

ALUMINIJ I LEGURE ALUMINIJA

Općenito. Aluminij je metal koji je poslije kisika najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori, gdje ga ima 8%. Prvi puta se pojavio 1855.g. na svjetskoj izložbi u Parizu. Danas se jedino čelik koristi više od aluminija. Dobiva se iz rude boksita, koja se prerađuje u glinicu Al_2O_3 , iz koje se izdvaja elektrolizom trošeći puno električne energije (16 kWh/kg Al).

Al i Al - legure se koriste kao valjani, prešani (ekstrudirani) i lijevani materijali, poluproizvodi i proizvodi. Primjenjuju se u građevinarstvu, prehrambenoj industriji, kriogenoj tehnici, za izradu posuda pod tlakom u vojnoj tehnici, bijeloj tehnici, te za izradu ambalaže.

Fizikalna svojstva ~istog Al

Talište	660 °C
Gustoća, pri 20 °C	2,70 g cm ⁻³
Koeficijent linearnog istezanja, (0- 100 °C)	23,5 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Specifični topl. kapacitet, (0 - 100 °C)	920 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

Ostala svojstva, odnosno, prednosti Al 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.
- Toplinska vodljivost 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 toplinu.
- 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.

Utjecaji na zavarljivost:

- a) **Al₂O₃ prirodna oksidna kožica** na hladnom materijalu je debljine oko 0,01 mm. Daje dobru kemijsku otpornost. Aluminij oksid Al_2O_3 ima visoku temperaturu taljenja (2050 °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. Al_2O_3 kao troska je teška 3.2 gcm⁻³ 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.

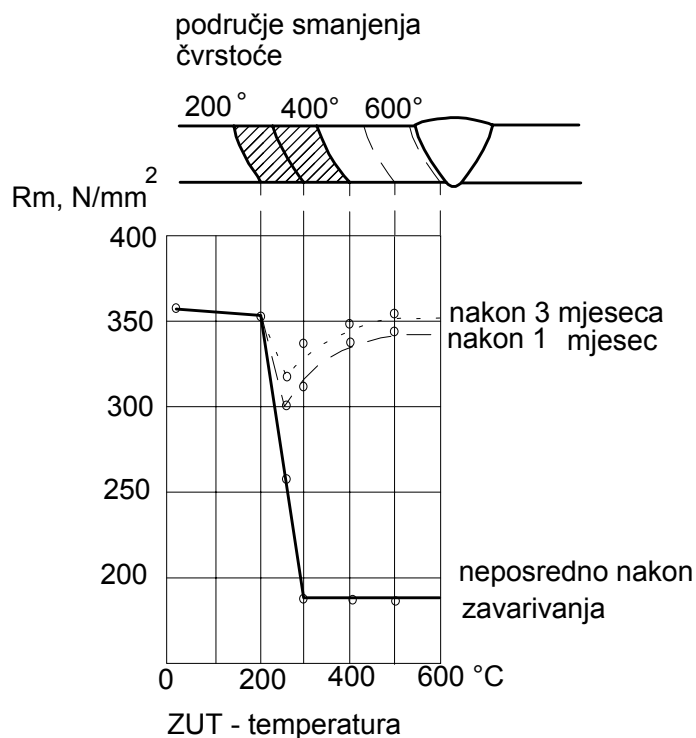
Kožica oksida se uključuje u zavareni spoj kao nemetalni uključak. Za uspješno zavarivanje potrebno je odstraniti ili razoriti oksidnu kožicu prije početka i za zavarivanja djelovanjem električnog luka u inertnoj atmosferi (elektroda na "+" polu), prašcima za zavarivanje pri plinskom zavarivanju i lemljenju, kemijskim nagrivanjem površine osnovnog i dodatnog materijala ili mehaničkim odstranjivanjem. Kod elektrootpornog zavarivanja deblji sloj oksida predstavlja i izolator, pa je potrebno posebno čišćenje. Deblji sloj se javlja napr. pri toplinskoj obradi.

- b) **Dobra toplinska vodljivost.** 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 toplinski input unatoč niskoj temperaturi tališta. Ako se zavaruje sa slabim i nedovoljno koncentriranim tokovima energije, nastaje široka ZUT sa omekšanom strukturom. Zbog visoke toplinske vodljivosti čistog Al, velika je vjerojatnost pojave poroznosti. Kod zavarivanja većih debljina potrebno je predgrijavanje da se izbjegne poroznost.

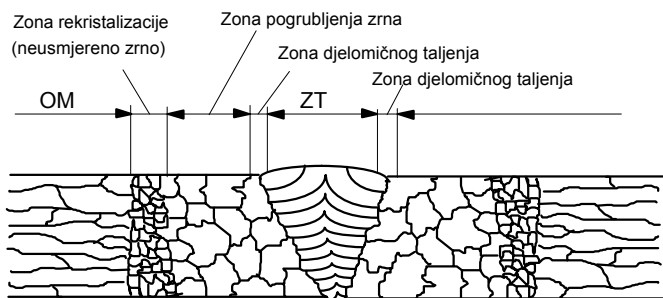
- c) **Jaka električna vodljivost.** Zahtijeva velike jakost struje i kratko vrijeme elektrootpornog zavarivanja.
- d) **Veliki koeficijent toplinskog istezanja** uzrokuje veća stezanja i deformacije pri hlađenju, pa je moguća pojava pukotina zbog jakog stezanja.
- e) **Rastvorljivost vodika u rastaljenom materijalu** je velika. Pri kristalizaciji, zbog naglog pada rastvorljivosti, oslobađaju se mjehurići vodika, koji mogu uzrokovati poroznost.
- f) **Pri zagrijavanju se ne mijenja boja** kao kod čelika, pa se ne može procijeniti temperatura na temelju boje pri zagrijavanju do tališta, što pričinjava poteškoće kod zavarivanja i lemljenja.
- g) **Skлонost vrućim, a u manjoj mjeri i hladnim pukotinama** ovisi o kemijskom sastavu i uvjetima zavarivanja

h) Omekšanje na mjestu zavarenog spoja.

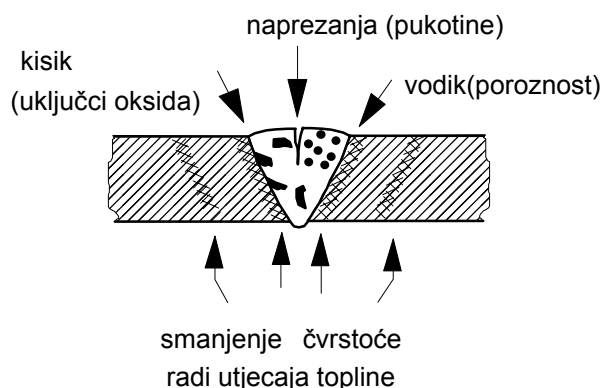
Hladnom deformacijom Al - materijali postaju znatno čvršći. Na mjestu zavarenog spoja zbog ljevačke strukture čvrstoća je najmanja, kao u meko žarenom stanju. Ovo slabljenje je razlog da se u avio industriji još uvijek mnogo koriste zakovani spojevi i svornjaci slični zakovicama (engl. lockbolt fastener) 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.



Na mjestu zone taljenja i u zoni utjecaja topline je najniža čvrstoća



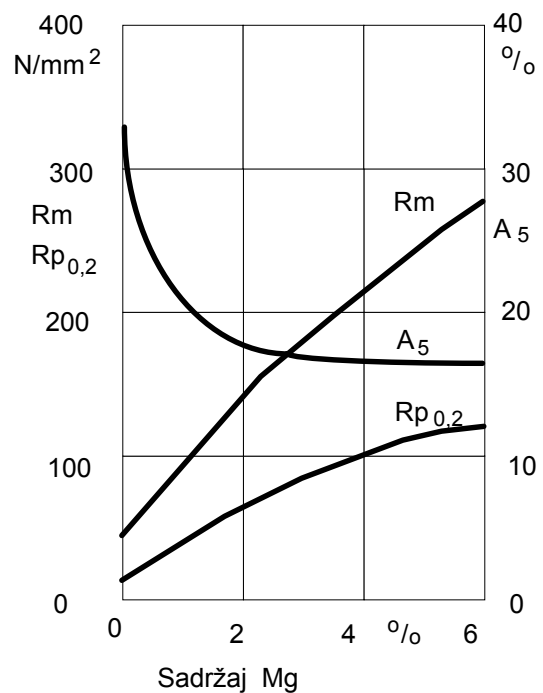
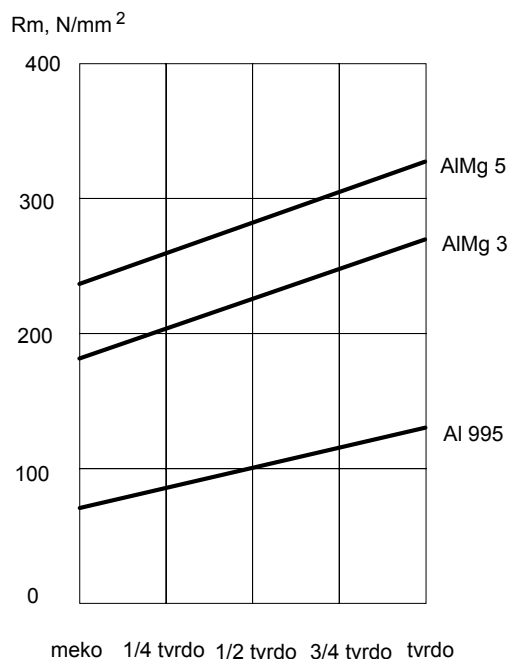
Zone zavarenog spoja na hladno deformiranom Al materijalu (čisti Al ili legura)



Prikaz najčešćih grešaka zavarenog spoja na Al -materijalima

Čvrstoća i grupe Al materijala: Čisti Al ima čvrstoću 90 - 190 MPa, ovisno o stanju isporuke (tvrđi, 1/2 tvrđi, 1/4 tvrđi, meki - prema stupnju hladne deformacije). Čvrstoća Al materijala se može povisiti na više načina:

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



Stupnjem hladne deformacije povećava se čvrstoća. Legiranjem se može povećati čvrstoća.

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

1. Al-legure bez strukturnog očvršćavanja tzv. "nekaljive legure". Grupe nekaljivih legura: Al Mn, Al Mg Mn, AlMg.
2. 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 Mg Zr

U inženjerskoj praksi najvećim dijelom se koriste valjani i prešani (ekstrudirani) proizvodi, zatim lijevani i kovani. Ovdje će biti isključivo riječ o valjanim i prešanim legurama tj. o tzv. gnječnim legurama (franc. l'aluminium et les aliages d' aluminium corroyes; engl. wrought aluminium and aluminium alloys; njem. Knet Legierungen).

Aluminij 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 aluminija. 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. 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: aluminij (1000), legure s manganom (3000), te legure s magnezijem (5000).

Nelegirani aluminij (1000):

Nelegirani aluminij se razlikuje po čistoći, tj. po učešću pojedinih "nečistoća" Fe, Si u aluminiju. Posjeduje izvanrednu otpornost prema atmosferilijama, odličnu toplinsku i električnu vodljivost i izvanrednu plastičnost (sposobnost oblikovanja). Čvrstoća je mala. Primjena mu je vrlo raširena (elektroindustrija, kemijska 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 topline 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 krom. 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.

Mehanička svojstva nekih Al - materijala

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

Granica razvlačenja R_p -----

Prekidna čvrstoća R_m -----

Al-legure sa strukturnim očvršćavanjem ("kaljive legure")

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 toplinskim postupkom. Prvu etapu toplinskog 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 aluminija. Slijedeću fazu toplinskog procesa predstavlja naglo hlađenje nazvano gašenje (Quenching) najčešće uranjanjem u hladnu vodu. Gašenjem se omogućava zadržavanje na okolišnoj temperaturi one strukture koju metal ima u zagrijanom stanju u kojem su legirajući elementi "zarobljeni" u prezasićenoj čvrstoj otopini precipitata (izlučevina). Naglo hlađenje 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 toplinskog 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 s bakrom (2000):

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).

Legure sa silicijem i magnezijem (6000):

Legirajući elementi u ovoj familiji su silicij (Si) i magnezij (Mg) koji tvore očvršćavajući spoj Mg_2Si . 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, kroma, cirkonija. Imaju bolja (veća) mehanička svojstva. Upotrebljavaju se u nosivim elementima.
- b) siromašnije u sadržaju silicija i magnezija, što im omogućuje velike brzine prešanja 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.

Legure sa cinkom i magnezijem (7000):

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. Konstruktali je njihov popularni naziv. Legure se dijele na dvije grupe ovisno od toga da li sadrže ili ne sadrže bakar:

- a) legure sa bakrom posjeduju najveću čvrstoću. Zavarivati se mogu jedino u specijalnim uvjetima. Loša su im antikorozivna svojstva. Najčešće se upotrebljavaju u avio i svemirskoj tehnici, naoružanju.
- b) legure bez bakra posjeduju nešto lošija mehanička svojstva od prethodne grupe. U pravilu su otpornije na koroziju od legura s bakrom. Upotreba u naoružanju, za nosive elemente (npr, potporanj u rudnicima) i sl.

Postupci zavarivanja Al i Al-legura

Plinsko zavarivanje ($C_2H_2+O_2$) s reducirajućim plamenom - viškom acetilena, da plamen ne bude oksidirajući. Koriste se topitelji u obliku prašaka i paste (kloridi i fluoridi alkalnih metala) da se kemijski veže i odstrani Al oksid. Ostatke topitelja nakon zavarivanja treba odstraniti, jer uzrokuju koroziju.

REL zavarivanje koristi elektrode sa oblogom sličnoj topitelju oksida kod plinskog zavarivanja. I plinsko i REL zavarivanje se najviše koristilo od 1910. god. do poslije drugog svjetskog rata. Danas se koriste najviše TIG i MAG postupci.

TIG zavarivanje koristi efekt razbijanja oksidne kože, pomicanjem katodne mrlje, mjesta izlaska elektrona, što znači da se zavar - radni komad priključuje na negativan pol izvora istosmjernog struje - na katodu, a W elektroda se priključuje na plus pol, koji jače zagrijava W elektrodu. 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.

MIG zavarivanje se koristi za deblje materijale, napr. preko 6 mm.

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 isti Al materijal se spaja, jer atomi dolaze na dovoljnu međusobnu udaljenost djelovanja međuatomskih kohezivnih sila.

Elektrotoporno zavarivanje zbog dobre vodljivosti električne struje i topline treba provoditi s velikim jakostima struje (do 100 kA) i kratkim vremenima (napr. 4 - 15 perioda izmjenične struje 50 Hz) za točkasto zavarivanje. Teškoće se mogu očekivati zbog prisutnog sloja Al-oksida, koji djeluju kao izolator, posebno, ako je deblji.

Osim navedenih postupaka koriste se i drugi postupci zavarivanja odnosno druge tehnike spajanja:

- difuzijom
- kondenzatorsko s pražnjenjem (slično elektrotopornom),
- ultrazvukom,
- trenjem,
- snopom elektrona,
- eksplozijom,
- plazma (i mikroplazma za debljine 0,2 do 1,5 mm)
- pod troskom,
- pod prahom,
- ljevačko, te
- lemljenje i
- ljepljenje

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; napr. spoj čelik- Al, Cu - Al, Ti - Al, Al - staklo, Al - keramika (ultrazvuk, difuzijsko).

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

Alat za čišćenje treba se koristiti samo za Al. Četke trebaju biti od nerđajućeg čelika. 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.

Dodatni materijal također treba čistiti - odmastiti (alkoholom, acetonom, trikloretilenom). Preporučuje se da se žica provlači kroz manji otvor, koji je na ulazu oštar da skida tanki sloj površine. Tako prije upotrebe "ogulimo" oksidnu kožicu.

U električnom luku izgaraju elementi napr. Mg. Potrebno je npr. koristiti žicu s napr. 5 % Mg za zavarivanje legure s 3 % Mg, jer će dio Mg iz žice izgoriti tijekom zavarivanja.

Poroznost je najčešća greška koja se može javiti u zavarima, a uzrokovana je vodikom zbog:

1. prisustva vodika u atmosferi luka (vlaga, masnoće,),
2. velike topivosti vodika u talini, a zatim smanjenja topivosti u krutom stanju za oko 10 puta.

I sloj Al oksida na OM i DM apsorbira vlagu, pa može uzrokovati poroznost. Potrebno je spriječiti ulaz vodika (odstraniti moguće izvore vodika) i/ili omogućiti efuziju (izlaz) vodika odgovarajućim postupkom i režimom zavarivanja.

Predgrijavanje smanjuje odvođenje topline i smanjuje vjerojatnost pojave poroznosti. Pored vodika Mg i Zn - lako isparljivi elementi pri visokim temperaturama zavarivanja mogu uzrokovati poroznost.

Tople pukotine. Tople pukotine se mogu javiti, a one su posljedica poprečnih reakcijskih naprezanja pri stezanju. Smjer kristalizacije i veličina kristala, te sadržaj nečistoća utječu na pojavu pukotina. Za sprječavanje toplih pukotina danas se koriste dodatni materijali s dodacima Ti, Zr i Cr do 0.1%. Ovi elementi će dati sitnije zrno jer stvaraju više klica kristalizacije pri skrućivanju.

Može se sumirati da na pojavu toplih pukotina utječu:

- kemijski sastav OM i DM,
- reakcijska naprezanja,
- režim zavarivanja (veličina i oblik kupke, brzina hlađenja) i miješanje OM i DM.

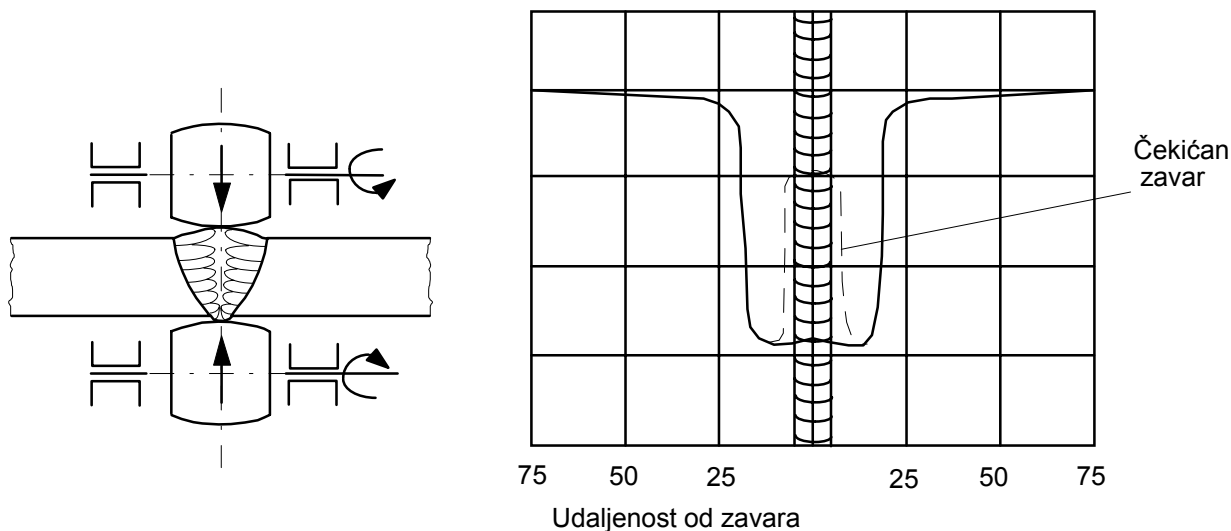
Predgrijavanje i pravilan slijed zavarivanja će smanjiti vjerojatnost pojave toplih pukotina.

Toplinska obrada kaljivih Al-legura obuhvaća tri koraka:

1. Homogenizacija (470 - 530 °C)
2. Hlađenje određenom brzinom
3. Dozrijevanje pri sobnoj ili povišenoj temperaturi pod kontrolom - umjetno dozrijevanje. Moguće je i prirodno dozrijevanje, pri sobnim temperaturama koji traje duže (i nekoliko mjeseci).

Mehanička obrada. Zavaren spoj ima grubozrnatu (ljevačku) strukturu s niskom čvrstoćom. Hladnom deformacijom ZT čekićanjem ili provlačenjem kroz valjke od tvrde gume ili čelika može se povećati R_m , R_e i tvrdoća zavora. Zone u ZUT mogu ostati mekane.

Čvrstoća / Tvrdoća



Čvrstoća omekšanog zavora se može povećati hladnom deformacijom zavora čekićanjem ili valjanjem