



UNIVERZITET U ISTOČNOM SARAJEVU
SAOBRAĆAJNO -TEHNIČKI FAKULTET
DOBOJ

Odsjek : Tehnički
Smjer: Proizvodno mašinstvo

Zoran Đuranović

ZAVARIVANJE ALUMINIJUMA
I ALUMINIJUMOVIH LEGURA

Diplomski rad

Doboj, 2007. Godine



UNIVERZITET U ISTOČNOM SARAJEVU
SAOBRAĆAJNO -TEHNIČKI FAKULTET
DOBOJ

Odsjek : Tehnički
Smjer: Proizvodno mašinstvo

ZAVARIVANJE ALUMINIJUMA
I ALUMINIJUMOVIH LEGURA

Mentor : **Prof.dr Aleksa Blagojević**
član: _____
član: _____

Kandidat : ing.maš. **Zoran Đuranović** 190/06
zorandjuranovic@gmail.com

Sadržaj:

Sadržaj.....	1
Predgovor.....	2
Zavarivanje aluminijuma i aluminijumovih legura.....	3
Zavarljivost aluminijuma i aluminijumovih legura.....	4
Oksidna kožica aluminijuma Al_2O_3	4
Alat za čišćenje aluminijuma.....	6
Karakteristike aluminijuma.....	7
Uticaj toplote zavarivanja na promjene mehaničkih osobina aluminijuma.....	9
Prsline.....	10
Tople naprsline.....	11
Hladne naprsline.....	12
Poroznost.....	12
Temperatura predgrijavanja aluminijuma.....	13
Mehaničke osobine zavarenog spoja aluminijuma.....	14
Mehanička obrada aluminijuma.....	15
Aluminij i Al - legure bez strukturnog očvršćavanja.....	16
Aluminijum legure sa strukturnim očvršćavanjem.....	17
Legure sa bakrom.....	18
Legure sa silicijem i magnezijem.....	19
Legure sa cinkom i magnezijem.....	20
Postupci zavarivanja aluminijuma i aluminijumovih legura.....	20
Zavarivanje aluminijuma plinskim postupkom.....	20
Zavarivanje aluminijuma TIG postupkom.....	23
Zavarivanje aluminijuma MIG postupkom.....	29
Ručno elektrolučno zavarivanje aluminijuma.....	33
Hladno zavarivanje aluminijuma.....	34
Elektrotopno zavarivanje aluminijuma.....	34
Aluminijumski lemovi.....	41
Skladištenje aluminijuma.....	44
Propisi za zavarivanje konstrukcija- aluminiju ANSI/AWS D12-97.....	45
Osnovni pojmovi.....	50
Skraćenice.....	51
Zaključak.....	51
Literatura.....	52

Predgovor

U narednom tekstu opisane su osnovne karakteristike aluminijuma kao i problematika koja se javlja kod zavarivanja aluminijuma i aluminijumovih legura. Pažnja je posvijećena aluminijumovom oksidu koji ima tri puta veću tačku topljenja od čistog aluminijuma, a ima i veću specifičnu težinu zbog čega se dešava da ostane zarobljen u zavaru.

Nepoželjni efekat koji se javlja zahvaljujući jedinjenju sa kiseonikom i vodikom, pa samim tim i greške koje se javljaju u zavaru. Da bi se obavilo uspješno zavarivanje dosta često je potrebno izvršiti i predgrijavanje aluminijuma, radi njegove velike toplotne provodljivosti.

Da bi se uspješno obavilo zavarivanje potrebno je sa površine odkloniti oksidni sloj. Odklanjanje ovog sloja moguće je izvršiti mehaničkim i hemiskim putem, čišćenjem sa tečnostima. Od postupaka zavarivanja najviše su zastupljeni postupci TIG (Tungsten Inert Gas) i MIG (Metal Inert Gas) zavarivanja sa svojim prednostima, manama i osnovnim karakteristikama. I osvrtom na hladno zavarivanje koje je zahvaljujući malom unošenju toplote, lijepom šavu, kao i zavarivanju raznorodnih materijala našlo svoju primjenu.

U tekstu su opisane osnovne karakteristike zavarenog spoja, kao i mogućnost smanjenja napona. Dalje su date osnovne karakteristike najčešće korištenih legura. Osnovne karakteristike za lemове, kao i način skladištenja i čuvanja aluminijuma.

ZAVARIVANJE ALUMINIJUMA I ALUMINIJUMOVIH LEGURA



Aluminijum je metal koji je poslije kiseonika najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori, gdje ga ima 8%. Prvi put se pojavio 1855.g. na svjetskoj izložbi u Parizu. Danas je jedino čelik zastupljeniji od aluminija. Dobiva se iz rude boksita, koja se prerađuje u glinicu Al_2O_3 , iz koje se izdvaja elektrolizom. Dobivanjem aluminija troši se puno električne energije (16 kWh/kg Al). Tehnički čisti aluminijum sadrži u sebi 99-9,8% Al. i 0,2-0,1% nečistoća kao što su silicijum, željezo, titan i bakar. Labalatorijski je moguće proizvesti aluminijum čistoće 99,99% Al.

U Francuskoj je, u prvoj polovini 19. veka, vladao car Napoleon III, “mali nećak velikog strica”, kako su ga zvali. Da bi zasjenio okolinu, priredio je banket na kojem su članovi carske porodice i najvažniji gosti jeli priborom od aluminijuma. Ostali su morali da se zadovolje zlatnim priborom. Kasnije, taj isti car je potrošio silno zlato da bi svojoj ličnoj gardi napravio oklope od aluminijuma. Neverovatna je i priča koju je zabilježio Plinije Stariji, pre gotovo dvije hiljade godina... Rimskom imperatoru Tiberiju neki majstor donio je na poklon čašu izrađenu od blistavog i neobično lakog metala. Majstor je objasnio da je taj metal dobio iz gline. Tiberije se uplašio da će novi metal smanjiti cijene zlata i srebra pa je naredio da se majstor ubije a njegova radionica razruši. Da li su stari majstori znali za neki drugi način dobijanja aluminijuma, bez upotrebe električne energije koja tada, koliko se zna, nije postojala, ostaje tajna.

Aluminijum ima kristalnu strukturu površinski centrirane kocke, odstojanje u rešetci je $4,413 \cdot 10^{-8}$ cm. Aluminijum i Al - legure se koriste kao valjani, presani (ekstrudirani) i ljevani materijali, poluproizvodi i proizvodi. Najveću primjenu je našao u mašinskoj industriji, građevinarstvu, prehrambenoj industriji, kriogenoj tehnici, za izradu posuda pod pritiskom u vojnoj tehnici, bijeloj tehnici, te za izradu ambalaže. Fizikalna svojstva čistog aluminijuma tab.br.1.

Tačka topljenja	660 °C
Gustoća, pri 20 °C čistoće 99,998%	2,6989 g cm ⁻³
Koeficijent linearnog istezanja, (0 - 100 °C)	23,5 10^{-6} °C ⁻¹
Specifični topl. kapacitet, (0 - 100 °C)	920,24 J kg ⁻¹ °C ⁻¹
Toplinska vodljivost (0 - 100 °C)	240 J s ⁻¹ m ⁻¹
Specifični električni otpor, (20 °C)	0,0269 Wmm ² m ⁻¹
Modul elastičnosti, (20 °C)	71 900 Mpa
Specifična težina aluminijum-oksida pri 2020 °C	3,96 g cm ⁻³
Tačka topljenja aluminijum-oksida	2050 °C

Tabela br.1 Fizikalna svojstva čistog aluminijuma

Ostala svojstva, odnosno, prednosti aluminijuma i Al-legura:

- Oko 2,9 puta lakši od čelika.
- Prekidna čvrstoća, maksimalno do 700 MPa, uz dobru istezljivost.
- Dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama.
- Toplotna provodljivost 13 puta veća nego kod nerđajućeg čelika, 4 puta veća od običnog čelika.
- Elektrovodljivost bliska Cu, ali pri istoj težini dvostruko veća nego kod Cu.
- Dobro reflektira svjetlost i toplotu.
- Dobra otpornost na koroziju i dekorativnost površine. Prirodno se zaštićuje slojem oksida čime se postiže samozaštita u normalnoj atmosferi.
- Anodizacijom i lakiranjem (eloksiranjem) se postiže izvanredan dekorativni efekt.
- Nije magnetičan.
- Dobro se obrađuju raznim načinima. Posebno je pogodan za proizvodnju prešanjem (ekstruzijom) složenih šupljih i punih presjeka. Pogodan je i za duboko vučenje i zavarivanje.

Zavarljivost aluminijuma i aluminijumovih legura

Pojam zavarljivost znači sposobnost materijala da se može zavarivati tako da zavareni spoj posjeduje odgovarajuću čvrstoću, korozionu otpornost i druga tražena svojstva.

Od svih postupaka TIG i MIG se najviše koriste. Za oba postupka preporučuje se rad sa impulsnim strujama pomoću kojih upravljamo prijelazom kapljica u luku i ostvarujemo kvalitetniji spoj. Postupci zavarivanja pritiskom: hladno, trenjem, ultrazvukom i eksplozijom su prigodni za zavarivanje Al materijala s drugim materijalima; npr. spoj čelik- Al, Cu -Al, Ti - Al, Al - staklo, Al - keramika (ultrazvuk, difuzijsko).

Priprema rubova zavarenih spojeva treba da omogući: čišćenje od nečistoća, sušenje, odmašćivanje od prethodnih operacija i odstranjivanje oksidne kože, ako je deblja. Oksidna kožica može biti deblja nakon npr. toplotne obrade. Odstranjivanje je moguće mehaničkim obradama ili hemijskim sredstvima. I nakon kratkog vremena u slobodnoj atmosferi će se formirati vrlo tanki sloj oksida.

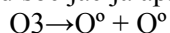
Oksidna kožica aluminijuma Al_2O_3

Aluminijumov oksid predstavlja osnovnu teškoću koja mora da se prevaziđe kod zavarivanja aluminija i njegovih legura. Na hladnom materijalu je debljine oko 0,01 mm. Daje dobru hemijsku otpornost. Aluminij oksid Al_2O_3 ima visoku temperaturu topljenja ($2050^{\circ}C$) i čini teškoće pri zavarivanju. Sam Al_2O_3 je bezbojan i vrlo tvrd. U prirodi se javlja obojen od prisustva drugih metala i u malim količinama kao rubin, safir, korund ili glinica.

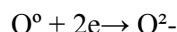
Oksidacija aluminijuma moguća je pri normalnoj temperaturi u suvoj atmosferi vazduha - kiseonika ili u prisustvu vlage.

Oksidacija aluminijuma moguća je pri normalnoj temperaturi u suvoj atmosferi vazduha
kiseonika površina tvrdog tijela posjeduje površinske sile koje određuju mogućnost apsorpcije gasa iz vanjske sredine. Pri kontaktu čiste površine aluminijuma sa kiseonikom slijedi apsorpcija njegovih molekula na površinu.

Pod dejstvom površinskih sila slijedi disocijacija apsorbovanih molekula na atome.

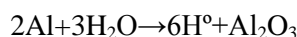


Kiseonik posjeduje veoma dobar afinitet prema elektronima zato atomi kiseonika, pripojeni nelokalizovanim elektronima iz površine sloja metala pretvaraju se u jone:

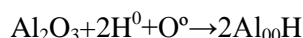


Kao rezultat spajanja elektrona površinskih metala sa atomom kiseonika, pojavljuje se sloj naelektrisanih čestica sa strane metala – sloj pozitivnih jona, a sa strane kiseonika sloj negativnih jona. Takav dvojni sloj električnog punjenja dovodi do pojave električnog polja sa intenzitetom $1 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$, koja pomaže uspostavljanju hemijske veze među kationima metala i anionima ili inače, formiranju monomolekularnog sloja oksidnog filma Al_2O_3 .

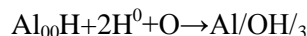
Oksidacija aluminijuma pri normalnoj temperaturi na vazduhu u prisustvu vodene pare u većini slučajeva oksidacija aluminija dešava se kao po pravilu u vlažnoj atmosferi. Uz postojanje vodene pare u atmosferi na površinu aluminija se apsorbuju molekuli vlage. Poslije fizičke apsorpcije vlage slijedi hemijska etapa apsorpcije.



U atomarnom obliku vodonik lako difundira u film i čak u rešetku aluminijuma, gdje je moguća njegova djelimična jonizacija. Pošto nastali film posjeduje veoma visoka apsorpciona svojstva te se na njegovu površinu lako apsorbuje vlaga, kiseonik i drugi gasovi. Kiseonik disocira na atome koji uvlačenjem u difuzionu strukturu filma mogu obrazovati sa vodonikom i metastabilnom fazom Al_2O_3 monohidroksid:



Monohidroksid u daljem može se pretvarati u trihidroksid:



Na taj način kao rezultat oksidacije pri normalnoj temperaturi u prisustvu vlage na površini aluminija se obrazuje tanki oksidni film zaštitnog tipa.

Zbog visoke apsorpcione sposobnosti prema gasovima i vodenoj pari oksidni film je izvor gasova koji se rastvaraju u metalu pa je indirektan uzročnik pojave različitih vrsta nehomogenosti.

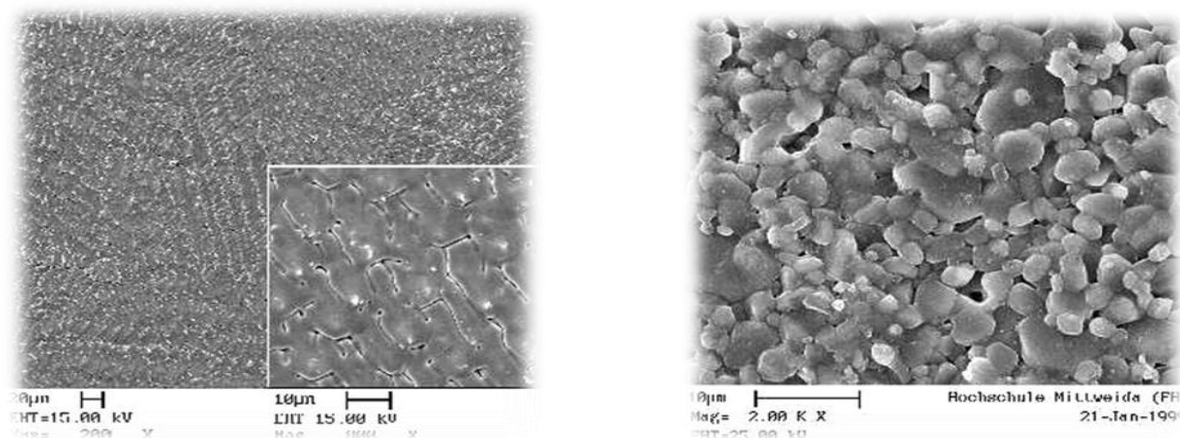
Al_2O_3 kao troska slika br.1. je teška 3.2 gcm^{-3} dok je težina aluminija 2.7 gcm^{-3} pa samim tim troska i ulazi u talinu. Pri visokim temperaturama toplinske obrade ili zavarivanja krutog ili rastaljenog Al stvara se na površini deblji sloj oksida kao i na kapima metala, pa se ne može dobiti homogen zavareni ili lemljeni spoj zbog uključaka oksida, dospijevajući u metal šava kao zarobljeni oksidni uključci, dovode do sniženja opšte korozione postojanosti i čvrstoće zavarenih spojeva aluminija i njegovih legura.



Slika br.1 Oksidni sloj

U toku jednog sata stvara se sloj debljine 80 μ m posle čega je oksidacija spora (skoro se zaustavlja). Al₂O₃ upija vlagu. Disocijacijom vode na 550-650°C vezuje se Mg za vodonik i stvara se poroznost. Kožica oksida se uključuje u zavareni spoj kao nemetalni uključak. Za uspješno zavarivanje potrebno je odstraniti ili razoriti oksidnu kožicu prije početka i za vrijeme zavarivanja djelovanjem električnog luka u inertoj atmosferi gasa (elektroda na "+" polu), prašcima za zavarivanje pri plinskom zavarivanju i lemljenju, hemijskim nagrivanjem površine osnovnog i dodatnog materijala ili mehaničkim odstranjivanjem.

Kod elektrotopnog zavarivanja deblji sloj oksida predstavlja i izolator, pa je potrebno posebno čišćenje. Deblji sloj se javlja npr. pri toplotnoj obradi. Na slikama je prikazan oksidni sloj aluminijuma uvećan 15000 puta i 25000 slika br.2.



Slika br. 2. Oksidni sloj aluminijuma

Njegovim otklanjanjem ne rješava se problem u potpunosti, pošto se očišćenja površina ponovo veže za kisik iz atmosfere, stvarajući ponovni sloj. Osim toga visoka temperatura zavarivanja pogoduje ponovnom staranju oksida, pa je neophodna dobra zaštita rastopljene mase u samom procesu zavarivanja. Zato se prilikom zavarivanja najčešće koristi postupak zavarivanja u sferi inertnog gasa TIG i MIG postupak. A površine koje se zavaruju u praksi se najčešće čiste acitilenom.

Alat za čišćenje aluminijuma

Mehaničko skidanje nečistoće i masnoće obavlja se suvim i čistim krpama, tvrdim plastičnim i metalnim četkama koje treba da se koriste samo za aluminijum slika br. 3. Radni prostor za Al treba biti odvojen od prostora za obradu čelika ili drugih materijala zbog čestica koje se mogu unijeti u Al materijale, a koje će kasnije uzrokovati koroziju.



Slika br.3. Čišćenje aluminijuma

Uobičajena sredstva za hemijsko čišćenje površina su alkohol, trihloretilen, vodeni rastvor NaOH, vodeni rastvor ortofosforne kiseline H₃PO₄.

Dobre osobine ovih sredstava sastoje se u tome što ne prodiru kroz površinu materijala, tako da se lako odstranjuju bilo hladnim isparavanjem ili sapiranjem. Isparavajuća sredstva imaju prednost u tome što se upotrebljavaju kao premazi, pa su pogodna za proizvodnje velikih gabarita. Nedostatak im je u tome što je nakon upotrebe, teško utvrditi stepen čistoće, naročito ako su u pitanju bezbojne nečistoće. Najbolje rezultate čišćenja daje rastvor ortofosforne kiseline ali je njen nedostatak u tome što zahtjeva specijalne kade za držanje i zagrijavanje rastvora na temperaturi od 60°C, jer rastvor u zagrijanom stanju ima jače djelovanje.

Naime, pri čišćenju površine metala osfosornom kiselinom površina metala ispada glađa nego površina metala čišćeno lužinama ili mehaničkim putem, npr. čeličnom četkom, pa se zbog toga na površini metala koji je očišćen ortofosornom kiselinom zadržava manja količina vlage i pri njenom zagrijavanju izdvaja se manja zapremina vodonika. Eksperimentalno je utvrđeno da se zapremina vodonika koji se oslobađa sa jedinice površine metala pri zagrijavanju od 650°C mijenja u širokim granicama zavisno od predhodnog čišćenja i vremena čuvanja uzroka prije eksperimenta.

Sadržaj vodonika pri čišćenju vodenim rastvorom ortofosforne kiseline i čuvanju 2-3 dana ne prelazi 0,00038 cm³/cm². Pri čuvanju do 10 dana zapremina vodonika raste do 0,001047 cm³/cm².

Pri čišćenju sa vodenim rastvorom NaOH zapremina vodonika se povećava za oko dva puta i iznosi 0,00165÷0.00184 cm³/cm².

Veličinom kade ograničene su i dimenzije predmeta. Osim toga transportni troškovi su veliki kao i utrošak tople vode za sapiranje, isto zagrijanje na temperaturi od 60°C, i utrošak tekuće vode za sapiranje, tako da se ovaj postupak čišćenja primjenjuje pri serijskoj proizvodnji manjih predmeta.

Na lijevoj prikazan je rub materijala koji nije čišćen prije zavarivanja. Oksidni sloj na rubu spriječio je mješanje između površine materijala i ostavio vidljivo oštećenje u varu.

Na desnoj strani je prikazan zavar gdje je sa ivica očišćen oksid i vidi se izjednačenje ivica slika br.4.



Slika br.4. Rezultat čišćenja tj. nečišćenja ivica

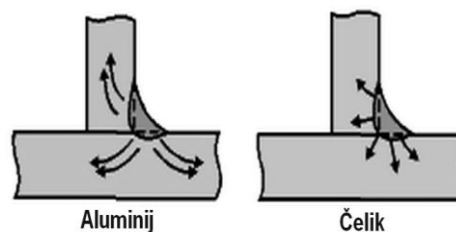
Pri ovom je najvažnije da sredstva za čišćenje budu potpuno odstranjena sa površine materijala, prije nego što se pristupi zavarivanju. U suprotnom može doći do povećanja poroznosti, koja je prouzrokovana sredstvima za čišćenje.

Karakteristike aluminijuma

Toplotna provodljivost zbog visoke toplotne provodljivosti čistog Al, velika je vjerovatnoća pojave poroznosti. Kod zavarivanja većih debljina potrebno je predgrijavanje da se izbjegne poroznost. Za čisti Al iznosi 240 Wm⁻¹ °C⁻¹, a za Al - legure između 117 i 155 W m⁻¹ °C⁻¹ pa su za zavarivanje potrebni snažni koncentrirani tokovi energije i visoki toplotni put unaprijed niskoj temperaturi topljenja.

Ako se zavaruje sa slabim i nedovoljno koncentriranim tokovima energije, nastaje široka zona uticaja toplote sa omekšanom strukturom.

Kod postupka zavarivanja aluminijuma toplota se mnogo brže širi nego kod čelika što je prikazano na slici br.5. Da bi se ublažilo odvođenje toplote od okoline najčešće se u praksi ispod dijela koji se zavaruje stavlja izolacija azbestno platno ili slično kako bi se smanjilo odvođenje toplote a samim tim postigli i što bolji uslovi prilikom zavarivanja aluminijuma.



Slika br.5.Širenje toplote kod aluminijuma

Jaka električna provodljivost. Zahtijeva veliku jačinu struje i kratko vrijeme elektrootpornog zavarivanja.

Veliki koeficijent toplotnog istezanja uzrokuje veća istezanja i deformacije pri hlađenju, pa je moguća pojava pukotina zbog jakog istezanja. Pa se često dešava da se zavarene konstrukcije moraju peglat, ako to karakteristike konstrukcije dozvoljavaju. Stoga treba birati postupak zavarivanja kojim će se unositi minimalna količina toplote u osnovni metal.

Rastvorljivost vodika u rastaljenom materijalu je velika pri kristalizaciji, zbog naglog pada rastvorljivosti, oslobađaju se mjehurići vodika, koji mogu uzrokovati poroznost.

Velika rastvorljivost gasova u aluminijumu otežava ponekad ostvarivanje šavova bez pora.

Pri zagrijavanju se ne mijenja boja kao što je slučaj kod čelika, pa se ne može procijeniti temperatura na temelju boje pri zagrijavanju do topljenja, što pričinjava poteškoće kod zavarivanja i lemljenja. Jer zavarivač prilikom zavarivanja mora da poveća struju kao što je slučaj postupaka TIG radi velike toplotne provodljivosti.

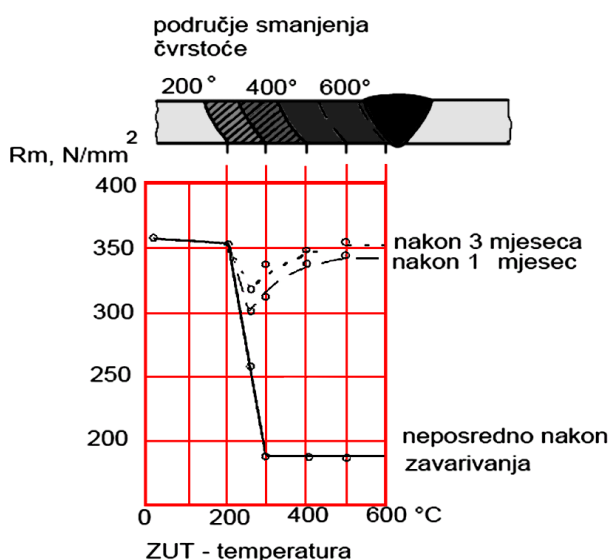
Sklonost vrućim, a u manjoj mjeri i hladnim pukotinama zavisi od hemijskog sastava i uslovima zavarivanja.

Uticaj toplote zavarivanja na promjene mehaničkih osobina aluminijuma

Aluminijum se isporučuje u tri stanja tvrdo, polutvrdo i meko. Tvrdoća jedino zavisi od stepena hladne deformacije (provaljanosti, prokovanosti i td.) Sa porastom tvrdoće raste zatezna čvrstoća i granica razvlačenja dok izduženje opada. Unošenjem toplote zavarivanjem tvrdoća i čvrstoća opadaju, a izduženje raste. Ove promjene su trajne i nikakvim postupkom toplotne obrade se ne mogu naknadno izmijeniti. Auminijumske legure za gniječenje dijele se na otvrdnjavanje hladnim postupcima obrade, i otvrdnjavanje pod uticajem toplote ili starenje što zavisi od hemijskog sastava legure.

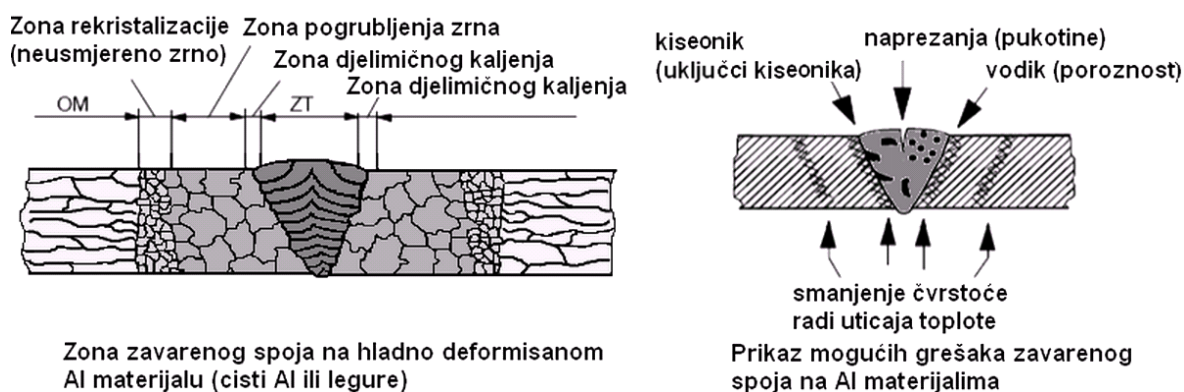
Omekšanje na mjestu zavarenog spoja hladnom deformacijom Al - materijali postaju znatno čvršći. Na mjestu zavarenog spoja zbog ljevačke strukture čvrstoća je najmanja, kao u meko žarenom stanju slika br.6.

Ovo slabljenje je razlog da se u avio industriji još uvijek mnogo koriste zakovani spojevi i svornjaci slični zakovicama (engl. lockbolt fastener) napravljeni od titan legure 6Al-4V. Za takav slučaj bi se moglo računati s koeficijentom slabljenja zavarenog spoja oko 0.6 zbog mehaničkog slabljenja (omekšanja) zavora.



Slika br.6. Smnjenje čvrstoće u zoni uticaja toplote

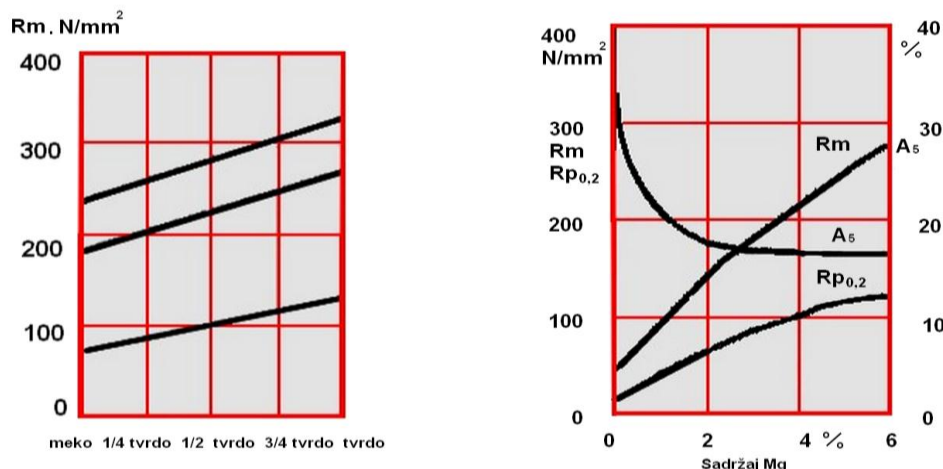
Za Al - legure, koje se toplinski obrađuju na 120 °C, zona uticaja toplote će obuhvatiti područje, koje je bilo zagrijavano na temperature 120 °C do tališta. Na mjestu zone kaljenja u zoni uticaja toplote je najniža čvrstoća, a na narednoj slici br. 7. je šematski prikazano šta se dešava u i oko zavarenog spoja.



Slika br.7. Promjene koje se dešavaju kod aluminijuma u zoni uticaja toplote

Čvrstoća i grupe Al materijala: čisti aluminijum ima čvrstoću 90 - 190 MPa, ovisno o stanju isporuke (tvrđi, 1/2 tvrđi, 1/4 tvrđi, meki - prema stepenu hladne deformacije) prikazano na slici br.8. Čvrstoća luminumovih legura se može povišiti na više načina:

1. hladnom deformacijom,
2. legiranjem,
3. toplinskom obradom
4. kombinacijom, npr. legiranjem i hladnom deformacijom.



Slika br.8. Čvrstoća aluminijuma zavisno od stanja

Mehanička svojstva se mogu značajno povećati legirajućim elementima tvoreći tako legure aluminija. Pri tome se razlikuju dvije grupe:

- Al-legure bez strukturnog očvršćavanja tzv. "nekaljive legure". Grupe nekaljivih legura: Al Mn, Al Mg Mn, AlMg.
- Al-legure sa strukturnim očvršćavanjem tzv. "kaljive legure". Grupa kaljivih Al legura: Al Cu Mg, Al Mg Si, Al Mg Si, Al Zn Mg, Al Li Cu Zr, Al Li Cu MgZr

U inženjerskoj praksi najvećim dijelom se koriste valjani i presani (ekstrudirani) proizvodi, zatim ljevani i kovani. Ovdje će biti isključivo riječ o valjanim i presanim legurama tj. o tzv. gnječenim legurama (franc. l'aluminium et les alliages d' aluminium corroyés; engl. wrought aluminium and aluminium alloys; njem. Knet Legierungen).

Zavarljivost može da se ocijeni na osnovu:

- Otpornosti materijala šava i osnovnog materijala u zoni uticaja toplote prema pojavi hladnih i toplih prskotina.
- Otpornosti materijala šava prema pojavi poroznosti i oksidnih uključaka.
- Mehaničkih osobina materijala šava i zavarenog spoja kao cjeline u odnosu na osnovni materijal.
- Odgovornosti zavarenih spojeva prema pojavi korozije u eksploatacinim uslovima.

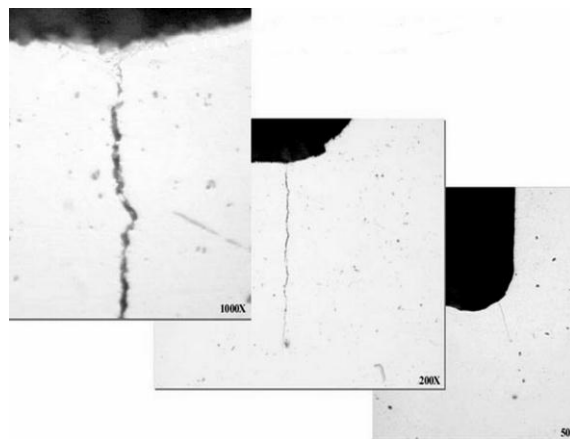
Prsline

Od svih stvari koje se mogu loše odraziti na šavove, prsline su najgore. Prsline nastaju zbog napona u onoj tački zavarenog sklopa koja prevazilazi zateznu čvrstoću (čvrstoća kidanja) ili smicajnu čvrstoću (čvrstoća razdvajanja smicanjem) osnovnog metala ili metala šava. Prsline ne mogu nastati tamo gdje je metal izložen pritiskom naponu, zbog toga što se on međusobno zbija

umesto da se razdvaja razvlačnjern. To je jedan od razloga zbog čega će površinsko sabijanje (pce-ning) šava i vaše zone uticaja toplote smanjiti površinske prsline. Površinskim sabijanjem šava površina metala dovodi se u sabijeno stanje. Međutim, površinsko sabijanje nije uvek dopušteno propisima zavarivanja

Najčešći uzrok nastajanja prslina u toku i neposredno nakon zavarivanja potiču neposredno od fizičkimetaluških osobina materijala. Tehnički čist aluminij je manje sklon pojavi naprslina. Praksa je pokazala da pri zavarivanju tanjih aluminijumskih djelova ne nastaju pukotine i zato je moguće tehnički aluminijum smatrati kao dobro zavarljivi materijal. Iz izloženog može se zaključiti da su svi materijali, a tu spada i tehnički aluminijum koji ne kristaliziraju u temperaturom intervalu već kristaliziraju pri konstatnoj temperaturi dobro zavarljivi i da nisu skloni prema pojavi prslina.

Jednom kad prslina počne, ona će nastaviti svoje širenje upravo kroz šav ili osnovni materijal sve dok se ne oslobodi napon koja prouzrokuje stvaranje prsline (što znači da napon opadne ispod zatezne čvrstoće ili konvencionalnog napona tečenja metala). Najčešće, umesto oslobađanja napona, prslina stvara manji konstrukcioni presek tako da jedinični napon po površini preseka postane čak veći. Znači da prslina, jednom započeta, može da nastavi svoje širenje upravo kroz zavarni sklop. Izgled naprslina nastalih zavarivanjem aluminijuma prikazane su na slici uvećane 50, 200 i hiljadu puta.



Slika br. 9. Prsline u zavarenom spoju

Tople prsline

Tople prsline nastaju u materijalu šava. Uzrok ove pojave su zapreminske pojave u procesu kristalizacije zbog kojih dolazi do naprezanja u metalu. Koeficijent zapreminskog širenja se pri prelazu iz tečnog u čvrsto stanje naglo mijenja pri čemu nastaju pukotine. Usled promjene koeficijenta zapreminskog širenja dolazi do pojave zatežućih napona i deformacija. Pukotine nastaju u materijalu šava, u kome se odvija kristalizacija, u periodu kada ovi naponi djeluju na materijal šava koji još nije potpuno očvrsnuo. Ako materijal šava uspije da očvrsne, prskotine se ne javljaju. Problem pojave toplih prslina rješava se tako što se osnovni materijal adekvatno legira. Tako se legurama tipa AlMg dodaje 1-1.2% Mn i 0.08-0.12% Ti čime se procenat toplih pukotina smanjuje sa 20-30% na 3-5%. Legure AlMg imaju maksimalnu sklonost prema pojavi kristalizacionih prslina ako se radi o AlMg4. Problem može da se riješi i dodatnim materijalom sa većim sadržajem Mg. Kada se u osnovnom materijalu nalazi 5-6% Mg, rijetko dolazi do pojave kristalizacionih naprslina (ukupne greške u zavarenom spoju ne prelaze 10 - 15%).

Stepen hladne deformacije osnovnog materijala nema bitnog uticaja na pojavu toplih prslina. Najveću sklonost prema obrazovnju toplih prslina imaju legure koje sadrže 0,2-1,5% Mg; 0,2-2% Si. Da bi se izbjegle tople prsline treba koristiti dodatni materijal sa 4-6% Si, ali tada šavovi imaju smanjenu površinu koja ne može da se poveća naknadnom termičkom obradom. Primjenom dodatnog materijala

AlMg6, za zavarivanje navedenog osnovnog materijala mogu da se izbjegnu tople prsline u materijalu šava, ali se one javljaju u zoni uticaja toplote.

Pri zavarivanju hladno otvrdnjavajućih samo zakaljivih legura tipa AlZnMg primjenom dodatnog materijala istog sastava kao osnovnog materijala dolazi do pojave prsline na granici rastapanja. Primjenom dodatnog materijala sa 5%Mg koji sadrži male količine Mn i Cr smanjuje se sklonost ka obrazovanju ovih prsline u znatnoj mjeri.

Hladne prsline

Velike teškoće pri primjeni legure AlZnMg izaziva naknadna pojava hladnih pukotina, 3-4 meseca poslije zavarivanja. Kao rezultat napona i zatežućih opterećenja, čiji zbir prelazi Rp0.2, javlja se plastična deformacija i izvesni porast Rp0.2 materijala šava i ZUT-a. Do porasta vrijednosti Rp0.2 dolazi usled otvrdnjavanja i starenja. Dopunski porast napona je u vezi sa strukturnim rasporedom čvrstog rastopa. Za hladnu poroznost karakterističan je početni period (kristalna građa metala, a posebno građa po kristalima zrna). S porastom odnosa Zn/Mn povećava se sklonost ka hladnim naprslinama. Sklonost prema hladnoj poroznosti raste s povećanjem sadržaja legirajućih elemenata.

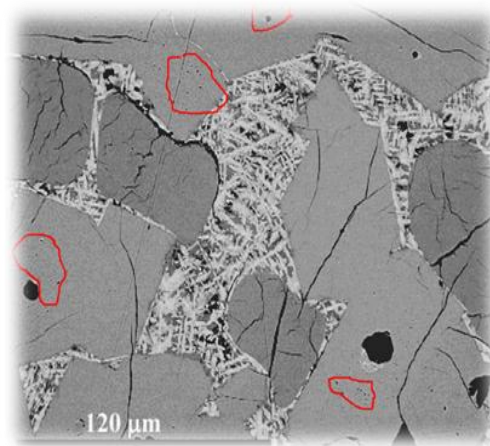
Poroznost

Povećana sklonost aluminijuma prema nastanku poroznosti je jedna od glavnih poteškoća za dobivanje zavarenog spoja visokog kvaliteta. Glavni uzročnik pojave pora u zavaru je izdvojeni vodonik. Osim vodika na reakciju u kupki utiču azot i kiseonik. Azot sa aluminijumom stvara aluminijum nitrat, koji prelazi u šljaku i ne utiče na stvaranje poroznosti. Kiseonik koji se nalazi u kupki jedini se sa aluminijumom u aluminijum-oksidi Al_2O_3 i kao takav utiče na poroznost u šavu.

Obrazovanje poroznosti indirektno zavisi od čišćenja osnovnog materijala kvaliteta obrade žljeba, kvaliteta dodatnog materijala, čistoće zašitnog gasa, uticaja atmosfere u kojoj se zavaruje, kvaliteta čišćenja, metode zavarivanja, parametara zavarivanja, način unošenja dodatnog materijala i dr. faktora.

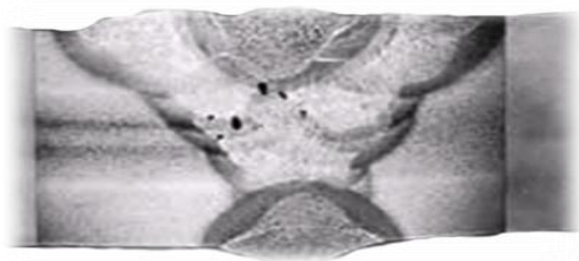
Pore se pri zavarivanju stvaraju još u tečnom stanju pre kristalizacije materijala šava pri naglom smanjenju rastvorljivosti H_2 . Sklonost metala prema obrazovanju pora nije samo posljedica porasta rastvorljivosti H_2 pri prelazu metala iz tečnog u čvrsto stanje, već je od značaja i gradijent rastvorljivosti H_2 u tečnom metalu, posebno u zoni bliskoj temperaturi topljenja. Porastom gradijenta rastvorljivosti raste sklonost metala prema obrazovanju pora. H_2 nastaje pri disocijaciji vlage koja se nalazi u oksidu Al_2O_3 na metalu koji se zavaruje ili na žici (dodatnom materijal). H_2 može poticati i od različitih nečistoća na površini stranica žljeba ili na žici. Kod legura tipa AlMg javlja se velika poroznost materijala šava i ZUT. Količina pora raste s povećanjem sadržaja Mg u leguri. Uzročnik pojave poroznosti u ovim legurama pripisuje se δ fazi (Al_3Mg_2) koja se pojavljuje pri brzom hlađenju, sadrži oko 36,5%Mg, a topi se na približno 448°C. Utvrđeno je da vlaga reaguje najviše sa Mg iz δ faze po formuli: $Al_3Mg_2 + 2H_2O = 2MgO + 3Al + 2H_2$. Disocijacija vodene pare se odigrava na temperaturi 550-620°C. Pri razlaganju vodene pare već na temperaturi 550°C i δ faza je u tečnom stanju, kada dolazi do njene intenzivne oksidacije i do rastvaranja H_2 koji stvara porozitet unutar šava. Vrlo je vjerovatno da pri visokim temperaturama osim H_2 porozitet mogu da izazovu lako topljivi elementi kao što su Zn i Mg. U porama, koje su stvorile pare ovih metala, posle hlađenja nastaje vakuum. Pore koje nastaju pri zavarivanju imaju sferni oblik. One kao koncentratori napona imaju manji uticaj od pukotina. Međutim, ako je zarobljen H_2 , u porama može biti vrlo visok pritisak (500 bara) tako da uz dodatna opterećenja na mjestu pore može doći do pojave prskotina. Povećana poroznost može da smanji korozijsku otpornost šava.

Sprečavanje disperzne poroznosti mnogo je složeniji postupak, jer poroznost u najvećoj mjeri zavisi od vlažnosti zaštitnog plina na koju mi ne možemo uticati nego samo proizvođač zaštitnog plina. Da bi smanjili disporeznu poroznost potrebno je preuzeti redukciju vodonika u zoni luka. U tom smislu mnogi autori su vršili eksperimente sa dodacima u argon raznih plinova kao helijum, CO_2 , hlor i kisik. Pokazalo se da količina CO_2 u u argoni nesmije preći 2,5-3%. Poroznost se može smanjiti primjenom mješavine gasa: 80%He+(5-10)% O_2 +(5-10%)Ar. Poroznost koja se javlja u zavaru zaokružena je crvenom bojom na slici br. 10. i 11.



Slika br.10. Poroznost u šavu

Sa prekoračenjem ove vrijednosti dobijaju se lošije osobine šava i zacrnenje lica zavora po cijeloj površini. Helijum je dao najbolje rezultate međutim cijena izrade mješavine argon - helijum je prilično visoka.



Slika br.11. Poroznost u šavu

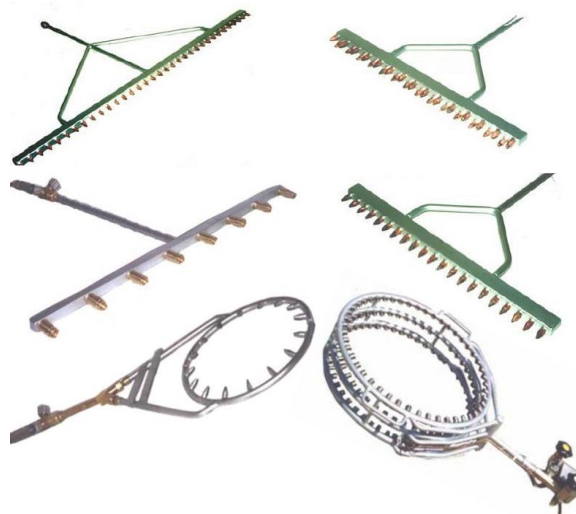
Kod MIG postupka zavarivanja strujno opterećenje žice je jako veliko, zbog čega metal isparava i stvara porozitet, ne samo u materijalu šava, nego i u zoni uticaja toplote. Ovaj postupak se teško ostvaruje bez poroznosti. Kod TIG zavarivanja koristi se manja energija pa se može izvesti bez poroznosti.

Temperatura predgrijavanja aluminijuma

Toplotna provodljivost aluminijuma i aluminijumovih legura je više od četiri puta veća nego kod čelika. Zbog toga, iako je temperatura topljenja aluminijuma i aluminijumovih legura niska, visoka toplotna provodljivost dovodi do gubitaka toplote unijete zavarivanjem, i traži velike količine dovedene početne toplote. Zbog svega toga, a i zbog sklonosti oksida da apsorbuju vlagu, literaturni podaci za predgrevanje su veoma različiti. Neki autori preporučuju da iznad 8 mm debljine treba predgrevati na 100-200°C. Upoređujući uzorke zavarene sa predgrevanjem ili bez njega ustanovljen je znatno viši kvalitet šava kod predgrijanih uzoraka i znatno brži rad (stabilniji luk i ljepši izgled šava).

Predgrijavanje je potrebno da se spriječi suviše veliko odvođenje toplote sa mjesta zavarivanja. Pukotine mogu nastati ako je u pitanju neka legura aluminijuma osjetljiva na lokalno zagrijavanje.

Predgrijavanje je nužan preduslov za uspješno zagrijavanje aluminijuma i njegovih legura, naročito ako se radi o debljinama iznad 10 mm. Najbolje predgrijavanje se dostiže jednakomjernim kruženjem plamenikom poviše zone zagrijavanja. Dijelovi koji će se spajati zavarivanjem moraju biti jednako zagrijani. Na slici 12 su prikazani specijalni plamenici širine 500mm i 100mm, kao i specijalni plamenici za cijevi.



Slika br.12. Specijalni plamenici

Kod aluminij-magnezij legura (AL Mg i AL Mg5) predgrijavanje treba vršiti posebno pažljivo jer su vrlo osjetljive, što znači da ih treba lagano zagrijavati, da se nebi suviše pregrijale. U mašinskoj industriji se umjesto legure ALMg3 koja ima neznatnu osjetljivost na predgrijavanje. Temperatura predgrijavanja kreće se obično 100-200°C, a kod zavarivanja odlivaka 300-400°C. Temperatura predgrijavanja se može kontrolisati termo kredama.

Mehaničke osobine zavarenog spoja aluminijuma

Aluminijum sa manjim sadržajem primjesa tj. čisti aluminijum 99,99% u odnosu na aluminijum sa 99,5% znatno je mekši i isplasniji, jer tvrdoća i čvrstoća opadaju sa porastom nečistoće.

Modul elastičnosti aluminijuma 99,99% je 7000 kp/mm²

Tvrdoća HB hladno ožarenog aluminijuma 99,996% je 27 kp/mm², a 99,5% je 33 kp/mm².

Tvrdoća HB hladno valjanog aluminijuma 99,996% je 17 kp/mm², a 99,5% je 18 kp/mm².

Zatezna čvrstoća hladno valjanog aluminijuma 99,996% je 11,41 kp/mm², a 99,5% je 13 kp/mm².

Zatezna čvrstoća ožarenog aluminijuma 99,996% je 4,81 kp/mm², a 99,5% je 8 kp/mm².

Istezanje hladno valjanog aluminijuma 99,996% je 5,5 %, a 99,5% je 4 %.

Istezanje aluminijuma 99,996% je 48,5 %, a 99,5% je 35%.

Mehaničke osobine zavise od legirajućih elemenata i primesa. U zavarenim spojevima termički neobrađenih legura sistema AlMn koeficijent čvrstoće iznosi 0,9-1. Kod AlMg legura, do smanjenja čvrstoće dolazi u manjoj meri. Najmanju čvrstoću ima materijal šava (0,8-1), što zavisi od kvaliteta legure, upotrebljenog dodatnog materijala i postupka zavarivanja (TIG - viši koeficijent, MIG - niži koeficijent) - važi za sve spojeve.

Znatno veći problemi su kada treba ostvariti zavarene spojeve koji imaju jednake mehaničke osobine kao osnovni materijal, kod termički obradivih legura. U ovim slučajevima materijal šava i zona uticaja toplote podvrgavaju se termičkoj obradi: kaljenju, otpuštanju, rekristalizaciji. Mjerenjem tvrdoće u zavarenim spojevima legura AlMgSi, AlCuMn i AlZnMg konstatovane su prednosti legura AlZnMg nad AlMgSi i AlCuMn kao i AlCuMn nad AlMgSi. U zavisnosti od temperature termičke obrade i njenog

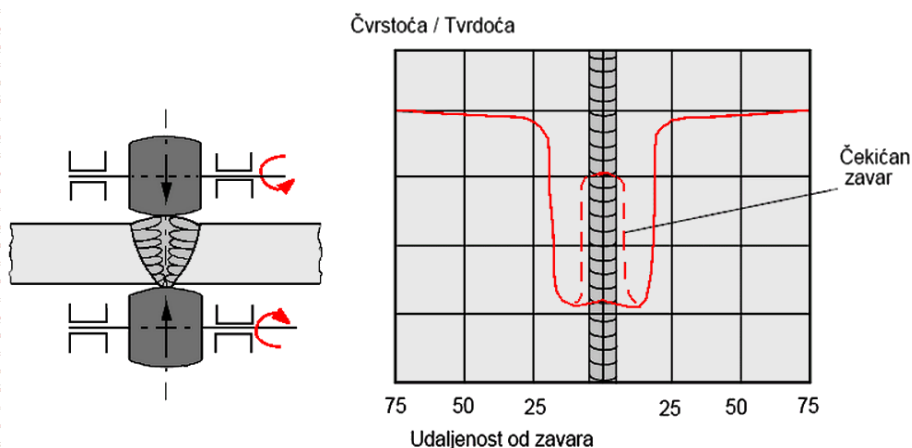
trajanja, R_m zavarenih spojeva na leguri AlMgSi se smanjuje i iznosi 50-80% od vrednosti R_m koje ima osnovni materijal. R_m zavarenih spojeva termički obrađenih AlCuMn legura iznosi 50-70% od R_m osnovnog materijala. Suštinsko povećanje R_m može da se postigne ponovnim kaljenjem čitavog zavarenog spoja i toplim otvrdnjavanjem zavarenog spoja (veštačkim starenjem). Ovakvu termičku obradu čitavog zavarenog spoja nije lako izvesti, često zbog velikih gabarita konstrukcije, a takođe je teško ostvarljiva i na konstrukcijama koje imaju tolerisane geometrijske mere. Ako se za legure tipa AlMgSi, radi izbegavanja prskotina u materijalu šava, koristi heterogeni dodatni materijal, termičkom obradom nije moguće postići R_m koju ima osnovni materijal.

Samozakaljive legure tipa AlZnMg posle zavarivanja dostižu normalnu čvrstoću nakon tri meseca. Takve legure poslije zavarivanja mogu biti podvrgnute i toplom otvrdnjavanju pa je tada R_m zavarenog spoja jednaka R_m osnovnog materijala. Obično treba uzimati u obzir da zona uticaja toplote i materijal šava imaju niže vrijednosti mehaničkih osobina u odnosu na osnovni materijal. Za osnovni materijal debljine 10mm zona uticaja toplote se prostire po 20mm s jedne i druge strane od podužne ose šava. Ako je pravac zavarivanja upravan na pravac djelovanja sile, zona uticaja toplote je najslabije mjesto na konstrukciji. Pri konstruisanju o ovome treba voditi računa.

Mehanička obrada aluminijuma

Zavaren spoj ima grubozrnastu (ljevačku) strukturu s niskom čvrstoćom. Hladnom deformacijom zavareski čekićanjem ili provlačenjem kroz valjke od tvrde gume ili čelika može se povećati R_m , R_e i tvrdoća zavareske. Prokivanje se može izvoditi u toplom i hladnom stanju, a u oba slučaja na čvrstoj podlozi. Hladnim prokivanjem čvrstoća raste a koroziona postojanost jako opada, zbog površinskih napona prouzrokovanih prokivanjem. Zbog toga se preporučuje toplo prokivanje na temperaturi od 350°C pri čemu se razbijanjem grubih kristalnih zrna u zavarenom spoju postiže visoka koroziona postojanost.

Tehnika prokivanja je dosta prosta, može se izvoditi sa dva bravarska čekića, što je pogodno pri toplom prokivanju. Danas se najviše koriste pneumatski alati isključivo specijalne namjene. Na slici 13 je dat prikaz porasta čvrstoće čekićanog zavareske.

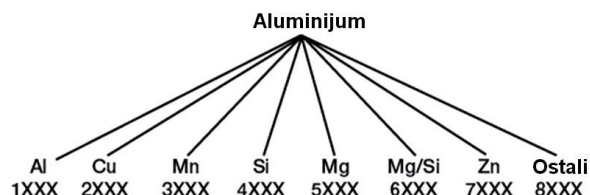


Slika br.13 Porast čvrstoće čekićanog zavareske aluminijuma

Aluminijum vrlo je podesan za plastično oblikovanje (jer ima dobru istezljivost), ali ima slaba mehanička svojstva. Mehanička svojstva se mogu značajno povećati legirajućim elementima tvoreći tako legure aluminijuma. Pri tome se razlikuju dvije grupe:

Aluminij i Al - legure bez strukturnog očvršćavanja

Očvršćavanje se u ovom slučaju postiže kombinacijom efekata dodavanja legirajućih elemenata (Mg, Si, Mn, Fe i drugih), hladne plastične deformacije i žarenja. Oznake legura su prikazane su na slici 14.



Slika br.14. Oznake legura

Postiže se cijela lepeza mehaničkih svojstava od mekog stanja s minimalnim mehaničkim vrijednostima i maksimalnom plastičnošću do tvrdih stanja s maksimalnom čvrstoćom i granicom razvlačenja, te minimalnom plastičnošću. U ovu grupu spadaju familije legura prema normama SAD: aluminijum (1000), legure s manganom (3000), te legure s magnezijem (5000).

Nelegirani aluminijum (1000) se razlikuje po čistoći, tj. po učešću pojedinih "nečistoća" Fe, Si u aluminijumu. Posjeduje izvanrednu otpornost prema atmosferilijama, odličnu toplotnu i električnu provodljivost i izvanrednu plastičnost (sposobnost oblikovanja). Čvrstoća je mala. Primjena mu je vrlo raširena (elektroindustrija, hemijska industrija, petrokemija, dekorativna upotreba, građevinarstvo). Zavarljivost je odlična.

Legura sa manganom (3000) mangan je osnovni legirajući element u ovoj familiji Al-legura. Legura AlMn (3003) je najčešći i pravi predstavnik ove familije. Ova legura ima izvrsnu plastičnost, otporna je na atmosferilije, dobro je zavarljiva. Upotrebljava se za duboka vučenja, za izmjenjivače toplote i sl. Često upotrebljiva legura iz ove familije je Al Mg Mn (3004) iz koje se proizvode konzerve za piće (tzv. can stock) kao i za cijevi proizvedene iz trake zavarivanjem.

Legure sa magnezijem (5000 u ovoj familiji osnovni legirajući element je magnezij, obično do 5 %, a ponekad se dodaje mangan i hrom. Ove legure posjeduju osrednja mehanička svojstva, dobro se zavaruju i imaju znatno poboljšana mehanička svojstva pri niskim temperaturama. S većim sadržajem magnezija odlično se ponašaju u morskoj atmosferi. Oblikovljivost je dobra ali opada s porastom sadržaja magnezija. Primjena im je vrlo raznovrsna: građevinarstvo, brodogradnja, uređaji za desalinizaciju morske vode, posude, različite cisterne za transport. Zavarljivost je dobra. Raspored mehaničkih karakteristika legura aluminijuma toplotno neočvrstivih i toplotno očvrstivih dat je u tabeli 2.

Mehanička svojstva nekih Al metala

Legura	Serija	Tip		Raspon mehaničkih karakteristika u (KNm)							
				0	100	200	300	400	500	600	700
Toplotno Neo čvrstive legure	1000	Al	1050.A 1070.A 1100 1200 1080								
	3000	Al-Mn	3003 3004 3005 3105								
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056.A 5456 5052 5005 5454 5754 5254 5182								
Toplotno očvrstive legure	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017.A 2618.A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219								
	6000	Al-Si-Mg	6005.A 6060 6061 6082 6081 6106 6351								
		Al-Zn-Mg	7020 7021 7039								
	7000	Al-Zn-Mg-Cu	7049.A 7175 7075 7475 7010 7150 7050								

Granica razvlačenja Rp

Prekidna čvrstoća Rm

Tabela br.2. Mehanička svojstva nekih aluminijumovih legura

Aluminijum legure sa strukturnim očvršćavanjem

Ova grupa Al-legura sadrži bakar (Cu), silicij (Si), magnezij (Mg), litij (Li), cink (Zn) i skandij (Sc). Ima mogućnost strukturnog očvršćavanja. To očvršćavanje se postiže određenim toplotnim postupkom. Prvu etapu toplotnog postupka predstavlja rastopno žarenje (solution treatment) koje ima za cilj da na povišenim temperaturama (450 - 550 °C) rastopi barem jedan od legirajućih elemenata u čvrstoj otopini aluminijuma. Slijedeću fazu toplotnog procesa predstavlja naglo hlađenje nazvano gašenje (Quenching) najčešće uranjanjem u hladnu vodu. Gašenjem se omogućava zadržavanje na okolnoj temperaturi one strukture koju metal ima u zagrijanom stanju u kojem su legirajući elementi "zarobljeni" u prezasićenoj čvrstoj otopini precipitata (izlučevina). Naglo hlađen metal je u nestabilnom stanju i teži stabilnijem stanju pri sobnim temperaturama. Metal postepeno dozrijeva.

Ova pojava popraćena sa značajnim povećanjem čvrstoće nazvana je strukturno očvršćavanje. Treća faza toplotnog procesa može se odvijati pri normalnim - sobnim temperaturama i tada se radi o prirodnom dozrijevanju (natural ageing) metala, a može se odvijati i pri nešto povišenim temperaturama i tada je riječ o umjetnom dozrijevanju (artificial ageing). Ovu grupu predstavljaju tri familije legura: legure s bakrom (2000), legure sa silicijem i magnezijem (6000) te legure sa cinkom i magnezijem (7000).

Legure sa bakrom

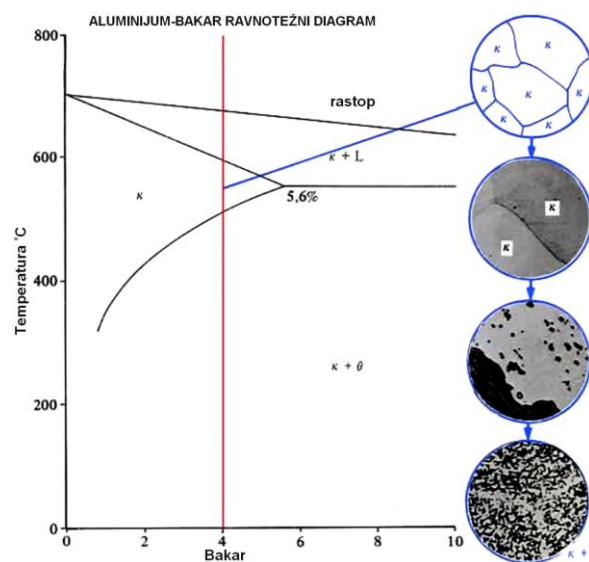
Legure s bakrom imaju oznaku 200 bakar je glavni legirajući element u ovoj familiji čije mehaničke vrijednosti dostižu one kod mekih čelika. Inače, familija je poznata po popularnom i tradicionalnom nazivu - durali.

Upotrebljava se najčešće za radne - nosive dijelove. Nema dobra antikorozivna svojstva i u pravilu se loše zavaruju. Ova legura često se oblaže (platira, plakira) sa čistim aluminijem radi antikorozivne zaštite. Masovno se upotrebljava u avioindustriji, naoružanju i mehaničkim dijelovima (zakovice, vijci). Dodatkom bakra aluminijumu se naglo povećava zatezna čvrstoća, a smanjuje električna provodljivost. Aluminijum dobijen na početku razvoja nije imao potrebne mehaničke karakteristike da bi mogao da se koristi kao konstrukcijski materijal za avione.

Nemački naučnik Alfred Vilm je pripremio leguru sa

- 95,5% Al ,
- 4% Cu,
- 0,5%Mg , pa je tu leguru zakalio.

Na slici br.15. prikazan je strukturni dijagram aluminijuma i bakra. Posle kaljenja više puta je izmjerio tvrdoću legure i dobio različite rezultate, pa je posumnjao u ispravnost aparature, ali kasnija istraživanja su pokazala da se čvrstoća i tvrdoća legure u toku vremena povećava. Tako je otkriven fenomen "starenja" i mada Alfred Vilm nije teoretski objasnio ovu pojavu, on je eksperimentalnim putem odabrao optimalni sastav legure i režim termičke obrade i svoj patent prodao pod nazivom duraluminijum. Do danas je razvijeno više legura koje se donekle razlikuju po sastavu, načinu termičke obrade i oznakama, ali se svi zovu istim imenom- **durali**. Posle kaljenja i starenja otpor na kidanje im je ravan $\sigma_M = 400-500$ MPa.



Slika br.15. Strukturni dijagram aluminijuma i bakra

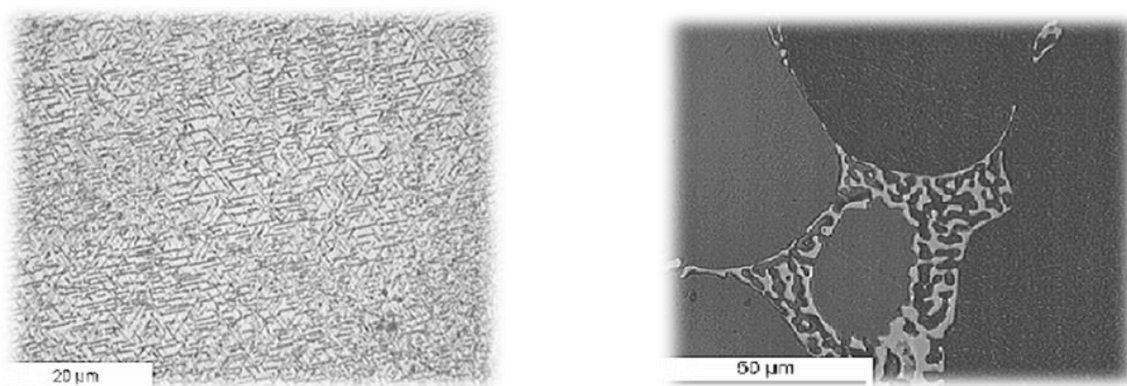
Durali se odlikuju sasvim specifičnim ponašanjem prilikom termičke obrade, što uslovljava što stvara postupke njegove tehnološke obrade.

- Zona minimalne otpornosti dobija se zagrevanjem na temperaturu od 350° C, što predstavlja praktični interes za tehnološku obradu, jer tada materijal postaje pogodan za obradu sa plastičnom deformacijom.
- Posle završetka obrade sa ovako omekšalim materijalom gotovi delovi se podvrgavaju kaljenju.
- Čvrstoća i tvrdoća durala se ne povećava odmah posle kaljenja, kao što je slučaj kod čelika, već postepeno sa vremenom od nekoliko dana.

solu natrijuma i kalijuma na temperaturi oko 500° C, pa se zatim brzo hladi u vodi.

- Kaljenje se izvodi na taj način što se legura potapa u kadu sa zagrejanim rastvorom pri kaljenju se vrši u vodi na sobnoj temperaturi, a zatim se predmet pere u toploj vodi radi uklanjanja soli koje su jako korozivne, potom se odlaže u skladište gdje na vazduhu odpočinje proces "prirodnog starenja".

Proces starenja se može ubrzati ukoliko se predmet posle zagrijavanja hladi u vodi, a zatim suši u struji toplog vazduha-vještačko starenje. Ukoliko se odmah posle kaljenja dijelovi čuvaju na niskim temperaturama, proces starenja se naglo produžava ili se čak uopšte i ne pojavljuje, što se koristi za čuvanje legura namijenjenih plastičnoj obradi. Na slici 16. lijevo je prikazana legura Al_4Cu , a desno je prikazana legura aluminijuna starija od godinu dana.



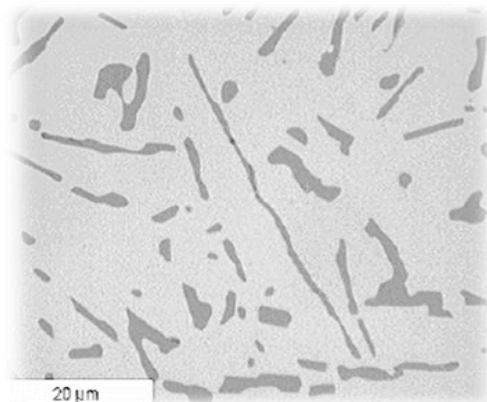
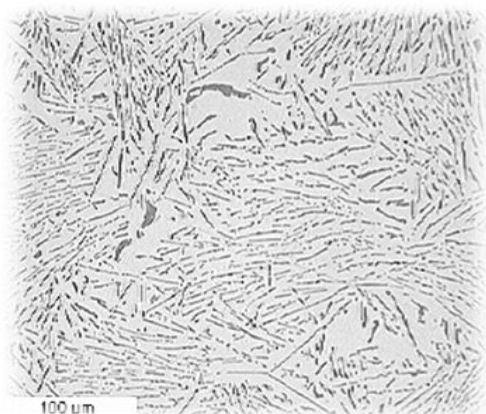
Slika br.16. Legura Al_4Cu , a desno je prikazana legura aluminijuna starija od godinu dana

Legure sa silicijem i magnezijem

Legirajući elementi u ovoj familiji su silicij (Si) i magnezij (Mg) koji tvore očvršćavajući spoj Mg_2Si a nose oznaku 6000. Posjeduju osrednje mehaničke vrijednosti. Izvanredno dobro se oblikuju. Dobro se zavaruju i posjeduju dobra antikorozivna svojstva. Legure se mogu podijeliti na dva dijela:

- a) bogatije na sadržaju silicija i magnezija uz dodatak mangana, hroma, cirkonija. Imaju bolja (veća) mehanička svojstva. Upotrebljavaju se u nosivim elementima.
- b) siromašnije u sadržaju silicija i magnezija, što im omogućuje velike brzine presanja i odličnu oblikovljivost uz nešto lošija mehanička svojstva. Ova familija ima široku primjenu kao na primjer za dekoracije, prozore, vrata, fasade, zavarene dijelove, cijevi, transportnu opremu, karoserije, za vagone vlakova i za metro jarbole i sl.

Na slici 17. je prikazana legura aluminijuma i silicijuma.



Slika br.17. Legura aluminijuma i silicijuma

Legure sa cinkom i magnezijem

Cink zajedno s magnezijem glavni je legirajući element ove familije čiji predstavnici kad im je još dodan bakar posjeduju najveću čvrstoću od svih Al-legura. Konstrukta li je njihov popularni naziv. Legure se dijele na dvije grupe ovisno od toga da li sadrže ili ne sadrže bakar

Postupci zavarivanja aluminijuma i aluminijumovih legura

Zavarivanje aluminijuma plinskim postupkom

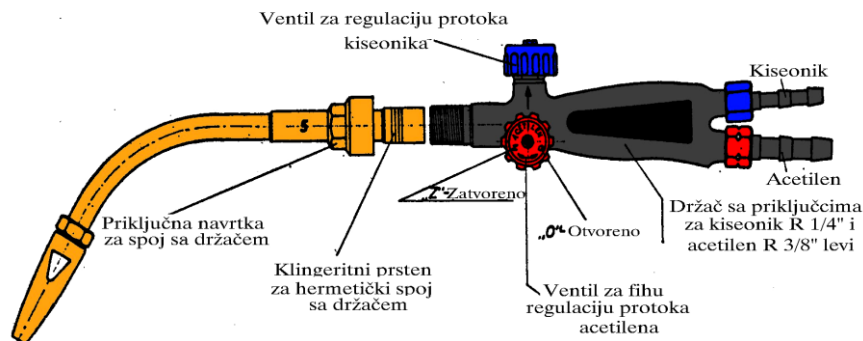
Aparaturu za plinsko zavarivanje čine boce za kiseonik i acilen, redukcioni ventili, dovodna crijeva, gorionik sa promenljivom mlaznicom i pomoćni alat prikazano na slici 18. Sottrand zavaruje prvi put plinskim plamenom O_2+H_2 . Kasnije se razvija plinsko zavarivanje kisik-acetilenskim ($O_2+C_2H_2$) plamenom, koje se od 1916. uspješno i široko primjenjuje u industriji. U gorionicima se dobijaju potrebne smješe kiseonika i acetilena, pri čemu se zahtjeva stabilan plamen određenog oblika i toplotne moći. Crijeva za dovod kiseonika su plava ili zelena dok su za dovod acitilena crvena.

Gorionici se prave od bakra i bakrenih legura, pošto imaju visoku toplotnu provodljivost a i slabije izgaraju na visokim temperaturama. Osnovni dijelovi gorionika prikazani su na slici 18.

Osnovni zahtjevi koje treba da ispuni gorivi gas da bi se koristio za zavarivanje su da temperatura plamena bude znatno viša od temperature topljenja osnovnog i dodatnog metala, da brzina sagorjevanja bude što veća, da se razvija dovoljna količina toplote za topljenje osnovnog i dodatnog metala, kao i za nadoknadu gubitaka toplote, i da hemijska reakcija plamena sa osnovnim i dodatnim materijalom bude što manja.



Slika br.18 Aparaturu za plinsko zavarivanje



Slika br.19. Gorionik

Za zavarivanje aluminijuma koristi se kao gas acitilen. Acetilen je gorivi gas bez boje, karakterističnog mirisa, neotrovan i rastvorljiv u vodi u odnosu 1:1 i u acetonu u odnosu 1:25, na sobnoj temperaturi i atmosferskom pritisku. Rastvorljivost acetilena u acetonu raste sa porastom pritiska, a opada sa porastom temperature. Acetilen je vrlo eksplozivan u prisustvu kiseonika ili vazduha. Acetilen se transportuje i čuva u čeličnim bocama pod pritiskom 15 bar, a u slučaju velike potrošnje racionalnije je koristiti razvijaače acetilena. Za dobijanje acetilena se koriste još i postupci pirolize ugljovodonika i delimičnog sagorevanja metana u kiseoniku. Boca za acetilen je obojena belo, ili ima bijelu traku na 2/3 visine. Acetilen u boci se rastvara u acetonu, jer je sam acetilen kao nezasićeni ugljovodonik vrlo eksplozivan na povišenom pritisku. Osim toga, boca se prethodno puni poroznom masom (najčešće drveni ćumur ili mješavina uglja i infuzorijske zemlje) u koju se uliva aceton, a zatim rastvara acetilen. Tako dobijena smjesa može da se podvrgne većem pritisku.

Kiseonik omogućava sagorjevanje gorivih gasova, a nalazi se u vazduhu (21% zapreminskog udjela). Na 15°C i atmosferskom pritisku gustina kiseonika iznosi 1,43 kg/m³, molarna masa 32 g/mol, a u tečno stanje prelazi na -183°C. U gasovitom stanju kiseonik nema boju i miris, nije zapaljiv i eksplozivan. Međutim, pošto u njegovom prisustvu neke materije postaju zapaljive, rukovanje kiseonikom mora da bude oprezno. Kiseonik se najčešće proizvodi frakcionom destilacijom tečnog vazduha. Tehnički kiseonik je čistoće 99,2 do 99,8%, a nečistoće su azot, argon i voda. Čistoća kiseonika je bitna za njegovo korišćenje. Kiseonik se prenosi i čuva u čeličnim bocama pod pritiskom 150-200 bar. Kiseonička boca je obojena plavo ili ima plava traku na 2/3 visine. Za zavarivanje aluminijuma i njegovih legura se koriste iste žice i šipke kao za TIG (*Tungsten Inert Gas*) postupak. Zbog velike toplotne provodljivosti aluminijuma zavarivanje dijelova debljih od 25mm je praktično neizvodljivo.

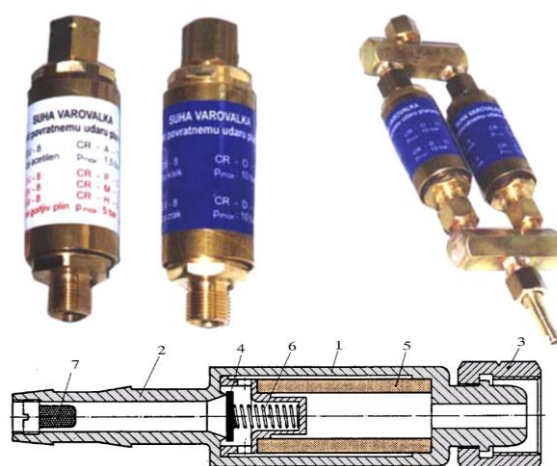
Kako je radni pritisak znatno niži od pritiska u boci, boce je neophodno snabdjeti redukcionim ventilima za kiseonik i za acetilen, slika 20. Oba redukciona ventila imaju po dva manometra, jedan za pritisak u boci, drugi za radni pritisak. Princip rada redukcionih ventila je isti, a jedina konstruktivna razlika je u načinu vezivanja za bocu. Kod kiseonika vezivanje je preko navrtke, a kod acetilena preko uzengije iz razloga što se tako isključuje mogućnost pogrešnog vezivanja. Osim toga, razlika je i u opsegu mjerenja - kod kiseonika manometri su do 300 bara (pritisak u boci), odnosno 16 bara (radni pritisak), a kod acetilena do 40 bara, odnosno 2,5 bara.

Posebnu pažnju treba obratiti na rukovanje redukcionim ventilom za kiseonik. Kako dodir kiseonika sa mašću, uljem ili nekom sličnom materijom može da izazove eksplozivno paljenje, zabranjeno je rukovanje redukcionim ventilom za kiseonik masnim ili prljavim rukavicama.



Slika br.20. Redukcioni ventil

Osim redukcionih ventila koriste se i tzv. suvi ventili, koji se postavljaju između redukcionih ventila i gorionika, slika 21. Princip rada suvog ventila je slijedeći: kroz gumeno crevo dotiče gas u cjevni nastavak (2) ventila i otvara nepovratni ventil (4), protiče kroz ventil u unutrašnjost poroznog uložka (5), zatim kroz njegov porozni zid u sredinu uložka, a otuda u nastavak (3) i u gorionik. U slučaju eksplozije povratni udar plamena stiže do komore između zida cjevi ventila (1) i uložka (5) i tu se gasi, jer se pri prolasku kroz porozni uložak ohladi ispod temperature paljenja mješavine gasova. Povećani pritisak od eksplozije gotovo trenutno zatvara nepovratni ventil.



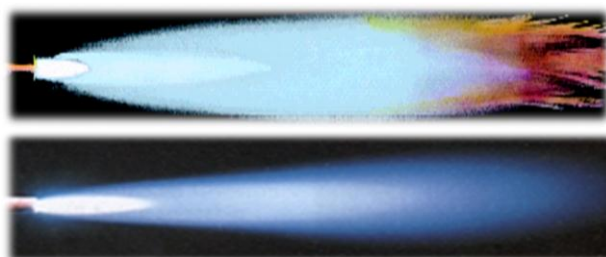
Slika br.21. Suvi ventili

U zavisnosti od kretanja gorionika i žice postoje dve tehnike gasnog zavarivanja: unapred i unazad u smislu međusobnog položaja žice i gorionika. Zavarivanje unapred je jednostavnije za rad, regulacija metalne kupke je lakša i dobijaju se lepi i glatki zavari, dok je kod zavarivanja unazad bolje iskorišćenje toplote i bolja zaštita metalne kupke.

Zavarivanje unapred je sporije, a utrošak acetilena sa povećanjem debljine znatno brže raste nego kod zavarivanja unazad. Ako se materijali veće debljine zavaruju tehnikom unapred teško se postiže jednoličan koren zavara obično se javljaju prokapljine, a takođe je povećana mogućnost pojave uključaka oksida.

Plinsko zavarivanje ($C_2H_2+O_2$) s reducirajućim plamenom - viškom acetilena, da plamen ne bude oksidirajući.

Kod redukujućeg plamena jezgro i omotač su veći, a oko jezgra postoji zona oblika pera što se vidi na slici 22 .



Slika br. 22. Reducirajući plamen

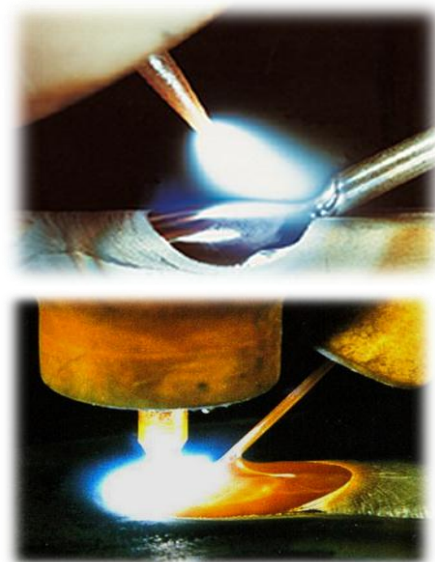
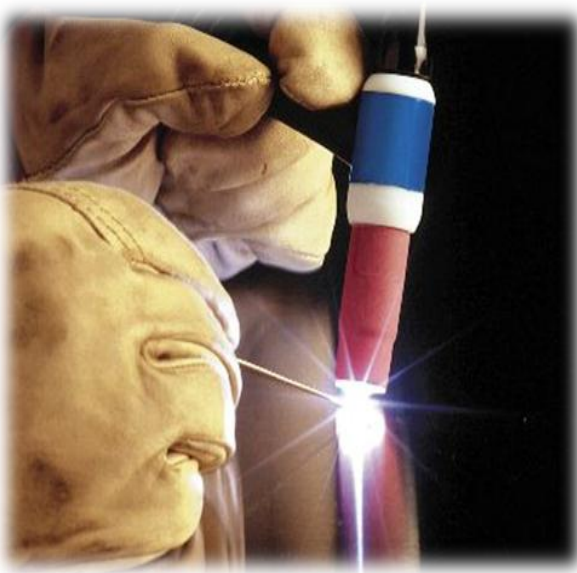
Da bi se oksidi odklonili za vrijeme zavarivanja potrebno je dodavati topitelje. Koriste se topitelji u obliku prašaka i paste (kloridi i fluoridi alkalnih metala) da se hemijski veže i odstrani Al oksid. Oni se hemijski vežu sa oksidima i isplivavaju na površinu vara, gdje se potom mehanički otklanjaju. Uloga topitelja je i da štiti žavar od uticaja atmosfere. Topitelji prašak ili žica mogu biti nanešeni na dodatnu žicu. Prašak se dodaje tako da se vrh žice zagreje, a potom u njega umače. Pasta se maže na površinu koja se treba zavariti. Ostatke topitelja nakon zavarivanja treba odstraniti jer uzrokuju koroziju. Postupak plinskog zavarivanja prikazan je na slici 23.



Slika br. 23. Postupak plinskog zavarivanja

Zavarivanje aluminijuma TIG postupkom

TIG je internacionalna skraćenica od *Tungsten Inert Gas*. Još su poznate skraćenice WIG i argonac, a sve se odnose na elektroručno zavarivanje netopljivom elektrodom pod zaštitom atmosferom inertnih plinova (argon-Evropa, helij-Amerika). Pred, a posebno poslije drugog svjetskog rata, počinje razvoj i primjena zavarivanja u zaštitnim plinovima TIG. Između netopive volframove elektrode (talište 3370°C) i komada koji se zavarujemo uspostavi se električni luk, koji tali mjesto spoja, a dodatni metal dodaje se ručno ili automatski sa strane u talinu što je prikazano na slici br. 24.



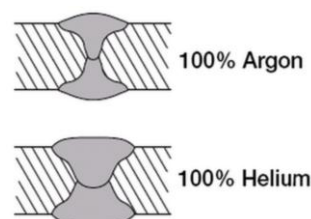
Slika br.24. Postupak Tig (Tungsten Inert Gas) zavarivanja dodavanje žice u talinu

Tig (*Tungsten Inert Gas*) ako se zavaruje jednosmjernom strujom, potreban je topitelj, dok se elektroda uključuje na minus pol, jel je tada dovođenje toplote najveće pa se omogućuju velike brzine rada uz mali prečnik elektrode. Na slici 25 je prikazan aparat za zavarivanje TIG postupkom sa njegovim osnovnim dijelovima pištoljem, crijevima, kliještima, kućištem aparata koje može biti sa vodenim ili vazdušnim hlađenjem. Hlađenje vodom je dosta bolje, a razlika u cijeni je veća u odnosu na vazdušno i do 100%.



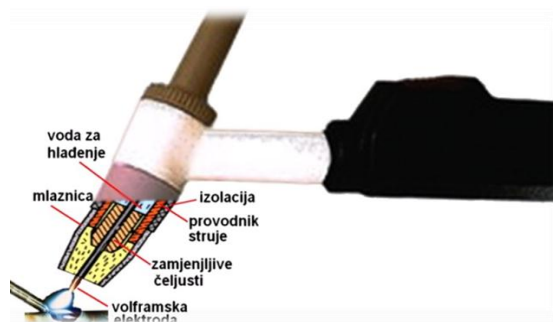
Slika br.25. Aparat za zavarivanje TIG postupkom

Argon, helijum, ili njihova mješavina za zavarivanje, kada se koriste za zaštitu pri zavarivanju aluminijuma treba da su minimalne čistoće 99,998 % za argon i 99,995 % za helijum, sa tačkom kapanja od -60 °C ili niže. Dubina provarivanja se razlikuje zavisno od gasa koji se koristi što je prikazano na slici 26.



Slika br.26. Dubina provara zavisno od zaštitnog gasa

Pištolj za zavarivanje treba da ima dovoljan strujni kapacitet da se ne bi pregrevao, a po pravilu se hladi, vazduhom ili vodom. Sastavni deo pištolja je mlaznica, čiji oblik bitno utiče na efikasnost zaštite. Mlaznica treba da ima takav oblik da isticanje zaštitnog gasa bude bez turbulencije, a da pri tome bude što udaljenija od mesta zavarivanja, da bi zavarivač imao bolji pregled. Na slici je prikazana drška za zavarivanje sa osnovnim dijelovima slika br.27.



Slika br.27. Drška za TIG zavarivanje

Crijeva za dovod zaštitnog gasa treba da budu od specijalnog plastičnog materijala ukoliko se koristi He, čiji su atomi toliko mali da kroz občno gumeno crevo difunduju u okolinu.

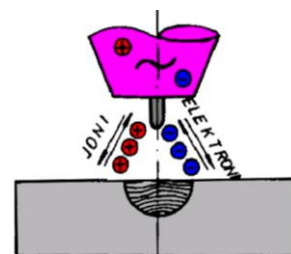
Oksidna opna na površini rastopine rastvora se bombarduje jonima argona. Opna se ne stvara ponovo, pošto se luk održava u atmosveri inertnog gasa. Oksidna opna se izdvaja iz šava zbog razlike specifične težine aluminija (2,7g./cm²) i oksidne opne (3,85g/cm²). Da se W elektroda ne grije, koristi se izmjenična struja, pa se efekt "čišćenja" oksida dešava, kada je zavar-radni komad negativan, a elektroda pozitivna. Za vrijeme druge poluperiode W elektroda se "hladi", kada je na minus polu. TIG se koristi za tanke limove i predmete do 6 mm, a takođe i kratke šavove kao i šavove složene konfiguracije

Da bi se obezbjedilo izdvajanje opne iz šava, zavarivanje sučeonih spojeva treba izvoditi sa izljebljenom pokretnom pločicom. Za ručno zavarivanje pokretna pločica nije potrebna pošto opna odlazi u spoljni dio opne korjena vara. Pri mehanizovanom i automatizovanom zavarivanju sučeonih spojeva,

ako se zahtjevaju šavovi sa potpunijim provarivanjem korijena zavarivanjem sa jedne strane, postavljanjem podkorenih pločica sa druge strane šava je obavezno. Inače dolazi do progorijevanja. Na pokretnoj pločici se izžlijebi kanal i u toku zavarivanja u dnu tog kanala taloži se oksidna opna.

Jačina kidanja zavarenog spoja legure AMg6, koji je izveden sa potkorenom pločicom bez kanala, jeste 22,1 kp/mm², a sa kanalom 31,7 kp/mm². Pokretna pločica se izrađuje bilo od bakra bilo od nerđajućeg čelika. Duboki kanali izazivaju pregrijavanje metala šava i pojavu oštih prelaza šava u osnovni materijal, što može da smanji jačinu zavarenog spoja. Pokretne pločice koje ostaju u spoju izrađuju se od materijala koji su po hemiskom sastavu slični osnovnom materijalu. I predhodno se pripoje za predmete koji se zavarivaju tačkasto. Prije zavarivanja vrši se nagrivanje ili samo ivice ili cijelog komada.

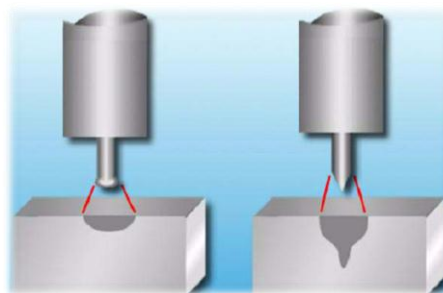
Kod zavarivanja aluminijuma TIG postupkom koristi se naizmjenična struja. Toplota pri zavarivanju se raspoređuje 2/3 na elektrodu, a 1/3 na osnovni materijal, što je neracionalno i daje nestabilan luk. Iako jednosmerna struja indirektno polarnosti, zahvaljujući kretanju elektrona od osnovnog materijala ka elektrodi, proizvodi efekt površinskog čišćenja teško otopljivih oksida aluminijuma slika br.28.



Slika br.28.Efekat površinskog čišćenja

Nedostatak je i tzv. nesimetrija struje, usled poremećaja njene vremenske sinusoide. Radi se o različitim sposobnostima aluminijuma i volframa da emituju elektrone, usled čega se povećava negativna poluperioda na račun pozitivne, jer se više elektrona emituje sa volframove elektrode kada je ona na (-) polu. Prva posledica ove nesimetrije je skoro jednosmerno dejstvo električnog luka, što uslovljava prekomjerno zagrijavanje zavarivačkog transformatora, a druga posledica je značajno smanjenje efekta katodnog čišćenja. Da bi se ovo sprečilo, u strujno kolo se uvodi kondenzatorska baterija, vezana redno sa lukom, koja ima zadatak da povećava pozitivne polu-periode, tj. da uspostavlja simetriju talasa struje. Time se ujedno i povećava efekt katodnog čišćenja što omogućava primjenu naizmjenične struje za zavarivanje aluminijuma i njegovih legura. Stoga su noviji transformatori za TIG postupak po pravilu snabdeveni i VF generatorom i kondenzatorskom baterijom.

Oblik vrha elektrode bitno utiče na stabilnost luka i dubinu uvarivanja. Postoje dva osnovna oblika vrha elektrode: konusni i sferni. U prvom slučaju gustina struje je znatno veća, pa je strujni luk koncentrisan, sl.29. U drugom slučaju jačina struje je mala, luk nije koncentrisan, pa se dobija znatno manja dubina uvarivanja, a veća širina šava. Konusni oblik se koristi sa jednosmjernu struju, a sferni sa naizmjeničnom strujom koja se koristi za zavarivanje aluminijuma.



Slika br. 29. Zavisnost uvara od vrha elektrode

Šipke za zavarivanje aluminijuma i aluminijumskih legura moraju da budu obojene na jednom kraju, sa čela, jednom ili dvjema bojama, tab. 3. Primjena žica i šipki za zavarivanje aluminijuma i aluminijumskih legura je takođe data u tab.br.3.

oznaka	boja	sastav - standard	primena (osnovni materijal)
S.Al99,8	plava-smeđa	JUS C.C2.100	Al99,8; Al99,7
S.Al99,5	plava	JUS C.C2.100	Al99,5; Al99; AlMn1
S.AlMn1	ljubičasta	JUS C.C2.100	AlMn1
S.AlMg3	zelena	JUS C.C2.100	AlMg2; AlMg3; AlMg5
S.AlMg5	zelena-smeđa	JUS C.C2.100	AlMg3; AlMg5
S.AlSi12	smeđa	JUS C.C2.100	Al-Si legure sa Si>8%

Tabela br.3. *Primjena žica i šipki za zavarivanje aluminijuma*

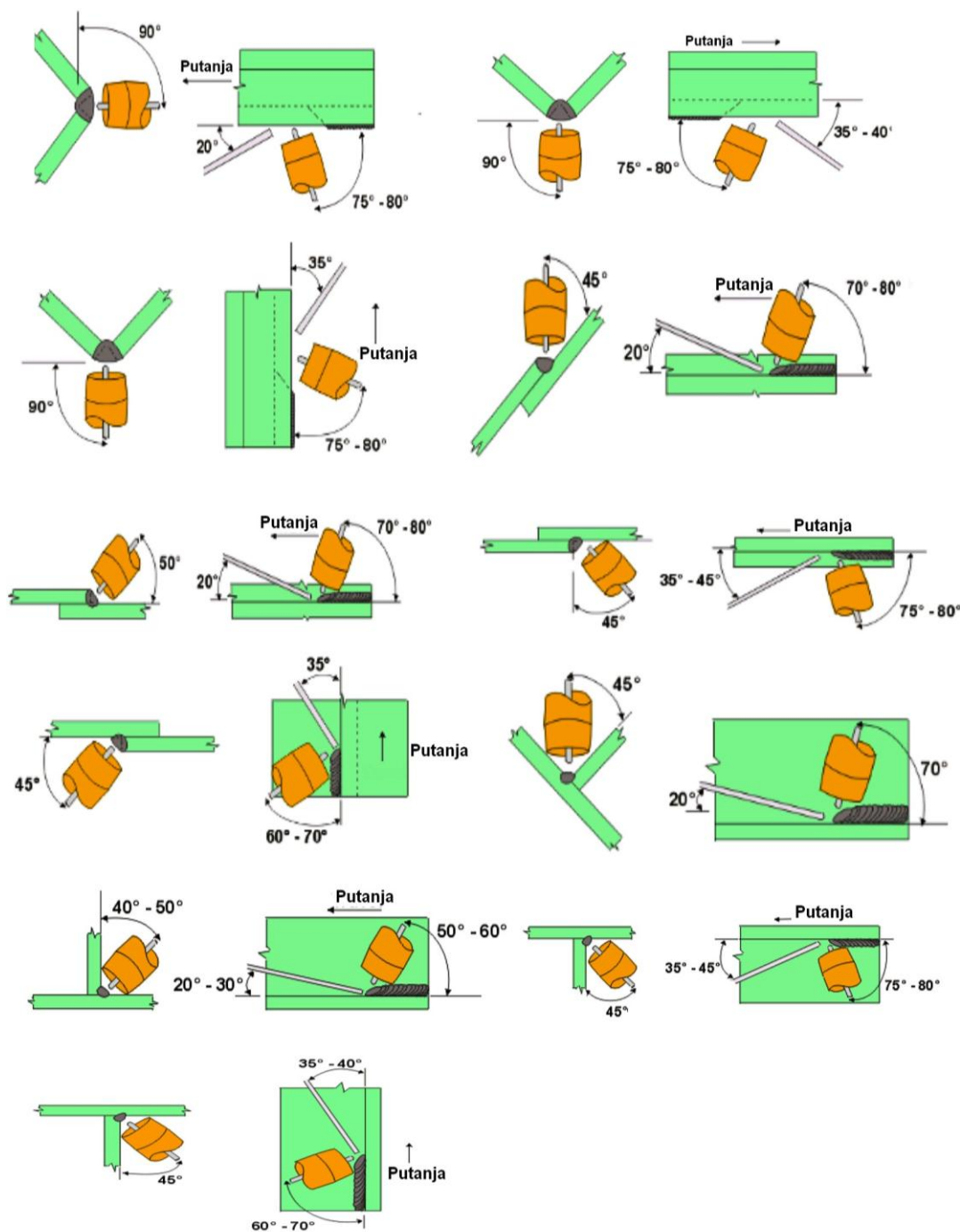
Prednosti ovog načina zavarivanja su sledeće:

- Vrhunski kvalitet spoja
- Nema rasprskavanja - dodatni metal se topi u metalnoj kupki, ne prenosi se kroz luk
- Moguća primena i bez dodatnog metala
- Odlična kontrola (oblika) korena
- Precizna kontrola parametara zavarivanja
- Primenljiv na veliki broj osnovnih metala
- Dobra kontrola izvora toplote i načina uvođenja dodatnog metala
- Nema troske
- Bilo koji položaj zavarivanja

Mane:

- Relativno mala toplotna moć i produktivnost
- Zahteva se posebna obučenosť zavarivača
- Teškoće u zaštiti zavarenog spoja pri zavarivanju na otvorenom

Tig (*Tungsten Inert Gas*) je moguće zavarivati u svim pozicijama na narednoj slici br.30. date su pozicije zavarivanja kao i ugao držanja žice i pištolja .



Slika br.30. Pozicije zavarivanja kao i ugao držanja žice i pištolja kod TIG postupka

Ako predmet u procesu čišćenja osam do deset sati nije očišćenj, ivice moraju da se očiste odmaštenim čeličnim četkama. U procesu transporta i montiranja očišćeni predmeti predviđeni za zavarivanje ne smiju da se isprljaju. Preporučuje se da se ove operacije izvode čistim rukavicama. Za zavarivanje legura aluminijuma i magnezijuma preporučuje se čisti argon prve vrste sa sadržajem azota ne preko 5%, i kiseonika ne preko 0,005%, vlažnost argona ne sme da bude veća od odgovarajuće tačke rosenja na -40°C . Elektroda treba da bude od čistog volframa. Helijum ili mešavina Ar+He ($< 75\%$) –

aluminijum. U narednoj tabeli dati su opšti podaci za izbor jačine struje, debljine elektrode i inertnog gasa kod TIG zavarivanja tabela br.4.

Materijal mm	Volframska Elektroda mm	Visokofrekventna naizmjenična struja sa IS komponentom		Izbalansirana naizmjenična struja			
				Helijum		Argon	
		Struja A	Argon m³/h	Struja A	Helijum m³/h	Struja A	Argon m³/h
1,6	1,0	40 - 75	0,28 – 0,24	20 – 60	0,28 – 0,24	do 85	0,28 – 0,42
2,4	1,6	75 - 125	0,41 – 0,51	30 – 100	0,31 – 0,42	60 – 130	0,41 – 0,51
	2,4						
3,25	2,4	100 - 170	0,42- 0,51	60 – 175	0,42 – 0,57	80 – 200	0,42 – 0,51
4,8	3,25	125 - 225	0,42 – 0,57	80 – 240	0,51 – 0,71	110 – 300	0,42 – 0,57
	3,25						
6,3	4,8	200 - 300	0,42 – 0,71	–	0,68 – 0,85	200 - 410	0,42 – 0,71
	4,8						

Tabela br.4. Izbor jačine struje, debljine elektrode i inertnog gasa kod TIG zavarivanja

Međusobna zavisnost prečnika elektrode, jačine i vrste struje, i vrste elektrode može da se utvrdi na osnovu podataka iz tab 5.

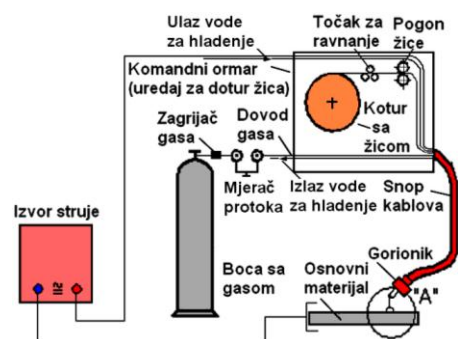
Debljina komada (mm)	Broj prolaza	Prečnik žice (mm)	Protok argona (l/min)	Jačina struje (A)			Temperatura predgrevanja (°C)
				Horizont.	Vertikal.	Nadglavno	
1	1	2	7	60	50	40	-
2	1	2 do 3	7	80	80	75	-
3	1	3	8	140	135	130	-
4	1 do 2	3 do 4	9	180	170	160	-
6	2	3 do 4	10	280	240	230	-
8	2	4 do 5	12	320	270	260	150
10	2-3	5	14	360	280	270	200
12	3	6	16	420	330	280	200
15	5	6	16	450	-	-	250
20	7	6 do 8	20-25	450	-	-	350
30	9	8	20÷25	450	-	-	350

Tabela br.5. Zavisnost prečnika elektrode, jačine i vrste struje, i vrste elektrode

Zavarivanje aluminijuma MIG postupkom

MIG (Metal inert gas – metalna topiva elektroda, IG – inertni gas). MIG zavarivanje se počinje primjenjivati 1948. kao Sigma postupak (Shielded Intert Gas Metal Arc), a 1953. u bivšem SSSR se prvi puta primjenjuje MAG postupak s CO₂ zaštitnim aktivnim plinom. Postupak je elektrolučni postupak zavarivanja, kod kojeg se električni luk uspostavlja između dodatnog materijala žice, koja se kontinuirano dovodi i topi i osnovnog materijala, u zaštiti inertnog gasa. Luk se uspostavlja između vrha elektrode žice. Pri tome se žica topi i prelazi u vidu sitnih kapi u zavarivačku kupku. Zavarivanje aluminijuma MIG postupkom moguće je samo na plus polu gdje se električni luk stvara na žici koja se topi. Kvalitet i izgled šava u velikoj mjeri zavisi od zaštitnog plina.

Kao zaštni inertni gas upotrebljava se argon ili helij koji mora biti velike čistoće inače ako se koristi plin manje čistoće šav je nekvalitetan i lošeg izgleda. Ovaj postupak zavarivanja aluminijuma koristi se za deblje materijale od 5 - 6 mm i više. Kao dodatni material služi gola žica koja se odmotava preko reduktora i pogonskih točkova sa bubnja te prolazi kroz fleksibilnu cijev u pištolj. Dotok žice je automatizovan, a time i ujednačen, dok je izvor struje standardni generator jednosmjerne struje. Vršni se strujom velike jačine što obezbjeđuje veliki uvar. Šematski prikaz uređaja za zavarivanje dat je na slici br.31.



Slici br.31.Šematski prikaz uređaja za MIG postupak

Zavarivanje počinje kad se pritisne okidač, a time se otvara i dovod gasa i dotok žice, potom se elektroda, koja se nalazi izvan mlaznice za 12 do 15 mm dotakne sa komadom, koji se zavaruje, pa kada se uspostavi luk istog momenta se uključuje u rad motor za dotok žice. Pištolj se tada postavlja u smjeru zavarivanja. Zavarivanje prestaje kada se kontakt prekine čime se obustavlja dotok struje, a istovremeno se obustavlja dotok žice i dotok gasa. Oprema za MIG postupak data je na slici 32.



Slika br.32 Oprema za MIG postupak zavarivanja

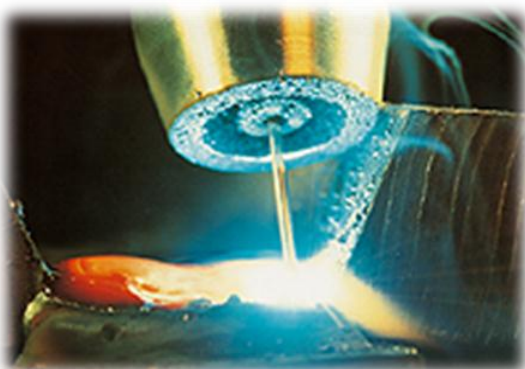
Pištolj se sastoji od kontaktne vodice, mlaznice za zaštitni gas i elemenata za fiksiranje slika 33. Tokom rada, temperatura može da dostigne 700°C (čak i pri kratkotrajnom zavarivanju), usled čega se na gasnoj mlaznici lijepi troska.



Slika br. 33 Izgled pištolja i mlaznice

Da bi se to sprečilo, posebno kod većih jačina struje, koriste se pištolji hlađeni vodom. Pri tome treba voditi računa o sledećem

- Gasovi bogati Ar termički više opterećuju pištolj u odnosu na CO₂
- Prečnik kontaktne vodice da bude veći za 0,2 mm (za čelik), tj. 0,5 mm (za Al) od prečnika žice.
- Kontaktne vodice treba da budu od E-Cu, CuCr ili CuCrZr. Zamjena kontaktne vodice zbog habanja pri zameni kotura žice (≈15 kg) se smatra normalnim. Izbor materijala kontaktne vodice zavisi od primene - E-Cu ima najbolju elektroprovodnost, ali se brzo habaju, dok je situacija obrnuta kod pomenutih legura. Treba imati u vidu da je trošak zamene kontaktne vodice zanemarljiv u odnosu na zastoj u radu robotizovanog MIG/MAG postupka.
- Ako treba smanjiti trenje između kontaktne vodice i žice da bi se obezbjedili nesmetano klizanje, odnosno dotur žice, preporučuje se korišćenje teflonskog umetka.
- Dužina paketa creva (kablovi za struju, gas i rashladnu vodu) treba da bude što manja.



Slika br.34. *Mlaznica*

Na slici 34. je prikazana mlaznica. Površina žice treba da bude bezprjekorno glatka kako bi lako prolazila kroz aparaturu. Utvrđeno je da površinsko stanje žice glatkoća i čistoća utiču na poroznost šava. Razmak između šobe i predmeta koji se zavaruje treba da bude između 5 i 7 mm. Veći razmak umanjuje uvarivanje povećava prskanje materijala i otežava tok zavarivanja.

Smjer vođenja može bit u lijevo ili desno. Smjer u lijevo ima prednosti sto je dobra vidljiva linija zavarivanja, nedotatak je što se ruka zavarivača nalazi iznad zavora, var kod smjera na lijevo je manje čišci zato što dolazi do zaklanjanja plina.

Smjer u desno održava duži luk, i teže je provarit. Izgled zavora je ljepši zbog ljepšeg strujanja plina što je prikazano na slici 35. Kada se vrši zavarivanje automatski slika 35. dobiva se ljepši oblik šava ali je ovakvo zavarivanje ograničeno.



Slika br.35. *Zavar u zavisnosti od smjera vođenja pištolja*

Prednosti ovog postupka su u odnosu na druge sledeće zaštitni gas prekriva zonu zavarivanja i štiti je od ponovne pojave oksida. Razarajući efekat električnog luka zasniva se na jakoj emisiji elektrona katodne strane radnog predmeta. Mlaz elektrona odkida sa površine na kojoj je vezan oksidni sloj čestice metala i iza sebe ostavlja metalno metalno čistu površinu zavarivanja.



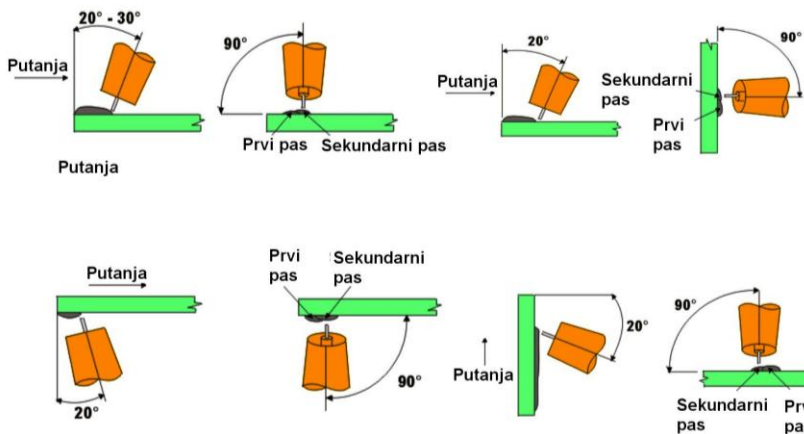
Slika br.35. Zavar na atomatu

Iz istog razloga radno mjesto mora biti zaštićeno od promaje (vjetra) pa i najmanjeg intežiteta. MIG postupak odlikuje se velikom moći taljenja žice i osnovnog materijala, dubokim uvaravanjem i velikom brzinom zavarivanja, neznatnim gubitcima u vrijeme zavarivanja, otpada zamjena elektrode, skidanje troske itd./dobrom preglednošću kupke, neznatnim razvijanjem dimnih plinova, neznatnim preskakanjem materijala, što površinu čini ravnom i čistom. Preporuke za zavarivanje aluminijuma MIG postupkom ručno, automatski i poluautomatski date su u tabeli br.6.

Zavarivanje	Debljina materijala u mm	Broj varova	Prečnik elektrode u mm	Jačina struje (A)	Brzina zavarivanja (m/h)	Prečnik dodatne žice (mm)	Brzina dovođenja žice (m/min)	Potrošnja argona (lit./min)
Mehanizovano bez dodatnog materijala	1,2	2	3 – 4	130 – 150	36	-	-	8 – 10
	2	1	4 – 5	220 – 240	36	-	-	10 – 12
	2,5	1	4 – 5	230 – 250	30	-	-	10 – 12
	3	1	4 – 5	260 – 280	30	-	-	10 – 12
Mehanizovano bez dodatnog materijala	1,2	1	4 – 5	210 – 220	22	2	1,2 – 1,4	10 – 12
	2	1	4 – 5	230 – 260	20	2	1,3 – 1,5	10 – 12
	2,5	1	4 – 5	260 – 280	17	2	1,4 – 1,6	10 – 12
	3	1	5 – 6	290 – 310	14	2	1,6-1,7	10 – 12
Ručno	2	1	3 – 4	100 – 120	-	-	-	10 – 12
	12	3 – 4	5 – 6	300 – 350	-	-	-	12 – 15

Tabela br.6. Preporuke za zavarivanje aluminijuma MIG postupkom

Položaj šobe pištolja za zavarivanje moguć je u svim pozicijama, a njegov izgled dat ja na slici br.17.



Slika br.36. Položaj šobe pištolja za zavarivanje MIG postupkom

Preporučeni dodatni materijali za gasno, MIG i TIG zavarivanje Al i Al-legura (homogeni i heterogeni spojevi) tabela 7.

OM 1



Al 99,5	Al 99,5																			
	99,8 Ti																			
	99,5																			
Al 99,5	Al 99,5		Al 99,5																	
	99,8 Ti		Al 99,5																	
	99,5																			
Al Mn 1			Al 99,5		Al99,5	AlMn1														
					Al Mn1															
Al Mg 1			Al 99,5 Al Mg 1		Al 99,5 AlMn 1	AlMg 1	AlSi 1	AlMg 3 AlMg 1												
							Al Mg 1													
Al Mg 3			AlSi 5	AlMg 3	AlSi 5	AlMg 3	AlSi 5	AlMg 3	Al Mg 3											
Al Mg 4			Al Mg 4		Al Mg4		Al Mg 4		Al Mg 4		Al Mg 4									
									Al Mg 3											
Al Mg 5			Al Mg 5		Al Mg5		Al Mg 5		Al Mg5		Al Mg 5		Al Mg 5							
							Al Mg3		Al Mg4	Al Mg 4										
							Al Si 5		Al Mg5	Al Mg 5										
AlMgSi			Al Si 5	Al Ng 5	Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5	Al Mg 5		Al Mg 5	Al Si 5	Al Mg5					
							Al Mg1													
													Al Mg 1							
AlSi1Mg			Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5	Al Mg 5		Al Mg 5		Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5		
AlZn5Mg			Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5	Al Mg5		Al Mg 5		Al Si 5		Al Si 5	Al Mg5	Al Si 5	Al Mg5	Al Mg5	AlMg4Zn2
																			Al Mg4Zn2	
OM 2 →	Al 99,8		Al 99,5		Al Mn 1		Al Mg1		Al Mg 3		Al Mg 4		Al Mg 5		Al Mg Si		Al Si Mg		Al Zn 5Mg	

Olakšano zavarivanje	Optimalne meh. karakteristike	- Preporučeni dodatni materijal za opštu upotrebu je podvučen; - Prazna rubrika znači retku upotrebu ili zahtev za posebno proučavanje
dobra hemijska otpornost	Ista boja posle anodacije	Za gasno zavarivanje: - AlMg4 umesto AlMg3 ili AlMg5 umesto AlMg4. - Za zavarivanje AlSi1Mg kada je predviđena termička obrada posle zavarivanja, sme da se odabere samo AlSiMg kao DM.

Tabela br. 7. *Preporučeni dodatni materijali za gasno, MIG i TIG zavarivanje Al i Al-legura.*

Ručno elektrolučno zavarivanje aluminijuma

Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom koristi toplotu električnog luka za topljenje osnovnog i dodatnog metala, čijim očvršćavanjem nastaje zavareni spoj. Električni luk se uspostavlja i održava između osnovnog i dodatnog metala, tj. elektrode, i zajedno sa njima čini strujno kolo, u kome još postoji izvor struje, kablovi i držač elektroda. Zavarivanje počinje kada se električni luk uspostavi između vrha elektrode i osnovnog metala. Kako je električni luk intenzivan izvor toplote (temperatura u centru luka je oko 5000°C), to topljenje osnovnog i dodatnog metala počinje gotovo istovremeno sa uspostavljanjem luka. Dejstvom toplote električnog luka tope se ivice osnovnog metala i vrh elektrode, na kome se obrazuju kapljice koje se velikom brzinom prenose u metalnu kupku.

Ručno elektrolučno zavarivanje se najviše koristilo od 1910. god. do poslije drugog svjetskog rata. Oscar Kjellberg (Švedska) prvi patentira i primjenjuje obloženu elektrodu. Obložena se elektroda proizvodila uranjanjem gole žice u otopinu minerala, a od 1936. g. obloga se nanosi ekstrudiranjem. Bazične elektrode su se počele proizvoditi 1940. g. na slici 37 dat je šematski prikaz jednog elektro aparata. Pri elektrolučnom ručnom zavarivanju obloženim elektrodama i EPP zavarivanju rastopljenu kupku od okoline atmosfere štiti topitelj od hlorida i fluorida bazičnih i bazično-zemnih metala, koji se pod dejstvom luka rastapaju i energetično reaguju sa oksidom aluminijuma, obrazujući složena jedinjenja koja prelaze u trosku.

Primjenjivani topitelji uglanom, na sobnoj temperaturi, izazivaju koroziju pa zbog toga njihove ostatke treba temeljno odstraniti, trljajući onečišćene dionice četkama u struji vrele vode ili pare. Prednost ovog postupka kod zavarivanja aluminijuma i aluminijumovih legura je ta što ivice ne moraju da budu tačno obrađene.

Elektrode su oploštene a plašt ima svrhu da odklanja oksid, stabilizuje luk i sprečava oksidaciju za vrijeme hlađenja. zavarivanje se najbolje izvodi jednoslojno dok je višeslojno zavarivanje otežano.



Slika br.37. Elektro aparat

Proces zavarivanja metala pozitivnim jonima tj. "katodno raspršivanje" jasno se može vidjeti isred rastopa, i u obliku svijetlih traka sa strane šava. Pošto je djelovanje čišćenja električnim lukom ograničeno dubinom njegovog prodiranja u metal koji se zavaruje, neophodno je da konstrukcija žlijeba i tehnologija i režim zavarivanja obrzbi jedne što dublju penetraciju luka u zavarivane dijelove. Dubina penetracije luka se reguliše jačinom struje zavarivanja.

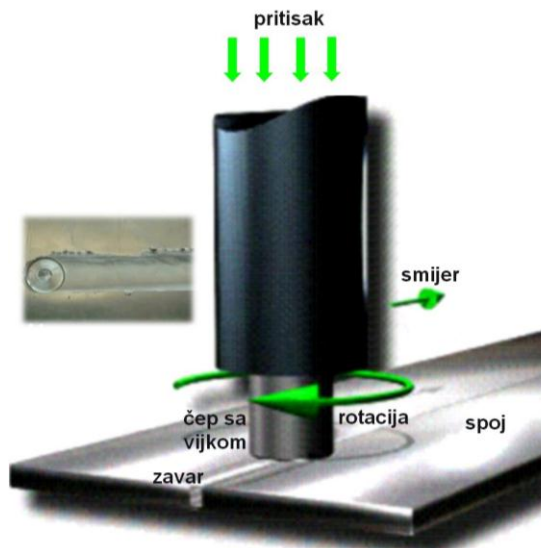
Kao glavni uzrok poroznosti metala u šavu je vodonik, a osnovni izvor vodonika je vlaga apsorbovana u oblozi elektrode, pa je potrebno obavezno izvršiti sušenje elektrode na temperaturi koju propisuje proizvođač elektrode.

Hladno zavarivanje aluminijuma

Hladno zavarivanje je veoma efikasno za sučeono zavarivanje debelih presjeka. Pritiskom se ostvaruju velike sile na sučeljenim površinama, javljaju se velike trajne deformacije, oksidna kožica puca i čisti Al materijal se spaja, jer atomi dolaze na dovoljnu međusobnu udaljenost djelovanja međuatomskih kohezionih sila.

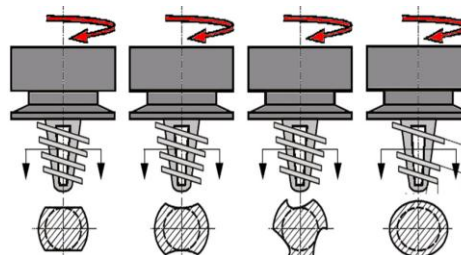
Zavarivanje trenjem sa mešanjem ("FSW" friction stir welding - pomicanje, mješanje zavarivanje trenjem) je specifičan postupak frikcionog zavarivanja koji se koristi za spajanje limova. Pronalazak ovog postupka omogućio je zavarivanje trenjem limova većih debljina, od različitih materijala, u svim mogućim međusobnim položajima i u svim oblicima zavarenog spoja.

Zavarivanjem trenjem dobivaju se zavari bez greške na limovima kod stalnog kretanja alata od 1600 °/min i kod brzine 200mm/min što je prikazano na slici br.38.



Slika br.38. Zavarivanjem trenjem

Generisanje toplote kod "FSW" je analogno običnom zavarivanju trenjem. Zavarivanje pločastih elemenata, međutim, ovde je rešeno tako što se potrebna toplota ne oslobađa trenjem direktno između kontaktnih površina zavarivanih delova, već se to čini posredno, pomoću specijalnog alata prikazanog na slici br.39.



Slika br.39. Specijalni alati za zavarivanje trenjem

Takav pristup obezbeđuje korišćenje toplote koja se oslobađa trenjem i vrši zavarivanje "FSW" ima izuzetne karakteristike: rad je jednostavan i lako može da se automatizuje, energetski je ubedljivo najefikasniji, ekološki je apsolutno čist, zavareni spojevi imaju vrlo visok kvalitet, itd.

Izuzetno dobre odlike "FSW" i intenzivna eksperimentalna istraživanja dovela su do vrlo dinamičnog širenja industrijske primene ove tehnologije. Ona se koristi u brodogradnji, u avio industriji, u proizvodnji železničkih vozila, automobilske industriji, u građevinarstvu, itd.

Elektrootporno zavarivanje aluminijuma

Osnovni postupci elektrootpornog zavarivanja su:

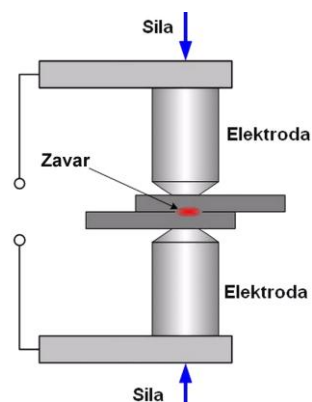
- **tačkasto**, kod koga spojevi nastaju u pojedinim tačkama preklapljenih delova,
- **šavno**, kod koga spoj nastaje preklapanjem niza zavarenih tačaka,

- **bradavičasto**, kod koga spoj nastaje u pojedinim tačkama preklopljenih delova, koje su pre zavarivanja oblikovane kao bradavice,
- **zbijanjem**, kod koga spoj nastaje stalnim pritiskom na dve sučeeone površine,
- **varničenjem**, kod koga spoj nastaje varničenjem između dve sučeeone površine.

Elektrotopno zavarivanje je našlo široku primenu u industriji, posebno automobilskoj, za spajanje tankih čeličnih limova. Osnovne prednosti elektrotopnog zavarivanja su velika proizvodnost i mogućnost automatizacije i robotizacije, a osnovne mane su ograničenja vezana za geometriju delova koji se zavaruju, i nemogućnost postizanja hermetičnosti spoja kod tačkastog zavarivanja.

Elektrotopno tačkasto zavarivanje aluminijuma je postupak spajanja metala kombinovanim dejstvom toplote, dobijene električnim otporom u zatvorenom strujnom kolu između dva pritisnuta elektrodama oblika šipke, i sile pritiska F , sl. 40. Zavarivanje se izvodi na preklop tako da struja protiče kroz dviju elektroda kroz preklopljene limove, koji se na međusobnom mjestu dodira usljed velikog otpora zagrijavaju pa se, pošto prestane djelovanje struje, pritiskom elektroda spoje u oblik tačke (slika). Pri tome nastaje spoj (zavarena tačka). Zbog dobre vodljivosti električne struje i toplote treba provoditi s velikim jačinama struje (do 100 kA) i kratkim vremenima (napr. 4 -15 perioda izmjenicne struje 50 Hz) za tačkasto zavarivanje.

Tačkasto zavarivanje Primjenjuju se više od svih elektrotopnih zavarivanja, i to za tanke i srednje debele limove. Teškoće se mogu očekivati zbog prisutnog sloja Al-oksida, koji djeluju kao izolator, posebno, ako je deblji.



Slika br.40. Tačkasto zavarivanje aluminijuma

Ponašanje aluminijumskih legura pri elektrotopnom zavarivanju uslovljeno je :

- Izrazitim padom čvrstoće pri zagrevanju hladno deformisanih i termički obrađenih legura u zoni zavarivanja. Da bi ova zona bila što manja, treba primenjivati što oštrije režime.
- Visokom električnom i toplotnom provodnošću, usled čega moraju da se primenjuju velike jačine struje.
- Širokim temperaturni intervalom kristalizacije (90-135°C) legure aluminijuma visoke čvrstoće, i stoga izraženom sklonošću ka obrazovanju toplih prslina, pa treba primenjivati velike sile pritiska pri kristalizaciji.
- Skoro dva puta većim koeficijentom toplotnog širenja nego kod niskougleničnih čelika, što izaziva velike termičke deformacije.

U principu je moguće spajati raznorodne legure aluminijuma, ali je daleko lakše zavarivati legure sa međusobno bliskim tačkama topljenja, tabela br.8. gdje je d - dobro, m - moguće, l - loše.

Legura	Toplotna provodljivost (% od Cu)	AlMn	AlMg	AlCu	Platirani Al	
AlMn	45	d	m	m	l	
AlMg	40	m	d	m	m	
AlCu	35	l	m	d	d	
Platirani Al	35	l	m	d	d	

Tabela br.8. Mogućnost zavarivanja raznorodnih legura aluminijuma

Podaci o parametrima zavarivanja legure AlMg su dati u tab. 9. Parametri zavarivanja ostalih legura aluminijuma (AlMg, AlCu, platirani aluminijum) imaju slične vrijednosti.

Debljina lima (mm)	Sila pritiska (kN)	Jačina struje (kA)	Vrijeme zavarivanja (s)	Dimenzije elektrode		Prečnik sočiva d_l (mm)
				D_{min} (mm)	R (mm)	
0,5	1,8	21-26	0,04	16	75	3,5
0,75	2,2	25-31	0,05	16	75	4,5
1,0	3,0	27-34	0,06	16	75	5,0
1,5	4,0	31-39	0,10	20	100	6,0
2,0	5,0	35-44	0,12	20	100	7,0
2,5	6,5	38-50	0,14	20	100	8,0
3,0	8,0	40-52	0,16	25	100	8,5

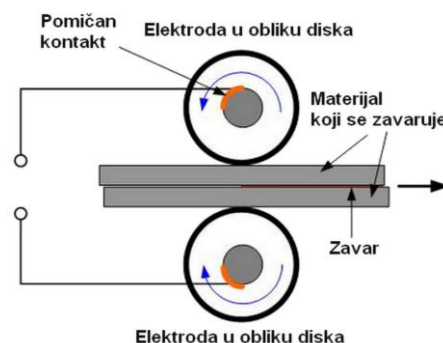
Tabela br.9. Elektrootpornotačkasto zavarivanje legure AlMg

Elektrootporno šavno zavarivanje je postupak spajanja metala kombinovanim dejstvom toplote, dobijene električnim otporom između dva lima pritisnuta elektrodama oblika diska, i sile pritiska, slika br.41. Pri tome nastaje spoj (šav), koji može da se shvati kao niz tačaka, po pravilu djelimično prekrivenih, koje obrazuju neprekidan šav. Za dobijanje neprekidnog i nepropusnog šava korak tačaka (rastojanje između centara dve susedne tačke) treba da bude $a > 0,5 \cdot d_m$. Bitna razlika šavnog zavarivanja u odnosu na tačkasto zavarivanje je oblik elektrode tj. disk umesto šipke i njeno obrtanje oko sopstvene ose. Osim toga, kod šavnog zavarivanja je neophodno relativno kretanje elektroda i osnovnog materijala u pravcu obrazovanja šava, šavno zavarivanje može da se izvodi dvostrano ili jednostano. Šavno zavarivanje aluminijumske legure debljine do 1,5-2 mm moguće je zavarivati diskontinualno ($t_{zv}/t=0,3$), naizmjeničnom strujom. Zbog potrebne velike struje za zavarivanje su potrebne mašine velike snage (250-350 KVA). Zbog koncentracije struje i smanjenja pregrevanja primenjuju se elektrode sa sferičnom površinom pri $R=40-150$ mm. Parametri šavnog zavarivanja Al legura su dati u tab. 10.

Debljina (mm)	Jačina struje (kA)	Vreme (s)		Sila pritiska (kN)	Radius sfere elektroda (mm)	Brzina zavarivanja (m/min)
		Impulsi	Pauze			
0.5	21	0.02-0.03	0.06-0.08	2,5	40	48-72
1.0	29	0.04-0.06	0.06-0.10	3,5	50	48-72
1.5	38	0.06-0.10	0.10-0.14	5,0	100	48-72

Tabela 10. Parametri diskontinualnog zavarivanja nekih Al legura

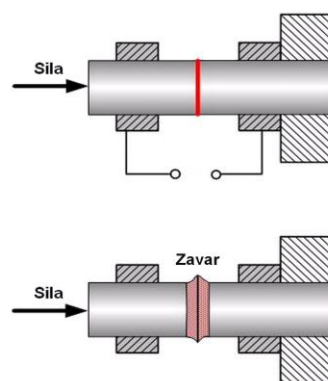
Vrlo je važna dobra priprema površina. Neophodna sila na elektrodama pri zavarivanju aluminijumskih legura raste s povećanjem čvrstoće legura. Brzina zavarivanja je obično manja nego pri zavarivanju čelika zbog veće potrebne snage. U okolnoj zoni se uočava pad čvrstoće što snižava koeficijent čvrstoće šava utoliko više ukoliko je polazna čvrstoća legure veća.



Slika br.41. Elektrootporno šavno zavarivanje

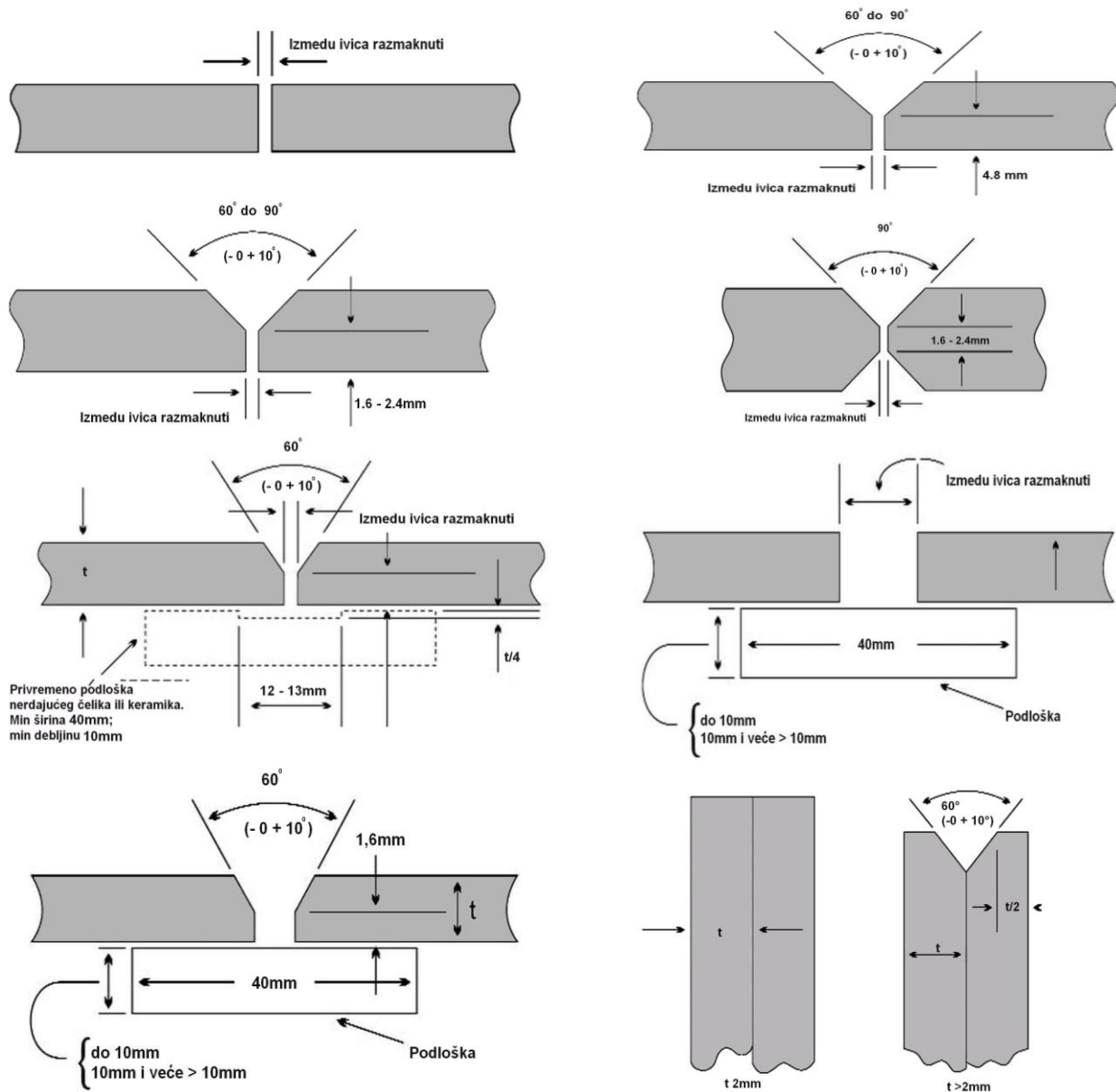
Elektrootpornom zavarivanju zbijanjem pri sučenom elektrootpornom zavarivanju zbijanjem delovi koji se zavaruju stežu se u čeljusti mašine tako da im se čeone površine priljube, sl.42. Uključivanjem struje, usled kontaktnog otpora, osnovni materijal se zagreva na mestima dodira do temperature koja je dovoljno visoka da se uz dodatni pritisak podužnom silom F ostvari spoj, sl., ali je niža od temperature topljenja, pa spoj nastaje u čvrstom stanju.

Ovaj postupak zavarivanja je primenljiv kod materijala koji imaju dobru plastičnost, kao što su niskouglenični čelik, aluminijum i bakar. Pri tome poprečni presek treba da bude što jednostavniji, a njegova površina u odnosu na dužinu predmeta što veća. Sučeono zavarivanje zbijanjem se najčešće koristi za spajanje čeličnih šipki prečnika 3 do 10 mm.



Slika br.42 Elektrootpornom zavarivanju zbijanjem

Tipičan zajednički olik pripreme žlijeba za zavarivanje aluminijuma



Slika br. 43. Olik pripreme žlijeba za zavarivanje aluminijuma

Opšte karakteristike osnovnih metoda zavarivanja aluminija i legura(lit bib) Tabela 11a. i 11b. Postupci zavarivanja topljenjem i pritiskom za aluminijum i aluminijumove legure.

Zavarivanje	Materijal	Propisana debljina u mm ili površina presjeka zavarivanih dijelova u mm ²	Osnovne vrste spojeva za zavarivanje	Prostorni položaj spojeva koji se zavaruje	Oblast primjene
Ručno elektrolučno metalnom elektrodom V	Aluminij i Al legure	≥ 1	Sučeon	Položen	U svim granama mašingradnje
Automatsko (VV) i poluautomatsko(V)topljivom metalnom elektrodom podslojem topitelja	Aluminij, i Al legure	≥ 6	Sučeon	Položen	U svim granama mašingradnje kodpodužnih šavova
Ručno elektrolučno ugljenom (netopljivom) elektrodom (V)	Aluminij	≥ 1	≥ 3 rubni	Položen	Ograničeno za neodgovorne spojeve
Automatsko netopljivom elektrodom (volframovom) pod slojem topitelj (V)	Aluminij	≥ 2	Sučeon	Položen	Ograničeno zazavarivanje obojenih metala
Električnom netopivom elektrodom u zaštitnoj atvosveri(argon) (V)	Aluminij, i Al legure	≤ 4	Sučeon T spoj,rubni, elektrozakivanje	Bilo koji osim iznad glave	Široka
Gasno (U)	Aluminij, i Al legure	≤ 10	sučeoni, navarivanje	Položen*	Za zavarivanje tankog metala
*Položaj je obično položeni određuje se konstrukcijom mašine za zavarivanje ** Kod serijske opreme do10.000 mm ² Primjedba:Zahtjeva se velika tačnost pripreme i monztaže dijelova za automatsko zavarivanje sa topiteljem, elektrootporno,čeono i šavno. Produktivnost :V – visoka, VV – veoma visoka, U – umjerena					

Tabela 11a. Postupci zavarivanja topljenjem za aluminijum i Al legure

Zavarivanje	Materijal	Propisana debljina u mm ili površina presjeka zavarivanih dijelova u mm ²	Osnovne vrste spojeva za zavarivanje	Prostorni položaj spojeva koji se zavaruje	Oblast primjene
Tačkasto (VV)	Aluminij i Al legure	≤ 6	Preklopno	Pri korišćenju prenosnih uređaja (stege, pištolja i sl.) bilo koji	Velika primasovnoj proizvodnji dijelova od materijala male debljine
Šavno	Aluminij, i Al legure	≤ 4	Preklopno	Položen	Velika primasovnoj proizvodnji dijelova od materijala male debljine
Hladno	Aluminij	10 50 mm ²	Preklopno	Položen	Ograničeno u energo mašingradnji
Trenjem	Aluminij, i Al legure	6000 mm ²	Čeono okrugle osvine ili cijevi	Položen	Proizvodnja alata, dijelova za automobile, polj, mašinama
Ultrazvukom (taškasto ili šavno)	Aluminij, i Al legure	1 do 1,5 mm	Preklopno	Položen	
Zavarivanje strujama radiočeljusti (do 450 kHz)	Aluminij	do 40 mm	Sučeono (podužni šav cijevi)	Položen	U proizvodnji cijevi

Tabela 11b. Postupci zavarivanja topljenjem za aluminijum i Al legure

Aluminijumski lemovi

Lemljenje je proces stvaranja nerazdvojive veze spajanjem osnovnih materijala u čvrstom stanju, pri čemu spoj nastaje potpunom zazora između osnovnih materijala rastopljenim dodatnim materijalom (lemom) i njegovim očvršćavanjem, po pravilu uz prisustvo topitelja. Lemljenje aluminijuma i legura upotrebljava se kod kompleksnih struktura. Izgled spoja je bolji od zavarenog, a može biti anodno zaštićen i elektrotoporan. Aluminijumski lemovi isporučuju se u formi žice, trake ili drugih oblika. Da bi aluminijumski lem imao nižu tačku topljenja od aluminijuma i aluminijumskih legura, legira se sa bakrom i silicijumom.

Tvrdo lemljenje je spajanje dijelova zagrijavanjem iznad 450°C, tj. Ispod temperature topljenja osnovnog materijala, a uz dodatak lema tabela br.8. Dodatni materijal prodire u sloj po zakonu kapilarnosti. Primjenatvrdog lemljenja je veoma široka tako dajenašla primjenu u svim granama industrije. Ovaj način ina dosta nisku cijenu koštanja, a spoj ostaje žilav čvrst otporan na zamor i koroziju. Tvrđim lemljenjem mogu se spajati osim aluminija; čelik, bakar, mesing, bronza, monel, nikel, inkonel, sivi liv, magnezij i dr. Tvrđim lemljenjem mogu se spajati sve njihove kombinacije osim aluminijuma sa magnezijumom.

Kovljive legure Al, koje nisu pogodne za termičku obradu, a koje se najuspješnije leme su ASTM 1xxx i 3xxx serije, i nisko Mg legure ASTM Sxxx serije. Legure koje sadrže visok sadržaj magnezijuma su teže za lemljenje korišćenjem metoda sa uobičajnim topiteljem zbog lošeg kvašenja lemom i naglašene penetracije u osnovni metal. Postoje lemovi koji se tope ispod solidus temperature svih komercijalnih kovljivih legura, termički ne obradljivih. Od kovljivih legura koje se mogu termički obradivati najviše se leme ASTM 6xxx serije. ASTM 2xxx i 7xxx serije aluminijumskih legura se slabo tope i samim tim nisu normalno lemljive sa izuzetkom legura 7072 i 7005.. Ostali Al osnovni metali mogu se lemiti, ali treba voditi računa o specifičnim primenama i zahtevima procesa. Svi komercijalni lemovi za lemljenje Al legura su na bazi aluminijuma. Ovi lemovi su raspoloživi kao žice ili pokrivači. Konvencionalni metod prethodnog postavljanja lemovi je da se koristi lemnii pokrivač, koji je Al legura osnovnog metala prekrivena lemom. Lemna ploča je pokrivena sa jedne ili sa obe strane. Osnovne legure 3003 i 6951 (termički obradive legure) se obično koriste. Treći metod nanošenja lema je smeša paste i lema u prahu. Uobičajni aluminijumski lem sadrži Si koji snižava tačku topljenja sa ili bez dodatka Zn, Cu i Mg. Aluminijum se može lemiti većinom standardnih procesa.

Zavarivačko lemljenje Poseban postupak lemljenja je zavarivačko lemljenje koje može da bude gasno ili elektrolučno u zavisnosti od izvora toplote za topljenje lema. U odnosu na ostale postupke lemljenja, bitna razlika je u pripremi osnovnog metala, koja je ista kao kod zavarivanja. Kod zavarivačkog lemljenja nema kapilarnog efekta, što ga čini bitno različitim od ostalih postupaka lemljenja. Najviše aluminijuma se lemi plamenikom, uranjanjem u hemijsko kupatilo ili u pećima. Lemljenje u pećima se može vršiti u vazduhu ili u kontrolisanoj atmosferi uključujući vakuum. Lemljenje u vakumu se koristi za proizvodnju automatskih i vazduhoplovnih izmenjivača toplote.

Gasno lemljenje kao izvor toplote se koriste spoljni omotač plamena pri sagorevanju sledećih gasova ili njihovih mešavina: acetilen, prirodni gas, propan, butan i izuzetno vodonik. Ovaj postupak se koristi za lemljenje ugljeničnih, niskolegiranih i nerđajućih čelika, legura Al, Cu i Mg. Po pravilu se koristi neutralan plamen, a izuzetno i blago redukujući. Gorionici su isti kao za zavarivanje, a postupak može da bude ručni ili (polu)automatski.

Prednosti tvrdog lemljenjasu sledeće:

- Tvrdo lemljenje ne zahtjeva nikakvu konačnu obradu
- Zbog niskih temperatura pod kojima se proces obavlja deformacije su male
- Nema prskanja materijala za vrijeme rada

- Tehnika rada je laka
- Proces se lako automatizuje
- Niska cijena koštanja

Mane tvrdog lemljenja su sljedeće:

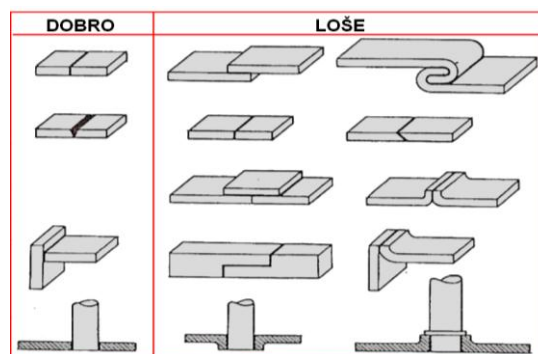
- U koliko spoj treba da bude u korozivnoj sredini tada lem treba da je anti korozivan
- Tvrdi lemovi kod visokih temperatura gube čvrstoću
- Boja lemova često odskače od osnovnog materijal

Topitelj za aluminijum: 1,755 litijuma, 5% fluora, ostalo kalijum i natrijum u odnosu 1:2. Sve izmješati u destilovanoj vodi dok ne dobije pasta.

Kod izbora topitelja potrebno je imati u vidu ove zahtjeve:

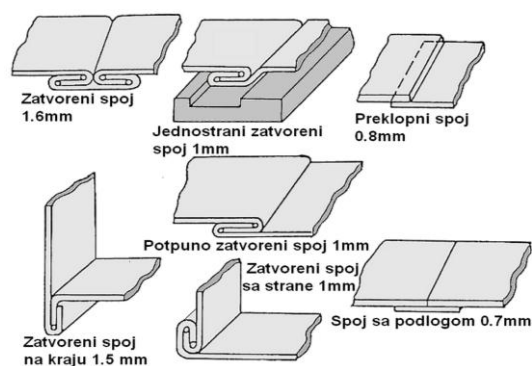
- 1 – topitelj treba da spriječava oksidaciju osnovnog materijala
- 2 – topitelj treba da rastvare okside, koji nastaju za vrijeme zagrijavanja,
- 3 – topitelj treba da povećava kapilarnost lema.

Tip prilemljenog spoja zavisi od čvrstoće koja se želi postići. Sudarno se leme lemovi deblji od 0,15 mm debljine. Na slici br.44. su prikazani tipovi spojeva koji dolaze u obzir kod lemljenja tj ispravni postupci pri lemljenju i neispravni postupci lemljenja aluminijuma. Uglavnom treba izbjegavati sudarne spojeve jer su oni najslabiji od svih drugih i mogu izdržati lem opterećenje samo oni koji izdrže lem kao takav.



Slika br.44. Ispravni i ne ispravni postupci lemljenja aluminijuma

Ukoliko je sudarni spoj neizbježan onda treba postaviti sličnu ploču. razmak između dijelova koji se leme ne smije biti jako mali kako bi topitelj bio onemogućen da uđe u zazor između materijala. Radi postizanja najveće moguće čvrstoće spoljna debljina lema treba da je što manja. Na slici br.45. prikazani tipovi spojeva koji dolaze u obzir kod lemljenja tankih limova.



Slika br.45. Spojeva koji dolaze u obzir kod lemljenja tankih limova

U narednoj tabeli 12 dati su aluminijumski lemovi prema hemiskom sastavu i oblasti primjene.

<i>Lemovi za spajanje aluminijuma i legura aluminijuma</i>								
Oznaka DIN 8513	Sastav %				Opseg topljenja a °C	Radna temp. °C	Zatezna čvrstoća u N/mm ²	Upotreba
	Ag	Si	Mn	Ost- alo				
S-AlSi5	94	5	0,5	-	570 – 630	600	140	Aluminijum-silicijumska šipka za zavarivanje (S6), žica (R6) i elektroda za zavarivanje (M6). Za zavarivanje okvira, armatura, pribornica, rebra za ojačanje i za popravke odlivaka.
S-Al99,5	99,5	-	-	0,5	658	658	240	Šipka za zavarivanje (S6A), žica (R6A) i elektroda za zavarivanje (M6A) od čistog Al. koje odlikuje dobra električna provodljivost. Za zavar. posuda, cevni konstrukcija, provodnika struje ..
S-AlMg5	94,5	-	5 Mg	0,5	560 – 630	590	180	Aluminijum-magnezijumska šipka za zavarivanje (S6M) i žica za zavarivanje (R6M) otporna na koroziju. Dobro se elokira i polira.
L-AlSi12 AL 104	87,5	12		0,5	570 – 580		180	Aluminijum-silicijumska šipka za zavarivanje i tvrdo lemljenje. Upotrebljava se za zavarivanje aluminijumskih odlivaka i tvrdo lemljenje čistog aluminijuma.
L-AlSi12 AL 104	87,5	12			570 – 580	590		Obloženi aluminijum-silicijumski tvrdi lem. Upotrebljava se za tvrdo lemljenje aluminijumskih odlivaka i čistog aluminijuma
L-SnZn40		-	60 Sn 40 Zn	-	200 – 350	300	8	Kalaj-cinkov lem za prevlačenje aluminijuma. Upotrebljava se za poboljšavanje aluminijumskih odlivaka i spojeva kablova. Odlivke od bakra pre lemljenja treba kalajisati.
L-CdZn20		-	80 Cd 20 Zn	-	270 – 280	280	12	Kadmijum-cinkov meki lem za aluminijum, bakar, odlivke od bakra i čelik.

Tabela br. 12. Lemovi za spajanje aluminijuma i legura aluminijuma po DIN-u

Skladištenje aluminijuma

Aluminijum treba da bude smešten u pokrivenom skladištu na uzdignutim drvenim blokovima iznad tla i po mogućnosti u zagrejanim prostorijama radi sprečavanja površinske korozije koja potiče od kondenzacije vlage. Korisno je obeležavanje različitih legura pomoću označavanja bojama. Ne treba koristiti sredstva koja sadrže olovo, bakar ili grafit.

Radi sprečavanja oštećenja, manipulaciju aluminijuma treba obavljati sa određenom predostrožnošću. Manipulacija treba da se obavlja sa užadima i vezama od najlona; ako se upotrebljavaju čelični lanci i kablovi, aluminijum treba zaštititi podmetačima od drveta ili tkanine. Pošto površina aluminijuma ne treba da ima ogrebotine, radni sto treba pokriti drvetom, aluminijumom ili linoleumom.

Aluminijum treba dobro upakovati za isporuku. Za duža putovanja, posebno brodom, treba ga obaviti u bituminiziran papir nepropustljiv za vazduh, i zaštititi drvenim letvama. Limovi se radije postavljaju između listova papira, a profile treba odvojiti kartonom. Ako je materijal pri prijemu vlažan, treba ga osušiti pre skladištenja ili zavarivanja.

Propisi za zavarivanje konstrukcija - Aluminijum ANSI/AWS D1.2-97

Zahtevi za zavarivanje iz ovih propisa se mogu primjeniti na bilo koji tip zavarene konstrukcije od legure aluminijuma. Njih treba koristiti zajedno sa pogodnim dodatnim propisima ili specifikacijama za materijale, za projektovanje i za konstrukcije. Oni obuhvataju zahteve koji su u osnovi zajednički za sve tipove konstrukcija, i dodatke koji se primenjuju posebno za statički opterećene konstrukcije, dinamički opterećene konstrukcije i cjevne konstrukcije.

Alternativni kriterijumi prihvatljivosti mogu biti zasnovani na ocjeni ili pogodnosti u eksploataciji prema ranijem iskustvu, eksperimentalnim dokazima ili inženjerskoj analizi razmatrane vrste materijala, uticaja radnih opterećenja i faktora okoline. Da bi se smanjio zahtevani broj kvalifikacija WPS (Welding Procedure Specification - Specifikacija postupka zavarivanja), ustanovljene su sledeće grupe osnovnih materijala. One su zasnovane na uporedljivim karakteristikama osnovnog materijala prema ASTM specifikacijama (npr. B209, B211, B221, B241, B249, B210, B247, B26, B108, B686), kao što su sastav, zavarljivost i mehaničke karakteristike (tab. 3.11.3). Osnovni metali u grupi se mogu zamenjivati uz saglasnost i razmatranje zamenljivosti iz aspekta metalurških i mehaničkih osobina, projektovanja i zahteva eksploatacije.

Oznaka grupe	Klasifikacija Udruženja aluminijumskih legura
M21	1060, 1100, 3003, ALCLAD 3003, 5005, 5050
M22	3004, ALCLAD 3004, 5052, 5154, 5254, 5454, 5652
M23	6005, 6061, ALCLAD 6061, 6063, 6351
M24	2219
M25	5083, 5086, 5456
M26	A201.0, 354.0, C355.0, 356.0, A356.0, 357.0, A357.0, 0.359.0, 443.0. A444.0, 514.0, 535 0
M27	7005

Tabela 13. Grupe Al legura za specifikaciju postupka zavarivanja (WPS)

Dodatni materijal treba da ispunjava sve zahteve poslednjeg izdanja ANSI/AWS A5.10, Specifikacija elektroda od aluminijuma i legura aluminijuma i šipki (Specification for Bare Aluminum and Aluminum Alloy Welding Electrodes and Rods). Kada se traži, ugovarač ili proizvođač treba da dostavi sertifikat proizvođača elektroda da dodatni materijal ispunjava zahteve poslednjeg izdanja ANSI/AWS A5.10. Da bi se smanjio zahtevani broj kvalifikacija WPS i dodatni materijali su grupisani. Dodatni materijal treba se čuva u neotvorenim kutijama, na suvom mestu, propisno zaštićenom od atmosfere dok nije potreban na mestu proizvodnje. Preporuke proizvođača o posebnom čuvanju tokom lagerovanja i korišćenja takođe moraju biti poštovane.

Zaštitni gas za zavarivanje aluminijuma treba da bude za zavarivanje specificiran argon, helijum ili mešavina argona i helijuma. Zaštitni gas treba da se čuva i koristi iz boca u kojima je isporučen ili iz centralnog rezervoara i sistema razvoda koji nadzire isporučilac gasa. Čitav sistem za razvod treba da je projektovan tako da se spreči zagađenje. Argon, helijum, ili njihova mešavina za zavarivanje, kada se koriste za zaštitu pri zavarivanju aluminijuma treba da su minimalne čistoće 99,998 % za argon i 99,995 % za helijum, sa tačkom kapanja od -60 °C ili niže.

Elektrode od volframa treba da odgovaraju zahtevima ANSI/AWS A5.12, Specifikacija za elektrode od volframa i legura volframa za elektrolučno zavarivanje i rezanje (Specification for Tungsten and Tungsten Alloy Electrodes for Arc Welding and Cutting). U procesima koji koriste elektrode od volframa (GTAW - TIG i PAW-VP), nivo struje zavarivanja treba da odgovara prečniku elektrode.


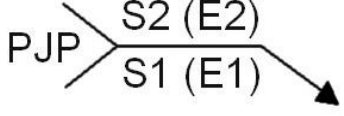
Ovaj propis se odnosi na zahteve za sledeće postupke:

- (1) GMAW - MIG – zavarivanje u zaštiti gasom topljivom elektrodom
- (2) GTAW - TIG – zavarivanje u zaštiti gasom netopljivom (volframovom) elektrodom
- (3) PAW-VP – zavarivanje u luku plazme promenljive polarosti
- (4) SW – tupo zavarivanje
- (5) PAG – žljebljenje plazmon

Termini za zavarivanje korišćeni u ovom propisu su saglasni sa definicijama u poslednjem izdanju ANSI/AWS A3.0, Standardni termini i definicije u zavarivanju (Standard Welding Terms and Definitions).

Simboli zavarivanja upotrebljeni u crtežima, skicama, planovima montaže, WPS itd. treba da budu oni prikazani u poslednjem izdanju ANSI/AWS A2.4, Simboli za zavarivanje, lemljenje i ispitivanje bez razaranja (Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination). Posebni uslovi treba da budu potpuno objašnjeni dodatim napomenama ili detaljima (vidi glavu 3.4). Ovi propisi mogu uvesti opasan materijal, operacije i opremu. Ovaj propis ne propisuje sa tim povezane probleme sigurnosti. Odgovornost korisnika je da utvrdi pravila koje se odnose na sigurnost i zdravlje. Korisnik treba da odredi primenljivost zakonskih ograničenja pre upotrebe. Odgovarajuće mere sigurnosti, uključujući ventilaciju radnog prostora, treba preduzeti prema zahtevima poslednjeg izdanja ANSI/ASC Z49.1, Sigurnost pri zavarivanju, rezanju i pridruženim procesima (Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes). (vidi glavu 4.5).

Konstrukcija zavarenih spojeva potpuni podaci o konstrukcijskom materijalu, tipu i dimenzijama komponenti koje treba spojiti i položaj, vrstu, veličinu i obim svih zavarenih spojeva treba da je jasan na crtežima. Na crtežima treba da se jasno razlikuju radionički spojevi i spojevi koji se zavaruju na licu mesta. Spoj ili grupa spojeva kod kojih je redosled važan bilo da bi se smanjio napon skupljanja, kontrolisalo krivljenje ili osigurala pristupačnost za zavarivanje treba da su jasno naznačeni na radioničkim crtežima. Ugovoreni projektni crteži treba da specificiraju efektivnu dužinu šava i, za žljebove šavova za delimičnom penetracijom (provarom), zahtevanu veličinu šava. Za takve šavove radionički crteži treba da specificiraju dubinu penetracije (S) potrebnu da bi se koristio WPS. Ugovoreni projektni crteži treba da pokažu zahteve za žljebove za potpunu ili delimičnu penetraciju. Simbol zavarivanja bez dimenzija označava žleb za potpunu penetraciju, a sa dimenzijama iznad ili ispod strelice označava delimičnu penetraciju (sl.14). Posebni detalji žljeba treba da su specificirani i označeni tamo gde je potrebno.

	
(a)	(b)
<p>Slika 14. Simboli za žleb za potpunu penetraciju (a) i delimičnu penetraciju (b) E2 = veličina šava, druga strana E1 = veličina šava, strana strelice S2 = dubina penetracije, druga strana S1 = dubina penetracije, strana strelice</p>	

Crteži detalja treba jasno da označe, pomoću simbola zavarivanja ili skica, pripremu i podešavanje materijala za zahtevani spoj. Ako se koriste spojevi za podloškom, materijal, širina, debljina i oblik (ako

ga ima) za podlošku treba da se prikaže. Svaki spoj sa posebnim zahtevima za kontrolu treba da bude označen na crtežu.

Dopušteni naponi za osnovni metal i za efektivnu površinu metala šava treba da se uzmu iz specifikacije za statički opterećene konstrukcije, dinamički opterećene konstrukcije i za cjevne konstrukcije, ili prema primenljivoj specifikaciji. Efektivna površina žljeba je proizvod efektivne dužine šava i veličine šava. Efektivna dužina šava za žljeb je širina najužeg dela koji se spaja, upravno na pravac napona. Veličina šava sa žljebom za potpunu penetraciju jednaka je debljini tanjeg dela u spoju. Ne dopušta se povećanje zbog nadvišenja šava. Šav veličine "E" sa žljebom za delimičnu penetraciju treba da bude kako sledi:

- Dubina penetracije "S" za (a) sve položaje u TIG zavarivanju V ili 1/2 V spoja sa upadnim uglom θ tako da je $45^\circ < \theta < 60^\circ$ ili (b) horizontalni ili nadglavni položaj za MIG zavarivanje, tako da je $45^\circ < \theta < 60^\circ$.
- Dubina penetracije "S" za (a) ravan ili vertikalni položaj MAG zavarivanja V- ili 1/2 V sa upadnim uglom θ tako da je $45^\circ < \theta < 60^\circ$, (b) svu položaji MIG i TIG zavarivanja V ili 1/2 V spoja sa upadnim uglom većim ili jednakim 60° i (c) svi položaji MIG i TIG zavarivanja J i U spoja.

Minimalna veličina "E" za spoj sa delimičnom penetracijom je data u tab. 15.

Debljina osnovnog materijala	mm	iznad	3	5	6	13	19	38	57	150
debljeg dela u spoju		do	5	6	13	19	38	57	150	
Minimalna veličina šava	mm		2	3	5	6	8	10	13	16

Tabela 15. Minimalna veličina šava za spoj sa delimičnom penetracijom "E"

Efektivna površina ugaonog šava je proizvod efektivne dužine šava i efektivnog vrata. Napon u ugaonom spoju treba uzeti kao smicanje efektivne površine, za bilo koji pravac djelujućeg opterećenja. Efektivna dužina ugaonog šava je ukupna dužina šava pune veličine, uključujući povratne krajeve, sa dužinom ne većom od širine najuže komponente. Efektivna dužina se ne smanjuje zbog pošetka zavara ili kratera ako je šav pune veličine po dužini. Efektivna dužina zakrivljenog ugaonog šava se meri duž srednje linije efektivnog vrata. Minimalna efektivna dužina ugaonog šava treba da je najmanje četiri puta veća od veličine šava, ili veličina šava se uzima da ne prelazi četvrtinu efektivne dužine. Efektivni vrat je najmanje rastojanje od korena do lica šava dijagramski prikazanog šava. Sledeći tipovi šava se smatraju spojevima sa punom penetracijom šava:

- Žljeb zavaren sa obe strane sa izbrušenim korenom prve strane do zdravog metala pre zavarivanja druge strane
- Žljeb zavaren sa jedne strane uz korišćenje stalne ili privremene podloške.
- Žljeb zavaren sa jedne strane TIG postupkom naizmeničnom strujom, bez podloške.
- Žljeb zavaren sa jedne strane postupkom PAW-VP oblika ključaonice.

Žljeb bez podloške, zavaren sa jedne strane, i žljeb zavaren sa obe strane, ali bez vađenja korena, smatraju se zavarenim spojevima sa delimičnom penetracijom. Minimalna veličina delimične penetracije I, V ili dvostruko V (X), 1/2 J i U žljeb su date u tab. 3.11.4. Radionički crteži i WPS treba da specificiraju dubinu penetracije (S), primenljivu na veličinu šava (E) prema postupku i položaju zavarivanja. Minimalna veličina ugaonog šava, sem za ugaoni šav koji se koristi za ojačanje žljeba, treba da je 3 mm za debljine manje od 6 mm, 5 mm za debljine između 6 i 13 mm, i 6 mm za deblje osnovne metale. Maksimalna veličina ugaonog šava, koja se dopušta duž ivica materijala treba da bude:

- Debljina osnovnog materijala, za metale manje debljine od 6 mm.

- 2 mm manja od debljine osnovnog metala, za metal debljine 6 mm ili više, sem ako nije na crtežu označena ili šav označen na crtežu da se izvadi da bi se dobila puna debljina vrata.
- Rastojanje ivice osnovnog metala i korena šava može biti i manje od 2 mm ako se ivica jasno vidi i veličina šava jasno može odrediti.

Minimalna dužina isprekidanog šava treba da je 38 mm ili četiri nazivne veličine, ali ne manje od 38 mm. Ugaoni šav u otvorima i žljebovima u preklopnom spoju može da se koristi za prenošenje smicanja ili da se sprječi izvijanje ili razdvajanje preklopljenih delova. Ovi ugaoni šavovi mogu da se preklapaju. Ugaoni šavovi mogu da se koriste za zakošene T spojeve sa uglom nagiba ne manjim od 60° i ne većim od 135° (sl. 3.11.15, detalji A i B).

Ploče za popunu mogu da se koriste u slijedećim slučajevima:

- Za zavarivanje delova različite debljine.
- Za veze koje, zbog postojeće geometrijske saosnosti moraju da se prilagode odstupanjima da se omogući stvaranje okvira.

Ploča za popunu tanja od 6 mm ne treba da prenosi opterećenje, ali mora da bude poravnana sa ivicama zavara dijela koji prenosi opterećenje. Veličina šava duž takvih ivica treba da je veća od zahtevane veličine za debljinu ploče za popunu. Ploča za popunu debljine 6 mm ili više treba da prelazi ivicu osnovnog metala. Ona treba da se zavari za deo kome je prilagođena i spoj treba da ima dovoljnu čvrstoću da prenese opterećenje na osnovni metal kao ekscentrično opterećenje. Šav koji spaja osnovni metal i ploču za popunu treba da bude dovoljan da prenese opterećenje na osnovni metal i dovoljno dugačak da se izbegne preopterećenje ploče za popunu duž podnožja šava.

Izrada poštovanje svih primenljivih podsekcija ove sekcije se zahteva u izradi i kontroli zavarenih sklopova i konstrukcija izrađenih po ovom propisu.

Oprema za zavarivanje i rezanje treba da je projektovana i izrađena, i održavana u takvom radnom stanju da kvalifikovani zavarivač, operator zavarivanja i zavarivač pripoja mogu da izvode postupak i dobiju rezultate zahtevane u ovom propisu.

Zavarivanje ne treba izvoditi ako je temperatura okoline ispod 0°C . Ovo se ne odnosi na sredinu, već na temperaturu u neposrednoj blizini radnog mesta. Ako je temperatura okoline ispod 0°C , zagrevanje konstrukcije je potrebno da bi se održala temperatura u blizini spoja 0°C ili više. Ako je temperatura područja zavarivanja i okolnog osnovnog metala ispod dopuštene temperature osnovni metal treba predgrejati tako da delovi na koji se nanosi metal šava budu na dopuštenoj minimalnoj temperaturi ili višoj od nje, na rastojanju jednakom debljini delova koji se zavaruju, ali ne manje od 75 mm na obe strane i ispred luka. Metal treba predgrejati pre početka zavarivanja da se istera vlaga iz područja šava.

Priprema ivica treba da se izvede rezanjem testerom, rezanjem plazmom, rendisanjem, ravnanjem, glodanjem ili brušenjem. Površine i ivice koje se zavaruju moraju biti glatke, ravnomerne, bez zaseka, udubljenja i prslina. Hrapavost koja prelazi dopuštenu veličinu i pojedinačni zarezi i zajedni veći od 5 mm, na inače zadovoljavajućoj površini mogu se otkloniti mašinski ili brušenjem sa nagibom 1:10. Zavarivanje radi popravke treba da sledi kvalifikovanu WPS i zahteve ovog propisa, a izvodi ga kvalifikovani zavarivač. Mašinska obrada, obrada testerom, žljebljenje ili brušenje mogu se koristiti za žljebljenje i skidanje privremenih šavova, ili skidanje pogrešno urađenih deonica. Sve površine koje se zavaruju moraju biti čiste, bez debelih slojeva oksida aluminijuma, boje, masti, ulja i vlage.

Montaža delova koji se spajaju zavarivanjem može da se izvede posle korektnog podešavanja. Gde nije moguće savijati zbog odstupanja sa osnosti, ono ne smije da pređe 10% debljine tanjeg dela, ali nikako se ne dopušta više od 3 mm od teorijske saosnosti. Delovi koji se spajaju ugaonim šavom treba da budu postavljeni što bliže. Razmak između delova ne sme da prelazi 2 mm. Ako posle ravnanja i u spoju otvor u

korjenu ne može da se zatvori dovoljno da se ovaj zahtev ispuni, prihvatljivo je maksimalno rastojanje od 8 mm pod uslovom da se izvede zaptivni šav ili koristi podložna ploča da se spreči isticanje rastopa. Komponente koje se zavaruju treba da se dobro poravnaju i drže u tom položaju stezačima, vijcima, ugaonicima, žicom i drugim prigodnim priborom, ili pripojima dok se ne završi zavarivanje. Korišćenje stezača se preporučuje kada je prikladno. Pripoje treba da izvedu, prema kvalifikovanoj WPS, kvalifikovani zavarivači i treba da ispune iste zahteve kvaliteta kao i za konačni šav. Zavarivanje treba da počne i da se završava na način koji obezbeđuje zdrav šav. Krateri koji postoje u pripojima treba da se pretope u završni šav, produženje ili ugaoni šav, a u srednjim ili korenim prolazima treba da budu izvađeni mehanički pre sledećeg zavarivanja.

Kontrola krivljenja i skupljanja. U montaži i spajanju dijelova konstrukcije ili ugradnji komponenti, i u zavarivanju ojačanja na komponente, WPS i redosled treba da budu takvi da se javi minimalno krivljenje i skupljanje. Spojeve kod kojih se očekuje veće skupljanje treba zavariti pre spojeva sa manjim skupljanjem. Kada se izvode spojevi u uslovima spolja ometenog skupljanja zavarivanje treba završiti ili završiti do tačke u kojoj nema pojave prslina, pre nego što se dopusti potpuno hlađenje spoja.

Osnovni pojmovi

Zavarivač je osposobljen i provjeren radnik za određeni opseg zavarivačkih radova: postupak, materijali (OM,DM), položaj zavarivanja, geometrijske oblike radnog predmeta, (uslove zavarivanja, npr. arktik, svemir, ...).

Zavareni spoj je cjelina ostvarena zavarivanjem, koja obuhvata dodirne dijelove zavarenih komada, a karakterizirana je međusobnim položajem zavarenih dijelova i oblikom njihovih zavarenih krajeva.

Zavarljivost je sposobnost materijala, da se pri određenim povoljnim uslovima zavarivanja ostvari kontinuirani zavareni spoj, koji će svojstvima udovoljiti predviđenim uslovima i vijeku eksploatacije.

Navarivanje je nanošenje dodatnog materijala na određenu površinu u cilju dobivanja sloja željenih dimenzija i svojstava.

Zona taljenja - ZT (zavar, navar, šav) je dio površine poprečnog presjeka zavarenog spoja koji je bio rastaljen. Sastoji se najčešće od mješavine materijala koji se zavaruje i materijala koji se dodaje u zoni taljenja pri zavarivanju, ali ponekad samo od dodatnog materijala (lemljenje) ili samo od osnovnog materijala (zavarivanje bez dodatnog materijala).

Zona utjecaja toplote - ZUT (prelazna zona) je onaj dio osnovnog materijala uz zavar koji se nije rastalio, ali čija su se mikrostruktura i svojstva izmijenili pod utjecajem toplote zavarivanja.

Predgrijavanje. Zagrijavanje neposredno prije zavarivanja u zoni osnovnog materijala gdje će se zavarivati. Potrebno je propisati minimalno potrebnu temperaturu predgrijavanja T_o s tolerancijama ($T_{o\ min}$, $T_{o\ max}$). Temperatura predgrijavanja se najčešće mora održavati sve do završetka zavarivanja.

Metalna kupka (kupka) je volumen rastaljenog metala u trenutku zavarivanja.

Prolaz je depozit (rastaljeni metal) ostvaren u jednom prolazu elektrodom kod ručnog zavarivanja ili automatom kod automatskog zavarivanja.

Sloj se sastoji od više paralelnih prolaza.

Osnovni materijal - je materijal koji se zavaruje, lemi ili reže.

Dodatni materijal - je materijal koji se dodaje u zoni taljenja pri zavarivanju, lemljenju ili nabrizgavanju.

Automatsko zavarivanje se ostvaruje opremom kod koje se operacija zavarivanja provodi bez ručnog podešavanja komandama operatora (zavarivača).

Poluautomatsko zavarivanje se ostvaruje opremom kod koje se automatski upravlja dodavanjem dodatnog materijala, a brzinom zavarivanja se upravlja ručno.

Skraćenice:

DM - dodatni materijal

EP - elektrolučno zavarivanje pod praškom

EPT - elektrozavarivanje pod troskom

IIW - International Institute of Welding

KBR - Kontrola bez razaranja

MIG/MAG - elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog/aktivnog plina (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) taljivom metalnom elektrodom

MIZ - Međunarodni institut za zavarivanje = IWW

OM - osnovni materijal

REL - ručno elektrolučno zavarivanje

TIG - elektrolučno zavarivanje netaljivom (volfram) elektrodom u zaštiti inertnog plina (Tungsten Inert Gas)

ZT - zona taljenja

Zaključak

Zavarivanje aluminijuma je otežano iz više razloga aluminijum ima visoku toplotnu provodljivost, nisku tačku topljenja u odnosu na oskidni sloj, sklonost afiniteta prema kiseoniku i vodoniku pa je njegovo zavarivanje dosta otežano.

Priprema rubova spojeva koji treba da se zavaruju treba da omogućit: čišćenje od nečistoća, sušenje, odmašćivanje od prethodnih operacija i odstranjivanje oksidne kože jel u koliko se ne izvrši dobro odklanjanje oksida sa površine materijala nećemo dobit zavareni spoj zadovoljavajućih karakteristika.

Mehaničko skidanje nečistoće i masnoće obavlja se tvrdim plastičnim i metalnim četkama suvim i čistim krpama, koje treba da se koriste samo za aluminijum. Uobičajena sredstva za hemijsko čišćenje površina su alkohol, trihloretilen, vodeni rastvor NaOH, vodeni rastvor ortofosforne kiseline H_3PO_4 , benzin i acitilen. Dobre osobine ovih sredstava su u tome što ne prodiru kroz površinu materijala, tako da se lako odstranjuju bilo hladnim isparavanjem ili sapiranjem. Isparavajuća sredstva imaju prednost u tome što se upotrebljavaju kao premazi, pa su pogodna za proizvodnje velikih gabarita. Nedostatak im je u tome što je nakon upotrebe, teško utvrditi stepen čistoće, naročito ako su u pitanju bezbojne nečistoće. Veoma je važno da sredstva za čišćenje poslije čišćenja ostrate sa materijala prije nego što se počne zavarivati inače neostranjivanje sredstava za čišćenje povećava poroznost.

Radi visoko toplotno provodljivosti često smo u prilici da se mora izvršiti i predgrijavanje aluminijuma, i u preksi se dio koji se zavaruje djelimično umotava u azbestno platno kako bi se smanjilo odvođenje toplote. Od svih postupaka zavarivanja aluminijuma najveću primjenu nalaze TIG (Tungsten Inert Gas) i MIG plina (Metal Inert Gas) postupci. Za oba postupka preporučuje se rad sa impulsnim strujama.

TIG (Tungsten Inert Gas) koristi efekt razbijanja oksidne kože ako se zavaruje jednosmjernom strujom, potreban je topitelj, dok se elektroda uključuje na minus pol, jel je tada dovođenje toplote najveće pa se omogućuju velike brzine rada uz mali prečnik elektrode.

MIG (Metal Inert Gas) postupkom se postizu najveće brzine rada i najveća količina vara u jedinici vremena. Ovaj postupak zavarivanja aluminijuma koristi se za deblje materijale od 5 - 6 mm i više. Kao dodatni material služi gola žica koja se odmotava preko reduktora i pogonskih točkova sa bubnja te prolazi kroz fleksibilnu cijev u pištolj

Zavarivanje trenjem sa mešanjem ("FSW" friction stir welding - pomicanje, mješanje zavarivanje trenjem) je specifičan postupak frikcionog zavarivanja koji se koristi za spajanje limova. Pronalazak ovog postupka omogućio je zavarivanje trenjem limova većih debljina, od različitih materijala, u svim mogućim međusobnim položajima i u svim oblicima zavarenog spoja

Lemljenje aluminijuma i legura upotrebljava se kod kompleksnih struktura. Izgled spoja je bolji od zavarenog

Literatura:

- 1) *D. Stamenković, M. Đurđanović, D. Mitić Zavarivanje postupkom "FSW" *"FSW" WELDING PROCESS April 2006. *Izlagano na Međunarodnoj konferenciji "Zavarivanje 2006", Zlatibor, maj 2006*
- 2) *L. Martinek, P. Fila, M. Balcar: Present condition and perspectives of the development of electric steelmaking at ŽĐAS, a. s. Metallurgical Papers, 2001, volume .*
- 3) *E. Mazancová, Z. Bůžek, K. Mazanec: Influence of harmful tramp elements on the achieved chemical and mechanical metallurgy properties of steels. In 7th International Metallurgical Workshop METAL 98, Ostrava, TANGER, s.r.o. Ostrava, 1998.*
- 4) *J. Madias, L. Castella, M. Dziuba: Evolution of electric steelmaking technology in South Africa. In 7th European Electric Steelmaking Conference, Venice, Italy, Associazione Italiana di Metallurgia..*
- 5) *J.Chvojka: Ingot defects. SNTL Praha 1968.*
- 6) *Zavarivanje i zavarene konstrukcija Beograd 2005.*
- 7) *Zavarivanje i zavarene konstrukcija Beograd 2004.*
- 8) *Proizvodni postupci mehatronika i robotika: pregled postupaka zavarivanja Doc.dr.sc. Zoran Kožuh 1.10.2007*
- 9) *Milenko Rakin Zavarivanje i srodni postupci treće izdanje, naučna knjiga Beograd 1976 god.*
- 10) *Pitanja sa odgovorima iz kolegija Tehnologije zavarivanja.*
- 11) *Buić G. "Izbor uređaja i utjecaj na ekonomičnost zavarivanja aluminija", Zbornik savjetovanja Spajanje aluminija i magnezija, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Šibenik, 19. do 21.09.2002., str.*
- 12) *Welding Aluminum: Theory and Practice, The Aluminum Association, Third Edition, November 1997.*