

# Zavarivanje aluminija

---

Šorman, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:004050>

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

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



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

# Veleučilište u Karlovcu

## Proizvodno strojarstvo



# ZAVRŠNI RAD

Student: Martin Šorman

Mentor: dr.sc. Tanja Tomić, dipl.ing.stroj.

Karlovac , 2018.

## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni preddiplomski studij: Strojarsstvo

Usmjerenje: Proizvodno strojarstvo

Karlovac , 01.03.2018.

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Martin Šorman**

Matični broj : 0110614029

Naslov: **ZAVARIVANJE ALUMINIJA**

#### Opis zadatka:

Aluminij je najrasprostranjeniji materijal na Zemlji. Kao takav je brzo pronašao primjenu u različitim granama industrije. U ovom radu obraditi će se aluminij i aluminijeve legure s aspekta primjene u industriji i mogućnosti spajanja primjenom topline. Biti će dan prikaz postupaka zavarivanja koji se uobičajeno koriste za zavarivanje aluminija. Također će se obraditi i problemi koji se javljaju pri zavarivanju te na koji način se isti mogu spriječiti.

**Zadatak zadan:**

12.02.2018

**Rok predaje rada:**

16.03.2018.

**Predviđeni datum obrane:**

23.03.2018.

**Mentor:**

dr.sc. Tanja Tomić, dipl.ing.stroj.

**Predsjednik Ispitnog povjerenstva:**

v.p. Marijan Brozović, dipl.ing.stroj.

# Sadržaj

<b>1. Uvod: Povijest i općenito o aluminiju.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Proizvodnja aluminija.....</b>	<b>10</b>
2.1. Boksit.....	10
2.2. Bayerov postupak za proizvodnju glinice.....	12
2.3. Hall – Heroult-ov proces.....	14
<b>3. Općenita svojstva aluminija.....</b>	<b>15</b>
<b>4. Aluminij i njegove legure.....</b>	<b>16</b>
4.1 Aluminij – bakar legure.....	17
4.2. Aluminij – bakar – silicij legure.....	17
4.3 Aluminij – silicij legure.....	18
4.4 Aluminij – silicij – magnezij legure.....	18
4.5 Aluminij – magnezij legure.....	18
4.6 Aluminij – cink – magnezij legure.....	19
4.7 Aluminij – kositar legure.....	19
<b>5. Primjena aluminija i njegovih legura.....</b>	<b>20</b>
5.1. Građevinarstvo.....	21
5.2. Transport.....	22
5.3. Pakiranje (ambalaža).....	23
5.4. Elektro – sektor.....	24
<b>6. Zavarivanje aluminija i aluminijskih legura.....</b>	<b>25</b>
6.1. Važna svojstva aluminija, kod zavarivanja, u odnosu na čelik.....	25
6.2. Zavarljivost aluminija.....	26
6.2.1. Poroznost(zaostalog plina).....	27
6.2.2. Uklanjanje oksidnog sloja tijekom zavarivanja.....	29

6.2.3. Tople pukotine.....	30
<b>7. Glavni postupci zavarivanja.....</b>	<b>33</b>
<b>7.1. TIG zavarivanje.....</b>	<b>33</b>
7.1.1. Postupak zavarivanja.....	34
7.1.2. Zaštitni plin.....	34
7.1.3. Pištoji i oprema za zavarivanje.....	36
7.1.4. Volframove elektrode.....	36
<b>7.2. MIG zavarivanje.....</b>	<b>38</b>
7.2.1. Postupak zavarivanja.....	38
7.2.2. Zaštitni plin.....	39
7.2.3 Pištolj za zavarivanje.....	41
7.2.4. Žica dodatnog materijala.....	43
<b>8. Ostali postupci zavarivanja.....</b>	<b>44</b>
<b>8.1. Plazma zavarivanje.....</b>	<b>44</b>
8.1.1. Plazma – TIG zavarivanje.....	44
8.1.2. Plazma – MIG zavarivanje.....	46
<b>8.2. Zavarivanje laserom.....</b>	<b>46</b>
<b>Zaključak.....</b>	<b>48</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>49</b>

## Popis slika, tablica, dijagrama

Slika 1. Fotografije Heroult-a i Hall-a.....	8
Slika 2. Graf proizvodnje Aluminija.....	10
Slika 3. Primjer boksita.....	11
Slika 4. Primjer glinice.....	12
Slika 5. Crveni mulj ( $Fe_2O_3$ ).....	13
Slika 6. Al kemijski element.....	15
Slika 7. Profili od aluminija.....	21
Slika 8. Boeing 747.....	22
Slika 9. Aluminijska folija.....	23
Slika 10. Primjer aluminijskog kabla.....	24
Slika 11. Fino raspršena poroznost u čeonom spoju aluminija debljine 6mm (TIG).....	27
Slika 12. „Zarobljen“ oksidni sloj unutar zavora.....	30
Slika 13. Tople pukotine , a) u završetku TIG zavora , b) u 3 mm debeloj ploči TIG zavora sa dodatnim materijalom.....	32
Slika 14. Shematski prikaz TIG zavarivanja.....	33
Slika 15. Kutni spoj , TIG zavarivanje izmjeničnom strujom zaštićeno argonom kod 6 mm debele ploče.....	35
Slika 16. Kutni spoj , TIG zavarivanje istosmjernom strujom zaštićeno helijom , 6 mm debela ploča.....	35
Slika 17. Preporučeni izgled volframove elektrode.....	37
Slika 18. Kut pištolja i žice dodatnog materijala.....	37
Slika 19. Shematski prikaz MIG zavarivanja.....	39
Slika 20. Prikaz tipičnog MIG pištolja.....	40

Slika 21. Kutni zavar , MIG zavarivanje , zaštitni plin argon , 12 mm debela ploča.....	42
Slika 22. Kutni zavar , MIG zavarivanje , helij zaštitni plin , 12 mm debela ploča.....	42
Slika 23. Kutni zavar , MIG zavarivanje , zaštitni plin argon-helij , 12 mm debela ploča.....	43
Slika 24. Prikaz plazma – TIG zavarivanja „preneseni luk“ .....	45
Slika 25. Princip laserskog zavarivanja.....	47

---

Tablica 1. Svojstva aluminija.....	16
------------------------------------	----

---

Dijagram 1. Uporaba aluminija po industrijama.....	21
--	----

---

# Sažetak

Rad je podijeljen na nekoliko dijelova kako bi se moglo detaljnije obraditi svaki od njih. U prva dva dijela objašnjena je povijest aluminija kada se počeo koristiti i kako je njegov utjecaj na industriju narastao do danas. Također objašnjena je proizvodnja potonjeg od njegove rude sve do postupka odvajanja aluminijevog oksida.

U trećem i četvrtom dijelu objašnjena su opća svojstva aluminija i svojstva aluminijevih legura. Treći dio se bavi svojstvima aluminija kao kemijskog elementa, a četvrti nekima od aluminijevih legura gdje se поближе opisuje njihova svojstva i utjecaj svakog od legiranih elemenata na leguru.

U petom dijelu je objašnjena uporaba aluminija. Navedeno je koliko se aluminij koristi u kojoj grani industrije, u kojim granama industrije se najviše koristi. Objasnjeno je također u kojim proizvodima danas imamo najviše aluminija.

U šestom dijelu kreće se sa zavarivanjem aluminija gdje su obrađena svojstva aluminija, specijalizirano ona u odnosu na čelik kao i zavarljivost samog aluminija. Pokazani su problemi koji se pojavljuju kod zavarivanja aluminija i njegovih legura te način na koji ih pokušati riješiti.

U sedmom dijelu objašnjena su dva glavna postupka zavarivanja MIG i TIG zavarivanje. Objasnjeno je поближе kako se svaki od tih postupaka koristi na aluminiju kao i njihov potrošni materijal koji koristimo kod zavarivanja.

U zadnjem osmom dijelu obrađeni su samo neki od ostalih postupaka zavarivanja aluminija. U ovom slučaju to su dva zavarivanja laserom i plazma zavarivanje. Pokazano je kako su ovi postupci također pogodni za zavarivanje aluminija i kod plazma zavarivanja neke od kombinacija sa drugim postupcima zavarivanja.



## 1. Uvod

### *Povijest i općenito o Aluminiju*

Postojanje aluminija prvi je otkrio Sir Humphrey Davy u prvom desteljeću devetnaestog stoljeća da bi 1825. godine bio prvi puta izoliran od Hans Christian Oersted-a.

Ostao je nešto kao labaratorijska znatiželja za sljedećih 30 godina kada je počela neka ograničena proizvodnja , ali tek 1886 vađenje aluminija iz rude boksita postao je uistinu održiv industrijski proces.

Metodu ekstrakcije/vađenja aluminija istodobno je izumio Paul Heroult u Francuskoj i Charles M. Hall u SAD-u , a taj temeljni proces još uvijek je u uporabi.



Paul-Louis-Toussaint Héroult

Charles Martin Hall

Slika 1. Fotografije Heroult-a i Hall-a

Zbog svoje reaktivne prirode aluminij nije pronađen kao samostalan element u prirodi, ali je prisutan u zemljinoj kori u obliku različitih spojeva ( nekoliko stotina).

Najvažniji od njih je boksit.

Postupak ekstrakcije/vađenja sastoji se od dvije odvojene faze , prva je odvajanje aluminijevog oksida  $Al_2O_3$  od rude , a druga je elektrolitička redukcija između  $950\text{ }^\circ\text{C}$  i  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  u kriolitu ( $Na_3AlF_6$ ).

To nam daje aluminij koji sadrži 5 - 10 % nečistoća kao što su Silicij (Si) i Željezo (Fe) , koji se potom čisti ili daljnjim postupkom elektrolize ili pomoću zone-melting tehnike da bi dobili metal čišće od oko 99.9 % .

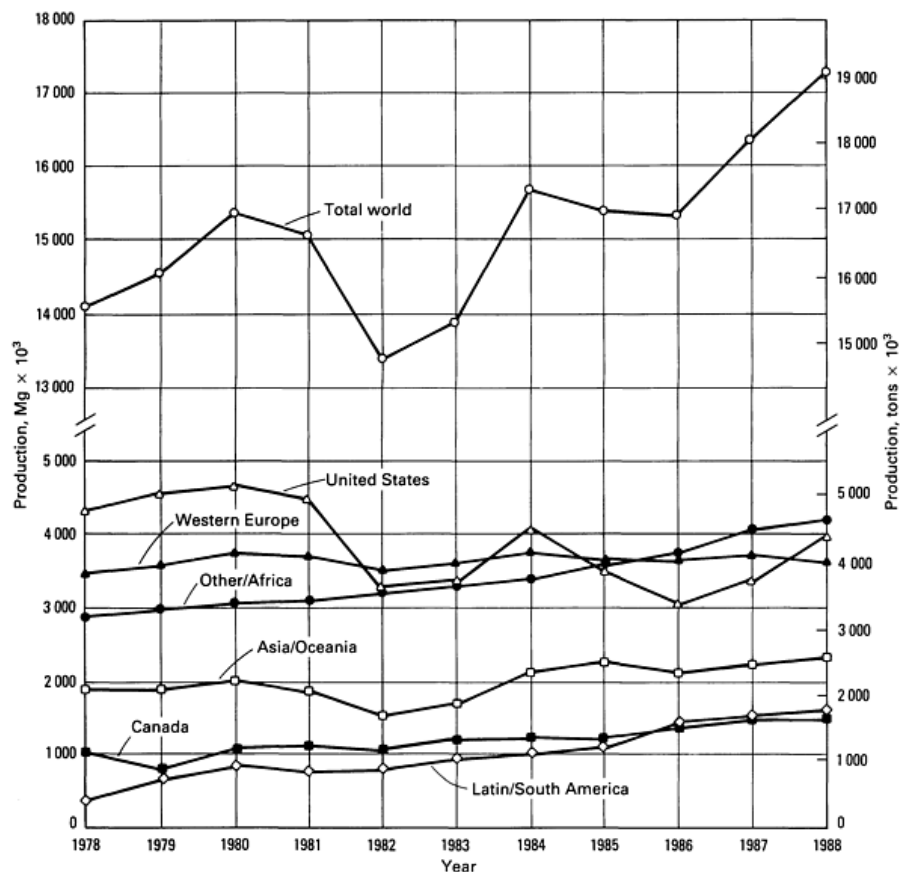
Na kraju dvadesetog stoljeća veliki je udio aluminija dobiven od recikliranog i otopljenog otpada , samo od tog izvora godišnje se u europi dobije oko 2

milijuna tona aluminijskih legura. Dobiveni čisti metal(aluminij) je relativno slab i kao takav se rijetko koristi , posebno u konstrukciji . Za povećanje mehaničke čvrstoće , čisti aluminij je općenito legiran s metalima kao što su bakar (Cu) mangan (Mn) magnezij ( Mg ) silicij ( Si ) i cink ( Zn ). Jedna od prvih proizvedenih legura bila je aluminij – bakar. Oko 1910. godine otkriven je se mnoge od tih legura počele upotrebljavati u aeronautičkoj industriji. Od tada je razvijen veliki niz legura s čvrstoćom koja prati kvalitetan ugljičan čelik ali s trećinom težine. Veliki poticaj razvoju aluminijskih legura dala su dva svjetska rata , osobito drugi svjetski rat kada aluminij postaje metal u konstrukcijskim dijelovima zrakoplova. Također u tom razdoblju došlo je do velikog napretka u proizvodnji aluminijskih i njegovih legura sa razvojem postupaka zavarivanja u neutralnom smjesi plinova ( MIG i TIG) . To nam je omogućilo varove visoke čvrstoće bez potrebe štetnih praškova za zavarivanje. Nakon završetka drugog svjetskog rata , imamo industriju koja traži nova tržišta u kojima bi mogla prodavati svoje proizvode . Postojala je potreba za tzv. „affordable housing“ (pristupačnim skladištima) pa tako nastaju prerađeni aluminijski bungalovi napravljeni od ostataka vojnih zrakoplova. Istovremeno domaći pribor, cestovna vozila, brodovi i konstrukcije su uključivale/koristile sve više aluminijskih legura.

Zapadna Europa proizvodi preko 3 milijuna tona primarnog aluminijskog (od rude) i gotovo 2 milijuna tona sekundarnog ili recikliranog aluminijskog godišnje. Također uvozi oko 2 milijuna tona aluminijskog godišnje, što rezultira potrošnjom po stanovniku od oko 17 kg godišnje. <sup>1</sup> (1)

---

<sup>1</sup> 1) Gene Mathers, «The welding of aluminium and its alloys» ,Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002. (str. 1. – 2. )



Slika 2. Graf proizvodnje Aluminija (literatura 9 )

## 2. Proizvodnja Aluminija

### 2.1. Boksiti

Boksiti su najvažnija ruda aluminija iz koje se danas dobiva skoro cjelokupna svjetska proizvodnja glinice i aluminija.

Po kemijskom sastavu, boksiti su složena polikomponentna sirovina. Osnovne komponente u njima su minerali aluminija, željeza, silicija, titana, kalcija i magnezija. Pored osnovnih komponenti boksiti sadrže u malim količinama i minerale niza drugih elemenata:

Na, K, P, Cr, V, Ga, Zr, Pb, Cu, Ni, Mn, Co i dr.



Slika 3. Primjer boksita

U pravilu, boksiti uvijek sadrže organske supstance i manje ili veće količine sumpora. Prema nekim autorima, u boksitima je utvrđeno prisustvo oko 42 kemijska elementa.

Kvaliteta boksita, u smislu mogućnosti korištenja za proizvodnju glinice, uglavnom se određuje sadržajem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$ . Što je sadržaj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  veći, a sadržaj  $\text{SiO}_2$  manji, boksit je kvalitetniji i obrnuto. Tu se može, u manjoj mjeru, uključiti i sadržaj drugih komponenti, kao što su Fe,  $\text{CO}_2$ , Zn, Ti i dr. U odnosu na sadržaj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  kvaliteta boksita se definira tzv. silicijskim modulom, koji se izražava kao postotni odnos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  u boksitu, prema jednadžbi.

$$\eta_{\text{Si}} = \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{SiO}_2}$$

gdje je: -  $\eta_{\text{Si}}$  - silicijski modul boksita.

Sa stanovišta Bayerovog postupka proizvodnje glinice, danas se smatra da su boksiti s  $\eta_{\text{Si}} = 10$  kvalitetni, s  $\eta_{\text{Si}} = 8 - 10$  takve kvalitete da se mogu prerađivati te oni s  $\eta_{\text{Si}} < 8$  loše kvalitete čija prerada nije ekonomski opravdana.

Kvaliteta boksita najviše ovisi o primjesama željeza i silicija. Željeza obično ima relativno mnogo, ali ono nema bitan utjecaj pri preradi, jer nije topljivo u NaOH koja služi za izlučivanje boksita. Ipak se dio NaOH gubi sa sada nastalom većom količinom crvenog mulja, bez obzira što se on prije odlaganja ispire.<sup>2</sup> (3)

<sup>2</sup> 3) <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/metalurgija-aluminija> (str. 17. – 19. )

## 2.2 Bayerov postupak za proizvodnju glinice

Hidrometalurški Bayerov postupak danas je osnovni i dominirajući postupak za proizvodnju glinice. Njegovom primjenom se proizvodi 90 % glinice u svijetu. Ovakva masovna zastupljenost Bayerovog postupka, prisutnog preko 100 godina u industrijskoj praksi, može se objasniti prije svega činjenicom da se u



Slika 4. Primjer glinice

prirodi još uvijek nalaze velike količine kvalitetnih, niskosilicijalnih boksita. Za preradu takvih boksita Bayerov postupak je najekonomičniji, relativno jednostavan i osigurava proizvodnju glinice visokog kvalitete. Bayerov postupak razradio je u periodu 1887. - 1892. godine austrijski kemičar Carl Josef Bayer, po kome je i dobio ime.

Bit procesa se nije promijenila, ali su promjene nastale zbog usavršavanja koja je donijelo novo doba, tako da se današnji Bayerov postupak može nazvati modificirani Bayerov postupak.

Bayerov postupak raščinjavanja boksita za dobivanje glinice temelji se na topljivosti aluminijske komponente iz boksita u vrućoj otopini NaOH, pri čemu nastaje topljivi natrijev aluminat  $\text{NaAlO}_2$  i netopljivi ostatak sastavljen iz željezne, silicijeve i 42 titanove komponente koji se naziva "crveni mulj". Cilj je otopiti što više glinice, a što manje oksida, a to se postiže s jako bazičnom otopinom. Prosječni sastavi boksita koji se mogu uspješno prerađivati

Bayerovim postupkom su: 46 - 65 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , < 5 %  $\text{SiO}_2$ , 12 - 18 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i 1 - 4 %  $\text{TiO}_2$ . (5)

Proces počinje drobljenjem i mljevenjem boksita, nakon čega slijedi rastvaranje u natrijevoj lužini, pri čemu aluminijski oksid prelazi u otopinu natrijeva aluminata ( $\text{NaAlO}_2$ ).

Netopivi sastojci boksita ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) ostaju u lužnatom zaostatku kao tzv. crveni mulj.

Slijedi odvajanje crvenog mulja od rastvora aluminatne lužine dekantacijom. Kad se bistra aluminatna lužina ohladi, razrijedi i cijepi dodatkom aluminijeva hidroksida, iz nje se izlučuje aluminijev hidroksid ( $\text{AlOH}_3$ ) koji, filtriran, ispran i kalciniran daje glinicu.

Pažljivo ispran i filtriran aluminijev hidroksid kalcinira se u rotacionim pećima na 1200 do 1300 °C. Zagrijavanje se vrši mazutom ili zemnim plinom. (10)

Crveni mulj sastoji se većinom od željezovog oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) koji mu daje karakterističnu crvenu boju, a ostatak čine silicijev oksid ( $\text{SiO}_2$ ) i titanov oksid ( $\text{TiO}_2$ ) te ostale primjese. Crveni mulj predstavlja nepoželjni i vrlo opasan otpad za okoliš koji nastaje tijekom procesa te se mora vrlo pažljivo zbrinuti na za to predviđena odlagališta. Četvrta faza procesa je taloženje aluminijevog hidroksida ( $\text{AlOH}_3$ ) iz otopine aluminijevog aluminata koje se provodi pri temperaturama oko 40 °C. Posljednja faza Bayerovog postupka je proces kalcinacije odnosno hidratizacije aluminijevog hidroksida koje se provodi pri povišenim temperaturama u cilju dobivanja nehigroskopskog oksida aluminija ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) odnosno glinice pogodne za elektrolitičko dobivanje aluminija.<sup>3</sup> (3)



Slika 5. Crveni mulj ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

<sup>3</sup> 3) <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/metalurgija-aluminija> (str. 41. – 43. )

### 2.3 Hall-Heroult-ov proces

<sup>4</sup>U Hall-Heroult-ovom procesu aluminij se proizvodi elektrolitičkom redukcijom glinice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) otopljene u kupki temeljenoj na rastaljenom kriolitu ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Metal se taloži na dnu ugljenog korita i s njim tvori katodu ćelije, dok se kisik izbija na ugljenoj anodi ćelije, reagirajući s njom i trošeći je, da bi tvorio ugljični dioksid. Općenito je usuglašeno mišljenje da se rastaljeni kriolit potpuno disocira na ione natrija ( $\text{Na}^+$ ) i na ione  $\text{AlF}_6^{3-}$ .

Glinica, otapanjem u kupki od kriolita, formira različite aluminijske oksid-fluoridne ione, koji se prenose na pozitivnu anodu (koju izgaraju) i kao anodni plin izlaze iz ćelije. Anodni plin sadrži, između ostalih, i emisije fluorida iz kupke, pa se odvodi u sustav za čišćenje plinova, prije nego što bude izbačen u atmosferu.

Povećanje znanja o kemijskim i elektrokemijskim procesima koji se odvijaju u tvornicama aluminijske industrije, bilo je omogućeno promjenama koje su učinjene u kemijskom sastavu kupke. Neki su fluoridi u malim i ograničenim količinama dodani u kupku s namjerom sniženja njene temperature i povišenja učinkovitosti elektrolitičkog procesa. Aluminijski fluorid ( $\text{AlF}_3$ ) je najčešći dodatak i danas praktički sve ćelije rade s jednim viškom sadržaja aluminijskog fluorida u odnosu na sadržaj istog u kriolitu. Kupka uvijek sadrži i izvjesnu količinu kalcijevog fluorida ( $\text{CaF}_2$ ), koji uglavnom potječe od kalcijevog oksida ( $\text{CaO}$ ), koji se nalazi kao nečistoća u doziranoj glinici, ali se također u nekim slučajevima kalcijev fluorid hotimično dodaje u kupku.

Prema Faradayevom zakonu elektrolize, jedan faradej elektriciteta (26,8 Ah) bi trebao teorijski proizvesti jedan gram-ekvivalent aluminijske (9,0 g). Međutim, u praksi se obično proizvede između 85 i 95 % od te količine metala. Glavni gubitak u iskorištenju struje je uzrokovan reoksidacijom tekućeg aluminijske s ugljičnim dioksidom. (5)

---

<sup>4</sup> 5) <http://miroslavjakovljevic.iz.hr/o-aluminiju/> (osnovno o tehnologiji proizvodnje aluminijske)



### 3.Općenita svojstva aluminija



Slika 6. Al kemijski element (4)

<sup>5</sup>Aluminij je srebrnobijel, mekan, relativno krt i sjajan metal. Lagan je, može se kovati, valjati u vrlo tanke listiće i izvući u fine niti. Po plastičnosti je treći, a po kovnosti šesti od tehnički važnih metala. Dobar je vodič topline i električne struje. Iako spada u skupinu neplemenitih metala, vrlo je otporan prema utjecaju korozivnih tvari kao što su voda, dušične kiseline, mnoga organska otapala, te atmosferski utjecaji. Uzrok postojanosti je stvaranje tankog oksidnog sloja na površini metala koji se ne ljušti i štiti metal od daljnje oksidacije. Umjetno pasiviziranje površine vrši se postupkom elektrolitičke oksidacije poznate pod tehničkim nazivom eloksiranje.

Aluminij nije otrovan, ali nema niti posebnu biološku funkciju. Već pri sobnoj temperaturi se lako otapa u lužinama pri čemu nastaju aluminati, i u neoksidirajućim kiselinama kada nastaju soli.

Sposobnost otapanja elementa u kiselinama i lužinama naziva se amfoternost.

Zahvaljujući navedenim svojstvima aluminij ima vrlo široku primjenu u građevinarstvu, metalurgiji, strojogradnji i velikom broju drugih djelatnosti. Sam elementarni aluminij ima znatno užu primjenu jer je mek i krt. Elementarni aluminij koristi se npr. za napanje na glatke plohe gdje stvara visokoreflektirajući sloj - gotovo idealno zrcalo, pa se koristi kao nanos na teleskopskim zrcalima i drugim reflektirajućim ploham.

Kao tehnološki metal aluminij se prvenstveno koristi legiran s drugim metalima.

(4)

---

<sup>5</sup> 4) <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html> (Svojstva i uporaba aluminija)



Tablica 1. Svojstva aluminija (literatura 8)

Fizikalno svojstvo, simbol	Vrijednost, mjerna jedinica
Atomski broj	13
Atomska masa, Ar	26.98
Valencija	3
Kristalna struktura	FCC
Talište, $\vartheta$	660.2 °C
Vrelište, $\vartheta$	2480 °C
Gustoća, $\rho$	2.6898 g/cm <sup>3</sup>
Poissonov koeficijent, $\nu$	0.34
Modul elastičnosti, E	68.3
Koeficijent toplinskog istezanja (0-100 °C), $\alpha_1$	23.5 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Električni otpor na 20°C, $\rho$	2.69 $\Omega$ cm

## 4. Aluminij i njegove legure

Iako je razvijen velik broj aluminijskih legura postoji sedam osnovnih obitelji:

- Aluminij - bakar (2xx)
- Aluminij – silicij - bakar (3xx)
- Aluminij - silicij (4xx)
- Aluminij - silicij-magnezij (3xx)
- Aluminij - magnezij (5xx)
- Aluminij - cink-magnezij (7xx)
- Aluminij - kositar (8xx)

### 4.1 Aluminij-Bakar legure

Aluminij-bakrene legure uglavnom se koriste u lijevanom i kovanom obliku gdje je potrebna čvrstoća i otpornost. Te legure pokazuju visoku čvrstoću na sobnim i povišenim temperaturama. Prve značajne legure aluminija za kovanje sadržavale su bakar u koncentracijama do 10 %. Bez razumijevanja toplinske obrade, ove legure pokazale su značajno poboljšane čvrstoće i tvrdoće u kovanom stanju.

Razvijene su mnoge legure koje sadržavaju 4 do 5% , obično s različitim količinama magnezija. Srebro ubrzava reakciju na starenje i smanjuje rizik od korozije. Ove legure podložne toplinskoj obradi predstavljaju imaju najveću čvrstoću od bilo koji drugih komercijalnih legura. S kontroliranim nečistoćama također je postignuta odlična rastezljivost. Kombinacija vlačnih svojstava i rastezljivosti pruža izuzetnu žilavost. Legure ovog tipa su osjetljive na pucanje. Potrebne su točne tehnike ljevanja kako bi se to izbjeglo.

Aluminijske legure koje sadrže bakar manje su otporne na koroziju. Bakar je obično temelj legure za poboljšana mehanička svojstva na povišenoj temperaturi, često s dodatkom nikla.

#### ***4.2 Aluminij – Silicij – Bakar legure***

Među najčešće korištenim aluminijevim legurama su one koje sadrže silicij i bakar. Količine oba dodatka dosta variraju, tako da bakar prevladava u nekim legurama, a silicij u drugima. Bakar pridonosi čvrstoći i obradljivosti legure, a silicij pridonosi boljoj livljivosti. Legure koje sadrže višlje koncentracije silicija su pogodnije za složenije odljevke, za trajni kalup i ostale procese lijevanja. Aluminij – silicij – bakrene legure s manje od 5.6 % Cu je moguće toplinski obraditi , ali važnije legure ove vrste su i one koje sadrže magnezij. Reakcija toplinske obrade je poboljšana što dovodi do vrlo lijepog raspona svojstava uključujući vrhunsku sposobnost čvrstoće. Mnoge hipereutektične silicijske legure(12 - 30 % Si ) isto tako sadrže bakar. Primarna faza silicija pridonosi odličnoj otpornosti na trošenje, a bakar pridonosi očvršćivanju i čvrstoći na visokim temperaturama.

### ***4.3 Aluminij – Silicij legure***

Binarne aluminij – silicij legure pokazuju izvrsnu fluidnost , livljivost (mogućnost lijevanja) , te otpornost na koroziju. Te legure pokazuju nisku čvrstoću i lošu mogućnost obrade. Duktilnost (žilavost) koja može biti izuzetna je takva zbog niskih koncentracija onečišćenja i mikrostrukturnih svojstava. Čvrstoća duktilnost i livljivost hipoeutektičnog aluminij – silicija može se još dodatno poboljšati podešenjem sastava silicija i aluminija. Podešenje tj modifikacija se radi u pješčanim kalupima te se može učinkovito postići kontroliranim dodavanjem natrija i/ili stroncija. Veće stope skrućivanja također promiču finije eutektične mikrostrukture . Aluminija – silicij legure pokazuju nisku specifičnu težinu i nizak koeficijent temperaturne rastezljivosti. U hiper eutektičnim aluminij – silicijskim legurama, silicij sa dodatkom fosfora neophodan za lijevanje i svojstva proizvoda.

### ***4.4 Aluminij – Silicij – Magnezij legure***

Dodavanje magnezija u aluminij – silicijske legure tvori novu vrstu legure koja nam kombinira odlična svojstva lijevanja s izvrsnim svojstvima nakon toplinske obrade. Otpornost na koroziju je također odlična i zadržava se nizak nivo toplinske rastezljivosti. Iako nema toliko veliku čvrstoću kao Al-Cu i Al-Si-Cu legure , mehanička svojstva od nekih Al-Si-Mg legura pokazuju svojstvo dosta visoke čvrstoće. Dodavanjem berilija povećava se čvrstina i žilavost. Eutektične modifikacije ostaju važne kao sredstvo poboljšavanja čvrstoće , elastičnosti i poboljšanja rezultata lijevanja.

### ***4.5 Aluminij – Magnezij legure***

To su u suštini binarne legure s umjerenim do visokim svojstvima čvrstoće i žilavosti. Njihova najvažnija karakteristika(osobina) je otpornost na koroziju , uključujući izlaganje morskoj vodi i morskoj atmosferi. Ova karakteristika također je osnova za povećanu uporabu u preradi hrane i pića. Aluminij – magnezij legura ima izvrsnu zavarljivost i često se koriste u arhitektskim i ostalim dekorativnim svrhama. Aluminij – magnezij legure imaju dobru mogućnost obrade , zavarljivost , i atraktivan izgled bilo da je izrađen , obrađen ,

poliran ili anodiran. U usporedbi sa aluminij – silicij legurama , sve aluminij – magnezij legure zahtijevaju veću kontrolu temperaturnih uvjeta. Magnezij u aluminijevim legurama povećava udio oksidacije. U rastaljenom stanju , gubici magnezija mogu biti značajni i oksidi od aluminijska i magnezija mogu utjecati na kvalitetu lijevanja. „Spinels“ ( $MgAl_2O_4$ ) aluminijeva i magnezijeva oksida formiraju se nezaštićenim izlaganjem pri visokim temperaturama rastaljenog materijala(metala) . Legure koje sadrže  $> 7.0 \%$  Mg su toplinski obradive , iako toplinske obrade se obično koriste za stabiliziranje svojstava koja se mogu inače promijeniti , u nekim spojevima, tijekom dugih vremenskih razdoblja.

#### ***4.6 Aluminij – Cink – Magnezij legure***

Mnoge legure ovog tipa prirodno stare , postizući punu čvrstoću 20 do 30 dana na sobnoj temperaturi nakon lijevanja. Toplinska obrada obično nije potrebna za razvoj legure. Brzo skrućivanje u tim legurama može rezultirati mikro-raspadanjem(odvajanjem) magnezij – cinka šta smanjuje potencijal (mogućnosti očvršnuća. Konvencionalne toplinske obrade mogu se koristiti kada razvoj odgovarajućih svojstava se ne događa kroz prirodno starenje. Budući da visoko temperaturna toplinska obrada i gašenje obično nisu potrebni , izbjegavaju se visoki ostaci napetosti i izobličenja. Umjetni procesi starenja mogu se koristiti za ubrzavanje procesa skrućivanja i postupaka žarenja da bi se postigla ista svrha s poboljšanom dimenzijskom i strukturnom stabilnošću. Ove legure obično pokazuju umjerena do dobra vlačna svojstva u stanju lijevanja.

Temperature taljenja legura u ovoj skupini su visoke, prednost je u odljevcima koji se moraju lemiti. Mogućnost obrade i otpornost na opću koroziju su dobri. Svojstvo lijevanja Al-Zn-Mg legure je loše i potrebne su dobre lijevaonice kako bi smanjile mogućnosti „Shrinking defekta“(ako pri hlađenju nema materijala koji nadoknadio početni koji se smanjuje pri skrućivanju).

#### ***4.7 Aluminij – Kositar legure***

Kositar je glavni element legiranja u spojevima koji su razvijeni za industriju ležajeva. Također se primjenjuje s bizmutom , olovom i kadmijem pri nižim koncentracijama kako bi se osigurala bolja strojna obrada. Legure koje sadrže 5.0 do 7.0 % kositra dosta se koriste u ležajevima i čahurama u kojima je nisko trenje , tlačna čvrstoća , otpornost na koroziju , umor i čvrstoća materijala važni

uvjeti. Dodatak bakra, nikla i magnezija doprinosi tvrdoći i čvrstoći, a silicij je dodan kako bi se poboljšalo svojstvo lijevanja i povećala tlačna čvrstoća. Većina ležajeva proizvodi se trajnim kalupima. Povećane stope skrućivanja promoviraju finije ujednačenije raspršenje kositra. Veći, specijalno dizajnirani i ležajevi malog broja ipak se uspješno lijevaju u pješčanim kalupima. Aluminij kositrene legure jedinstvene u odnosu na ostale značajne spojeve. Aluminij i kositar su u biti ne spojivi (ne mogu se međusobno mješati). Prije i nakon skrućivanja kositar je prisutan u raspršenom obliku. Aluminij – kositrene legure koje sadrže bakar možemo toplinski obraditi. Većina ležajeva lijeva se obične pune ili šuplje cilindrične oblike, dijelovi se mogu plastično ohladiti da bi se povećala tlačna čvrstoća.<sup>6</sup>

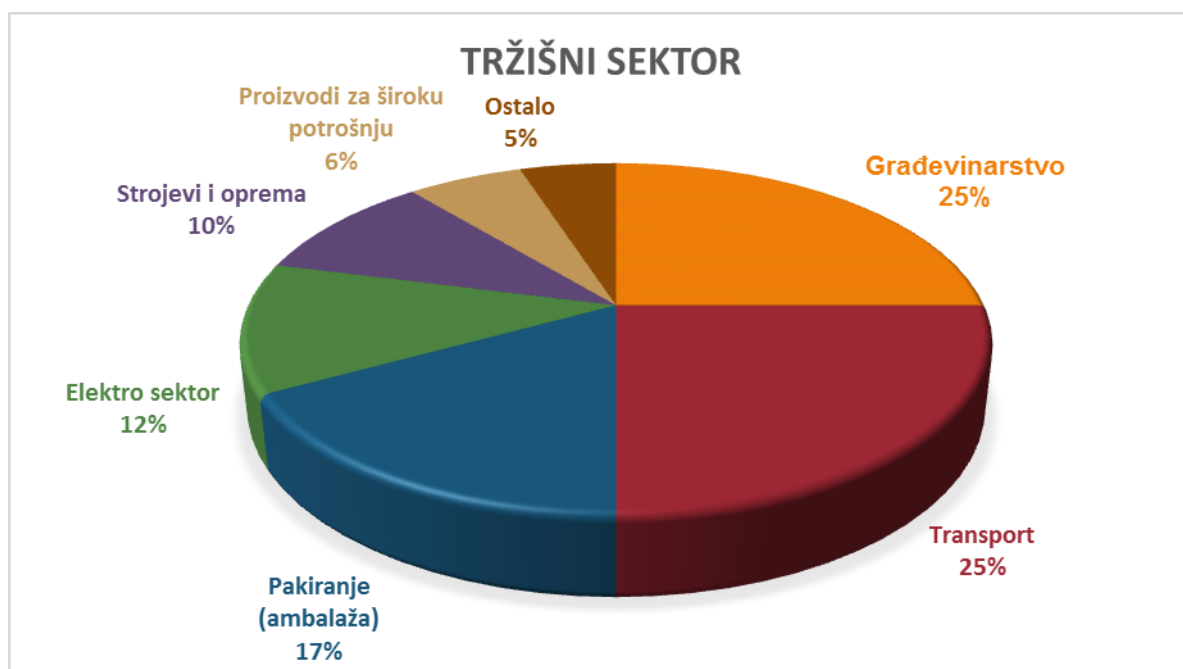
(2)

## ***5. Primjena aluminija i njegovih legura***

Primjeri primjene aluminija i aluminijskih slitina dostupni su sve širem broju korisnika proizvoda od tradicionalnih materijala, koji se, uvidjevši prednosti korištenja aluminijskih slitina, unatoč povećanim troškovima, sve češće odlučuju za korištenje aluminijskih izvedbi istog proizvoda. Razvoj novih tehnologija iz drugih grana industrije, uz manje modifikacije i prilagodbe, omogućuje raznovrsniju proizvodnju predmeta od aluminija i aluminijskih slitina. Predmeti od aluminija i aluminijskih slitina, na taj su način, još više komercijalizirani i približeni čovjeku u njegovom svakodnevnom životu.

---

<sup>6</sup> 2) Kaufman, J.G.: Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications, ASM International, 2004. (str. 13. – 14. )



Dijagram 1. Uporaba aluminija po industrijama (literatura 3)

## 5.1 Građevinarstvo

Zbog svoje gustoće, kao i potpune antikorozivnosti aluminij je idealan materijal za sve klimatske uvjete i lokacije i kao takvom mu je najveće tržište u građevinarstvu. U brojnim novosagrađenim domovima upotrebljavaju se aluminijska vrata, fasade, prozori, pokrovi, odvodi i žljebovi, koji zahtijevaju minimalno održavanje, a vrlo su dugotrajni. Ne zanemaruje se i mogućnost eloksiranja i anodiziranja vanjske površine aluminija. To su postupci kojima se aluminiju daju sve pastelne boje, kojima se može, s obzirom nastanje i efekt površine, imitirati plemenite metale, porculan i dr. Danas je aluminij također i glavni industrijski građevni proizvod. Aluminijske slitine posebno su primjenjive u uvjetima priobalnog područja, gdje je morska sol vrlo štetna za ostale metale.



Slika 7. Profili od aluminija

## 5.2 Transport

Drugo najveće tržište je tržište transporta i transportne tehnike gdje je aluminij cijenjen radi svoje male gustoće i dobrih mehaničkih svojstava. Ostala dobra svojstva aluminija, kao što su lakoća obrade, veliki izbor profila i nezapaljivost, proglašavaju ga materijalom budućnosti. Materijali koji se koriste za konstrukciju zrakoplova moraju zadovoljiti svojstva kao što su mala težina, izdržljivost i otpornost na oštećenja i koroziju. U industriji zrakoplova aluminij se nalazi u motorima zrakoplova, okvirima, oblogama, opremi za slijetanje i interijeru. Otpornost na atmosferske utjecaje, mala gustoća, dobra toplinska vodljivost, učinili su ga najpoželjnim materijalom u izgradnji satelita i ostalih svemirskih objekata.



Slika 8. Boeing 747

Neke procjene govore da se udio aluminija kreće do 80 % mase konstrukcije zrakoplova. Standardni Boeing 747 „Jumbo jet“ sadrži otprilike 75.000 kg aluminija. Zahvaljujući kontinuiranom razvoju aluminijskih slitina i usporednoj primjeni kompozita, postignut je značajan napredak u pogledu brzine zrakoplova, nosivosti, težine, veličine, sigurnosti i trajnosti. Kako aluminijske slitine postaju sve bolje i kvalitetnije, zrakoplovi su sve lakši, a time mogu primati i veći broj putnika što pogoduje troškovnoj isplativosti. S obzirom na činjenicu da se precipitacijskim očvršćivanjem čvrstoća aluminija približava čvrstoći mnogih čelika te uz svojstva kao što su mala težina, niska gustoća, dobra otpornost koroziji i mogućnosti recikliranja, aluminij je gotovo idealan materijal za primjenu u zrakoplovnoj industriji.

Treba naglasiti da aluminij legiranjem može dostići čvrstoću konstrukcijskih čelika, pri čemu je i dalje skoro tri puta lakši. Zbog male gustoće i otpornosti na

koroziju, aluminij se ugrađuje u trup brodova, spremnike plina na brodovima koji prenose tekući prirodni plin i palubna spremišta za brodska plovila. Upotreba aluminija u automobilskoj industriji je u posljednjem desetljeću napravila pravu revoluciju aluminijske karoserije, blokovi motora, cilindri, hladnjaci, kućišta mjenjača, naplatci i drugi dijelovi u velikoj su mjeri smanjili masu automobila poboljšavajući im performanse, a ne umanjujući komfor. Sa svakim kilogramom aluminija koji zamijeni druge teže materijale u vozilu, tokom njegovog radnog vijeka smanji se emisija ugljičnog dioksida za oko 20 kg. Osim toga, aluminij smanjuje buku i vibracije te apsorbira kinetičku energiju tako da pri sudaru najveći dio energije ne "prime" putnici već struktura automobila.

Kod putničkih automobila je samo na zamijeni čelične karoserije aluminijskom moguće smanjiti masu za oko 45 %. Aluminij se također nalazi i u karoseriji brzih prijevoznih sredstava, dijelovima motora za dizel lokomotive, teretnim željezničkim vagonima, motorima autobusa i kamiona, teretnim kontejnerima, cestovnim znakovima te rasvjetnim tijelima. Aerodinamično oblikovani vlakovi izrađeni od lakih i izdržljivih aluminijskih slitina postižu brzine od oko 300 km/h uz optimalnu kombinaciju komfora, sigurnosti i potrošnje energije..

### ***5.3 Pakiranje (ambalaža)***

U ambalažnoj industriji aluminij se koristi prilikom pakiranja hrane, pića, lijekova, čuva proizvode tijekom distribucije i skladištenja. Brzo hlađenje, lako otvaranje, mala gustoća i reciklirajuće značajke slitina aluminija, pozitivno su utjecale na korištenje aluminijskih spremnika prilikom pakiranja napitaka. Omoti od folija i aluminijske vrećice, zatvaranje zavrtanjem i lako otvaranje uvelike su obogatili ambalažnu industriju prehrambenih proizvoda.



Slika 9. Aluminijska folija



## 5.4 Elektro sektor

U elektro primjeni glavni su proizvodi aluminijske žice i kablovi. U podzemnim električnim kablovima sadržane su velike količine aluminija. Aluminijske žice se također koriste u rezidentnim, komercijalnim i industrijskim građevinama.

Primjena aluminija u elektrotehnici je velika. Aluminij zauzima više prostora od bakra za istu vrijednost vodljivosti stoga se ne koristi za namotaje električnih strojeva. Međutim, primjenjuje se tamo gdje je kritična težina vodiča (npr. instalacije u zrakoplovima). Primjenu bakra, također, pomalo ograničava prognoza da će svjetske zalihe postojećih bakrenih ruda uz današnji tempo iskorištenja trajati još samo 20 - 25 godina, dok su zalihe aluminijskih ruda, računajući i glinu, u usporedbi s bakrenim vrlo velike. Aluminij zauzima prvo mjesto u primjeni za zračne vodove. U tu se svrhu koristi aluminijska užad od tvrdo vučene aluminijske žice (E-Al F17). Zbog nedovoljne vlačne čvrstoće aluminija izrađuju se vodovi u obliku užadi od aluminijskih i pocinčanih čeličnih žica (tzv. alu-če vodiča).<sup>7</sup> (3)



Slika 10. Primjer aluminijskog kabla

<sup>7</sup> 3) <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/metalurgija-aluminija> (str. 10. – 15. )

## 6. Zavarivanje Aluminija i Aluminijskih legura

### 6.1. Važna svojstva aluminija, kod zavarivanja, u odnosu na čelik

Navedena u nastavku su glavna fizikalna i kemijska svojstva aluminija, suprotno onima od čelika, metal s kojim je većina inženjera više upoznata. Kao što se može vidjeti s ovog popisa, postoji broj važnih razlika između aluminija i čelika koji utječu na ponašanje zavarivanja:

- Razlika u točkama taljenja dvaju metala i njihovih oksida. Oksidi željeza svi se rastope blizu ili ispod točke tališta dok se aluminij oksid topi na  $2060\text{ }^{\circ}\text{C}$ , oko  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  iznad tališta aluminija. Ovo ima važan utjecaj za proces zavarivanja budući da je neophodno ukloniti i raspršiti oksidni sloj (kožicu) prije i tijekom zavarivanja kako bi se postigla potrebna kvaliteta zavarivanja.
- Oksidni film na aluminiju je izdržljiv i samoobnovljiv. To daje aluminijskim legurama izvrsnu otpornost na koroziju, omogućujući im da se koriste u izloženim „atmosferama“ (okolišu) bez dodatnih zaštita. Ta otpornost na koroziju može se dodatno poboljšati anodizacijom - stvaranje oksidnog filma kontrolirane debljine.
- Koeficijent toplinske rastezljivosti aluminija je približno dvostruko veći nego od čelika što može dovesti do neprihvatljivog izvijanja i iskrivljenja tijekom zavarivanja.
- Koeficijent toplinske provodljivosti aluminija je šest puta veći od onog od čelika. Rezultat toga je da izvor topline za zavarivanje aluminija treba biti daleko intenzivniji i koncentriraniji od čelika.
- Specifična toplina aluminija - količina topline potrebna za podizanje temperature tvari - dvostruko je veća nego od čelika.
- Aluminij ima visoku električnu provodljivost, samo tri četvrtine od one od bakra, ali šest puta veću od čelika. To je nedostatak kada toplina za zavarivanje mora biti proizvedena električnom otpornosti.
- Aluminij ne mijenja boju dok se temperatura diže, za razliku od čelika. To može otežati zavarivaču da prosudi kada počinje taljenje, zbog toga je potrebna odgovarajuća prekvalifikacija zavarivača kada se prebacuje sa zavarivanja čelika na zavarivanje aluminija.

- Aluminij je nemagnetičan , što znači da je „arc blow“ (pomicanje materijala zavarivanja u polju elektrode pod utjecajem magnetske sile) eliminiran kao problem kod zavarivanja.
- Aluminij ima modul elastičnosti tri puta veći od čelika što znači da se rastegne tri puta više od čelika pod opterećenjem, ali može apsorbirati veću energiju prilikom udarca.
- Činjenica da aluminij ima kubičnu kristalnu strukturu znači da pri padu temperature ne gubi na tvrdoći. Zapravo neke od legura pokazuju i poboljšanje u vlačnoj čvrstoći i žilavosti kako temperatura pada.
- Aluminij ne mijenja svoju kristalnu strukturu pri grijanju ili hlađenju u odnosu na čelik kojem se kristalna struktura mijenja pri određenim temperaturama. To omogućuje skrućivanje čelika naglim hlađenjem , ali kod aluminijevih legura promjene pri hlađenju imaju mali ili nikakav utjecaj na njih. <sup>8</sup>

## ***6.2. Zavarljivost aluminija***

U idealnom slučaju zavarivanje - pod tim se misli na cjelovit spoj koji obuhvaća materijal za zavarivanje, zonu utjecaja topline (ZUT) i susjedni osnovni materijal - trebali bi imati ista svojstva kao i osnovni materijal. Postoji, međutim, broj problema povezanih sa zavarivanjem aluminija i njegovih legura koji otežavaju postizanje tog ideala. Značajke i nedostaci koji pridonose gubitku svojstava obuhvaćaju sljedeće:

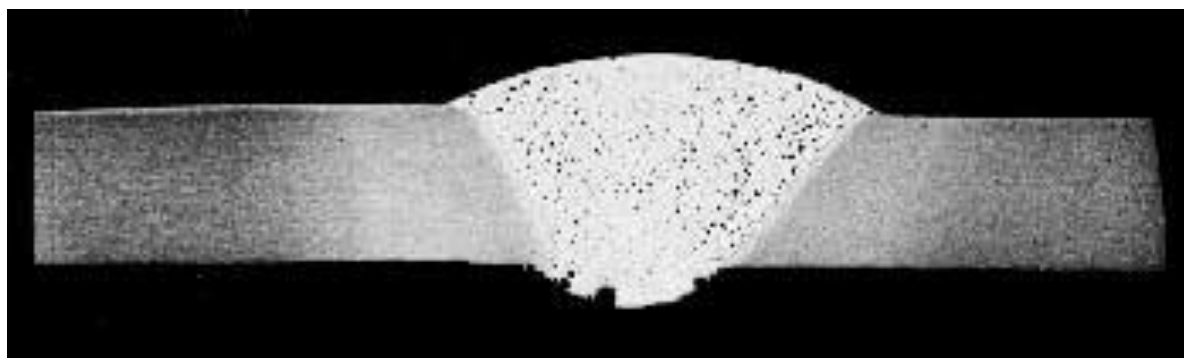
- Poroznost (zaostalog plina)
- Oksidni sloj
- Tople pukotine
- Smanjena čvrstoća u zavaru i zoni utjecaja topline
- Nedostatak spajanja(fuzije)
- Smanjena otpornost na koroziju
- Smanjena električna otpornost

### ***6.2.1. Poroznost (zaostalog plina)***

---

<sup>8</sup> 1) Gene Mathers, «The welding of aluminium and its alloys» ,Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002. (str. 4. – 5. )

Poroznost je problem ograničen isključivo na materijal(metal) zavarivanja. Proizlazi iz otopljenog plina u rastaljenom metalu te ostaje zarobljen u materijalu kod skrućivanja formirajući mjehuriće u čvrstom zavaru. Poroznost može varirati od izuzetno sitne mikroporoznosti do grubih pora od 3-4 mm u promjeru. Krivac za ovo u slučaju aluminija je vodik koji ima visoku topljivost u rastaljenom aluminiju, ali vrlo slabu topljivost u čvrstom aluminiju.



Slika 11. Fino raspršena poroznost u čeonom spoju aluminija debljine 6mm (TIG) (1)

Kada se koristi dodatni materijal razina poroznosti se povećava zbog kontaminacije(onečišćenja) na žici. Od konvencionalnih postupaka spajanja TIG ima niže razine poroznosti od MIG zbog kontaminacije žice vodikom.

Povećanjem jakosti struje povećava se temperatura taline, a time se povećava brzina apsorpcije vodika u rastaljenom metalu(materijalu).

Sastav legure također može utjecati na količinu poroznosti promjenom topivosti vodika, posebno dobar utjecaj ima magnezij. Smatra se da magnezij povećava topljivost ismanjuje apsorpciju vodika za čak dva puta na 6% Mg. Bakar i silicij imaju suprotan učinak.

Zaključak koji se može izvući iz ovoga je da kada dođe do poroznosti, korištenje Al-Mg kao dodatnog materijala može smanjiti taj problem. Naravno, pretpostavlja se da je taj dodatni materijal prihvatljiv za određenu namjenu. Izvori vodika su mnogi i različiti, ali jedni od primarnih su zalihe (potrošni materijal za zavarivanje prašak plin elektrode). Plin koji se koristi u postupcima zaštićenim plinom još je jedan izvor vlage koji se lako zanemari. Idealno bi trebali koristiti plin sa rosištem<sup>9</sup> (temperatura do koje se vlažan zrak mora hladiti (100% relativne vlage zraka), kod konstantnog tlaka, da počne kondenzacija vode) manjim od  $-50^{\circ}\text{C}$ . Da bi se postigla takva visoka čistoća, neophodno je kupiti plin s zajamčenom nižom točkom rosišta. Također je potrebno da plin

<sup>9</sup> 11) <https://hr.wikipedia.org/wiki/Rosi%C5%A1te>

zadrži visoki stupanj čistoće kada ga dovodimo u tzv. „weld pool“ (talinu). To znači da bi se sustav opskrbe plinom trebao redovito provjeravati da li negdje dolazi do puštanja plina. Unatoč najboljim naporima dobavljačima plina nije uvijek moguće jamčiti potpunu čistoću svih bočica osim sa velikim troškom. Opskrbni materijali su općenito vrhunske kvalitete.

Daljnji izvor kontaminacije može doći i od samih crijeva za plin. Mnogi od plastičnih spojeva, korištenih za izradu plinskih cijevi, su porozni prema vodi prisutnoj u zraku. To rezultira kondenzacijom vlage na unutarnjoj strani crijeva i ulazak vlage u zaštitni plin. Puno nedavnih izvješća prepoznali su problem propusnosti plastičnih crijeva. Iz toga se može vidjeti da samo ograničeni broj crijeva održava čistoću plina.

Najbolji od svih je kompletan metalni sustav. U skladu s primjenom, plastične cijevi bi trebale biti što kraće i sa što manjim promjerom. Važna je i činjenica da se vlaga skuplja u crijevu i u razdoblju kada ga se ne koristi. S obzirom na to da se zaključiti da ako oprema za zavarivanje miruje dulje vrijeme nakon prvog korištenja, pri ponovnom zavarivanju može sadržavati neprihvatljivu količinu poroznosti. Ispiranje crijeva možemo smanjiti poroznost korištenjem „torch trigger“-a (okidača za baklju).

Žicu za zavarivanje TIG-om treba očistiti krpom koja ne ostavlja dlačice i dobrim odmaščivajućim sredstvom prije primjene. Nakon čišćenja žicu ne dirajte golim rukama nego koristite čisti par rukavica, odložite žicu na čistu površinu i počnite zavarivati u kratkom vremenskom razdoblju nakon čišćenja. Čistoća osnovnog metala je također izuzetno važna u postizanju niske razine poroznosti – „ne može se previše naglasiti koliko je ovo važno“. Osnovno je temeljito odmaščivanje, nakon čega slijedi mehaničko čišćenje kao npr uklanjanje oksidnog sloja sa žice od nehrđajućeg čelika četkom. Nakon što je žica očišćena i osnovni materijal odmašćen, osnovni materijal bi se trebao zavariti u kratkom vremenskom razdoblju (razdoblje do 4 sata se smatra prihvatljivim).

Posljednji izvor poroznosti može biti vodik otopljen u aluminiju. Iako je topivost vodika niska u krutoj fazi, može biti dovoljno da bi se u osnovnom metalu pojavio problem kod zavarivanja. Ovo nije često kod kovanih proizvoda, ali se može pojaviti kod zavarivanja odljevaka ili sinteriranih proizvoda. Izbjegavanje poroznosti kada je vodik prisutan u osnovnom metalu je nemoguće izbjeći.

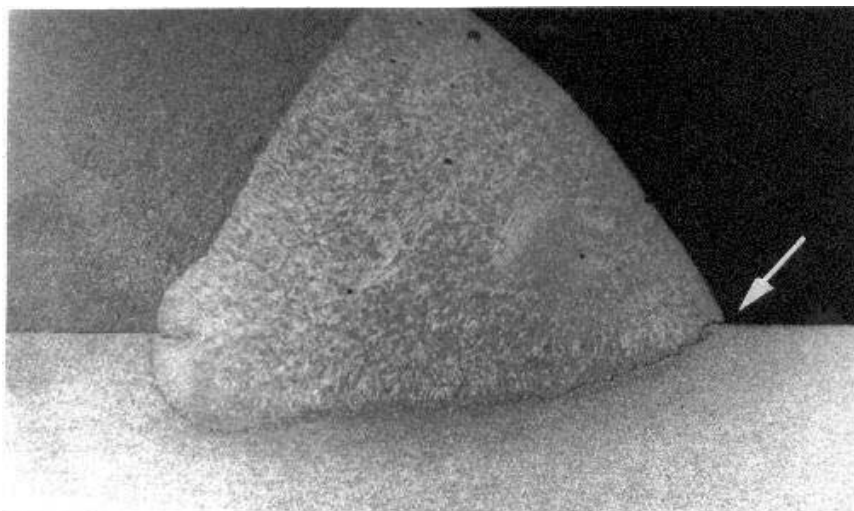
### ***6.2.2. Uklanjanje oksidnog sloja tijekom zavarivanja***

Aluminij oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) je vrlo čvrsto povezan i brzo stvarajući oksid koji daje aluminiju izvrsnu otpornost na koroziju. Aluminij oksid ima vrlo visoku točku taljenja,  $2060^\circ\text{C}$  u usporedbi s čistim aluminijem koji se topi na  $660^\circ\text{C}$ . Oksidi većine ostalih metala tale se na temperaturama istim ili malo temperature taljenja čistog metala i tijekom zavarivanja će plutati na vrhu zavara kao rastaljena troska. Oksidni sloj može ostati zarobljen unutar zavara, što pogoršava čvrstoću zavara. Izuzetno teško ga je ukloniti zavarivačkim postupcima koji koriste prašak ili obloženu elektrodu jer moraju biti vrlo agresivni da uklone oksidni sloj.

U plinskom zavarivanju postoji poznat kao katodno čišćenje koje se može koristiti za postizanje željenog rezultata. Kada je elektroda spojena na pozitivni pol izvora napajanja i istosmjerna struja prođe, postoji proticanje elektrona od radnog komada do elektrode sa iona koji putuju u suprotnom smjeru i „bombardiraju“ površinu radnog komada. Ova „bombardiranja“ razijaju i raspršuju oksidni sloj i omogućuju stvaranje taline i spajanje komada.

MIG postupak zavarivanja koristi samo DC elektrodu (istosmjerna struja) – ako se koristi negativna DC (istosmjerna struja) elektroda to rezultira nestabilnim lukom, nepravilnim prijenosom metala i slabom kvalitetom zavara. Zbog toga uklanjanje oksidnog sloja vrlo važan dio MIG zavarivanja.

TIG zavarivanje s druge obično koristi DCEN (istosmjerna struja na negativnoj elektrodi), koje, ako se koristi kod aluminija može dovesti do slabe kvalitete zavara. Ako koristimo DCEP (istosmjerna struja na pozitivnoj elektrodi) rezultira prevelikim zagrijavanjem volframovih elektroda. To može uzrokovati topljenje elektrode i dovesti zavarivanje do prijevremenog kraja. Kompromis se postiže koristeći izmjeničnu struju gdje se uklanjanje oksidnog sloja odvija na pozitivnom poluciklusu – spojeno na pozitivni pol izvora, a hlađenje elektroda na negativnom poluciklusu – spojeno na negativni pol izvora. TIG zavarivanje se stoga većinom izvodi s izmjeničnom strujom iako postoji nekoliko tehnika koje koriste istosmjernu struju.



Slika 12. „Zarobljen“ oksidni sloj unutar zavara (1)

### 6.2.3. Tople pukotine

Tople pukotine su problem kod zavarivanja koji se ne pojavljuje u čistim metalima ali se mogu naći u određenim legurama. Nije ograničeno samo na aluminij nego se isto susreće u čeličnim, niklenim i bakrenim legurama. Dodavanje legirnih elemenata u čisti metal izazvat će promjenu temperaturu na kojoj se metal skrućuje.

Prva čvrsta tvar koja se oblikuje je čestica koja djeluje kao jezgra na koju se atomi vežu, formirajući ono što je poznato kao dendrit. Dendrit se povećava sve dok se ne počne sudarati sa svojim susjedima koji su nastali na sličan način. Točka(mjesto) u kojoj se dogodi ovaj sudar postaje granica između susjednih dendrita i kristala – granica zrna. Posljedica skrućivanja je ta da se spoj sa najnižom temperaturom taljenja gura ispred skrućujućeg dendrita sve dok ne postane zarobljen između susjednih dendrita tj duž granice zrna.

U većini metala ovaj je učinak uzrokovan nečistoćama. Sumpor u čeliku i legurama nikla dobar je primjer gdje se stvaraju eutektici sumpora sa niskom točkom taljenja. U aluminijevim legurama, međutim, to su namjerno dodani legirni elementi koji tvore niz spojeva sa nižim točkama taljenja od glavnog metala.

Ako razlika temperature taljenja između tog legirnog elementa i glavnog metala velika, nastaje tekući sloj duž granice zrna te može doći do razdvajanja na granici zrna kako se taj tekući sloj skuplja i hladi. To znači da su sve aluminijske legure osjetljive na određeni stupanj ovog oblika

pucanja, koji se razlikuju samo po stupnju osjetljivosti. Testovi pucanja odredili su ono što se naziva „hot short range“, rasponom unutar kojeg legura ima visoki rizik od toplih pukotina. Ti testovi su dizajnirani tako da se poprečno opterećuje zavar u kontroliranim uvjetima da dođe do pukotina, dužina pukotine će biti mjera za osjetljivost pucanja legure koja se testira.

Praktična posljedica toga je da na osjetljivost na pucanje utječu bilo kakve promjene u sastavu metala koji se zavaruje. U mnogim situacijama kod zavarivanja aluminijskih legura dodatni materijal nije odgovarao osnovnom materijalu.

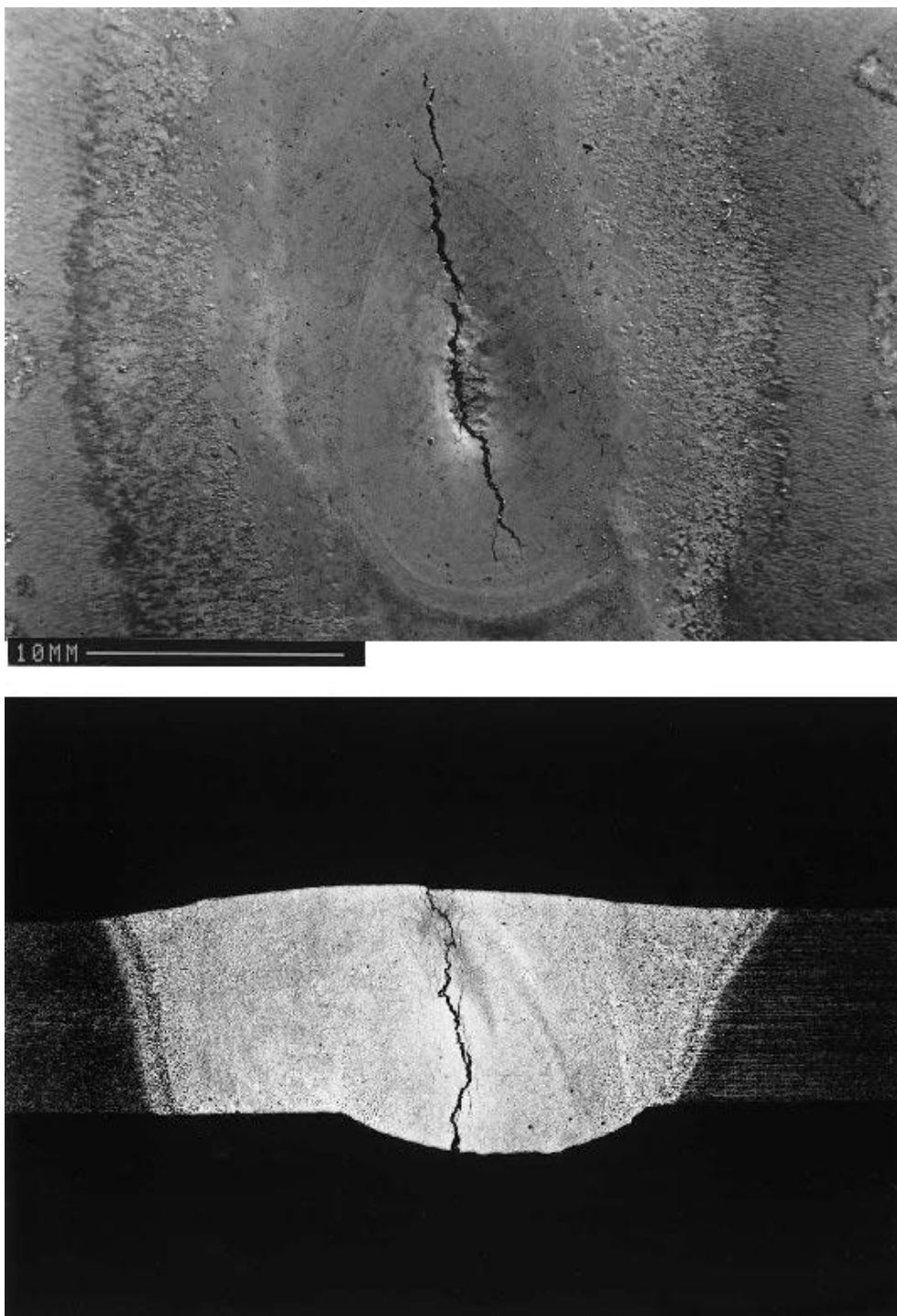
Ako dođe do nastajanja toplih pukotina, to može biti uklonjeno na više načina:

- Smanjenje veličine zrna. Otkriveno je da uz male dodatke elemenata kao što su titan, cirkonij ili skandij, koji će djelovati kao jezgra za formiranje vrlo sitnog zrna tijekom skrućivanja. Također se to postiže dodatnim materijalom legiranim s titanom i / ili cirkonijem.
- Kontrolirajte sastav zavara dodavanjem dodatnog materijala da bi proizveli leguru koja nije sklona toplim pukotinama
- Koristite pripremu spoja i razmak između komada kako bi se dodala dovoljna količina dodatnog materijala da se ostvari zavar izvan zone toplih pukotina
- Koristite najveću brzinu zavarivanja. Velike brzine smanjuju vrijeme u kojem se zavar nalazi unutar raspona temperature toplih pukotina. Visoke brzine zavarivanja također smanjuju ZUT (zonu utjecaja topline) i time naprezanja kod skrućivanja u spoju
- Upotreba više prolaza velikih brzina i manjeg volumena umjesto jednostrukih prolaza velikog volumena.
- Odabir zavarivačkih i montažnih sekvenci koje minimiziraju ograničenja i zaostala naprezanja
- Primijenite vanjsku silu za održavanje zavara pod tlačnim opterećenjem do je u rasponu toplih pukotina
- Izaberite dodatni materijal s temperaturom taljenja blizu onoj osnovnog metala<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> 1) Gene Mathers, «The welding of aluminium and its alloys», Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002. (str. 10. , 18. – 31. )



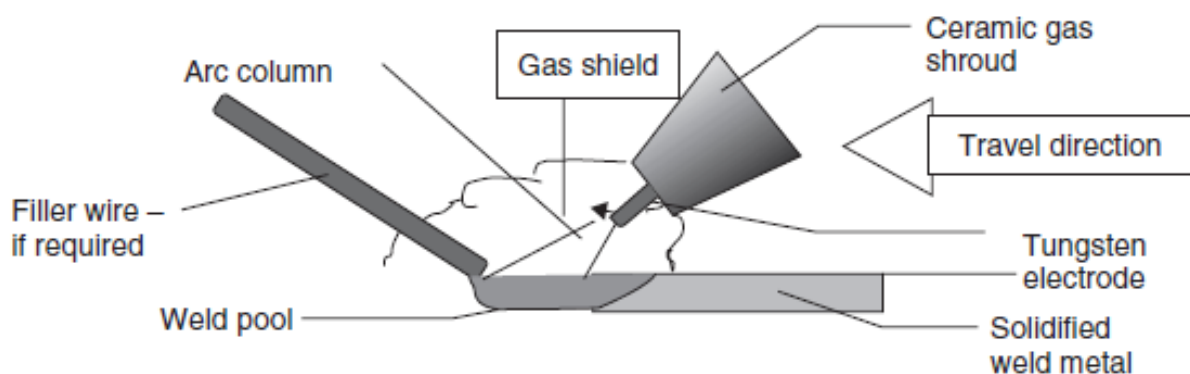


Slika 13., Tople pukotine , a) u završetku TIG zavara , b) u 3 mm debeloj ploči TIG zavara sa dodatnim materijalom (1)

## 7. Glavni postupci zavarivanja aluminija

### 7.1 TIG zavarivanje

Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina je postupak zavarivanja koji koristi netaljivu volframovu elektrodu i neutralni zaštitni plin da bi se zaštitila elektroda, električni luk i samo područje zavara. Električni luk djeluje kao samo kao izvor topline te inženjer zavarivanja ima izbor dodati žicu dodatnog materijala ili ne. Stabilan električni luk kod male jačine struje omogućuje zavarivanje tankih komponenti sa visokom kvalitetom, iako za najbolje rezultate potrebni su visokokvalificirani zavarivači. Ima manju brzinu zavarivanja od MIG zavarivanja, što ga čini manje isplativim u nekim situacijama. TIG je pretežito limitiran na tanje serije aluminija do 6 mm debljine. Ima manju penetraciju u osnovni metal nego MIG te se ponekad javljaju poteškoće pri zavarivanju kuteva i korijena zbog nedovoljne penetracije u osnovni metal.



Slika 14. , Shematski prikaz TIG zavarivanja ( s lijeva u desno , talina - područje zavara, žica dodatnog materijala, električni luk, zaštitni plin, keramička sapnica plina, smjer kretnje, volfram elektroda, skrućeni dio metala zavara). (1)

### ***7.1.1. Postupak Zavarivanja***

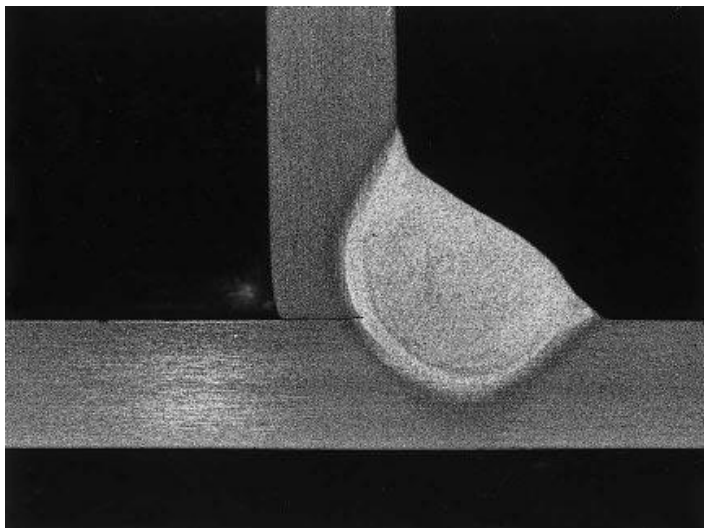
Osnovna oprema za TIG zavarivanje obuhvaća izvor energije, pištolj za zavarivanje, neutralni zaštitni plin, žice dodatnog materijala, i u nekim slučajevima sustav hlađenja vodom. Za zavarivanje većine materijala TIG postupak obično koristi istosmjernu struju sa elektrodom spojenom na negativni pol izvora energije (DCEN). Kao što smo objasnili na ovom polu loše se uklanja oksidni sloj. Dodatna značajka plinski zaštićenog električnog luka je da se najveći dio topline proizvodi na pozitivnom polu. TIG zavarivanje sa elektrodom spojenom na pozitivni pol (DCEP), rezultira pregrijavanjem i taljenjem elektrode. Ručno TIG zavarivanje aluminija se stoga izvodi pomoću izmjenične struje gdje se odstranjivanje oksidnog sloja odvija na pozitivnom poluciklusu, a hlađenje elektrode na negativnom poluciklusu. Električni luk se ugasi i ponovno upali svakih pola ciklusa kako struja električnog luka prolazi nulu, na 50Hz izvoru energije ovo se mora dogoditi oko 100 puta u sekundi, dva puta na svakom ciklusu napajanja.

Aluminija je slab emitator elektrona, što znači da je teže ponovno aktivirati električni luk na elektrodi pozitivnog poluciklusa. Ako postoji određeno kašnjenje u ponovnom paljenju to znači da manje struje protiče na pozitivni dio poluciklusa nego na negativni dio poluciklusa. Električni luk postaje nestabilan, čišćenje je nemoguće i to uz neke druge stvari može dovesti do pregrijavanja transformatora. Ovo je spriječeno na starijim izvorima energije osiguravajući suprotnu struju iz baterija ili u modernoj opremi umetanjem blokirajućih kondenzatora u krug izvora energije.

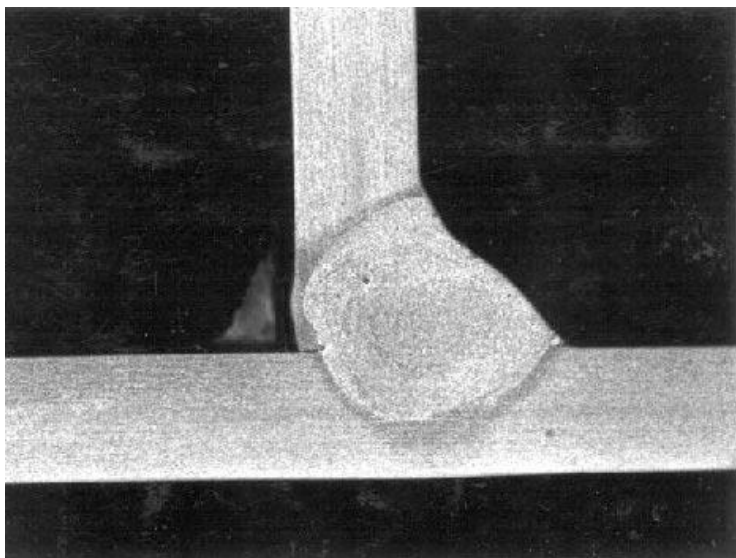
### ***7.1.2. Zaštitni plin***

Preferirani plin za TIG zavarivanje izmjeničnom strujom je argon, iako se mogu upotrijebiti mješavine helija i argona-helija. Argon daje široku plitku penetraciju zavara, također će zavar biti svjetli i srebrni. Najlakše paljenje električnog luka i najstabilniji el. luk će biti ostvaren sa argonom. Helij povećava napon struje što daje efekt suženja el. luka, povećavajući penetraciju, ali time otežavajući paljenje luka i pogoršavajući stabilnost luka. Neki od modernih izvora

zavarivanja opremljeni su s pogonom za pokretanje zavarivanja argona, a kada se ostvari stabilan luk, automatsku promjenu na helij. Dodavanje argona u helija poboljšava preciznost i stabilnost el. luka. Brzine zavarivanja i penetracija će biti manje nego kod čistog helija, ali veća nego kod argona. Moguće je kontrolirati širinu i penetraciju zavaresa mijenjajući količinu argona u smjesi. Većinom se koristi mješavina sa 25% helija u argonu.



Slika 15. , Kutni spoj , TIG zavarivanje izmjeničnom strujom zaštićeno argonom kod 6 mm debele ploče (1)



Slika 16. , Kutni spoj , TIG zavarivanje istosmjernom strujom zaštićeno helijom, 6 mm debela ploča (1)

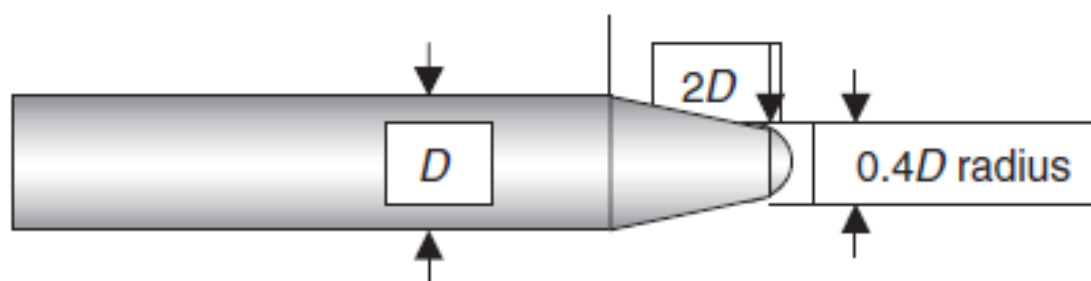
### ***7.1.3. Pištolji i kablovi za zavarivanje TIG-om***

Imamo velik izbor pištolja za zavarivanje u rasponu od nekoliko desetaka ampera do 450 ampera , ovisno o tome koliko debeli materijal zavarujemo. Većina modernih pištolja opremljeni su upravljačima za kontrolu jakosti struje. Svi osim najlakših pištolja (pištolji koji rade na manje od 200 A) su vodeno hlađeni , i ta ista voda se može koristiti da bi se hladili kablovi , omogućujući im da budu lakši i fleksibilniji. Pregrijavanje pištolja za zavarivanje može rastopiti oštećene spojeve unutar pištolja ili plastičnu cijev koja štiti kabel za napajanje , i isto tako je važno da točno odabrat pištolj za struju na kojoj će raditi. Proizvođačeva ocjena za pištolj može biti za pozitivnu istosmjernu struju što onda moramo prilagoditi ako radimo na izmjeničnoj struji. Većina pištolja može biti opremljena sa metalnom ili keramičkom sapnicom , iako su keramičke sapnice popularnije. Oni se, međutim lakše oštete nego metalne sapnice. Preporučeno je da se uređaj nazvan „gas lens“(plinske leće) ugradi u pištolje za zavarivanje. To uređaj u obliku mrežastog diska umetnut u pištolj koji omogućuje bolji protok zaštitnog plina.

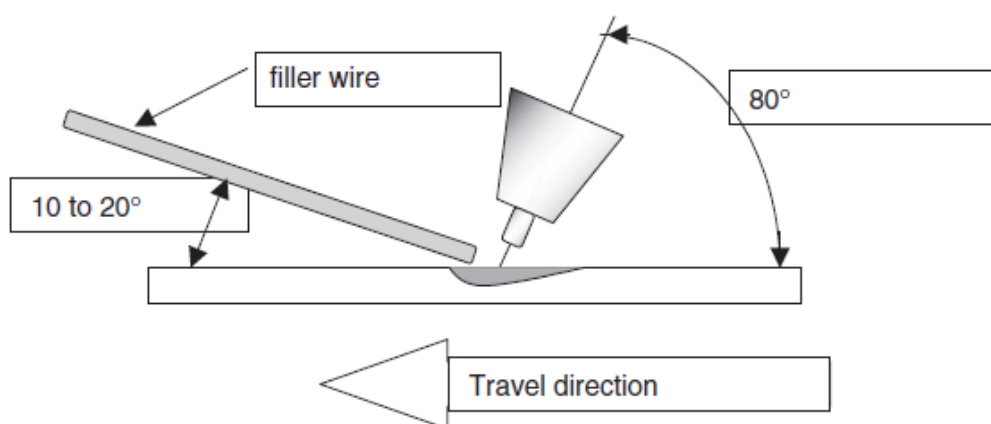
### ***7.1.4. Volframove elektrode***

Postoji nekoliko vrsta elektroda koje se koriste za TIG zavarivanje. To uključuje čistu volframovu elektrodu i volfram legiran sa torijevim oksidom ( $\text{ThO}_2$ ) ili cirkonijevim oksidom ( $\text{ZrO}_2$ ). Ovi spojevi dodani radi poboljšanja početnih karakteristika električnog luka , da stabiliziraju el. luk i da produže život elektrode. Nedavno je došlo do pomaku u korištenju nekih rijetkih elemenata kao što su cezij, cerij, lantan, za koje se tvrdi da produžuju još više produžuju vijek elektrode i smanjuju rizik radijacije koji nastaje tijekom brušenja elektroda koje koriste torij. Cirkonijeve elektrode su poželjne za TIG zavarivanje izmjeničnom strujom jer imaju višu temperaturu tališta od čistih volframskih elektroda ili volframovih elektroda sa torijem te zbog toga mogu podnijeti veću jakost struje zavarivanja i otpornije su na onečišćenje. Vrh elektrode dobiva polukružni oblik tijekom zavarivanja. Važno je da se ovaj oblik zadrži da bi se ostvario stabilan el. luk. Ako je elektroda pre mala za određenu jakost struje to

će dovesti do pregrijavanja i eventualnog topljenja, što rezultira onečišćenjem područja zavara tj. taline. Prevelika elektroda za određenu jakost struje će rezultirati sa problemom stabilnost el. luka i vrlo širokim zavarom. Elektrode su dostupne u promjeru od 0.3 mm do 6.4 mm. Elektroda ne bi trebala izlaziti iz mlaznice za više od oko 6 mm, iako se može produžiti do 10 mm ako je postavljena „gas lens“ (plinska leća). Ovo proširenje može biti korisno ako je pristup ograničen ili loš. Prije početka zavarivanja preporuča se da se elektrodu zagrije oblikovanjem el. luka na komadiću aluminijskog otpatka. Ovo omogućuje oblikovanje zaobljenog vrha, omogućuje zavarivaču dali se elektroda ponaša ispravno i omogućuje da se el. luk ponovno upali s lakoćom. Ako vrh postane kontaminiran ili je oštećen trebalo bi se vratiti i popraviti ga na ovaj način.<sup>11</sup>



Slika 17. , Preporučeni izgled volframove elektrode (1)



Slika 18. , Kut pištolja i žice dodatnog materijala (1)

## 7.2. MIG zavarivanje

<sup>11</sup> 1) Gene Mathers, «The welding of aluminium and its alloys», Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002. (str. 97. – 114. )

Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog (inertnog) plina isto tako znano pod imenima MIG, MAGS, GMAW , prvi put je korišteno u SAD-u sredinom 1940-tih godina. Od tih ranih dana ovaj proces zavarivanja počeo se koristiti u širokom rasponu industrija od proizvodnje automobila do cjevovoda. To je elektrolučno zavarivanje koje koristi i žicu dodatnog materijala i elektrodu kao dodatni materijal, električni luk i talina su zaštićeni zaštitom neutralnog plina. Nudi prednosti visokih brzina zavarivanja , manje zone utjecaja topline od TIG zavarivanja, odlično uklanjanje oksidnog sloja i sposobnost zavarivanja u svim pozicijama. Iz tih razloga MIG zavarivanje je najraširenije korišteno elektrolučno zavarivanje za spajanja (zavarivanje) aluminijske.

### ***7.2.1. Postupak zavarivanja***

MIG postupak zavarivanja u pravilu koristi istosmjernu struju sa elektrodom spojenom na pozitivni pol izvora energije (snage) , DC (direct current – istosmjerna struja) pozitivan. Kao što je objašnjeno gore ovo rezultira dobrim uklanjanjem oksidnog sloja. Nedavni razvoj izvora energije omogućio je se MIG zavarivanje izvodi sa izmjeničnom strujom. Većina topline proizvedene na električnom luku proizvodi se na pozitivnom polu , u slučaju kada se kod MIG-a tali elektroda, to rezultira velikim trošenjem žice dodatnog materijala (elektrode) i učinkovitog prenošenja ove topline u područje taline (zavara). Kada zavarujemo na niskoj jakosti struji , vrh žice dodatnog materijala se možda neće otopiti dovoljno brzo da bi se održavao električni luk, ali se može umočiti u talinu da bi došlo kratkog spoja. Kratki spoj uzrokuje da se žica otopi slično kao električni osigurač i taj rastaljeni materijal povučen je površinskom napetosti u talinu zavara. Električni luk se ponovo uspostavlja i ciklus se ponavlja. Ako parametri zavarivanja nisu dobro podešeni i slab je prijenos topline može doći do pretjeranog prskanja taline što dovodi do lošeg spajanja na mjestu zavara. Ovo je poznato pod nazivom „dip transfer“ (prijenos metala umakanjem). Na većim jakostima struje dodatni materijal se topi od vrha žice i prenosi preko el. luka raspršivanjem rastaljenih kapljica kao sprej. Ovo stanje daje daleko manje razine prskanja taline kao i dublju penetraciju u osnovni metal nego prijenos





kabel mora biti lagan i fleksibilan. Važno je ako se želi postići dobra kvaliteta zavara da se zavarivača opremi najboljim dostupnim pištoljom.



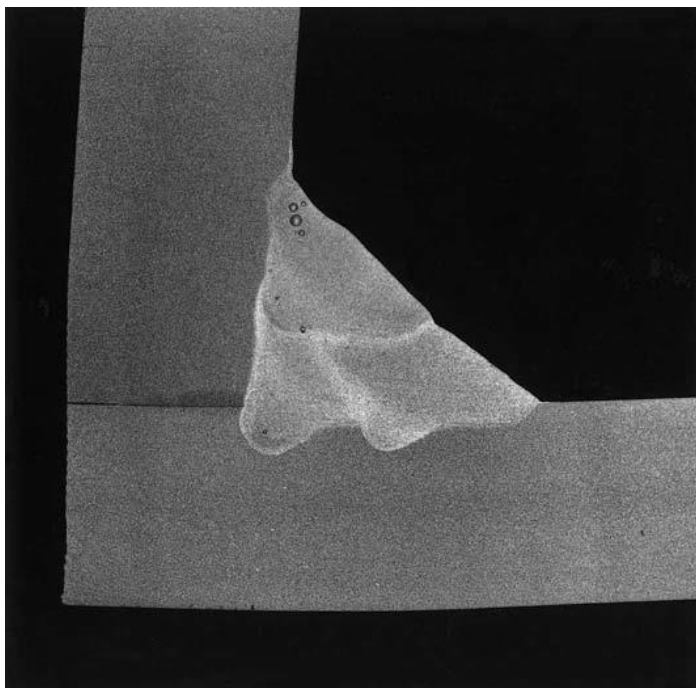
Slika 20., Prikaz tipičnog MIG pištolja , A - ergonomski oblikovana drška , B kontaktni vrh , C - plinska sapnica, D - plinski ventil , E – konektor kabla za napajanje , F – osnovni kabel koji sadrži crijevo za plin , kabel za napajanje i kontrolni kabel , G – prekidač za paljenje , H – zamjenjiva košuljica , I – podesiva mlaznica (1)

### **7.2.3. Zaštitni plin**

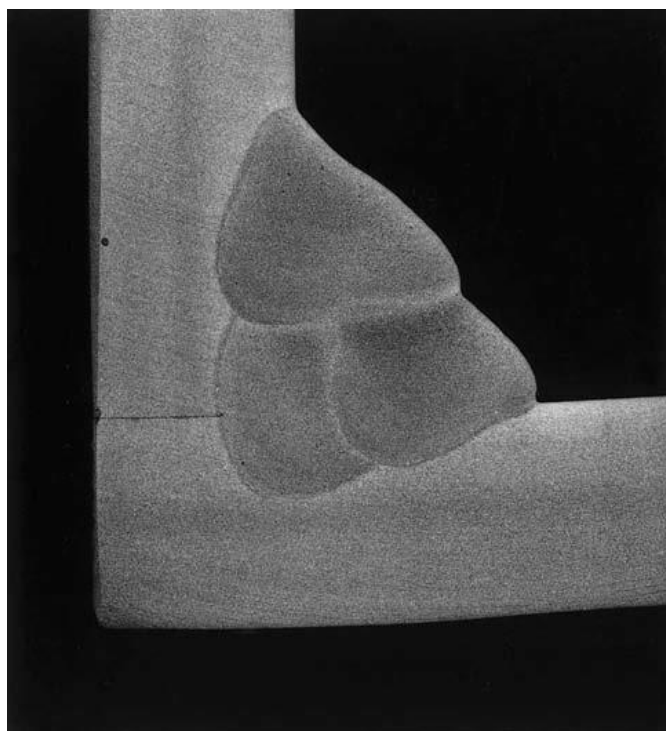
Zaštitni plinovi kao i kod TIG zavarivanja su neutralni plinovi argon i helij i kombinacije njih dvoje. Drugi aktivni plinovi kao kisik ili dušik čak i u malim količinama daju problem poroznosti. Najčešće korišten plina je argon koji se koristi za ručno i neko automatsko zavarivanje. Znatno je jeftiniji od helija i daje nam glatki, tihi i stabilni električni luk. Argon isto tako nam daje najmanji prijenos topline i stoga najsporije brzine zavarivanja. Stoga postoji rizik od nedostatka spajanja na mjestima zavara i poroznosti kod debelih komada. Argon također može dati crni sloj na površini zavara. To se može lako ukloniti četkanjem.

Helij povećava napon na električnom luku za do 20% što u usporedbi sa argonom daje daleko topliji električni luk, poboljšanu penetraciju i širi zavar. Kod šireg zavara pozicioniranje nije toliko kritično važno, također imamo bolje spajanje na rubovima i bolju penetraciju zavara. Vrućija sporije hladena talina omogućuje micanje vodika iz taline, što nam omogućuje smanjenje poroznosti. Veća toplina omogućuje veću brzinu zavarivanja čak tri puta veću nego kod sličnog zavara kod kojeg se koristi argon kao zaštitni plin. Helij međutim je dosta skuplji i daje nestabilniji el. luk od argona. Čist helij stoga se najviše koristi kod mehaniziranog ili automatiziranog zavarivanja. Kod ručnog zavarivanja smjese argona i helija daju dobre rezultate sa karakteristikama negdje između ova dva plina. Ove smjese su korisne na debljim materijalima jer povećavaju unos topline u odnosu na sam argon. One će također popraviti produktivnost omogućujući korištenje većih brzina zavarivanja. Najpopularnije kombinacije su 50% i 75% helija u argonu.

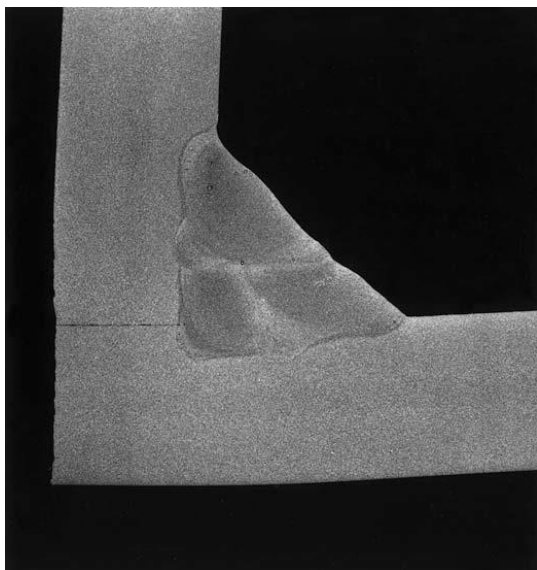
Posljednja točka koju je potrebno napomenuti zbog velikog utjecaja koju ona ima na samu kvalitetu zavara je čistoća plina. Zaštitni plinovi moraju imati minimalnu čistoću od 99.998% i nisku razinu vlage, idealno sa rosištem manjim od -50 °C i to na pištolju.



Slika 21., Kutni spoj , MIG zavarivanje , zaštitni plin argon , 12 mm debela ploča (1)



Slika 22. , Kutni spoj , MIG zavarivanje , helij zaštitni plin , 12 mm debela ploča (1)



Slika 23. Kutni spoj, MIG zavarivanje , zaštitni plin argon-helij , 12 mm debela ploča (1)

#### ***7.2.4. Žica dodatnog materijala***

Žica djeluje kao dodatni materijal i anoda u električnom luku. Da bi se postiglo , žica preuzima struju trljanjem na kontaktnom vrhu pištolja. Promjeri žice dodatnog materijala variraju od 0.8 mm do 3.2 mm što rezultira velikim omjerom površine u odnosu na volumen. Ova relativno velika površina zahtijeva da se žica čuva jako čistom jer će površinska onečišćenja izazvati poroznost. Žice treba čuvati u čistim i suhim uvjetima u njihovim neotvorenim pakiranjima gdje je to moguće. Žice koje su bile u trgovini već duže vrijeme npr. 6 mjeseci i više, čak i pakirane u svojoj originalnoj ambalaži mogu se onečistiti što dovodi do povećanja poroznosti. Ako ostanu na stroju za zavarivanje preko noći ili preko vikenda treba ih zaštititi pokrivajući ih plastičnom vrećicom.

Kondenzacija se može pojaviti na žici ako ju se dovede iz hladne u toplu trgovinu i u uvjetima visoke vlažnosti na žici se može pojaviti vlaga. Neki izvori napajanja uključuju grijače da bi ovo spriječili. Moguće je nabaviti uređaje za čišćenje koji se pričvršćuju na žicu. Ovi uređaji sastoje se od tekućine za čišćenje koja uklanja onečišćenja kako žica prolazi kroz kabel. Mogu biti vrlo učinkoviti u uklanjanju tragova masti , ulja , prašine itd. na površini žice. Još je bolje brijanje žice. Ovo ne samo da uklanja onečišćenja na površini i okside već ojačava žicu , što omogućuje da se žica lakše tali.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> 1) Gene Mathers, «The welding of aluminium and its alloys» , Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002. (str. 116. – 130. )

## 8. Ostali postupci zavarivanja

MIG i TIG zavarivanje mogu se smatrati najčešće korištenim procesima zavarivanja za spajanje aluminijskih legura, ali isto tako imamo velik broj drugih procesa zavarivanja koji su jednako korisni. Ti procesi zavarivanja više se koriste kod nekih specijaliziranih slučajeva nego kao uobilježeni postupci zavarivanja.

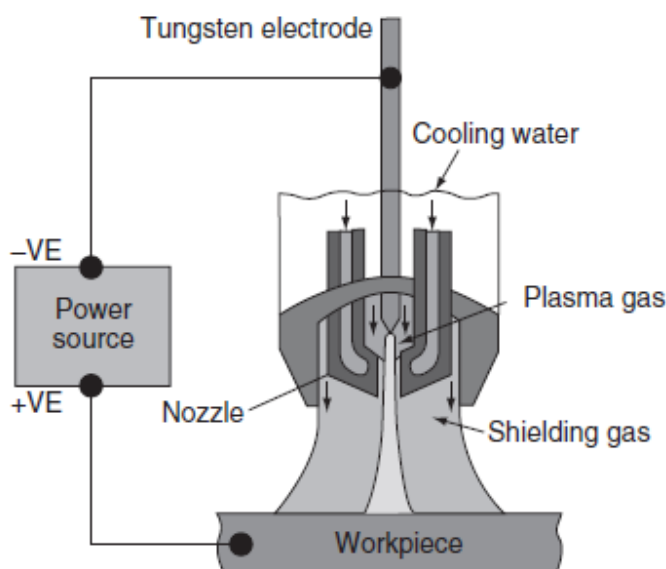
### 8.1. Zavarivanje postupkom plazme

Modifikacija TIG zavarivačkog pištolja omogućuje da se proizvede jak mlaz plazme koji ima neke vrlo poželjne značajke za zavarivanje i rezanje. Unatoč tim prednostima, proces se malo koristi kod zavarivanja aluminijskih legura jer kada se koristi istosmjerna struja na negativnoj ili pozitivnoj elektrodi dolazi do nedostataka spajanja materijala. Izmjenjiva struja nije dala bolje rezultate jer su bile potrebne visoke jakosti struje, što je rezultiralo ubrzanim trošenjem elektrode. Pulsiranje struje također je uzrokovalo nestabilnost taline zavara, lošim oblikom zavara i defektima slabe fuzije (spajanja) materijala.

#### 8.1.1. Plasma – TIG postupak zavarivanja

Za zavarivanje se prenešeni luk mlaza plazme se koristi kao izvor topline, glavna razlika od rezanja je ta da nikakav rezajući plin nije uključen da bi odnio rastaljeni metal. Postoji niz prednosti koje ima plazma – TIG zavarivanje u odnosu na obično TIG zavarivanje i to uglavnom zbog cilindrične i sužene plazme. Ovo omogućuju manju osjetljivost na vrijednosti koje utječu na samo proces u odnosu na TIG. Sužena plazma znači da se toplina ograniči na manju površinu, što omogućuje vrlo stabilan el. luk na niskim strujama od čak 0.1 A. Plazma se može dobro usmjeriti u bilo kojem smjeru čak i na jako niskim jakostima struje. Cilindričan oblik plazme omogućuje da je toplina koju daje konstantna bez obzira na udaljenost od obratka, za razliku od TIG-a sa svojim koničnim el. lukom. Volframova elektroda je udubljena unutar mlaznice pištolja,

što onemogućuje onečišćenje volframa. Tu je također i povećanje kvalitete zavora uz smanjeni rizik od poroznosti i izobličenja. Veća jakost struje zavarivanja omogućuje nam da zavarujemo materijal debljine 15 mm iako u sučeonom spoju to je ograničeno na oko 8 mm bez dodatnog materijala. Postupak se može koristiti pomoću sličnih tehnika kao kod TIG-a. Zavar može biti autogen (bez žice dodatnog materijala) kod legura koje su otporne na pucanje (pukotine), žica dodatnog materijala može se dodati kod legura koje su osjetljive na pukotine. Ova žica se može dodati ručno, postoje pištolji koji su opremljeni automatskom žicom dodatnog materijala. Ta posljednja značajka čini proces osjetljiv na udaljenost od zavora. Promjena u udaljenosti će utjecati na položaj u kojem žica ulazi u područje taline i to može dati promjenjivu kvalitetu zavora. Problem sa uobičajenim plazma-TIG zavarivanjem je taj da proces obično radi na negativnom polu istosmjerne struje, tako da nikakvo katodno (korzijsko) čišćenje nije moguće što je očigledan nedostatak kod zavarivanja aluminijskih legura. Zavarivanje bez mogućnosti uklanjanja oksidnog sloja uzrokuje poroznost. Da bi se ovo prevladalo razvijen je postupak plazma-TIG zavarivanja sa istosmjernom strujom na pozitivnom polu što je omogućilo razvijanje plazma postupka sa varijabilnom polarnosti. Ovaj postupak koristi ravnotežu negativnog i pozitivnog pola istosmjerne struje kako bi osigurala da se obje komponente zadovolje, taljenje i adekvatno odstranjivanje oksidnog sloja.



Slika 24., Prikaz plazma – TIG zavarivanja „preneseni luk“ (1)

### **8.1.1. Plazma – MIG zavarivanje**

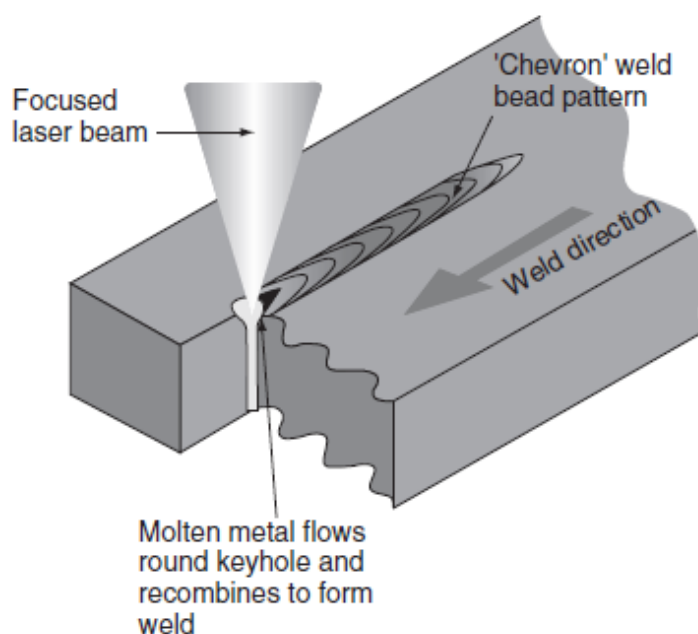
Postupak plazma – MIG zavarivanja koristi MIG žicu dodatnog materijala , obično 1.6 mm promjera koja se postavi kroz pištolj luka plazme. To omogućuje veću kombiniranu struju zavarivanja nego kod MIG-a. To omogućuje povećanje brzina zavarivanja ali uz manji unos topline i užu zonu utjecaja topline sa boljim mehaničkim svojstvima. Postupak se obično koristi u mehanizirano ili automatskoj proizvodnji, iako ga je moguće koristiti u poluautomatskom ručnom načinu rada. Debljina metala koji zavarujemo može biti u rasponu od 6mm do 60 mm.

## **8.2. Zavarivanje laserskim snopom (Zavarivanje laserom)**

Zavarivanje laserom se sve više koristi u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji za zavarivanje niza materijala. Zavarivanje aluminijskih legura laserom je međutim , predstavljalo probleme inženjerima zavarivanja. Loša povezanost snopa s osnovnim metalom , visoka toplinska provodljivost, visoka reflektivnost i legirani elementi sa niskim talištem su do relativno nedavno spriječavali postizanje dobre kvalitete zavara. Valna duljina laserske svjetlosti utječe na spajanje – absorpciju snopa energije od metala koji se reže ili zavaruje. Kako se povećava valna duljina povezivanje postaje siromašnija i to je poseban problem sa aluminijem i njegovim legurama. Valna duljina svjetlosnog zračenja kod plinskog CO<sub>2</sub> lasera je 10.6 μm dok je od Nd – YAG lasera 1.06 μm – stoga je laser sa čvrstom jezgrom pogodniji za zavarivanje aluminijskih legura. Razvojni rad uglavnom za automobilsku industriju na limu , pomogao je da se smanje ovi problemi poboljšanim fokusiranjem snopa obje vrste lasera. Glavni razlog poboljšanja zavarivanja laserom bila je sposobnost postići veliku gustoću snage , tipično iznad 40 kW/mm<sup>2</sup> , sa oba Nd – YAG laserom sa čvrstom jezgrom i CO<sub>2</sub> plinskim laserom. Kao postupak , zavarivanje laserom nudi prednosti koncentriranog , toplinskog izvora visoke gustoće energije.

Duboko penetrirajući zavar proizvodi vrlo usku zonu utjecaja topline, umanjući gubitak čvrstoće ZUT-a i smanjenje gubitka elemenata sa niskim talištem, kao što je magnezij. Elementi sa niskim talištem pomažu u upostavljanju stabilnog zavara. Velika energija zrake omogućuje da se postigne velika brzina

zavarivanja. Glavni parametar zavarivanja je snaga lasera koja određuje i dubinu penetracije i brzinu zavarivanja. Nedostaci u zavarenim spojevima su slični onima koje susrećemo i kod drugih postupaka zavarivanja. Poroznost je uzrokovana vodikom iz okoliša, otopljenog u osnovnom metalu ili sadržanog u oksidnom sloju. Rješenje ovog problema je pažljiva priprema površine struganjem, zaštitom plinom itd. Iako većina legura koje se ne mogu toplinski obraditi se mogu uspješno zavariti, može se naići na tople pukotine pogotovo kod osjetljivih legura. Ovo se može smanjiti ili ukloniti dodavanjem prikladnih žica dodatnog materijala. Zadnja poteškoća uzrokovana je niskom viskoznošću rastaljenog metala zavara. Ovo uzrokuje problem "drop through" (ispadanja) gdje metal zavara ispada iz spoja kod sučeonog spoja. Taj se problem može prevladati zavarivanjem kutnim spojem.<sup>13</sup>



Slika 25., Princip laserskog zavarivanja (1)

<sup>13</sup> 1) Gene Mathers, «The welding of aluminium and its alloys», Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002. (str. 147. – 155. )



## Zaključak

Aluminij se danas kao materijal koristi u raznim aplikacija od auto-industrije do najobičnije aluminijske folije koji rabimo kao svakodnevni potrošni materijal. To nam govori koliko nam je on kao materijal važan i također nam pokazuje koliko je njegova uporaba raširena. Jedna od najvažnijih stavaka osobito u industriji je to da može postići čvrstoću konstrukcijskog čelika ali sa trećinom težine čelika. Upravo radi toga je toliko priminjem u transportu, jer omogućuje prijevoz većeg tereta.

Zbog ove navedene i drugih primjena aluminij i legure aluminijske sve više zavarujemo. Kod zavarivanja aluminijske najviše se uspoređuju njegova svojstva u odnosu na čelik. Aluminij i njegove legure kao materijal imaju nekoliko problema kod zavarljivosti na koje moramo obratiti pozornosti i pokušati ih ukloniti (poroznost oksidni sloj, tople pukotine itd.). Zato je potrebno određene postupke kao što je npr. TIG prilagoditi da rade onako kako je to najbolje za kvalitetu zavara (ovdje mislim na uklanjanje oksidnog sloja gdje je poželjno da se koristi izmjenična, a ne istosmjerna struja). Naravno to je samo jedan od primjera. Ako se obrati pozornost na te probleme zavarljivosti i pokuša ih se smanjiti na najnižu razinu nema razloga da kvaliteta zavara u konačnici ne bude na visokoj razini.

Potrebno je napomenuti da ako zavarivač nema adekvatno znanje o aluminiju, već je u dosadašnjem radu npr. radio isključivo sa čelikom potrebno ga je uputiti sa kojim se problemima u radu može susresti da bi se smanjila mogućnost ovih gore navedenih defekata. Naravno da se oni u konačnici ne mogu u potpunosti izbjeći, ali uz njihovo smanjenje može se, kao što sam već naveo u tekstu, dobiti dovoljno dobra kvaliteta zavara.

## Literatura:

- 1) Gene Mathers, «The welding of aluminium and its alloys» ,Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002.
- 2) Kaufman, J.G.: Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications, ASM International, 2004.
- 3) <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/metalurgija-aluminija> , pristupljeno veljača 2018.
- 4) <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html> , pristupljeno veljača 2018.
- 5) <http://miroslavjakovljevic.iz.hr/o-aluminiju/> , pristupljeno veljača 2018.
- 6) [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al\\_lg.pdf](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf) , pristupljeno veljača 2018.
- 7) [https://aluminiumleader.com/about\\_aluminium/what\\_is\\_aluminum/](https://aluminiumleader.com/about_aluminium/what_is_aluminum/) , pristupljeno veljača 2018.
- 8) <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863> , pristupljeno veljača 2018.
- 9) Više autora: ASM Handbook, Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous alloys and special – purpose materials, ASM International, 1992. (Aluminium production)
- 10) Aluminijski materijali, Metalbiro, Zagreb, 1985.
- 11) <https://hr.wikipedia.org/wiki/Rosi%C5%A1te> , pristupljeno veljača 2018.

