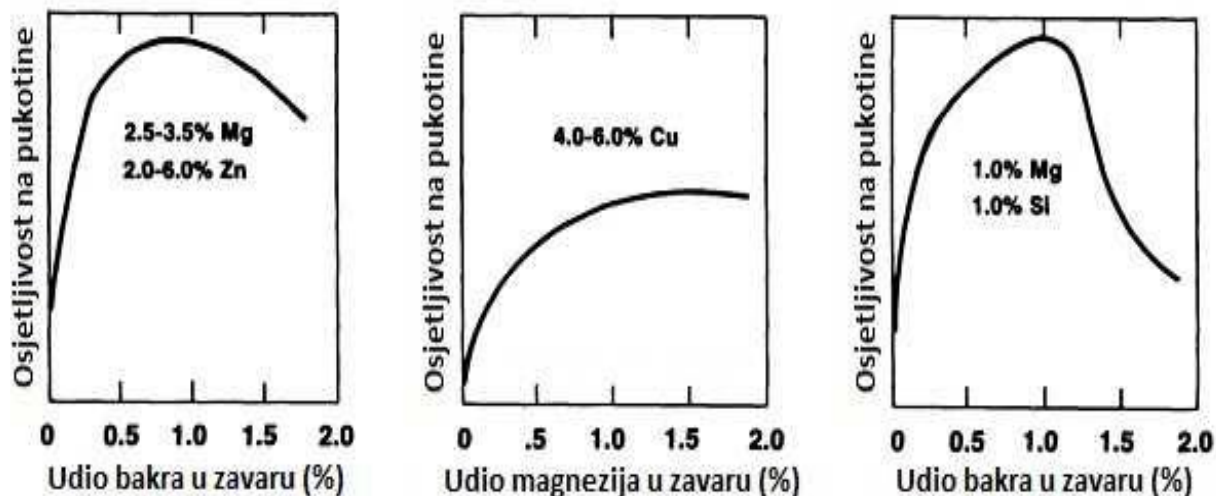
Osnovni način za sprječavanje pojave pukotina kod zavarivanja aluminijских legura je korištenje odgovarajućih legirnih elemenata. Utjecaj tih legirnih elemenata na pojavu pukotine u zavaru je prikazan na slici 5. [10]



Slika 5. Utjecaj legirnih elemenata na pojavu pukotina u zavarenom spoju [10]

U pravilu se za odabir legirnih elemenata koriste krivulje za binarni sustav materijala kako bi se dobila smanjena osjetljivost na pojave pukotina. Kad su u pitanju legure koje imaju više legirnih elemenata manji dodaci nekih elemenata mogu značajno utjecati na osjetljivost prema nastajanju pukotina samim time što šire raspon temperatura u kojima se formira koherentna struktura skrućivanja. Na slici 6. je prikazan upravo takav utjecaj na osjetljivost

prema pojavi pukotina s primjerom nekoliko aluminijskih legura s više legirnih elemenata [10].



Slika 6. Utjecaj određenih legirnih elemenata na stvaranje pukotina kod legura s više legirnih elemenata [10]

2.4. Primjena

Aluminij i aluminijske legure u suvremeno vrijeme upotrebljavaju se na mnogo različitih načina u mnoštvo područja kao što su:

- Metalurgija
- Brodogradnja
- Strojogradnja
- Građevinarstvo
- Kemijska industrija
- Prehrambena industrija
- Transportna industrija

Također su korištene u područjima pakiranja električnih modula, elektroničke tehnologije, strukture karoserije automobila, upravljanja energije vjetra i sunca. Ovo sve je moguće zbog svojstva visoke specifične čvrstoće, visoke obradivosti, dobre vodljivosti, ekološki prijateljske prirode i mogućnosti ponovne uporabe [11].

2.4.1. Primjena u autoindustriji

Aluminij je korišten u autoindustriji praktički od prvih dana proizvodnje aluminija. Već 1899. godine je nastao prvi automobil s potpuno aluminijskom karoserijom, Durkopp sportski automobil, koji je bio predstavljen na međunarodnoj izložbi u Berlinu. Prvi potpuno aluminijski motor je bio napravio poznati njemački izumitelj Karl Benz te se koristio u utrci u Nici. Od tog prvog aluminijskog motora napravljena su mnoga poboljšanja i napretci na njegovom osnovnom dizajnu te se danas koriste napredne verzije inspirirane Benzovim motorom. Veći interes za korištenjem aluminija i njegovih legura u proizvodnji automobila je počeo nakon naftne krize 70-ih godina prošlog stoljeća koja je natjerala proizvođače da pokušaju što je više moguće povećati efikasnost goriva. To su najbolje mogli postići smanjivanjem težine vozila i samim time je krenuo razvoj i masovno korištenje aluminija u autoindustriji. Na početku je aluminij bio korišten za aute koji su spadali u visoku klasu vozila. Prvi masovno proizvedeni model automobila sa potpuno aluminijskom karoserijom bio Audi S8 iz 1994. godine. Tek je 2014. godine proizveden prvi automobil s potpuno aluminijskom karoserijom koji je pripadao segmentu masovnog tržišta i to je bila najnovije izdanje Fordovog Ford-150 kamioneta. Promjenom prijašnje čelične karoserije u aluminijsku postignuta je ušteda od 315 kg što je omogućilo puno bolju ekonomičnost goriva i znatno niže CO₂ emisije. Na slici 7. vidljiv je još jedan primjer velikog vozila na kojem je uporaba aluminija uvelike poboljšala performanse u više pogleda, to je najnoviji model Range Rover-a koji je čak 39% lakši od svojeg prethodnika [12].



Slika 7. Najnoviji model Range Rover-a s aluminijskom karoserijom [12]

2.4.2. Primjena u brodogradnji

Najprivlačnija svojstva aluminijskih legura važna za uporabu u brodogradnji su dobra mehanička svojstva uz dobru korozijsku postojanost i malu gustoću. Aluminiij i njegove legure počele su se koristiti u brodogradnji od samog početka razvoja industrije aluminiija kao što je bio slučaj i kod autoindustrije. Prvo aluminijsko plovilo, izrađeno 1893. godine, zvalo se „Le Vendenesse“. Bilo je plovilo dugo 17,4 m, istisnine od 15 tona s vanjskom oplatom od aluminijskog lima debljine 2 mm zakovicama spojenim na čelični okvir. Ovakva konstrukcija je rezultirala u uštedi od čak 40% mase trupa [13].

Moderna pomorska plovila su sve češće građena od tzv. „morskog“ aluminiija. Taj izraz odnosi se na širok raspon Al-Mg legura (3-6% Mg) koje se koriste u strojarstvu. Te legure imaju izvanrednu otpornost na koroziju u slatkoj, ali i u morskoj vodi. Još neka važna svojstva ovih legura su dobra čvrstoća i lakoća zavarivanja. Možda i najčešći oblik u kojem se mogu naći aluminijske legure u brodogradnji su u obliku lima koji se izrađuju hladnim ili vrućim valjanjem. Također valja napomenuti šipke i cijevi koje se mogu izraditi valjanjem, vučenjem ili prešanjem [12].

Morski aluminiij je 100 puta manje podložan koroziji od čelika. Dok je čeliku u prvoj godini rada brzina pokrivanja korozijom 120 mm godišnje, morskom aluminiiju je samo 1mm godišnje. I uz sva prije nabrojana svojstva morski aluminiij je i jako fleksibilan pa zbog toga ni snažan udarac ne može probiti rupu u trupu broda. Aluminijski okviri ne poboljšavaju samo plovidbenost nego su čak sigurniji i smanjuju troškove održavanja. Zbog tog razloga se aluminiij koristi u motornim čamcima, jahtama, podvodnim plovilima, itd. Sportski čamci su skoro uvijek izrađeni od aluminiija od kobilice do jarbola što im daje potrebnu prednost u brzini, dok su plovila velikog kapaciteta i dalje izrađena od čelika uz nadogradnju i ostalu opremu koja je također napravljena od aluminiija radi uštede na težini i samim time povećanja nosivosti [13].

2.4.3. Primjena u zrakoplovnoj industriji

Na aluminij će se uvijek gledati kao metal koji je čovječanstvu omogućio letenje. Lagan, čvrst i fleksibilan, aluminij se pokazao idealnim za izradu zrakoplova. S razlogom se u nekim krugovima zove „krilatim metalom“. Danas aluminij čini 75-80% modernog zrakoplova i zapravo je korišten u zrakoplovstvu prije izuma samog zrakoplova. Grof Ferdinand Zeppelin je napravio okvire svojih poznatih zračnih brodova, prikazanih na slici 8 koji su i dobili svoj naziv po njemu, cepelini.



Slika 8. Poznati njemački cepelin Graf Zeppelin [12]

Kada se priča o aluminiju u zrakoplovstvu neizbježno se moraju spomenuti braća Wright koji su 1903. godine prvi uspjeli letjeti u zrakoplovu Flyer-1 koji je zbog tadašnjih preslabih i preteških motora koristio poseban motor koji je sadržavao više dijelova od aluminija kao što su blok cilindara koji su bili lijevani od aluminija. Postepeno je aluminij zamijenio drvo, čelik i ostale materijale u trupu prvih zrakoplova te je do 1917. godine poznati njemački dizajner zrakoplova Hugo Junkers sagradio prvi zrakoplov ikad čiji je trup izrađen od duraluminija, legure aluminija koja sadrži bakar (4,5%), magnezij (1,5%) i mangan (0,5%). Ovu jedinstvenu leguru razvio je 1909. godine Alfred Wilm. On je također otkrio da se ta legura može znatno ojačati nakon što je toplinski obrađena tijekom duljeg razdoblja [12].

Nakon otkrića duraluminija aluminij postaje ključni proizvodni materijal u zrakoplovstvu. Dok se sastav legura korištenih u zrakoplovstvu promijenio, zrakoplovi su postali bolji, ali se cilj konstruktora zrakoplova nije promijenio: izgraditi što je moguće lakši zrakoplov sa maksimalnim kapacitetom koji koristi minimalnu količinu goriva i čije tijelo s vremenom neće korodirati. Aluminij je upravo taj koji omogućuje zrakoplovnim inženjerima da ostvare sve te ciljeve što je dovelo do najvećeg zrakoplova na svijetu prikazanim na slici 9, Antonov An-124 Ruslan. Zato se u modernim zrakoplovima aluminij koristi u [12]:

- Trupu
- Oblogama
- Oknima krila i u kormilu
- Blokovima za „hranjenje“
- Crijevima za punjenje goriva
- Podovima i vratima
- Okvirima pilotskih i suvozačkih sjedala
- Mlaznicama za gorivo
- Potpornim stupovima kabine
- Motornim turbinama i na puno drugih mjesta



Slika 9. Najveći teretni zrakoplov na svijetu, Antonov An-124 Ruslan [12]

3. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

Aluminij i aluminijske legure se mogu zavarivati plinskim, elektrootpornim i elektrolučnim postupcima, eksplozijom, plazmom, ultrazvukom, difuzijski, laserskim i elektronskim snopom, itd. [14].

Zbog osigurane zaštitne atmosfere najviše korišteni postupci su MIG (Metal Inert Gas) i TIG (Tungsten Inert Gas). Za tanke limove i elemente debljine do 6 mm preporuča se korištenje TIG postupka, a za deblje elemente iznad 6 mm MIG postupak zavarivanja [14].

3.1. MIG postupak zavarivanja

MIG postupak, prikazan na slici 10., je elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova te pripada postupcima zavarivanja taljenjem. Prvi put se upotrijebio sredinom 1940.-ih godina u Sjedinjenim Američkim Državama. Od tih ranih dana našao je primjenu u širokom spektru industrija od autoindustrije do cijevovoda [1].

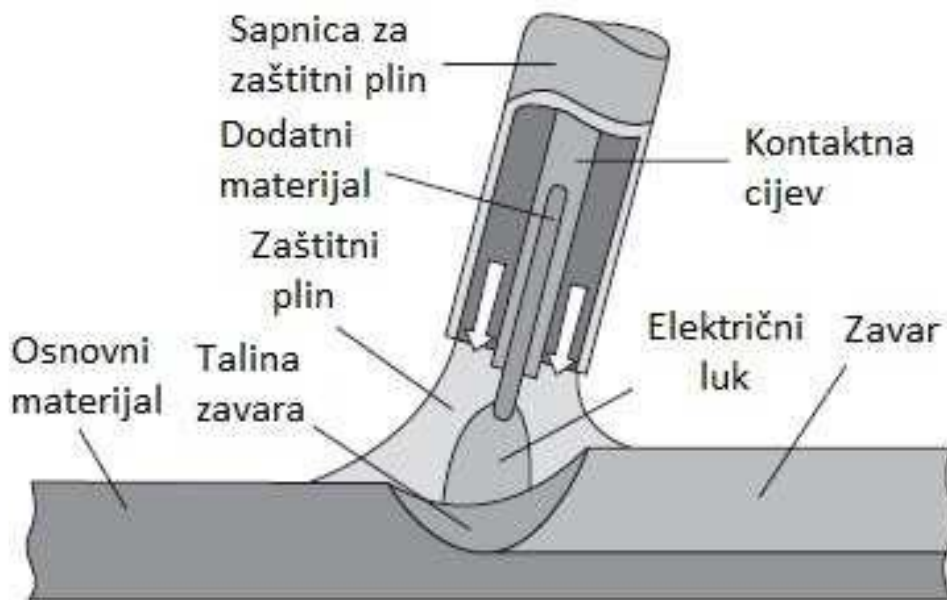
Cijeli postupak odvija se u zaštitnoj atmosferi osiguranoj inertnim plinovima argonom i helijem. Zaštitni plinovi korišteni u ovom postupku štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere te se dovode na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju za zavarivanje [15].

Kod ovog postupka koristi se neprekidno dodavanje žice koja služi kao elektroda i dodatni materijal. Metalna elektroda, najčešće spojena na pozitivan pol istosmjernog izvora struje, i osnovni materijal tale se uslijed utjecaja topline električnog luka. Najveći dio topline koja se razvija u luku generira se na pozitivnom polu koji je u ovom slučaju na elektrodi te zbog toga nastaje velika količina rastaljenog dodatnog metala i efikasan prijenos topline u samu talinu zavara [1].

Osnovne prednosti ovog postupka su [1]:

- Velike brzine zavarivanja
- Izvrsno čišćenje oksidnog sloja tijekom zavarivanja
- Manji ZUT od onog kod TIG postupka
- Mogućnost zavarivanja u svim položajima

Zbog ovih prednosti MIG postupak je najčešće korišteni postupak zavarivanja aluminija i njegovih legura. Na slici 10 prikazani su dijelovi sapnice te zavar kod MIG postupka zavarivanja.



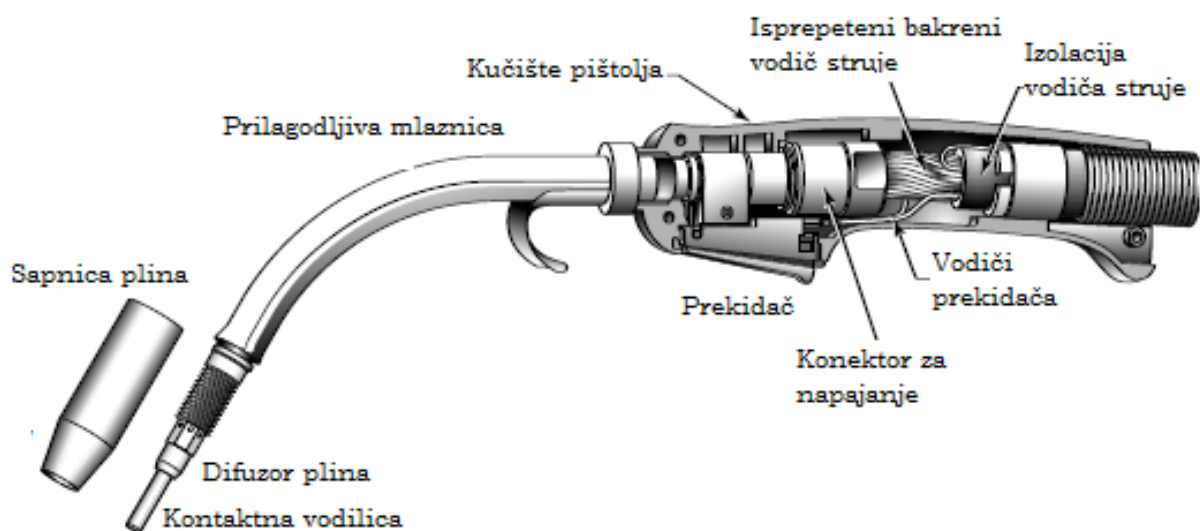
Slika 10. Prikaz dijelova sapnice i zavara kod MIG postupka [1]

Aluminij i njegove legure prvenstveno se zavaruju lijevom tehnikom. Kod zavarivanja aluminijevih legura lijevom tehnikom kut pod kojim se mora održavati pištolj je od 5° do 10° te se naziva „push angle“. Zavarivanje desnom tehnikom zahtijeva održavanje pištolja pod kutem zvanima „drag angle“ te kod nje može doći do odsutnosti zaštitnog plina kod taline zbog čega će nastati površinski sivi ili crni zavar tako da se zbog toga desna tehnika i ne koristi [16].

3.1.1. Oprema za zavarivanje

3.1.1.1. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za zavarivanje MIG postupkom, prikazan na slici 11., je polikabelom vezan s pogonskim sustavom žice. Polikabel služi kao vod za električnu struju, dodatni materijal i zaštitni plin. Unutarnja građa polikabela ovisi o tome koristi li se izvor struje s vodenim ili običnim zračnim hlađenjem pištolja za zavarivanje. Sitna precizno namotana vlakna polikabelu daju veću fleksibilnost. Pored odvoda i dovoda vode za hlađenje u kabelu postoji i dovod za žicu i zaštitni plin. Uz to su također i strujni pinovi za provod signala za paljenje i gašenje luka te raznih novih funkcija kao zaslona ili kontrola na suvremenim pištoljima za zavarivanje [18]. Postoje i posebni pištolji poput spool i push-pull pištolja, koji su razvijeni za MIG zavarivanje aluminijskih legura.



Slika 11. Pištolj za zavarivanje MIG postupkom u poprečnom presjeku [19]

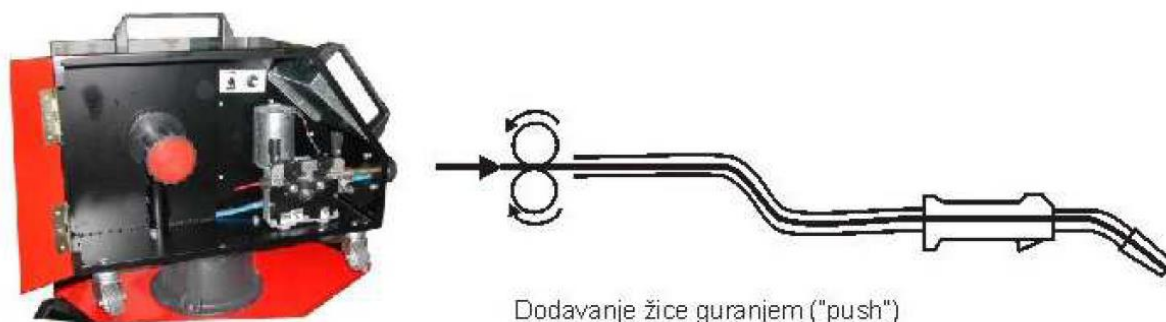
3.1.1.2. Dodavač žice

MIG postupak zavarivanja zahtijeva kontinuirano dodavanje žice što znači da je za njega uvijek potreban dodavač žice koji služi za automatsko dodavanje žice kod MIG, MAG i EPP postupcima zavarivanja. Pomoću dodavača žice može se utjecati na brzinu dodavanja i slobodni kraj žice. Dodavač žice ili pogonski sustav može se nalaziti u sklopu kućišta izvora struje za zavarivanje kako bi se postigli manji volumen uređaja, ušteda na cijeni proizvodnje i bolja mobilnost. Usprkos tome u današnje vrijeme se dodavači žice najčešće montiraju izvan kućišta kao odvojena jedinica zbog raznih prednosti kao što je rotacija modula s obzirom na

izvor struje za zavarivanje. To je jako korisno kod velikih radnih komada kojima je otežan pristup. Još jedna od prednosti vanjskog montiranja je bolja preglednost namotaja žice na samom kolutu u slučaju pojave greške pri uvođenju [18].

Problem učinkovitog dovođenja žice kroz pogonski sustav, polikabel, pištolj te do radnog lokaliteta javlja se kod MIG zavarivanja aluminijskih legura zbog manje krutosti aluminijskih legura u odnosu na čelične legure. Zbog toga se koriste posebno razvijeni pogonski sustavi i pištolji za zavarivanje koji olakšavaju dovođenje dodatnog materijala. Dvije vrste pogonskih sustava koji se koriste za dovođenje žice kod zavarivanja aluminijskih legura su push i push-pull sustav [16].

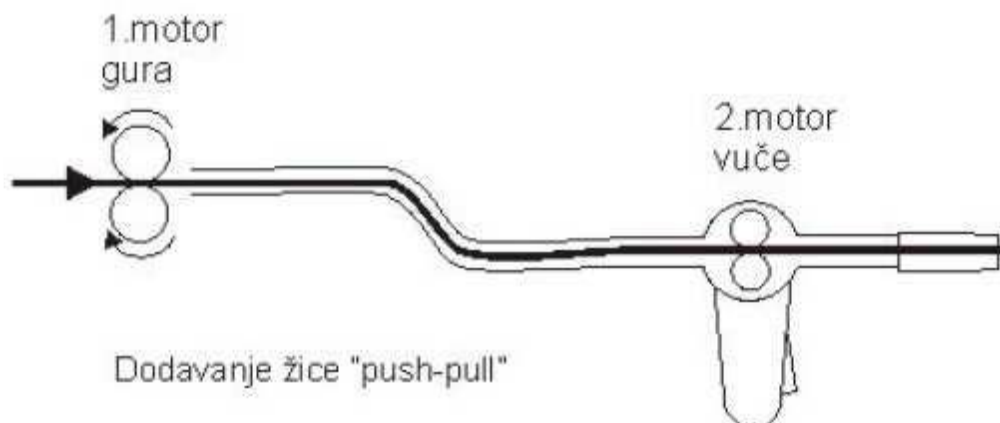
Kod „push“ sustava žica se gura kontroliranom brzinom kroz vodilicu žice u pištolju do samog mjesta zavarivanja pomoću pogonskih kotačića. Elektronički reguliranim istosmjernim motorom se osigurava kontrolirana brzina. Ovim načinom mogu se efikasno dodavati žice aluminijske i njegovih legura u promjerima od 1,2 mm do 2,4 mm dok su sve vodilice u sustavu u pravilu grafitne, poluamidne ili teflonske. Najčešće korišten način dodavanja žice danas je upravo guranjem koji je skoro pa obavezan kod impulsnih izvora. Na slici 12. prikazan je sustav dodavanja žice guranjem („push“) [20].



Slika 12. „Push“ sustav dodavanja žice [20]

Ako se žica pomoću pogonskih kotačića kontinuirano gura kroz vodilicu do drugih pogonskih kotačića u gorioniku koji ga vuku do samog mjesta zavara onda je riječ o „push-pull“ sustavu dovođenja žice. Kod ove vrste sustava dovođenja pogonski motor je u ručki pištolja te može biti zračni ili električni. Glavna prednost „push-pull“ sustava je konstantna nategnutost žice u vodilici koja omogućava sigurno dodavanje na velikim udaljenostima do 15 m od izvora i to kod žica promjera od 0,8 mm. S druge strane je mana ovog postupka visoka cijena i sama težina sustava pištolj/kabel, posebno kod većih udaljenosti i struja. Zbog tog razloga se danas ovaj sustav koristi većinom kod zavarivanja aluminijske i aluminijskih

legura na konstrukcijama kod kojih nema drugih rješenja. Na slici 13. prikazan je „push-pull“ sustav [20].



Slika 13. „Push-pull“ sustav dodavanja žice [20]

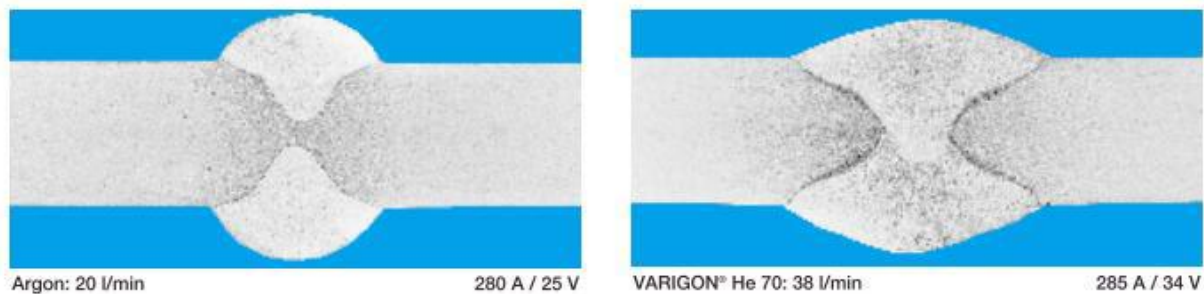
3.1.2. Zaštitni plinovi

Kao zaštitni plinovi za zavarivanje aluminijskih legura uobičajeno koriste se argon, mješavine helija i argona te i plinovi s dodacima dušika. Ostali plinovi kao što su vodik, kisik i ugljikov dioksid i u tragovima imaju loš utjecaj na samu kvalitetu zavara pa se zbog toga ne bi trebali koristiti kod MIG zavarivanja aluminijskih legura. Za zavarivanje konstrukcija od aluminijskih legura debljine do 12,7 mm kao zaštitni plin preporučuje se stopostotni argon dok se kod debljih preporučuju mješavine od 75% helija/25% argona ili 75% argona/25% helija zbog većeg potrebnog unosa energije za taljenje materijala veće debljine [16].

Argon je najgušći inertni plin s gustoćom 10 puta većom od helija. Zbog te gustoće je kod korištenja helija potreban veći protok za dobivanje iste kvalitete zaštite u položenom položaju [9]. Jedno od najbitnijih svojstava kod odabira zaštitnog plina je toplinska vodljivost. Visoka toplinska vodljivost osigurava veću provodljivost topline u sami radni komad te određuje veličinu ZUT-a i oblik električnog luka. Argon u usporedbi s helijem ima znatno nižu toplinsku vodljivost od samo 10% toplinske vodljivosti helija [19]. Zbog toga helij daje širu zonu jezgre luka uz manju penetraciju što je vidljivo na slici 14, ali zato se uporabom argona dobije uska zona jezgre luka [9].

Također valja napomenuti da helij ima veću cijenu od argona koji stvara stabilniji električni luk, ali zato ima nižu toplinsku vodljivost te nizak unos topline zbog čega ima i manju brzinu zavarivanja. U usporedbi s argonom helij povećava napon električnog luka do

20% zbog čega se dobije veći unos topline, ali uz veći trošak. Jedan od problema koji se javlja pri korištenju helija je teže postizanje i održavanje stabilnog električnog luka. Kao zaštitni plin koristi se čisti helij kod automatiziranog zavarivanja aluminijskih legura dok se za ručno zavarivanje koriste mješavine helija i argona koje svojom kombinacijom omogućuju postizanje karakterističnih svojstava oba plina [1].



Slika 14. Usporedba utjecaja helija i argona na širinu te profil zavora [21]

3.1.3. Prijenos metala

Načini prijenosa metala kod MIG postupka zavarivanja su [16]:

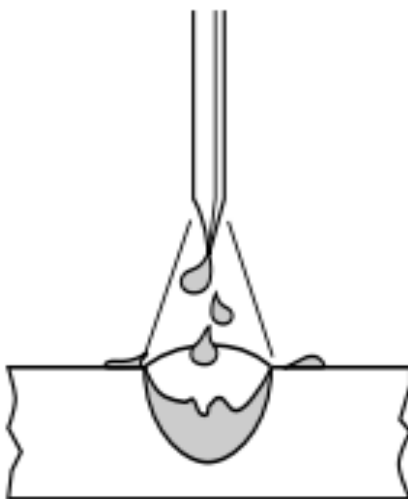
- Kratkim spojevima
- Prijelaznim lukom
- Štrcajućim lukom
- Impulsno zavarivanje

3.1.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Kod prijenosa metala kratkim spojevima, prikazanim na slici 18., postižu se okvirne vrijednosti (za korištenje žice promjera 1,2 mm) struje zavarivanja (50-170 A) i napona (13-21 V). Ovaj način prijenosa metala je prikladan za spajanje tankih materijala debljina od 0.6 do 5mm zbog malene količine rastaljenog metala, unosa topline te deformacija za korijenske prolaze [19]. Zbog malog unosa topline nije pogodan za zavarivanje aluminijskih legura [16].

3.1.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

Na slici 15. prikazan je prijenos metala prijelaznim lukom koji je kombinacija u manjoj mjeri kratkih spojeva i štrcajućeg luka. Kod prijenosa prijelaznim lukom se koriste struje od 170 do 235 A te naponi od 22 do 25 V za promjer elektrodne žice od 1,2 mm. Ove vrijednosti su veće od onih kod prijenosa kratkim spojevima zbog čega dolazi do stvaranja većih kapljica koje se odvajaju nepravilno te padaju s vrha elektrode. Kao posljedica tog padanja dolazi do pojave prskanja, onemogućeno je zavarivanje u svim položajima te je izgled zavara lošiji [19].



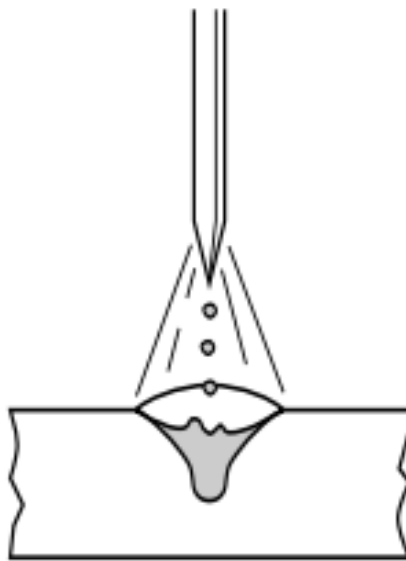
Slika 15. Prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [19]

3.1.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterističan je po tome da se rastaljeni metal sa vrha elektrode prenosi slobodnim letom u obliku sitnih kapljica kroz atmosferu luka i istodobno elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom, kao što je vidljivo na slici 16. Ovaj tip prijenosa metala zbog jačih struja od 200 do 600 A i većih napona od 25 do 40 V prikladan je za zavarivanje debljih materijala. Još neke prednosti su veliki učinak taljenja materijala uz malo prskanja, lijepa estetika zavara, omogućena velika penetracija te moguće zavarivanje u položenom položaju [19].

Neki nedostaci su [19]:

- Zavarivanje moguće samo u položenom položaju
- Povećano je zračenje topline i svjetlosti zbog čega je potrebna veća zaštita okoline i zavarivača
- Povećano generiranje zavarivačkih para
- Potrebna je zaštita od okolnih uvjeta kod rada na terenu
- Veća cijena mješavine plinova



Slika 16. Prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [19]

3.1.4. Impulsni način prijenosa metala

Krajem 1960.-ih godina počelo je razvijanje impulsnog MIG/MAG zavarivanja. Ova inačica MIG zavarivanja osigurava prijenos metala slobodnim letom kapljice bez pojave kratkih spojeva, tj. izvor struje stvara promijenjiv oblik impulsa struje koji omogućava otkidanje isključivo jedne kapljice tijekom impulsa, ovo sve je vidljivo na slici 18 [22].

Glavne karakteristike impulsnog načina prijenosa metala su [18]:

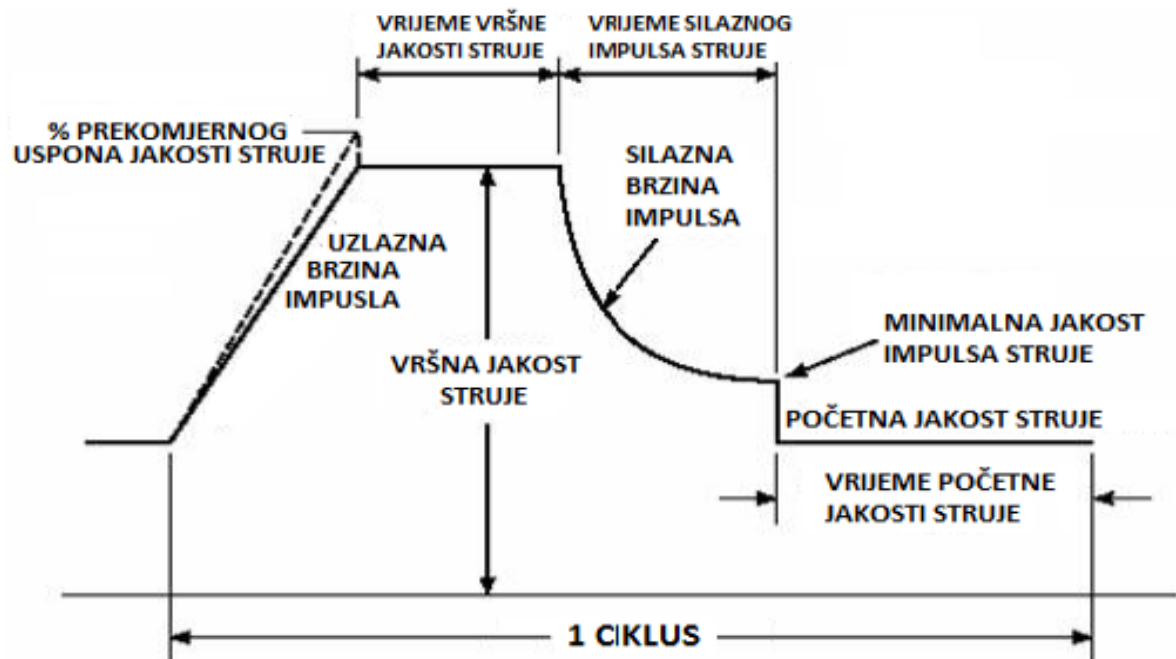
- Promjeri žica od 0,8 mm do 2,4 mm
- Jakost struje od 80 A do 500 A te napon od 13 V do 30 V
- Preporučena uporaba inertnog zaštitnog plina
- Kontroliran unos topline

- Spajanje komada debljine veće od 1 mm
- Konstantna visina električnog uz minimalno štrcanje
- Moguće zavarivanje u svim položajima ovisno o parametrima
- Mlaz sitnih kapljica kontinuirano i ujednačeno pada na radni komad
- Prikladan za mehanizaciju i robotizaciju
- Izrada završnih i popunskih prolaza

Danas se koriste sinergijski izvori struje koji dolaze sa otprije programiranim modelima prijenosa metala kod kojih je način prijenosa tvornički ispitan i provjeren kako bi izvor mogao dati što adekvatniju kombinaciju jakosti struje i ulazno izlazne karakteristike [18].

MIG zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala koristi nisku početnu ili tzv. pozadinsku struju koja je dovoljno niska kako bi se električni luk mogao održavati, ali i pri kojoj se žica dodatnog metala ne može rastaliti i odvojiti [1].

Na slici 17 na grafičkom prikazu faza vidi se da se uzlaznom brzinom impulsa dobiva vršna impulsna struja koje je znatno veća od potrebne struje da bi se ostvario štrcajući luk. Ovim se koriste dobre strane štrcajućeg luka kao načina prijenosa metala sitnim kapljicama, ali uz ujedno manju struju zbog kontrole impulsa [18].



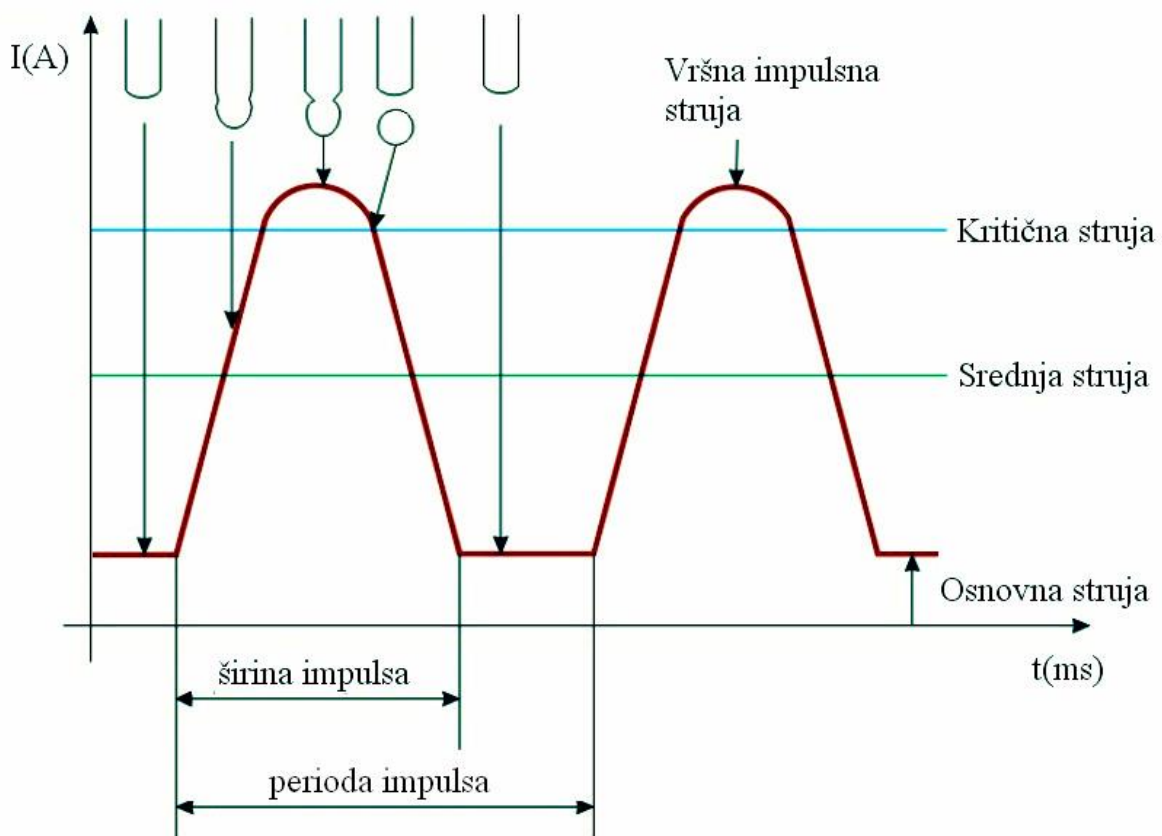
Slika 17. Grafički prikaz faza u prijenosu metala kod impulsnog zavarivanja [18]

Glavne prednosti impulsnog postupka zavarivanja su [22]:

- Oblik zavara je ujednačen
- Zavarivanje bez prskanja je prenijeto i u nisko područje parametara što omogućuje uspješno zavarivanje tanjih limova te zavarivanje u prisilnim položajima debljim žicama sa boljim rezultatima od onih dobivenih kratkim lukom
- Zbog preciznog odvajanja kapljice onemogućeno je njihovo pregrijavanje čime se ujedno smanjuje i emisija dimova
- Omogućena je bolja penetracija u materijal unutar područja štrcajućeg luka

Glavni nedostaci su [22]:

- Manja produktivnost u području velikih parametara u usporedbi sa štrcajućim lukom
- Veća cijena uređaja za zavarivanje

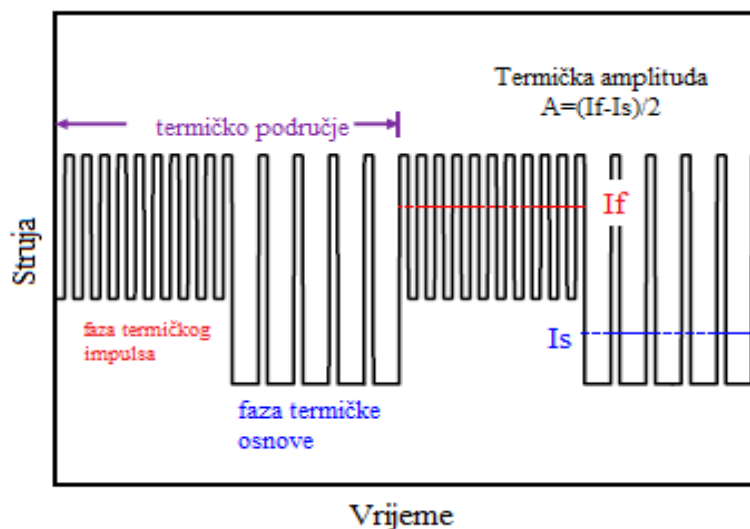


Slika 18. Grafički prikazan impulсни postupak zavarivanja i otkidanje kapljice [9]

3.1.4.1. Zavarivanje dvostrukim pulsom

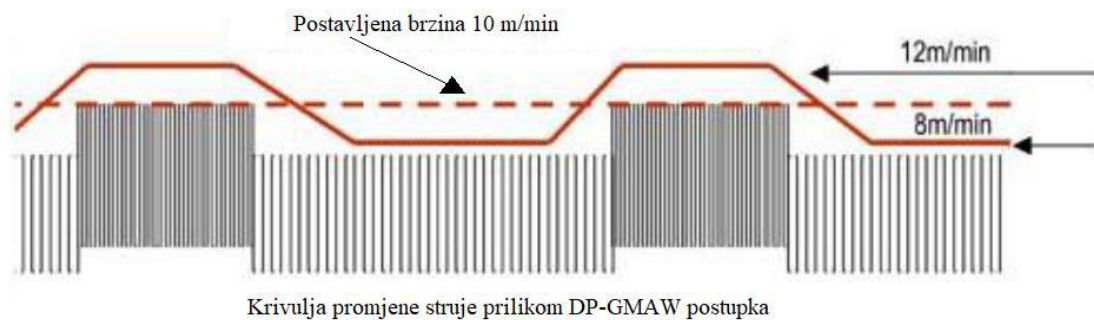
Usprkos boljoj kvaliteti zavara postignutoj razvojem impulsnog zavarivanja i dalje je očigledna limitiranost na zavarivanje manjih debljina. Još jedna mana postupka impulsnim zavarivanjem je pojava lošeg miješanja metala te nestabilnost luka pri nižim frekvencijama. Zbog ovih mana se ukazala potreba za poboljšanjem impulsnog postupka zavarivanja što je rezultiralo razvitkom postupka zavarivanja dvostrukim pulsom. Kod ovog postupka najvažniji parametri su brzina dobave žice, visoka frekvencija te intermitencija. Mijenjanjem ovih parametara može se utjecati na različite karakteristike postupka pa se tako određenom brzinom dobave žice može utjecati na veličinu kapljice, prijenos jedne kapljice po impulsu može se dobiti dobrim podešavanjem frekvencije te se iznosom intermitencije koja utječe na oblik kapljice metala konačno utječe na sami izgled zavara [23].

Ovim postupkom je pomoću termičkog impulsa omogućena kontrola trajanja i iznosa vršne struje prijenosa kapljice. Na slici 19 vidljivo je da je u fazi termičkog impulsa frekvencija impulsa veća od frekvencije u fazi termičke osnove te je u fazi termičkog impulsa osnova struje veća od struje u fazi termičke osnove. Ovaj postupak ne omogućuje samo manji unos topline već i dobro popunjavanje većih razmaka kod samog korijena zavara što izričito dolazi do izražaja kod većih brzina zavarivanja te uz to se omogućuje i usitnjavanje zrna zbog efekta miješanja u metalu zavara što poboljšava kako metalurška tako i mehanička svojstva same legure aluminija [24].



Slika 19. Krivulja struje ovisno o vremenu kod zavarivanja dvostrukim pulsom [25]

Tijekom faze termičkog impulsa dolazi do povećanja struje i u isto vrijeme povećanja napona čime ujedno dolazi i do većeg unosa topline. Kod te faze dolazi do većeg unosa energije nego kod konvencionalnog pulsnog zavarivanja pa je veća i sama količina nataljenog materijala. Brzina dodavanja žice se prilikom zavarivanja mijenja zbog povećanja i smanjenja unosa energije [26]. Promjena brzine dodavanja žice u ovisnosti o fazi prikazana je na slici 20.



Slika 20. Promjena dobavne brzine žice ovisno o promjeni iznosa struje zavarivanja kod postupka zavarivanja dvostrukim pulsom [26]

Osnovne prednosti postupka zavarivanja dvostrukim pulsom su [25]:

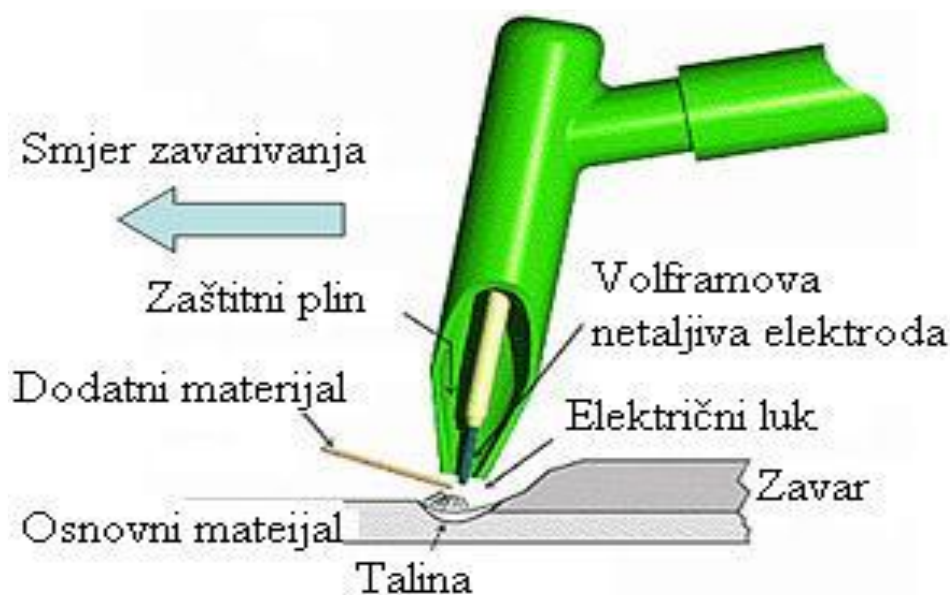
- Manja učestalost pojave poroznosti u zavaru
- Manja učestalost pojave osjetljivosti na pukotine koje su nastale prilikom očvršćivanja

Još neke prednosti zavarivanja dvostrukim pulsom su [26]:

- Lijepi estetski zavar slično kao kod TIG postupka
- Jednostavnija automatizacija, te time i bolja produktivnost od TIG postupka

3.2. TIG postupak zavarivanja

TIG ili Tungsten=Wolfram Inert Gas zavarivanje je naziv za elektrolučno zavarivanje kod kojeg se električni luk uspostavlja između volframove elektrode i radnog metala. Toplina oslobođena u tom električnom luku tali osnovni, a nekad ovisno o potrebi i dodatni materijal. Kod zavarivanja koristi se inertni zaštitni plin koji zagrijava zonu, talinu, zagrijani i rastaljeni vrh žice (kada se koristi dodatni materijal) te zagrijani vrh netaljive elektrode štiti od pristupa plinova iz atmosfere koji mogu nanijeti štetu [27]. Na slici 21. je shematski prikazan TIG postupak zavarivanja.



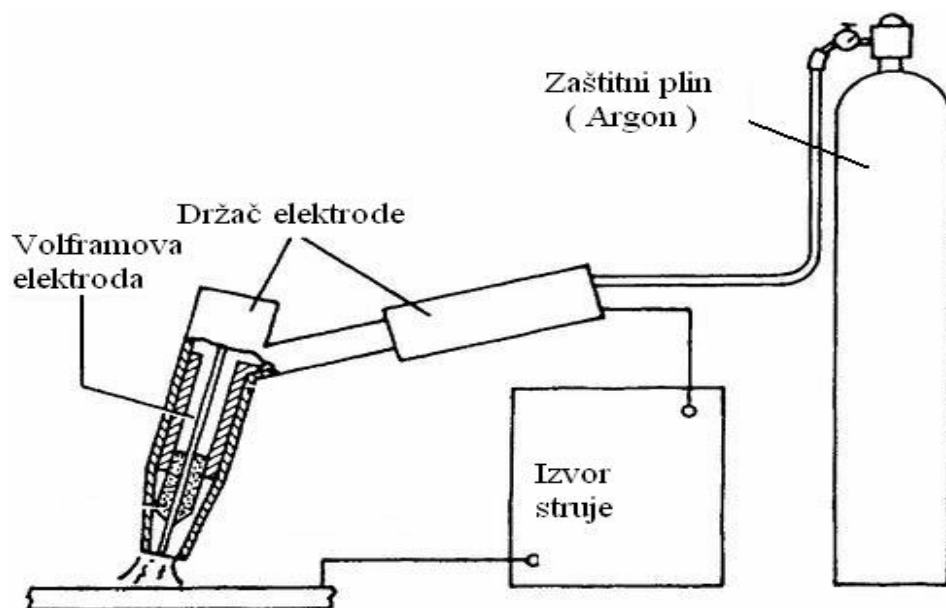
Slika 21. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [28]

Ovaj postupak zavarivanja se koristi za zavarivanje debljina materijala do 6 mm uz moguće zavarivanje u svim položajima. Makar ima manju brzinu zavarivanja od MIG postupka zavarivanja te manji depozit dodatnog materijala postiže se veoma kvalitetan zavar [1].

Osnovna oprema potreba za TIG postupak zavarivanja je [1]:

- Izvor struje
- Izvor inertnog zaštitnog plina
- Pištolj za zavarivanje
- Sustav za hlađenje
- Dodatni materijal ako se koristi (može se zavarivati i bez njega)

Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja može se vidjeti na slici 22.



Slika 22. Shematski prikaz uređaja za TIG postupak zavarivanja [29]

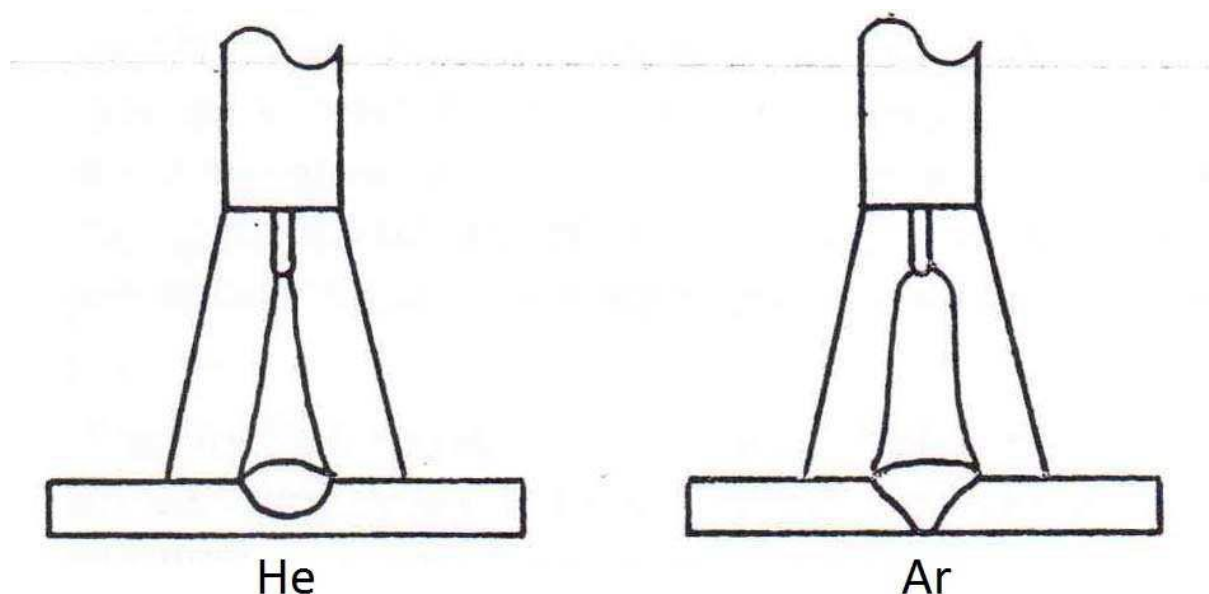
Kod većine materijala koji su podvrgnuti TIG zavarivanju koristi se istosmjerna struja s volframovom elektrodom spojenom na negativan pol. U takvom slučaju kod zavarivanja aluminijskih legura dolazi do neadekvatnog odvajanja oksida s površine dok spajanjem elektrode na pozitivan pol dolazi do pregrijavanja te taljenja elektrode. Zbog toga se kod TIG zavarivanja aluminijskih legura standardno koristi izmjenična struja [1].

Preporuka za TIG postupak uz korištenje izmjenične struje je uporaba volframove elektrode legirane cirkonijem koji ima veću temperaturu taljenja od čistog volframa i volframa legiranim torijem. Zbog toga je cirkonij-volfram elektroda otpornija na kontaminaciju, može podnijeti veće struje kod zavarivanja i umanjuje prskanje pri zavarivanju [1].

Ovisno o vrsti korištene struje mora se nabrusiti vrh elektrode prije samog zavarivanja. Kod korištenja izmjenične struje kao što je slučaj kod aluminijskih legura, potrebno je nabrusiti vrh elektrode u oblik polukugle koji se održava tijekom cijelog procesa zavarivanja kako bi održali stabilan električni luk [1].

Volframova elektroda se ne tali u radu pa se zato naziva i netaljivom elektrodom, ali zbog erozije vrha i samog prislanjanja u slučaju slučajnog kontakta sa radnim komadom, što onda zahtjeva brušenje, elektroda se postepeno troši. Njena trajnost u slučaju elektrode duge 170 mm je prosječno 30 sati [15].

Zaštitni plin kod TIG zavarivanja aluminijskih legura je u pravilu argon uz moguću uporabu i helija ili mješavine helija i argona. Argon daje široku, ali plitku penetraciju uz veoma laku uspostavu stabilnog električnog luka. Helijem se dobiva sužen električni luk te veća penetracija, ali uz otežanu uspostavu i održavanje stabilnost električnog luka [1]. Promjena oblika i učinka električnog luka ovisno o uporabi zaštitnog plina prikazana je na slici 23.



Slika 23. Učinak i oblik električnog luka kod helija i argona [30]

3.3. Plazma postupak zavarivanja

Plazma postupak zavarivanja se razvio iz TIG postupka zavarivanja. Nastanak plazme dobiva se rastom tlaka plina koji prolazi električnim lukom. Sami električni luk se uspostavlja između volframove elektrode spojene na negativni pol izvora struje te sapnice pištolja ili radnog komada. Glavna prednost je paralelnost električnog luka koji se ne širi kao kod TIG postupka [15].

Koncentrirani mlaz plazmenih plinova visoke temperature tali osnovni materijal te oblikuje talinu zavarenog spoja. U usporedbi sa TIG zavarivanjem plazmeni mlaz ima veću brzinu te osigurava kvalitetniji prijenos topline što ujedno daje veću brzinu zavarivanja i veću penetraciju [15].

Ovim postupkom mogu se zavarivati svi tehnički primjenjivi materijali, ali to ne znači da su to doslovno svi materijali koji postoje. Izvor struje kod ovog postupka je u pravilu

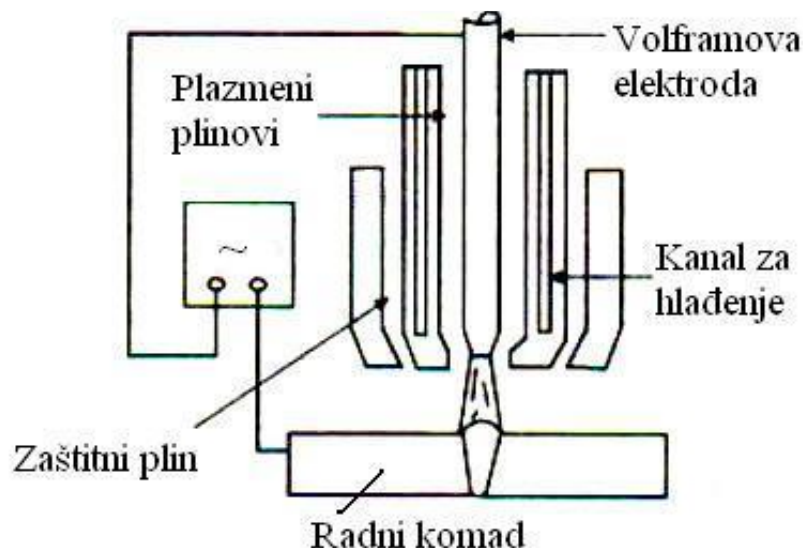
istosmjerni sa strmo padajućom karakteristikom dok se za zavarivanje aluminija i aluminijskih legura moraju koristiti posebni plazma uređaji [15].

Plazma zavarivanje može se izvoditi mehanizirano i ručno u skoro svim položajima. Dok je pištolj za plazma zavarivanje sličan pištolju za TIG zavarivanje, on je ipak složeniji zbog toga što često ima i kanal za zaštitni plin uz kanal za plazmeni plin te obavezni sistem hlađenja [15]. Na slici 24. prikazan je shematski prikaz plazma postupka zavarivanja.

Plazmeni plin je argon u količini od 0,5 do 2,5 l/min dok se kao zaštitni plin koriste argon, helij i mješavine uz poneke male dodatke pojedinih aktivnih plinova. Protok zaštitnih plinova je između 5 i 15 l/min [15].

Najbitnije prednosti zavarivanja aluminijskih legura automatiziranim plazma postupkom su [31]:

- Poboljšana izvedba te smanjene deformacije pri zavarivanju zbog automatizirane dobave žice
- Povećana kvaliteta zavarenih spojeva uslijed odličnog uklanjanja oksidnog sloja
- Povećan životni vijek spojeva koji su izloženi dinamičkim naprezanjima
- Ne može uzrokovati štrcanje



Slika 24. Shematski prikaz plazma postupka zavarivanja [14]

3.4. Zavarivanje laserom

Korištenje zavarivanja laserom u industriji počelo je 1990.-ih godina u sektoru brodogradnje, ali je značajna uporaba u praksi tek nedavno ostvarena. Uz mnoge prednosti ovog postupka, za samu primjenu potrebno je ispuniti stroge uvjete [2]:

- Veoma malen i kontinuiran razmak između komponenti od 0,1 do 0,2 mm
- Čvrsto i točno stezanje komponenata
- Ravnost površina rubova na spoju komponenata

Razlikuju se dva načina zavarivanja laserom [14]:

- Zavarivanje protaljivanjem ili tzv. efektom ključanice
- Zavarivanje taljenjem

U laserskom mediju nastaje laserska zraka, a razlikuju se dva tipa kod primjene za obradu metala [15]:

- Nd:YAG laser koji pripada laserima s krutim medijem
- CO₂ laser koji pripada plinskim laserima

Dok kruti laseri proizvode zrake kratkih valnih duljina, ona je kod plinskih lasera znatno veća. Reflektiranjem i fokusiranjem kod CO₂ lasera dobiva se zraka lasera točkastog oblika veličine od 0,4 do 0,6 mm. Zbog toga zavar napravljen MIG postupkom ima dimenziju 5 puta veću od one napravljene laserom. Ujedno je reducirana i širina ZUT-a na 10 puta manju od one koja se dobije MIG postupkom, ali uz neizbježan pad u mehaničkim svojstvima na tom presjeku [2]. Za obradu metala najviše se koriste CO₂ laseri. Postoji nekoliko tipova CO₂ lasera [14]:

- Laseri malih snaga od 3 do 100 W sa zatvorenom cijevi
- Laseri s aksijalnim protokom plina snage od 50 W do 2 kW
- Laseri s poprečnim strujanjem plina snage od 2 do 15 kW

Nd/YAG laser ima značajnu prednost nad CO₂ laserom u mogućnosti prijenosa snopa putem optičkih vlakana čime je omogućeno veoma jednostavno upravljanje snopom. Makar je

distribucija snage snopa lošija od one kod CO₂ lasera, Nd/YAG laser se koristi kada nije nužna velika penetracija kao što je slučaj kod npr. zavarivanja lima karoserija automobila.

Svojstva zavara ostvarenih laserskim zavarivanjem su [14]:

- Vrlo uski zavari i ZUT
- Veliki omjer penetracije i širine zavara
- Mali unos toplinske energije
- Odlična morfologija zavara
- Mala deformacija

3.5. Elektrootporno zavarivanje

Za vrijeme procesa elektrootpornog zavarivanja zavarivanje se vrši pritiskom dok se dijelovi toplinom dobivenom prolaskom struje kroz kontaktni otpor zagrijavaju. Nakon približavanja i laganog stiskanja dijelova pušta se jaka struja uslijed čega se zbog savladavanja otpora razvije toplina na mjestu dodira. Uz prikladan pritisak dolazi do zavarivanja dijelova [1].

Toplinska i električna vodljivost aluminijske su oboje veće nego kod čelika uz nižu točku tališta pa je potrebno dovesti veću količinu energije u manjem vremenu od one potrebne pri zavarivanju čelika. Zato se uređaji za elektrootporno zavarivanje čelika ne koriste za zavarivanje lakih metala [1].

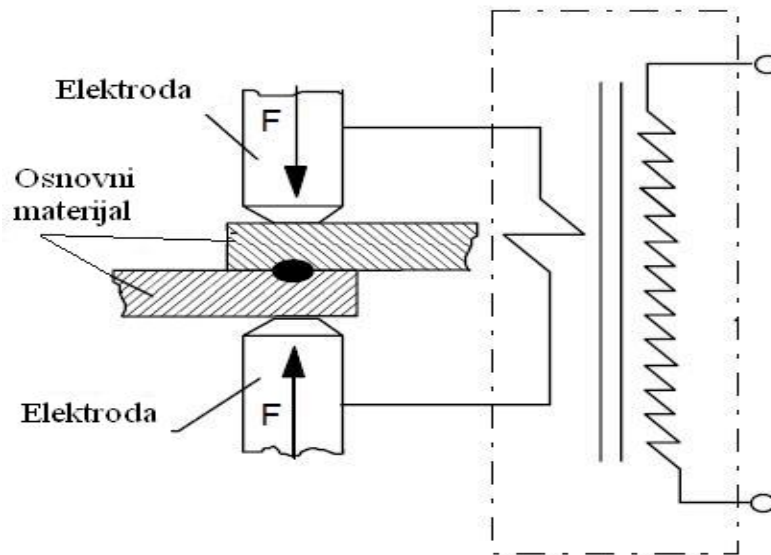
Razlikuje se nekoliko vrsta elektrootpornog zavarivanja [1]:

- Točkasto
- Šavno
- Bradavičasto

Razlikuju se dva tipa osnovna tipa elektrootpornog točkastom zavarivanja [32]:

- Jednotočkasto
- Višetočkasto

Kod višetočkastog elektrotopnog zavarivanja struja prolazi kroz više točaka u isto vrijeme te se time dobiva više zavarenih mjesta [32]. Shematski prikaz elektrotopnog točkastog zavarivanja prikazan je na slici 25.



Slika 25. Shematski prikaz elektrotopnog točkastog zavarivanja [32]

4. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno zavariti uzorke od aluminijske legure postupkom zavarivanja dvostrukim impulsom. Na dobivenom zavaru provedena su ispitivanja prema normi HRN EN ISO 151614-2. Za kutni zavar su propisane prvo vizualna pa penetrantska te zadnje makroskopska metoda ispitivanja.

Eksperimentalni dio rada je napravljen u Laboratoriju za zavarivanje te Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

4.1. Oprema za zavarivanje

Za eksperiment je bio korišten uređaj Welbee P500L, Daihen Varstroj. Uređaj je prikazan na slici 26.



Slika 26. Uređaj za zavarivanje, Welbee P500L, Daihen Varstroj

U tablici 5. su prikazane tehničke karakteristike uređaja Welbee P500L.

Tablica 5. Tehničke karakteristike uređaja Welbee P500L, Daihen Varstroj [33]

Mrežni napon, V	400 (+/- 15%)
Broj faza	3
Potrošnja snage, kW	22,9
Intermitencija, A	410
Nazivna izlazna struja, A	DC: 500 A / Puls: 400 A
Nazivni izlazni napon, V	DC: 39 V / Puls: 34 V
Raspon struje zavarivanja, A	30 A - 500 A
Raspon napona zavarivanja, V	12 V – 45 V
Radna temperatura, °C	-10 do 40
Težina uređaja, kg	83
Dimenzije uređaja Š / D / V, mm	395 / 710 / 762

4.2. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentu je korištena ploča aluminijske legure 5086, debljine 6 mm, širine 120 mm te duljine 290 mm. U tablicama 6. i 7. su prikazani kemijski sastav te svojstva korištene legure 5086.

Tablica 6. Kemijski sastav legure 5086

Kemijski element	Al	Mg	Si	Cr	Mn	Fe
Udio, %	93,15-96,25	3,5-4,5	0-0,4	0,05-0,25	0,2-0,7	0-0,5

Tablica 7. Svojstva legure 5086

Gustoća, g/cm ³	2,65
Temperatura taljenja, °C	588
Modul elastičnosti, GPa	70-80
Poissonov faktor	0,33
Toplinska provodnost, W/mK	127
Toplinsko širenje, 10 ⁻⁶ /°C	23,9 (pri uvjetima 20 °C – 100 °C)

Za dodatni materijal kod navarivanja i zavarivanja korištena je žica promjera 1,2 mm, od aluminijske legure AlMg5 te proizvođača Elektroda Zagreb. Karakteristike žice korištene kao dodatni materijal prikazane su na slici 27.

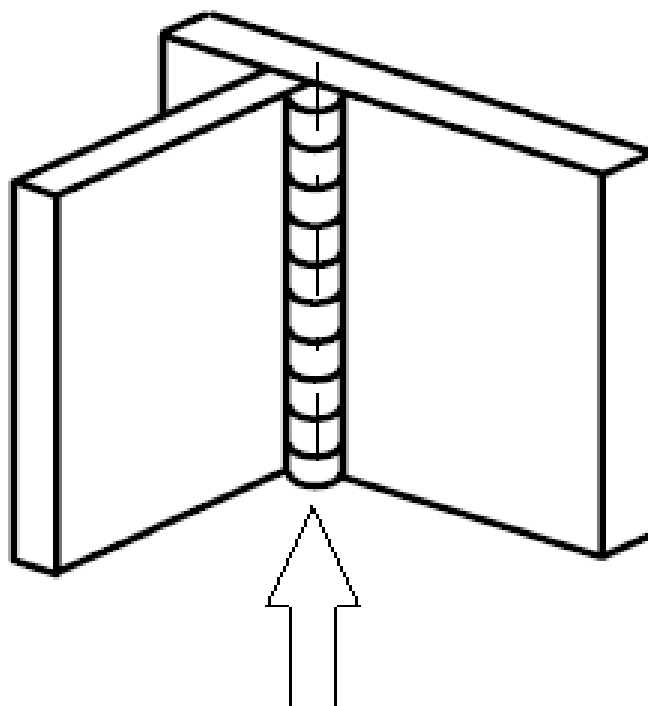
EZ - MIG AlMg5						
NORME						
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10		W. Nr.			
S Al 5356 / Al Mg5Cr(A)	ER5356		3.3556			
SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE						
Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s 5% magnezija. Namijenjena za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legura. Metal zavara relativno visoke čvrstoće, korozijski postojan u morskoj atmosferi. Pogodna za zavarivanje dijelova namijenjenih eloksiranju.						
MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA						
R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²		A ₅ %			
120	260		> 25			
ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE						
	Al	Mg	Mn	Cr	Si	Fe
%	bal.	5,0	0,15	0,10	0,05	0,15
ZAŠTITNI PLIN						
I1 (Ar)						
PAKIRANJE						
Promjer žice mm			Namotaj			
0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0			Žica do žice (S-S)			
7 kg - žičani kolut						

Slika 27. Karakteristike žice dodatnog materijala od AlMg5 [34]

Korišteni zaštitni plin je plin trgovačkog naziva Argon 5,0. Volumni udio argona u njemu iznosi 99,999% te je protok plina iznosio 22 l/min.

4.3. Postupak izrade

Prije samog postupka zavarivanja obje ploče su očišćene i odmašćene vodom i alkoholom. Tada su ploče dovedene u položaj za zavarivanje pripoja MIG postupkom zavarivanja te su pripoji zavareni. Zatim je uzorak pozicioniran u vertikalni položaj za zavarivanje dvostrukim pulsom prema gore. Korišteni položaj te smjer zavarivanja prikazan je na slici 28.



Slika 28. Položaj uzorka te smjer zavarivanja [36]

Nakon što je uzorak doveden u odgovarajući položaj (prema normi EN ISO 6947) vertikalno prema gore je zavaren. Zavarivanje je izvedeno ručno. Izračunat je unos topline klasičnim analitičkim uvrštavanjem vrijednosti u formulu (1). Stupanj iskoristivosti (η) električnog luka je konstantan i za MIG postupak iznosi 0,8. Svi parametri postupka prikazani su u tablici 8.

$$(1) \quad Q = I \times U \times \frac{\eta}{v}$$

Tablica 8. Parametri zavarivanja

Jakost struje, A	160
Napon, V	22
Brzina zavarivanja, cm/min	33,3
Protok plina, l/min	22
Unos topline pri zadanim/očitanim parametrima, J/mm	507,39

Nakon zavarivanja uzorak je ostavljen na sobnoj temperaturi da se ohladi. Zavareni uzorak prije čišćenja prikazan je na slici 29.



Slika 29. Zavar izveden MIG postupkom duplim pulsom

4.4. Analiza zavara

Nakon što se uzorak ohladio na sobnu temperaturu pripremljen je za analizu. Prvo se ručno četkom od nehrđajućeg čelika zavar površinski očistio te se u prvom koraku analize vizualno pregledao. Vizualnim pregledom nisu uočene nepravilnosti na površini (licu) zavara. Četkom očišćeni zavar prikazan je na slici 30.



Slika 30. Vizualno pregledana površina (lice) zavara

Sljedeći korak analize bilo je nerazorno ispitivanje penetrantima po normi HRN ISO 15614-2. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje te su tijekom ispitivanja korištena sljedeća sredstva: čistač SKC-S, razvijач SKD-S2 (proizvođač Magnaflux) i crveni penetrant K7B2p (proizvođač Elite Flaw-Findr), sva prikazana na slici 31.



Slika 31. Sredstva korištena za ispitivanje penetrantima

Površina je očišćena alkoholom i nakon toga nanosi dodatno sredstvo za čišćenje SKC-S te se uzorak ostavlja kako bi se sredstvo osušilo. Zatim je nanesen crveni penetrant duž cijele dužine zavara. Tada je uzorak ostavljen 10 minuta kako bi penetrant imao dovoljno vremena da odjeluje i uđe u moguće greške u zavaru. Pranjem i brisanjem je odstranjen višak penetranta te je nanoseno sredstvo za razvijanje duž zavara. Nakon još 10 minuta čekanja da se razvijatelj osuši i prikaže eventualne indikacije pogrešaka nije bilo jasno vidljivih pogrešaka na zavaru. Zavar sa nanesenim penetrantom i razvijanjem prikazan je na slici 32.



Slika 32. Zavar sa nanesenim penetrantom i razvijanjem

4.5. Analiza makroizbrusaka

Zadnja metoda analize zavara je analiza makroizbrusaka za koju je bilo potrebno izrezati te potom i pripremiti makroizbruske. Nakon što je uzorak izrezan strojnim rezanjem na tračnoj pili prikazanoj na slici 33, prvo je grubo izbrušen pa nakon toga i brušen na strojnoj brusilici. Brušenje se izvedeno brzinom vrtnje od 300 o/min, brus papirima granulacije 320, 600, 1200, 2400 te zadnje 4000. Korišteno je vodeno hlađenje i podmazivanje kod postupka brušenja. Oba postupka, rezanje i brušenje su provedeni u Laboratoriju za zavarivanje. Strojna brusilica za brušenje je prikazana na slici 34.



Slika 33. Tračna pila korištena za strojno rezanje makroizbrusaka



Slika 34. Brusilica

Nakon završetka brušenja na strojnoj brusilici izrezani uzorak se u Laboratoriju za zaštitu materijala 30 sekundi nagriza u otopini: 10 ml HNO_3 , 10ml HCl , 10 ml H_2O i 1 ml HF . Postupak nagrivanja se provodi kako bi se bolje vidjela makrostruktura zavara. Nakon nagrivanja se uzorak isprao u vodi te ostavio da se osuši. Postupci nagrivanja, ispiranja te sušenja se odvijao u dijelu laboratorija prikazanog na slici 35 koji je izoliran od ostatka laboratorija te posjeduje svoju ventilaciju za usisavanje otrovnih para.



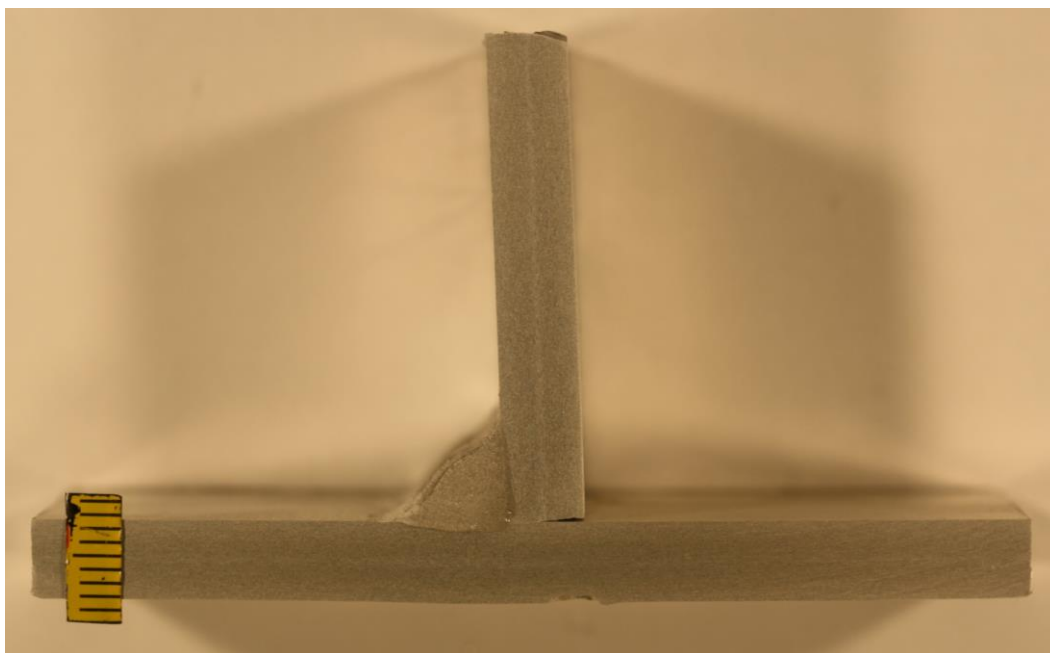
Slika 35. Dio laboratorija za provedbu nagrivanja

Potpuno pripremljen makroizbrusak se slika na posebnom području za slikanje prikazanom na slici 36.

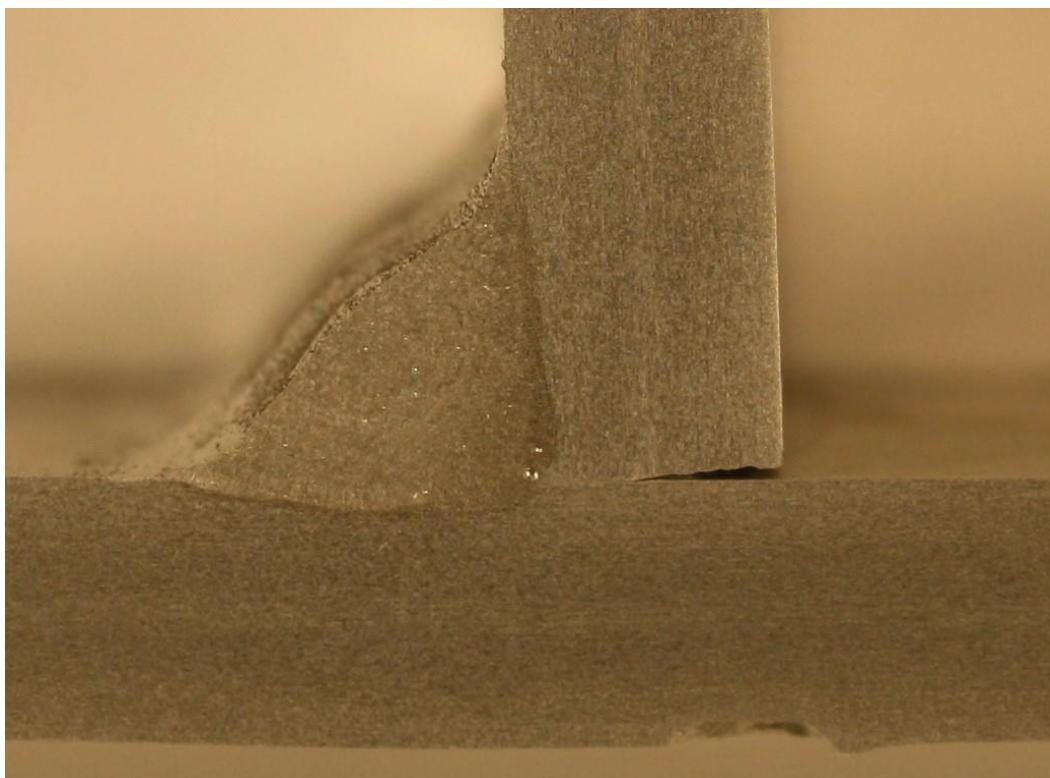


Slika 36. Područje za slikanje makroizbrusaka

Na slikama 37 i 38 prikazan je makroizbrusak nakon postupka nagrivanja.

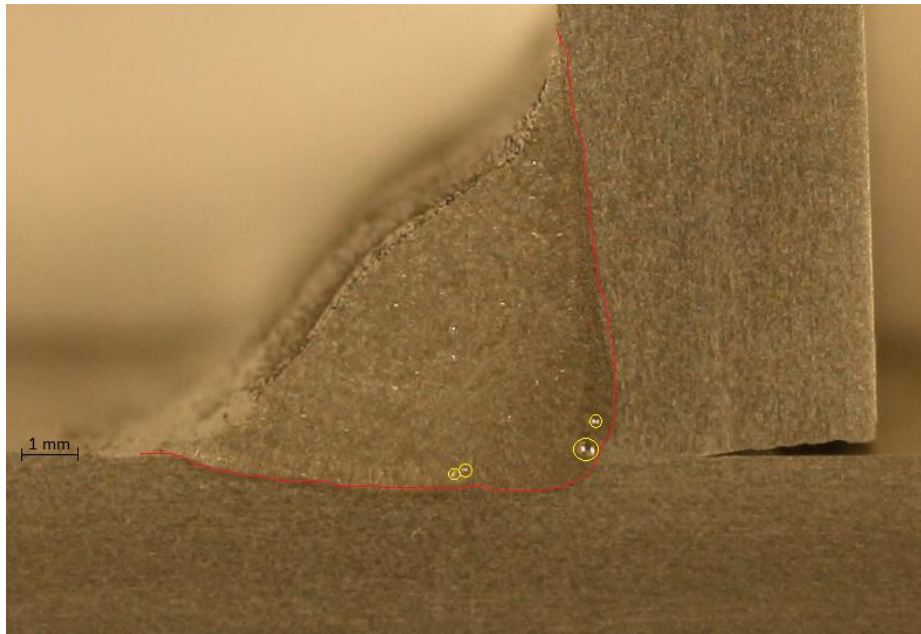


Slika 37. Makroizbrusak nakon postupka nagrivanja

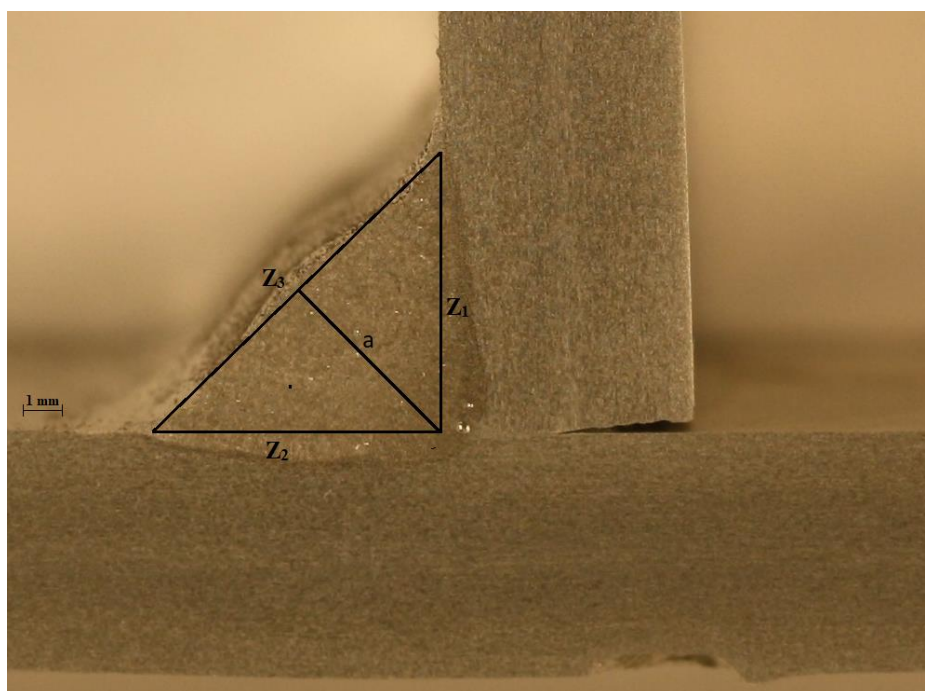


Slika 38. Detalj uzorka

Na detalju uzorka vidi se malo odvajanje dvaju ploča na dijelu koji nije bio protaljen zbog nedovoljno dobre pripreme prije samog postupka zavarivanja. Kontura zavara te najveće poroznosti su prikazane na slici 39. Poroznosti su praktično nemoguće za potpuno izbjeći kod zavarivanja aluminija i njegovih legura tako da se ova razina pogrešaka smatra prihvatljivom.



Slika 39. Prikaz konture zavara te poroznosti u zavaru



Slika 40. Geometrija zavara

Geometrija zavora je prikazana na slici 40. U tablici 9 prikazana je geometrija zavora. Prema podacima u tablici 9 vidljivo je da je prisutna pogreška nesimetričnog kutnog zavora. Ova pogreška najčešće nastaje kao rezultat neispravnog nagiba pištolja tijekom zavarivanja, a uzimajući u obzir da je zavarivanje bilo ručno ovo je potpuno unutar očekivanog.

Tablica 9. Prikaz izmjerenih geometrijskih veličina na uzorku

Z ₁ , mm	6,857
Z ₂ , mm	7,121
Z ₃ , mm	9,891
a, mm	4,945

5. ZAKLJUČAK

Aluminij je u kombinaciji sa raznim drugim elementima u obliku aluminijskih legura u kratkom vremenu postao jedan od najvažnijih industrijskih materijala. Zbog svojih jedinstvenih svojstava aluminijske legure su među najsvestranijim materijalima te se koriste u širokom spektru industrija. Glavne i gotovo neizbježne pojave kod zavarivanja aluminijskih legura su nepravilnosti poput poroznosti, toplih pukotina, redukcije čvrstoće u području zavara, redukcije električne i korozijske otpornosti. Unatoč navedenim nepravilnostima koje se javljaju kod zavarivanja aluminijskih legura, one su većinom zavarljive uz odgovarajuću pripremu i odabir tehnologije zavarivanja. Zahtijevani uvjeti za dobru kvalitetu zavara su ispunjeni postupcima kao što su MIG, TIG, lasersko, plazma te elektrootporno zavarivanje, ali samo uz ispunjenje dodatnih uvjeta poput prikladnog zaštitnog plina, dodatnog materijala, parametara zavarivanja, opreme i dr. Varijacija duplog pulsa MIG postupka je jedna od novije razvijenih tehnologija u području zavarivanja aluminijskih legura. Kod korištenja zavarivanja duplim pulsom dolazi do manjeg unosa topline te efektom miješanja u metalu zavara omogućuje usitnjavanje zrna što pozitivno utječe na metalurška i mehanička svojstva aluminijskih legura što je uvijek poželjna pojava.

U eksperimentalnom dijelu rada napravljen je jedan kutni zavar MIG postupkom korištenjem duplog pulsa u vertikalnom položaju sa smjerom zavarivanja prema gore (prema normi EN ISO 6947). Korištena je aluminijska legura 5086 te se zavarivalo ručno. Nakon su provedena nerazorna i razorna ispitivanja. Prvo se vizualnim pregledom pregledao zavar te nisu uočene značajnije pogreške nastale tijekom zavarivanja. Zatim se nakon nerazornog ispitivanja penetrantima ponovno pregledao zavar te još jednom nisu bile prisutne indikacije poroznosti ili nekih drugih pogrešaka očekivanih kod zavarivanja aluminijskih legura. Zadnje ispitivanje je bilo razorno, analiza makroizbrusaka. Nakon adekvatne pripreme izrezanih uzoraka na slikama uzoraka je bilo vidljivo nekoliko malih, zanemarivih poroznosti za zavarivanje aluminijskih legura te geometrija zavara koja nije bila savršeno simetrična, ali definitivno unutar toleriranih granica odstupanja. Također je bilo vidljivo da nije došlo do potpunog protaljivanja ploča što ukazuje na bolju kontrolu unosa energije. U konačnici se zaključuje da je MIG zavarivanjem duplim pulsom za odabrane parametre zavarivanja

dobiven kvalitetan zavar unatoč mogućih komplikacija u položaju zavarivanja u vertikalnom položaju.

LITERATURA

- [1] Mathers, G.: The welding of aluminium and its alloys, Cambridge, 2002.
- [2] Ferraris, S., Volpone, L.M.: Aluminium alloys in third millennium shipbuilding: Materials, technologies, perspectives, The Fifth International Forum on Aluminum Ships, Tokyo, 2005.
- [3] Kovačićek, F., Indof, J., Filetin, T.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2009.
- [4] Aluminijski materijali, Metalbiro, Zagreb, 1985.
- [5] Don Donaldson, Benny Raahauge - Essential Readings in Light Metals_ Volume 1_ Alumina and Bauxite-Wiley-TMS (2013)
- [6] Više autora: ASM Handbook, Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous alloys and special – purpose materials, ASM International, 1992.
- [7] Sheasby, P.G., Pinner Herold, R.: The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and Its Alloys, ASM International, 2001.
- [8] Inženjerski priručnik 4, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [9] Vrućinić, G.: Zavarivanje i zavarljivost aluminijska i legura, 5.Seminar DTZI, Pula, 2008.
- [10] ASM Handbook, Vol.6, Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, 1993.
- [11] Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization, Deekshant Varshney, Kushal Kumar, ScienceDirect
- [12] <https://www.aluminiumleader.com/application/transport/> , 15.12.2020.
- [13] Aluminium and the sea, Alcan aerospace, transportation and industry, 2004.
- [14] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [15] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Zavarivački i srodni postupci, FSB, Zagreb, 2015.
- [16] http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_AluminumMIGGM_AWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5356TM/c8100.pdf , 16.12.2020.
- [17] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt, 16.12.2020.
- [18] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, FSB, Zagreb, 2016.
- [19] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf , 20.12.2020.

- [20] Rudan, M.: MIG zavarivanje tankih aluminijevskih limova, 5. SEMINAR, Aluminij i aluminijevske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.
- [21] http://lindeplin.hr/dat/shieldinggases_.pdf , 20.12.2020.
- [22] Rudan, M.: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4.Seminar DTZI, Pula, 2007.
- [23] E. Warinsiriruk, J. Greebmalai, and M. Sangsuriyun, “Effect of Double Pulse MIG Welding on Porosity Formation on Aluminium 5083 Fillet Joint,” *MATEC Web Conf.*, vol. 269, p. 1002, Jan. 2019.
- [24] L. Wang, J. Li, W. Huang, M. Xu, and J. Xue, “Effect of Thermal Frequency on AA6061 Aluminum Alloy Double Pulsed Gas Metal Arc Welding,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 2152–2157, Oct. 2015.
- [25] L. Wang and J. Xue, “Perspective on Double Pulsed Gas Metal Arc Welding,” *Appl. Sci.*, vol. 7, p. 894, Sep. 2017.
- [26] “Strojevi i oprema za zavarivanje, podloge za predavanja.” Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [27] Živčić, M.: TIG zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Časopis Zavarivanje, 28 (1): 39-46., 1985.
- [28] <http://www.ram-rijeka.com/c/932/l/IT/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml> , 26.12.2020.
- [29] <http://arhiva.elitesecurity.org/t399555-TIG-zavarivanje-bez-zice> , 26.12.2020.
- [30] Živčić, M.: TIG zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Časopis Zavarivanje, 28 (2): 99-107., 1985.
- [31] Levshakov, V.M., Steshenkova, N.A., Nosyrev, N.A.: High-Production Laser and Plasma Welding Technologies for High-Speed Vessels Production, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol 8, No 9, 2014.
- [32] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, FSB, Zagreb, 1992.
- [33] “Welbee P 500L,” *Daihen Varstroj* : http://www.daihen-varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/welbee-varilni-inverterji1_ang/welbee-p-500l-eng.html , 2.2.2021.
- [34] “EZ - MIG AlMg5,” *Elektroda zagreb*: [https://www.ezg.hr/download/prod/071_EZ - MIG AlMg5.pdf](https://www.ezg.hr/download/prod/071_EZ_-_MIG_AlMg5.pdf) , 2.2.2021.
- [35] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/poloz.pdf> , 2.2.2021.