

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 27/2015

Вељко Њ. Илић

**Термичка обрада неких легура
алуминијума**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Завршни рад садржи следеће целине:

- Уводне напомене о алуминијуму
- Преглед легура алуминијума
- Опис термичке обраде неких легура алуминијума
- Легуре алуминијума за деформисање
- Легуре алуминијума за ливење
- Примена алуминијума и његових легура у техничкој пракси
- Заваривање термички обрађеног алуминијума и његових легура

Препоручена литература:

[1] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: Наука о материјалима I, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.

[2] Р. Врачар: Теорија и пракса добијања обојених метала, Савез инжењера металургије Србије, Београд, 2010.

[3] В. Ђукић, А. Мајсторовић: Увод у испитивање метала, Образовни центар “Воја Радић” Школа за више образовање радника, Крагујевац, 1978.

[4] М. Јовановић, В. Лазић: Технологија ливења и заваривања, универзитетски уџбеник, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.

[5] Б. Мусафија: Обрада метала пластичном деформацијом, Завод за уџбенике и наставна средства, Сарајево, 1988.

[6] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: Технологија заваривања – приручник, Самостално ауторско издање, Крагујевац, 1996.

Крагујевац, датум

Ментор:

Проф. др Вукић Лазић

Садржај

Резиме	1
Abstract	1
1. Уводне напомене о алуминијуму.....	2
1.1 Уводне напомене	2
1.2 Основне карактеристике алуминијума.....	2
1.3 Хемијске особине алуминијума	4
1.4 Заступљеност алуминијума у природи.....	4
1.5 Руде алуминијума.....	6
1.5.1 Боксит	6
1.5.2 Алунит	7
1.5.3 Нефелин.....	7
1.5.4 Каолини	8
1.6 Историјат производње алуминијума	8
1.7 Производња алуминијума.....	8
1.8 Отпорност алуминијума према корозији	10
1.9 Технички чист алуминијум	11
1.10 Механичке и технолошке особине чистог алуминијума	11
2. Преглед легура алуминијума	13
2.1 Подела легуре алуминијума	13
2.2 Основне карактеристике Al-легура у односу на челик.....	15
2.2.1 Отпорност на корозију.....	15
2.2.2 Понашање на ниским и високим температурама	16
2.2.3 Тежина и механичка својства Al-легура у односу на челик	17
3. Опис термичке обраде неких легура алуминијума	18
3.1 Термичка обрада.....	18
3.2 Структура и термичка обрада легура алуминијума	18
4. Легуре алуминијума за деформисање	22
4.1 Обрада деформисањем.....	22
4.2 Легуре алуминијума за прераду деформисањем (ковне).....	23
4.3 Ковне легуре алуминијума које таложно не ојачавају.....	23
4.4 Ковне легуре које таложно ојачавају – термички обрадиве легуре	24
5. Легуре алуминијума за ливење	26
5.1 Технологија ливења	26
5.2 Легуре алуминијума за ливење	27

5.3 Ливачке легуре које таложно не ојачавају - термички необрадиве легуре	27
5.4 Ливачке легуре које таложно ојачавају.....	30
6. Примена алуминијума и његових легура у техничкој пракси	31
6.1 Алуминијум у транспортној техници.....	32
6.1.1 Алуминијум у аутомобилској индустрији	32
6.1.2 Алуминијум у железничкој индустрији.....	33
6.1.3 Алуминијум у ваздухопловној индустрији.....	34
6.2 Алуминијум за електроиндустрију.....	35
6.3 Алуминијум у прехранбеној индустрији.....	36
6.4 Употреба алуминијума за различите делове и конструкције у грађевинарству	37
6.5 Алуминијум за покућство.....	39
6.6 Алуминијум за робу широке потрошње	40
7. Заваривање термички обрађеног алуминијума и његових легура.....	41
7.1 Заварљивост алуминијума и његових легура	41
7.2 Припрема алуминијумских предмета за заваривање	41
7.3 Топли пролом	43
7.4 Електролучно заваривање ковног алуминијума.....	43
7.5 Заваривање ливеног алуминијума	44
7.6 Методе заваривања алуминијума и његових легура.....	44
7.6.1 ТИГ заваривање алуминијума.....	44
7.6.2 МИГ заваривање алуминијума	49
8. Закључак.....	51
9. Литература	52

Резиме

Тема овог рада је лаки метал алуминијум. Алуминијум је најзаступљенији метал на свету и трећи је најчешћи елемент у Земљиној кори. Свестраност алуминијума чини га најкоришћенијим металом после челика. У раду ћемо се упознати са хемијским, механичким и технолошким особинама алуминијума. Описана је његова распрострањеност у природи, представљен минерал и начин производње алуминијума. Чист алуминијум је мекан, дуктилан, отпоран на корозију, мале јачине и лоше ливкости и има велику електричну проводљивост, па као такав и ограничену примену. Стога се алуминијум легира како би му се побољшале механичке карактеристике. Представљен је начин легирања алуминијума, његова подела на легуре за деформисање и ливење, као и његова примена у техничкој пракси. Објашњено је заваривање термички обрађеног алуминијума и његових легура, као и методе заваривања.

Кључне речи: алуминијум, минерал алуминијума, производња, корозија, легирање, деформисање, ливење, заваривање.

Abstract

The subject of this research paper is non-ferrous metal aluminum. Aluminium is the most represented metal in the world and is third most common element which can be found in the Earth. Versatility of the aluminium makes it the most commonly used metal after steel. In this research paper we will discuss more about chemical, mechanical and technological properties of the aluminium. We will describe more it's versatility in the nature, present his ore and ways of aluminium manufacturing. Pure aluminium metal which is soft, ductile, resistant to the corrosion, it has small power and bad castability but high electrical conductivity, as such it's uses are limited. Due to that, aluminum is being alloyed, in order to improve it's mechanical properties. Paper also gives division of aluminium alloys to alloys for deformation and casting, as well as his uses in technical practice. Paper will also try to explain welding of thermally treated aluminum and its alloys, as well as welding methods.

Key words: aluminum, mineral, manufacturing, corrosion, alloys, deformation, casting, welding.

1. Уводне напомене о алуминијуму

1.1 Уводне напомене

Уобичајена подела метала је на црне и обојене, па према овој подели у црне метале се убраја гвожђе и манган, а остали метали су обојени. Дакле, обојени метали су сви метали који у себи не садрже гвожђе. Такође, за обојене метале се често користи назив и нежелезни метали. Примењују се због својих посебних особина, код алуминијума су то добра електрична и топлотна проводљивост, мала тежина, корозивна отпорност и друге.

Обојене метале можемо поделити на:

- Лаке метале Li, Mg, Be, Al, Ti ($\rho < 5000 \text{ kg/m}^3$).
- Тешке метале Pb, Cu, Zn, Ni, Co и тсл. ($\rho > 5000 \text{ kg/m}^3$).
- Племените метале Au, Ag, Pt.
- Ретке метале In, Ga, Se, Te, W, V, Mo, Zr, Re, U и тсл.

Легуре лаких метала се највише примењују у авијацији, транспортној техници и за све друге примене где је потребна мала тежина. Најважнији и најпримењивији материјали лаких метала су легуре алуминујума, магнезијума и титана. Као легирајући елементи лаких метала користе се берилијум и литијум. По обиму производње прво место припада алуминијуму и његовим легурама.

Основне карактеристике лаких обојених метала у односу на челик су:

- слабије механичке карактеристике,
- боља отпорност на корозију,
- већа електрична и топлотна проводљивост,
- немагнетичност,
- ниске специфичне тежине (густине) и тсл.

Наведене карактеристике обојених метала у односу на челик треба узети условно, јер неке легуре могу имати затезну јачину (чврстоћу) чак и као челик повишене јачине.

1.2 Основне карактеристике алуминијума

Алуминијум, после гвожђа је други по реду метал који се користи у савременој машинској техници. Употребљава се као чист метал у електротехници, металопреправљачкој, прехранбеној и хемијској индустрији, али му је много значајнија примена у виду различитих вишекомпонентних легура које се широко употребљавају у машинској индустрији.

Алуминијум припада групи лаких обојених метала густине 2.7 g/cm^3 , што значи да је три пута лакши од гвожђа 7.874 g/cm^3 . Добија се из руде боксита електрометалуршким методама. Боксит се претежно састоји од алуминијумових хидроксида и примеса SiO_2 , те оксида и хидроксида гвожђа. Алуминијум се одликује добром електричном ($38 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$) и топлотном ($\approx 209 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) проводношћу.

Алуминијум је неалотропски метал, тј. метал који при загревању до топљења задржава површински центрирану кубну кристалну решетку (Al). Може се обрађивати деформисањем на топло и хладно, отпоран је на атмосферску корозију, док му је механичка отпорност релативно ниска. Температура топљења алуминијума је 660°C . Најчешће примесе у алуминијуму су Fe и Si, које потичу из почетних (полазних) сировина, а оне се металуршки тешко одстрањују.

Силицијум је примеса у чистом алуминијуму, али и главни легирајући елемент у ливачким легурама алуминијума. Механичке и технолошке особине хемијског чистог алуминијума (99.99%) и техничког чистог алуминијума (99.5%) (металуршког) дате су у табелици 1.1, одакле се уочава утицај чистоће алуминијума на његове механичке особине. Хемијски чист алуминијум се може добити из металуршког алуминијума који се пречишћава (рафинише) електрометалуршким методама. Технички чист алуминијум садржи 0.50% примеса Fe и Si, намењен је за електричне проводнике, судове у хемијској и прехранбеној индустрији, те за декоративне и заштитне компоненте у архитектури.

Таблица 1.1 Особине чистог алуминијума у жареном стању при температури од 20°C

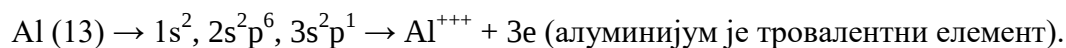
Механичке особине		Al 99.99, %	Al 99.5, %
Техничка граница течења	R_p , МПа	15	50
Јачина на кидање	R_m , МПа	50	80
Издужење	$A_{5.65}$, %	45	30
Контракција	Z , %	90	70
Модул еластичности	E , МПа	71000	71000
Тврдоћа	НВ	15	20
Технолошке особине			
Обрадивост на хладно	Веома добра		
Обрадивост на топло	Веома добра		
Ливкост	Отежана		
Заварљивост	Веома добра, условна		
Обрадивост резањем	Добра		

Већ при садржају Fe изнад 0,05% (граница α -чврстог раствора) појављује се еутектикум ($\alpha + Al_3Fe$) који погоршава обрадивост деформисањем и отпорност на корозију. Растворљивост Si у Al (α -чврст раствор) је вишег реда него гвожђа, а изнад граничне растворности 11,7% се појављују груби игличасти кристали силицијума (фаза β), који на особине алуминијума утиче слично као и еутектикум ($\alpha + Al_3Fe$).

По истовременој појави примеса Fe и Si снижава се чистоћа алуминијума на 99,5% и мање, па се уместо фазе β (чистих кристала Si) образује комплексна фаза Al_mFe_nSi .

Ефикасно уситњавање зрна ливеног алуминијума постиже се додавањем ситних честица титана (Ti) које у растопу стварају више центара кристализације. Алуминијумски одливци склони су ка порозности због растварања водоника који потиче из влажних пешчаних калупа. При ливењу у сувим калупима, у одливцима се при хлађењу око солидус температуре појављују прслине на топло, па се алуминијум лије у влажним пешчаним калупима. Тог проблема нема при ливењу у кокилама, било гравитационо или под притиском. Сличне тешкоће настају и при заваривању алуминијумских легура, па се морају применити технологије које дају врло низак садржај водоника у металу шава (углавном се алуминијум и његове легуре заварују у заштити аргона, TIG или MIG методама).

Електронска конфигурација алуминијума је:



1.3 Хемијске особине алуминијума

У табелици 1.2 су дате основне хемијске особине алуминијума.

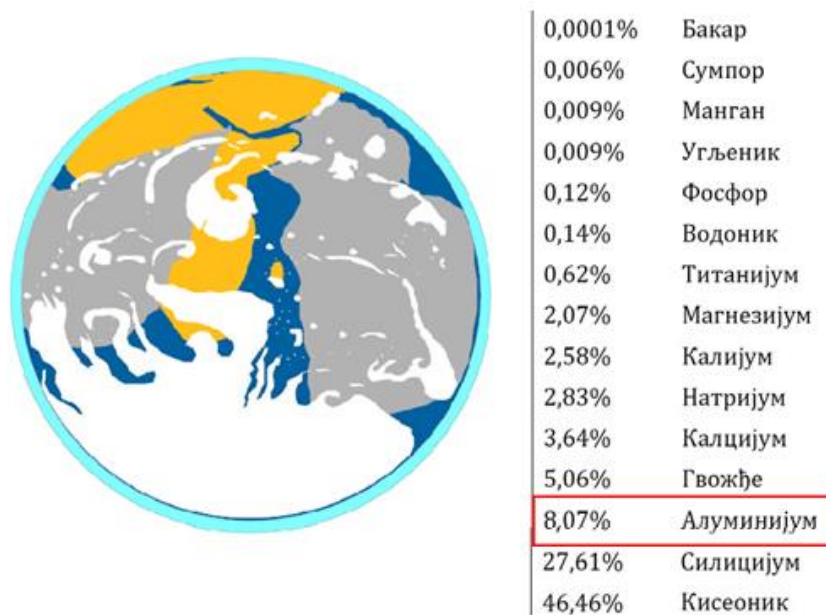
Таблица 1.2 Хемијске особине алуминијума

Елемент	Алуминијум
Симбол	Al
Атомски број	13
Кристална структура	Кубна површински центрирана решетка (A1)
Параметар решетке, nm	0.40496
Атомска маса	26.9815
Радијус атома R_a , nm	0.143
Радијус јона R_j , nm	0.053
Температура топљења, T_t , $^{\circ}C$	660
Специфична топлота, c , J/kgK	1046
Коефицијент термичког линеарног ширења, $\alpha \cdot 10^6$, $1/^{\circ}C$	23.9
Термичка проводност, λ , W/mK	209-222
Густина, ρ , g/cm^3	2.700
Затезна јачина, R_m , MPa	50-80
Издужење, A_5 , %	30-45
Тврдоћа, HB	15-20
Модул еластичности, E , MPa	≈ 69000
Пластичност	-

1.4 Заступљеност алуминијума у природи

Алуминијум је сребренасто-бели лаки метал. У природи се алуминијум не налази као слободан елемент. Велики број минерала у Земљиној кори и стенама садрже једињења алуминијума. Због тога је алуминијум најзаступљенији метал и трећи најбогатији елемент у Земљиној кори (сл. 1.1).

Само силицијум и кисеоник су чешћи од алуминијума. Следећи метал по распрострањености после алуминијума је гвожђе. Од укупно 8,07% колико га има у Земљиној кори, на првом месту је од метала, а после кисеоника и силицијума. Поседује релативно високу хемијску реактивност, што значи да има тенденцију везивања са другим елементима тј. формирања различитих једињења. На слици 1.2 приказано је проналажење и ископавање алуминијума.



Слика 1.1 Распрострањеност алуминијума у природи



Слика 1.2 Проналажење и ископавање руда алуминијума

Као што је наведено велики број различитих минерала садржи алуминијум, а у природи се може наћи са садржајем силицијума и кисоника у облику алуминијум силиката. Алуминијум силикат је хемијско једињење стакластог сјаја, он је нерастворљив и користи се за прављење стакла и у грађевинарству као ватростални материјал. Пошто се алуминијум не може издвојити из алуминијум силиката, због начина и врсте хемијских веза, економски оправдан и индустријски најефикаснији начин јесте прерада руде боксита. Природних минерала са металима који не садрже силицијум нема много. Такав је минерал корунд и његове варијације (модификације) попут рубина и сафира. Минерал корунд (сл. 1.3) има највећи удео алуминијума у себи - 53%, али се веома ретко налази у природи. Обојен траговима других оксида, природни корунд, добро искристалисан, јавља се у облику драгог камена.

Минерале алуминијума можемо поделити на:

- примарне минерале и
- секундарне минерале.

У примарне минерале можемо поделити алуминијум силикате. Због наведених разлога, настали су и секундарни минерали, који се карактериши великим садржајем

алуминијума. То су беле глине, боксит и криолит. Такође, једна група се мора издвојити и за рециклирање алуминијског отпада. На тај начин би се уштедела енергија за производњу алуминијума.



Слика 1.3 Минерал корунд

1.5 Руде алуминијума

Алуминијумска руда је природна сировина од које се добија метал. Најчешћа руда која се користи је боксит. Садржи највећи удео алуминијум оксида Al_2O_3 . Остале стене као што су алунит, нефелин и каолини, такође се користе за производњу алуминијума, али су знатно сиромашније.

Минерали (руда) алуминијума који се налазе у природи су минерали у којима су присутни и минерали других метала. Рафинацијом руде добијене из природе добија се алуминијум оксид, који се назива глиница. Да би се добила глиница, сировина која се прерађује мора да испуњава следеће услове:

- да има висок садржај алуминијум оксида Al_2O_3 ,
- да цена прераде рафинације буде прихватљива,
- да налазиште са кога се врши ископавање буде у што већем облику,
- да издвајање Al_2O_3 буде у што чистијем облику.

Алуминијум се налази у више од 250 минерала. Од њих су највреднији за индустрију:

- боксит,
- нефелин и
- алунит.

1.5.1 Боксит

Боксит (сл. 1.4) је најважнија руда алуминијума од које се данас добија скоро целокупна светска производња алуминијума. Основне компоненте у њима су минерали:

- алуминијума,
- гвожђа,
- силицијума,
- титана,
- калцијума и
- магнезијума.

Квалитет боксита, у смислу коришћења за производњу глинице, углавном се одређује садржајем Al_2O_3 и SiO_2 . Што је садржај Al_2O_3 већи, а садржај SiO_2 мањи,

боксит је бољег квалитета и обрнуто.



Слика 1.4 Руда боксита

Боксити се деле на:

- хидраргитне (гипсане),
- бемитне (eng. boehmite),
- дијаспорне и
- мешовите

1.5.2 Алунит

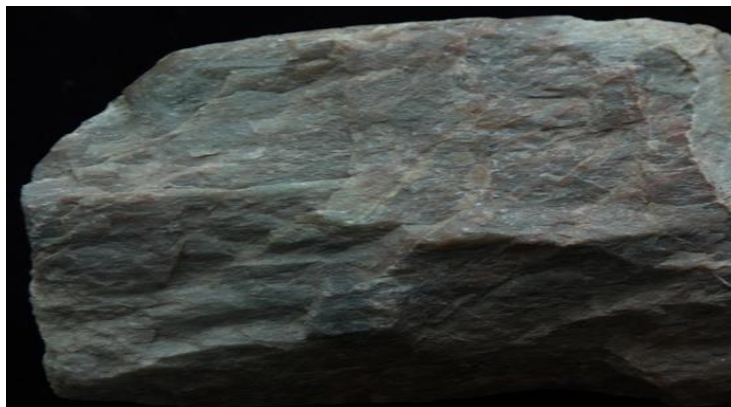
Алунитне руде (сл. 1.5) настају у водном и приобалном подручју, у условима вулканске и хидротермалне активности. Ова руда садржи до 40% глинице.



Слика 1.5 Руда алунита

1.5.3 Нефелин

Нефелин (сл. 1.6) је кристална алкална стена, која садржи у себи поред Al_2O_3 и оксиде алкалних метала Na_2O и K_2O . По значају је друга руда алуминијума.



Слика 1.6 Руда нефелин

1.5.4 Каолини

Каолини (сл. 1.7) су најраспрострањеније сировине које у себи садрже алуминијум. Алуминијум је у каолину садржан у облику алуминијум силиката.



Слика 1.7 Минерал каолин

1.6 Историјат производње алуминијума

- 1807. год. је енглески хемичар сер Хемфри Дарви предвидео могућност издвајања алуминијума из глине, што је 1825. год. успело данском истраживачу Дерстеду и 1827. год. немачком истраживачу Волеру. Алуминијум тако добијен је био нечист и веома скуп (као злато).
- 1855. француски хемичар Сент Клер Девил издваја алуминијум на индустријски начин - електрохемијском редукцијом алуминијум хлорида (чистоће 96-97%). Цена пада на петину, али је и даље била веома велика. Алуминијум је и даље сматран за племенити метал.
- 1866. год. Чарлс Мартин Хол у САД и Пол Херо у Француској проналазе економски оправдано решење добијање алуминијума.
- 1892. год. аустријски истраживач Бајер патентирао је поступак добијања алуминијум оксида - глинице (Al_2O_3) из руде боксита који се у својој основи и данас користи.

1.7 Производња алуминијума

Као што је већ речено, рафинацијом (пречишћавањем) руде добијене из природе добија се алуминијум оксид, који се назива глиница. Од поступка за добијања глинице, највећу и најширу праксу у индустрији имају базни поступци. Помоћу базних поступка произведе се преко 95% укупне глинице у свету. Најзначајнији поступци су:

- Бајеров поступак за добијање глинице из руде боксита и
- суви алкални или такозвани “Синтер” поступак.

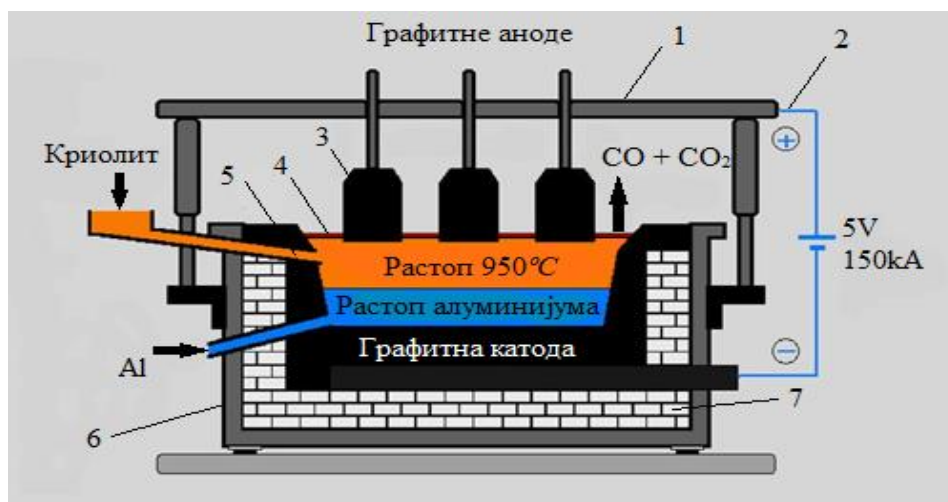
Алуминијум се у природи као што је већ споменуто среће у облику различитих минерала којих има веома много. Основна руда из које се процесом обраде добија алуминијум је боксит. Код алуминијума је боксит везан у облику хидроксида. Поступак добијања алуминијума из боксита, састоји се из следећих операција:

1. Млевење и печење боксита;
2. Растварање у натријум хидроксиду у аутоклавима при чему се добија база (лужина) натријум алумината;
3. Добијања бистре лужине и ослобађање од јаловине (отпадни материјал при обради руда);
4. Добијање и топљење хемијски скоро чисте глинице (Al_2O_3) са криолитом;
5. Електролиза растопа са издвајањем металног алуминијума у течном стању;
6. Течни алуминујум се затим претапа у графитним лонцима и лије у одговарајуће форме.

Криолит (сл. 1.8) је минерал, беле је боје, по изгледу је сличан леду. Користи се у електролитичком процесу добијања алуминијума из боксита. Растварањем у натријум хидроксиду боксит се ослобађа од отпада, а остале компоненте (силицијум, титан и оксиди гвожђа) се не растварају и остају као црвени муљ. Електролитички процес, где се топи криолит са алуминијумом, приказан је на слици 1.9.



Слика 1.8 Криолит



- 1- сабирна шипка; 2- електрична струја; 3- угљенична облога аноде;
4- стврднута кора електролита и алуминијум оксида; 5- криолитно купатило;
6- челична облога; 7- угљенична облога катоде;

Слика 1.9 Топљење Al_2O_3 и његово претапање

У пећ се убацује млевени криолит (Na_2AlF_6) и укључује струја. Пробија се лук (на $3000^\circ C$), а криолит се топи на $950^\circ C$, где се добија растоп криолита-течан криолит. У течном криолиту раствара се Al_2O_3 , Слично као $NaCl$ у H_2O и добија електролит. Лук се тада гаси и кроз електропроводљиви електролит протиче струја и настаје дисоцијација:



Алуминијум тада пада на дно (на катоду $\rightarrow$ дејонизација), а $O \rightarrow$ на аноду, која делом сагорева у CO , $CO_2 \uparrow$. Течан алуминијум се испушта и лије у трапезне калупе од ливеног гвожђа.

Овако добијени алуминијум од боксита се назива топионички или технички алуминијум чистоће 99–99,8%. Алуминијум високе чистоће 99.99% се добија електричном рафинацијом, а користи се за заштиту и израду делова који су изложени корозији.

За једну тону металуршког чистог алуминијума потребно је: две тоне Al_2O_3 + четири тоне Na_6AlF_6 и око 20 000 kWh (скоро десет пута више од утршка енергије при добијању исте количине челика).

Металуршки алуминијум се употребљава:

- за производњу Al (99.5%),
- за производњу Al-легура (са Mn, Mg, Cu, Si и тсл.),
- за израду технички чистог алуминијума (Al 99.5-99.9%) и
- за израду хемијски чистог алуминијума (Al 99.9-99.999%).

На слици 1.10 приказана је шема процеса добијања алуминијума. Од боксита, хемијским процесом добија се глиница. Онда се од глинице електролитичким процесом добија алуминијум. Ознакама од 1-8, илустрован је процес добијања алуминијума, па све до његовог коришћења.



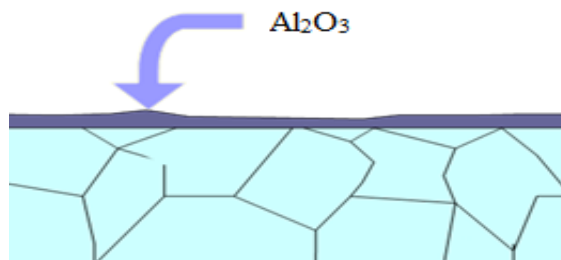
- 1- боксит; 2- пречишћавање; 3- глиница; 4- топљење; 5- алуминијум; 6- производња;
7- производи за крајњу употребу; 8- рециклажа; 9- производња алуминијума у електролитичком лонцу;

Слика 1.10 Шема процеса добијања алуминијума

При производњи алуминијума се троши веома велика количина електричне енергије (14-16 MWh). Рециклажом секундарних сировина потрошња електричне енергије се смањује на само 5% енергије за производњу примарног алуминијума. Укупна производња секундарног алуминијума у укупној светској производњи је око 25%.

1.8 Отпорност алуминијума према корозији

Отпорност према корозији код алуминијума се постиже спонтаним стварањем заштитног оксидног слоја Al_2O_3 (сл. 1.11) на температури околине. Тај слој досеже до дебљине око $0.1 \mu\text{m}$ што чини алуминијум корозивно стабилним на ваздуху и у морској води. У корозивно активним срединама алуминијум одолева боље што је чистији. Међутим, подлеже корозији у хидроксидима (NaOH, KOH) и киселинама халогених елемената (HCl, HF).

Слика 1.11 Заштитни оксидни слој Al_2O_3

1.9 Технички чист алуминијум

Технички чист алуминијум (Al 99.5%) добро проводи електричну струју па се алуминијумске жице употребљавају за пренос електричне струје на далеководима и нисконапонској мрежи. С обзиром на малу јачину алуминијумских жица, оне се упредају око носеће челичне жице (затезне јачине 1200 МПа), па би их требало звати челично-алуминијумске жице. Слични проводници употребљавају се и за тролејбуске мреже. Алуминијумске жице се такође употребљавају за намотаје статора, генератора и електромотора.

Добра топлотна проводљивост, као и велика отпорност алуминијума на деловање знатног броја хемикалија и животних намирница, допринела је широкој примени алуминијума у хемијској и прехранбеној индустрији, као и у домаћинству. Алуминијум се употребљава и за метализацију (алитирање) у бродоградњи, вагоноградњи и архитектури. Осим тога, технички чист алуминијум се користи као дезоксидатор у металургији челика и као састојак мешавине за термитно заваривање.

Природна отпорност алуминијума на корозију често се вештачки поправља поступком елоксирања, тј. повећањем почетне дебљине спонтано формираног оксидног слоја (Al_2O_3) дебљине 0.10 на 10 μm . Елоксирањем се углавном постиже ефикасна заштита посуђа у хемијској и прехранбеној индустрији (сл. 1.12). Од укупне количине произведеног технички чистог алуминијума прерађује се око 35% у полупроизводе, а око 65% служи за производњу алуминијумских легура (силумина, дурала и тсл.).

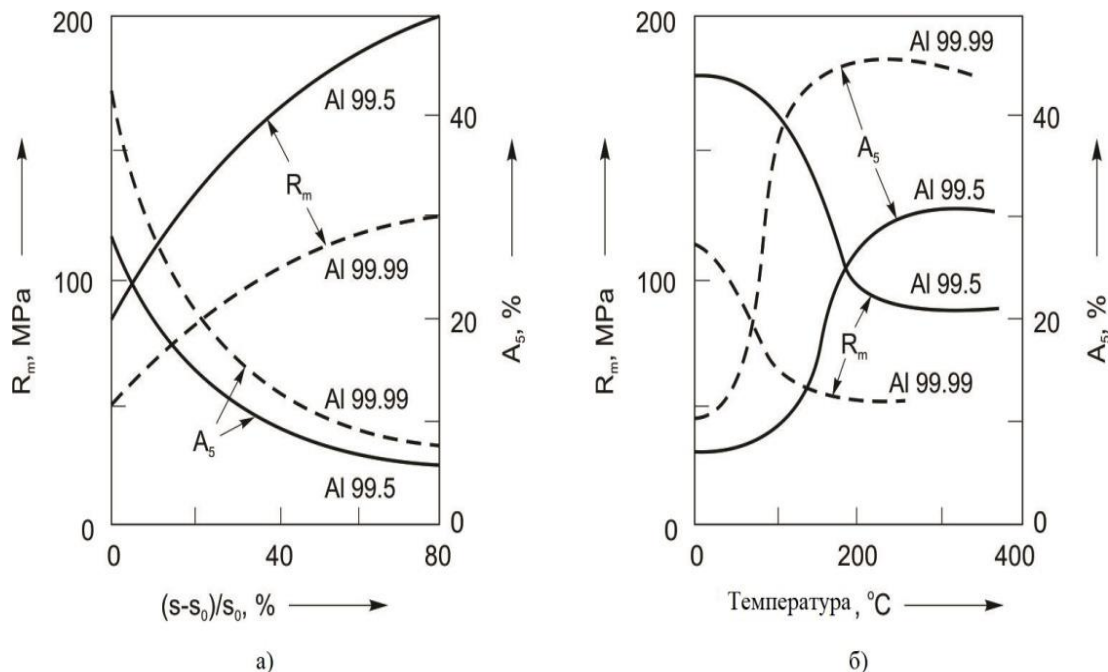


Слика 1.12 Посуђе од алуминијума

1.10 Механичке и технолошке особине чистог алуминујума

Технички чист алуминијум има релативно ниска својства отпорности, која се могу поправити пластичном прерадом на хладно. На величину деформационог ојачања, при истом степену прераде, утиче чистоћа алуминијума (сл. 1.13а); ток опорављања, тј. пораст издужења- $A_{5.65}$ и смањење јачине- R_m , при рекристализационом жарењу, дат је на слици 1.13.б. Степен прераде на хладно дефинише се односом $(s-s_0)/s_0$, где је: s_0 - почетна, а s - крајња дебљина деформисаног лима, трака и тсл.

У току опорављања код алуминијума настаје полигонизација (издужена зрна постају равноосна), што успорава појаву и раст нових зрна. Код веома чистог алуминијума и већих степена прераде те промене започињу већ и на собној температури. Рекристализациона температура Al 99.5% при средњем степену прераде, износи око 150°C (сл. 1.13б). У пракси се рекристализационо жарење алуминијума обавља на температури 300-400°C.



Слика 1.13 Промена јачине R_m и истегљивости $A_{5.65}$ технички чистог алуминијума:
а) у зависност од степена прераде на хладно $(s-s_0)/s_0$; б) у зависности од температуре рекристализационог жарења ($(s-s_0)/s_0=50\%$, време жарења 1h)

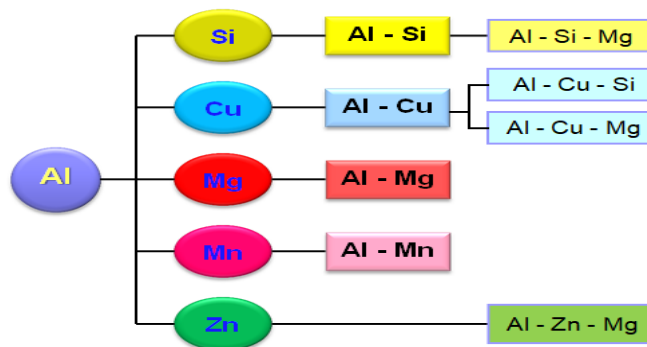
Прерада алуминијума на топло, како је уосталом то правило и код других метала, одвија се изнад температуре рекристализације, углавном при 350-500°C. Алуминијумски полупроизводи добијени деформисањем; шипке, профили, цеви, лимови, траке и жице израђују се од топионичких производа - гредица или стубова добијених континуалним ливењем. Жице већег пречника израђују се у две фазе: најпре ваљањем, а потом вучењем. Жице мањих пречника обликују се вучењем на хладно кроз калибрисане отворе у челичној плочи.

2. Преглед легура алуминијума

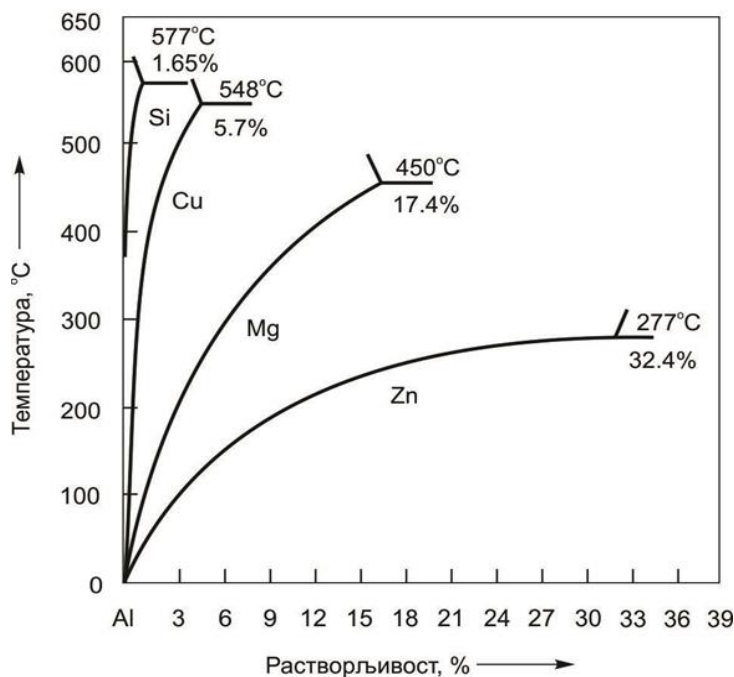
2.1 Подела легуре алуминијума

Легура је фина механичка смеша два или више елемента од којих је барем један метал. Легирајући елементи могу са основним металом да формирају једну фазу, тзв. чврсти раствор (једнофазне легуре) или више различитих фаза (вишефазни системи). Особине једнофазних легура зависе углавном од хемијског састава тј. удела легирајућег елемента, док код вишефазних легура облик, удео и расподела различитих фаза и микроструктура играју одлучујућу улогу. Легура има особине метала али оне могу бити знатно различите од особина чистих компонената из којих се легура састоји. Особине легура се могу поправити променом структуре, тј. легирањем, пластичном прерадом на хладно (ваљањем, ковањем) и термичком обрадом (жарењем, каљењем и отпуштањем).

Механичке и технолошке особине чистог алуминијума (пластичност и ливкост), могу се поправити легирањем елементима: Si, Cu, Mg, Mn, Zn (сл. 2.1) који граде са алуминијумом ограничене чврсте растворе, а вишак образује хемијска једињења Al-легирајући елемент. Гранични чврсти раствори ових елемената у алуминијуму дати су на слици 2.2.

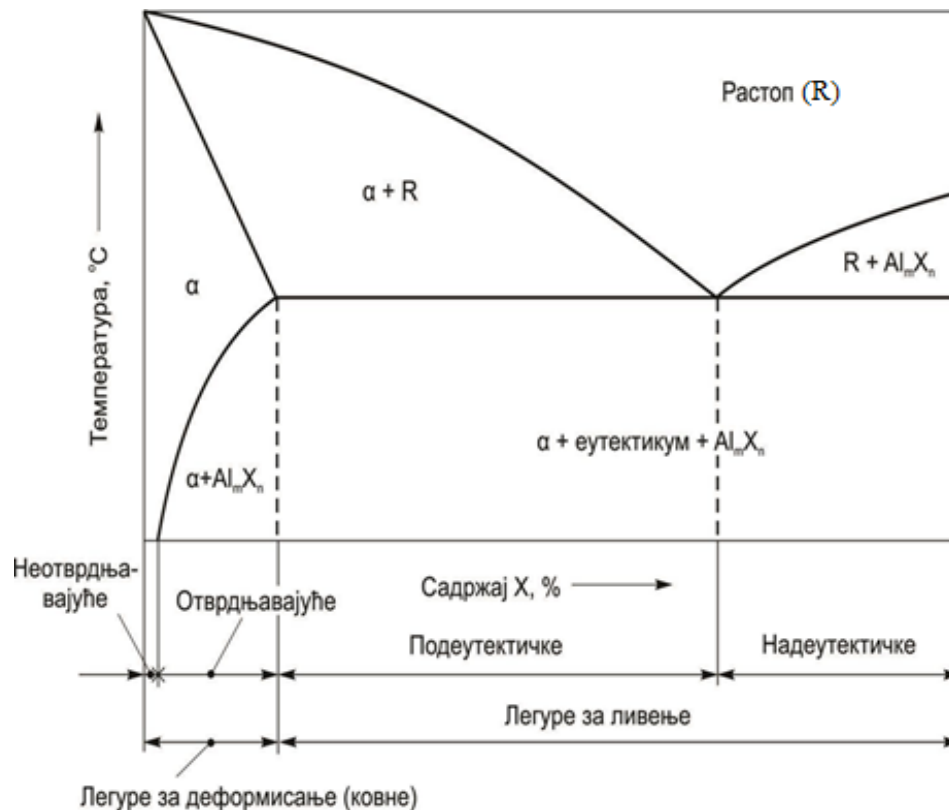


Слика 2.1 Легирање алуминијума различитим елементима



Слика 2.2 Растворљивост Si, Cu, Mg и Zn у алуминијуму

О погодности легура алуминијума за пластичну прераду може се закључити разматрањем равнотежног дијаграма Al-легирајући елемент. У циљу упрошћења биће приказан уопштени бинарни систем Al-X (сл. 2.3), иако су алуминијумске легуре претежно вишекомпонентне. Хомогене легуре, или легуре које се загревањем могу превести у хомогено стање (α -фаза), имају добру истегљивост па су погодне за пластичну обраду (ваљање, ковање, пресовање), укратко се каже да су ковне. Легуре које у структури садрже еутектикум погодне су за ливење. Код неких легура на собној температури настаје преципитација тј. таложно ојачавање (излучивање честица унутар металних зрна). Преципитационо ојачавање се као вид термичке обраде понекад избегава, јер пораст механичких особина може бити праћен падом корозивне отпорности.



Слика 2.3 Шема бинарног равнотежног дијаграма Al-X (X-легирајући елемент)

Из горе поменутог разматрања и слике (дијаграма) 2.3 може се закључити да постоје две врсте Al-легура, тј. да их можемо поделити према начину технолошке прераде на:

- 1) Легуре алуминијума за пластичну прераду (ковне легуре) и
- 2) Легуре алуминијума за ливење (ливачке легуре).

Такође, легуре можемо их поделити према броју главних додатих елемената (компоненти) на:

- двојне (бинарне),
- тројне (тернарне) и
- вишекомпонентне (сложене).

Поступци прераде Al-легура су следећи:

- ваљање (у врућем или хладном стању),
- пресовање или истискивање (у врућем стању),
- ковање (у врућем или хладном стању),
- вучење (у хладном стању) и
- извлачење (у хладном стању).

2.2 Основне карактеристике Al-легура у односу на челик

Као што је већ речено, легирањем чистог алуминијума побољшавају се механичке и технолошке особине. У овом делу биће упоређене Al-легура и челик, као највише коришћен материјал у техничкој пракси. Најбитније разлике су:

- отпорност на корозију,
- понашање на ниским и високим температурама,
- мала специфична тежина и механичка својства.

2.2.1 Отпорност на корозију

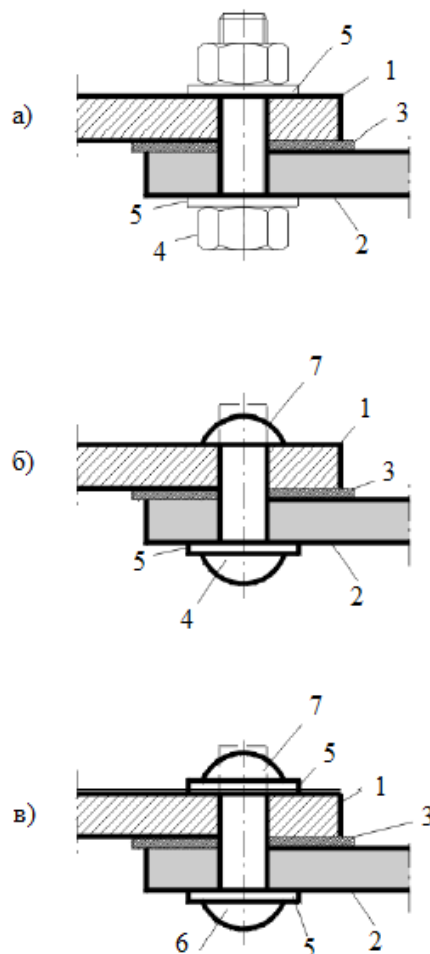
Отпорност према корозији као што је већ речено у делу 1.7, код алуминијума, се постиже образовањем заштитног оксидног слоја Al_2O_3 . Природни слој алуминијум оксида обезбеђује високо ефикасану антикорозивну заштиту. При корозији алуминијума, услед његовог дејства, на годишњем нивоу долази до губитка само $2-4 \text{ g/m}^2$. Док код челика, приликом дејства корозије, долази до губитка око 80 g/m^2 . Пошто, алуминијум има добру отпорност на корозију, може се примењивати без заштитних премаза, али постоји опасност од контактне корозије.

Код контактне корозије, због разлике електрохемијског потенцијала алуминијума и других елемената (таб. 2.1), у присуству електролита, настају галванске струје које доводе до разградње електрохемијски негативнијег материјала.

Таблица 2.1 Стандардни електродни потенцијали одабраних метала, E°

Метал, јон	Стандардни потенцијал, V	Метал, јон	Стандардни потенцијал, V
Mg, Mg^{++}	-2.34	Sn, Sn^{++}	-0.14
Al, Al^{+++}	-1.660	Pb, Pb^{++}	-0.126
Zn, Zn^{++}	-0.763	H_2 , H^+	0.000 (референтан)
Cr, Cr^{++}	-0.71	Cu, Cu^{++}	+0.337
Fe, Fe^{++}	-0.440	Hg, Hg^{++}	+0.800
Cd, Cd^{++}	-0.40	Ag, Ag^+	+0.800
Co, Co^{++}	-0.28	Pt, Pt^{++}	1.2
Ni, Ni^{++}	-0.250	Au, Au^{++}	1.7

Из таблице 2.1 може се закључити да алуминијум има знатно нижи стандардни електродни потенцијал у односу на гвожђе. Алуминијум је прекривен танком превлаком оксида, која успорава корозију, тј. алуминијум кородира мање интензивно. Уколико дође до међусобног контакта дошло би на крају до анодног растварања алуминијума. Због тога, треба да се посвети посебна пажња како би се контактна површина између ова два метала изоловала. То се може учинити различитим повезивањима ова два метала, уметцима, подметачима, премазима и тсл. (сл. 2.5).



1- челични део конструкције; 2- алуминијумски део конструкције; 3- изолирајући уметак од синтетичког материјала; 4- глава челичног завртња, односно глава челичног закивка;
5- поцинкована или кадмијумска подложна плоча; 6- глава алуминијумског закивка;
7- обликована глава закивка

Слика 2.5 *Изолација контакта алуминијума и челика: а) челичног завртња; б) челичног закивка; в) алуминијумског закивка*

2.2.2 Понашање на ниским и високим температурама

Када је у питању примена алуминиума у средини са нижим температурама, погоднији је од челика, јер је:

- алуминијум отпорнији на крти лом, тј. ударна жилавост је већа и
- долази до повећања дуктилности и затезне чврстоће.

Што се тиче понашања Al-легура на високим температурама у односу на челик оне имају:

- слабу ватроотпорност,
- лоша механичка својства која много брже опадају,
- знатно већа издужења и
- много мањи модул еластичности.

2.2.3 Тежина и механичка својства Al-легура у односу на челик

Алуминијум има малу специфичну густину, која износи 2.7 g/cm^3 , док гвожђе има 7.874 g/cm^3 . Из тог разлога може се закључити да алуминијум има:

- око три пута мању специфичну тежину у односу на челик,
- лакшу конструкцију него конструкција код челика и
- мање трошкове транспорта и монтаже.

Механичка својства Al-легура у односу на челик:

- модул еластичности је три пута мањи него код челика,
- граница развлачења и јачина на кидање варирају у зависности од врсте Al-легура и
- издужења при лому су мања него код челика исте геометрије.

3. Опис термичке обраде неких легура алуминијума

3.1 Термичка обрада

Термичка обрада је поступак обраде метала и легура постепеним загревањем до одређене температуре и регулисаним хлађењем да би се извршила промена структуре и добила одговарајућа механичка својства. Основни параметри термичке обраде су температура загревања, време загревања и време хлађења, а бирају се за дати квалитет на основу:

- препоруке произвођача – каталога,
- на основу егзактних метода,
- практичних метода и
- рачунских метода.

У зависности од врсте материјала и потребних својства одређују се методе и режим термичке обраде. Основне методе термичке обраде су:

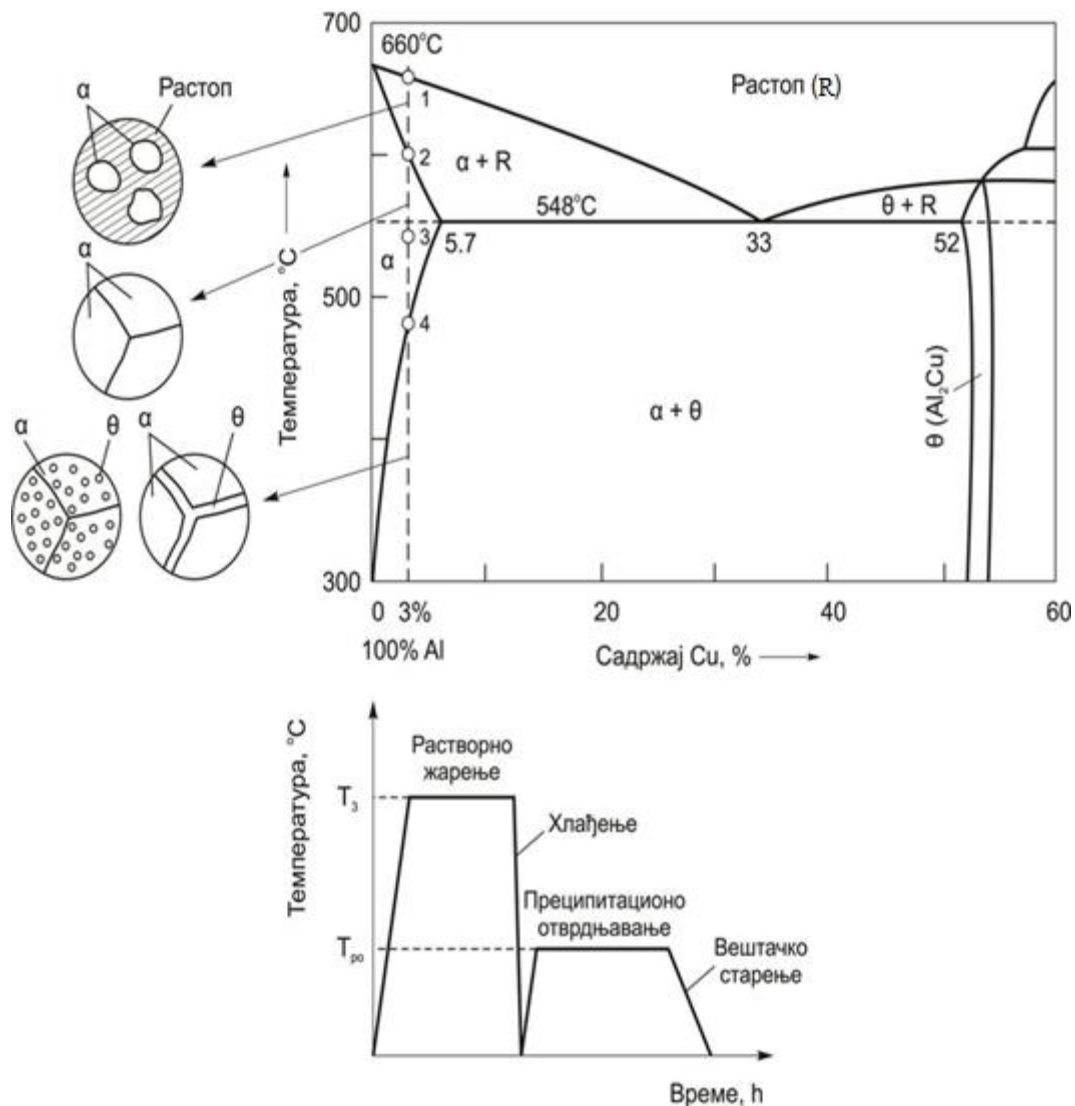
- Жарење,
- Каљење и
- Отпуштање.

Метали и легуре имају кристалну структуру. У структури атоми су правилно распоређени просторно и међусобно повезани у систему кристалних решетки. Атоми осцилују око својих равнотежних положаја у хладном и топлом стању. При загревању и хлађењу долази до премештања атома у кристалној решетки.

3.2 Структура и термичка обрада легура алуминујума

Одливци алуминијумских легура, па чак и неке легуре у стању после прераде на хладно, често имају малу јачину, уз истовремено високу истегљивост. Јачина се може повећати термичком обрадом која се састоји из загревања предмета до нешто изнад солвус линије, држања (прогревања) при тој температури и затим брзог хлађења у води; овако се задржава пресићен чврст раствор и на околној температури. Термички третман који обухвата загревање, прогревање и хлађење зове се презасићење. После тога одвијају се веома сложени металуршки процеси таложног (преципитационог) ојачавања, које се назива старење. Ова појава донедавно је објашњавана дисперзионим излучивањем нове фазе из презасићеног чврстог раствора. Типична термичка обрада већине Al-легура управо је преципитационо отврдњавање, настало таложењем фино диспергованих честица које делују као препрека кретању дислокација што ојачава легуру.

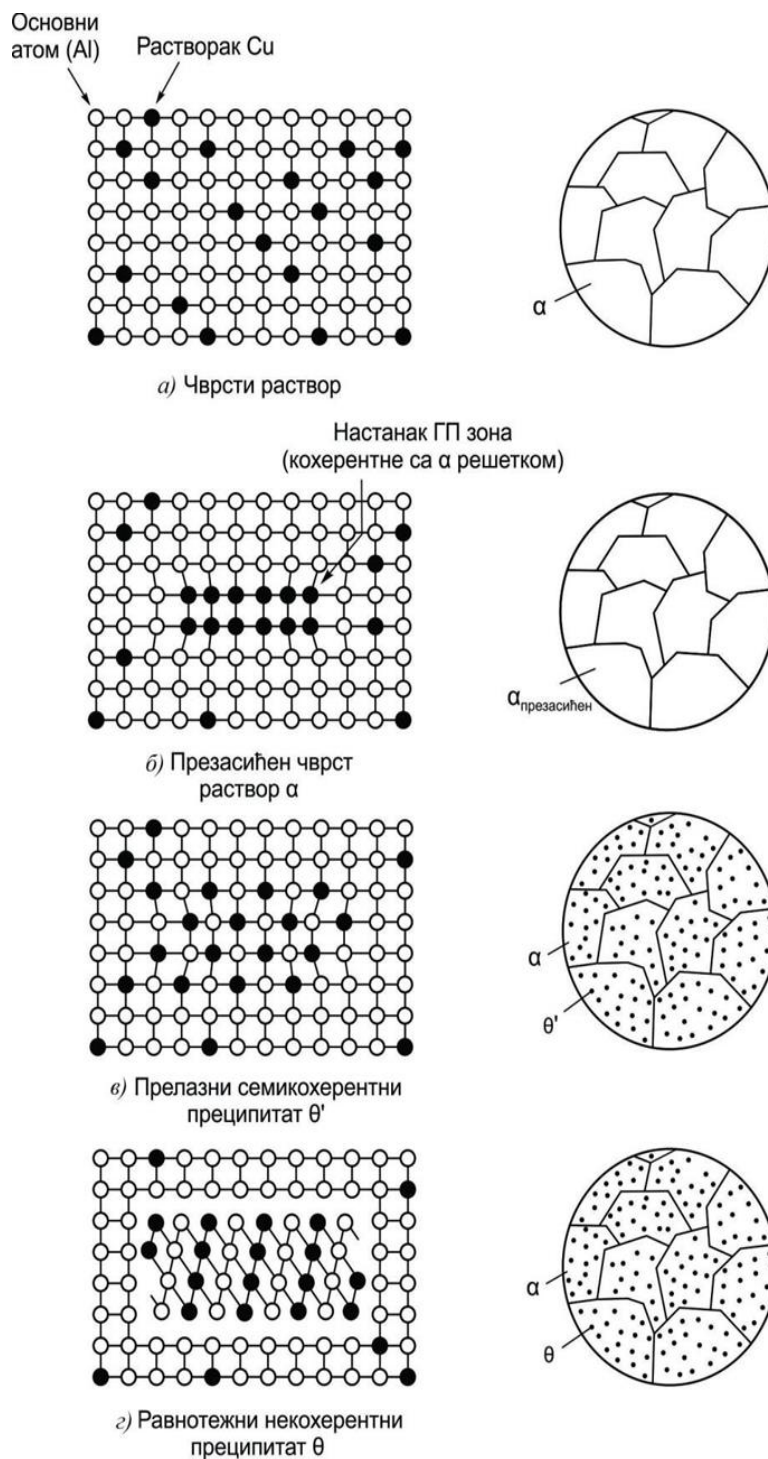
Суштина микроструктурних процеса који се одвијају при таложном ојачању може се најлакше објаснити на примеру бинарног система Al-Cu (сл. 3.1). Растворљивост Cu у чврстом раствору α опада са 5.7% при 548°C на свега 0.10% на собној температури, чиме је испуњен основни услов за образовање презасићеног чврстог раствора при брзом хлађењу из α -зоне. Загревањем хетерогене ($\alpha + \theta$) легуре која има 3% Cu, она се може превести у хомогену (α -фазу); прогревање у тачки 3 зове се растворно жарчење. При брзом хлађењу α -фаза ће се задржати и на околној температури. Међутим, то стање је нестабилно, па ће убрзо почети излучивање једињења Al_2Cu , тј. θ -фазе унутар и по границама алуминијумских зрна. Релативни удео θ -фазе ако се почетни састав легуре приближава максималној растворљивости бакра (5.7%) у α -фази (слике 2.2 и 3.1).



Слика 3.1 Бинарни равнотежни дијаграм Al-Cu (горе) и шематски приказ температура растворног жарења и отврђавања (доле)

На слици 3.2а, приказана је кристална мрежа алуминијума у којој су по закону случајне расподеле смештени атоми бакра (Cu). На доњим мрежама (сл. 3.2б,в,г) виде се Гиније-Престонове (*Guinier-Preston*) зоне (GP-зоне) у којима се у току старења групишу атоми Cu. Формирање ових зона одвија се у три етапе:

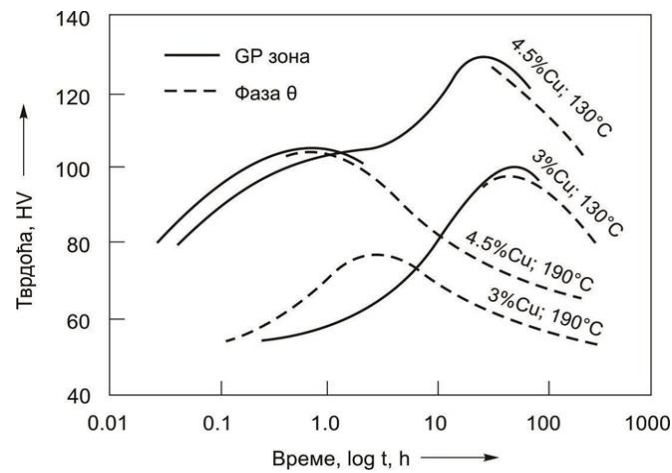
- У првој етапи (сл. 3.2б), се у једној области нагомилавају атоми бакра; они имају радијус атома мањи од Al, па се решетка локално скупља, док се задржава кохеренција између равни основе и равни талоба, што доводи до великог пораста тврдоће и ојачања легуре. Ова етапа при вештачком старењу траје до 100°C (сл. 3.3).
- У другој етапи старења (сл. 3.2в), бакар се концентрише на појединим местима па се образују једињења Al_2Cu која изазивају преплитање металних јона и појаву семикохерентних преципитата θ' .
- У трећој етапи, преципитати фазе θ се групишу у равнотежне мреже и губе кохерентност са равнима основе (сл. 3.2г). Даљи пораст температуре и времена старења доводи до пада тврдоће и јачине, па се каже да је легура престарела.



Слика 3.2 Шематски приказ етапа старења и микроструктура легуре AlCu3

Отврдњавању легуре Al-Cu једним делом доприноси напонско поље у кристалној решетки, а другим делом преципитационо старење; новонастале структуре се не могу уочити оптичким металографским микроскопом, већ само електронским микроскопом.

Процес отврдњавања може се убрзати вештачким старењем, тј. прогревањем презасићене легуре до испод солвус линије и задржавањем на тој температури (доња слика 3.1). Слика 3.3 дате су две легуре различитих % Cu и ток отврдњавања са протоком времена.



Слика 3.3 Пораст тврдоће HV у зависности од времена старења за две легуре Al-Cu (3% Cu и 4.5% Cu) и две температуре старења (130 и 190°C)

Брзина старења расте са повишењем температуре, али само до неке граничне температуре изнад којих нема нових GP-зона, па остаје једино преципитационо отврдњавање.

Сличне промене микроструктуре, праћене ојачавањем и отврдњавањем дешавају се и код других сложенијих система као што су вишекомпонентне легуре алуминијума.

4. Легуре алуминијума за деформисање

4.1 Обрада деформисањем

При обради метала деформисањем, подразумевају се оне методе обраде при којима се метал даје жељени облик. Методе обраде метала пластичним деформисањем су многобројне и оне налазе најширу примену у металској индустрији (металопрађивачкој, моторној, авионској, индустрији полуфабриката прецизној механици и тсл.).

Циљ овог начина прераде јесте да се најмање могућим шкартом материјала и са најмањим бројем радних операција добију комади у коначном облику, тако да се исти комади уз минималну дораду са скидањем струготине или без ње, могу непосредно употребљавати или уградити у одговарајући склоп.

Да би се материјал могао прерађивати, потребно га је довести у стање пластичног течења, што значи да га треба оптеретити изнад границе течења материјала. Уколико се материјал оптерети изнад границе развлачења (границе пластичног течења), тада се он трајно деформише, а овај начин се означава као обрада пластичном прерадом.

Пластична прерада метала се може изводити у хладном или врућем стању. Са порастом температуре метала опада отпор којим се метал супроставља деформисању и олакшавају се услови обраде. Да ли ће се процес изводити у врућем или хладном стању, зависи од низа фактора. То су пре свега: облик, димензије, квалитет почетног материјала и тсл. С обзиром на облик почетног материјала, пластична прерада обухвата:

1. Прераду лимова, који се прерађују у процесима:
 - савијања,
 - дубоког извлачења (сл. 4.1) и
 - разним пластичним обликовањем.
2. Прераду компактних тела, који се прерађују у процесима:
 - пресовања,
 - истискивања и
 - ковања.



Слика 4.1 Пример дубоког извлачења, судопера

4.2 Легуре алуминијума за прераду деформисањем (ковне)

Најчешћи легирајући елементи код ових легура су Mn, Mg, Cu, Zn и Ni.

- Манган (Mn) се незнатно раствара у α -фази; повећава јачину, ковност, рекристализациону температуру, отпорност на корозију и ограничава раст зрна при растворном жарењу.
- Магнезијум (Mg) доводи до пораста јачине, деформационог ојачања и отпорности на корозију.
- Бакар (Cu) ојачава легуру при преради на хладно (дурал, супердурал које се највише примењују у авио-индустрији).
- Никл (Ni) позитивно утиче на механичке особине нарочито на вишим температурама, као и отпорност према корозији.
- Литијум (Li) се као релативно нов легирајући елемент примењује код легура Al које су намењене за авио-индустрију.

4.3 Ковне легуре алуминијума које таложно не ојачавају

Овде спадају двокомпонентне легуре Al-Mn и Al-Mg (таб. 4.1). Легуре Mn се испоручују у облику лимова, штапова, цеви, жица, профила. Садржај Mn ограничава се на 1.5%, јер се већ при 2% Mn образују примарни кристали фазе Al_6Mn , који погоршавају механичке особине.

Таблица 4.1 Легуре Al за пластичну прераду (бројеви иза легирајућег елемента означавају садржај, тог елемента)

Хемијски састав легура	Примена
AlMn1	Мање оптерећени делови у хемијској и прехранбеној индустрији, заварени резервоари за течности и гасове; служи за платирање.
AlMg1, AlMg2, AlMg3, AlMg5	Компоненте транспортних средстава, хемијска и прехранбена индустрија, грађевинарство. Легуре AlMg5 познате су под називом хидроналиум.
AlCu4Mg AlCu4Mg1	Авиони, друмска возила, аутомобили (дурал и супердурал); по потреби се елоксирају.
AlCu2Mg	Закивци.
AlCu2Mg2Ni AlMg1Si	Компоненте турбокомпресора, авио и ауто индустрија, прехранбена индустрија, прецизна механика.
AlMgSiFe	Електропроводљива легура.
AlZn4Mg1	Компоненте за средства ваздушног и железничког транспорта, судови под притиском.
AlZn6Mg2Cu	Високо оптерећене компоненте.

Легуре Al-Mn склоне су ка крупнозрнастој и стубичастој кристализацији, што се спречава микролегирањем са Ti, B, Zr. Ове легуре имају добру отпорност на корозију, добру заварљивост, а после прераде на хладно достижу $R_m = 200 \text{ MPa}$ (деформационо ојачање).

Легуре Al-Mg. Растворљивост Mg у Al већа је него Mn, али се избегава преципитационо отврдњавање, јер би незнатно повећање јачине довело до великог пада истегљивости. Зато се производе легуре које садрже до 5% Mg, јер пораст Mg значи и већи удео фазе β (Al_3Mg_2) која погоршава обрадивост деформацијом и отпорност на корозију.

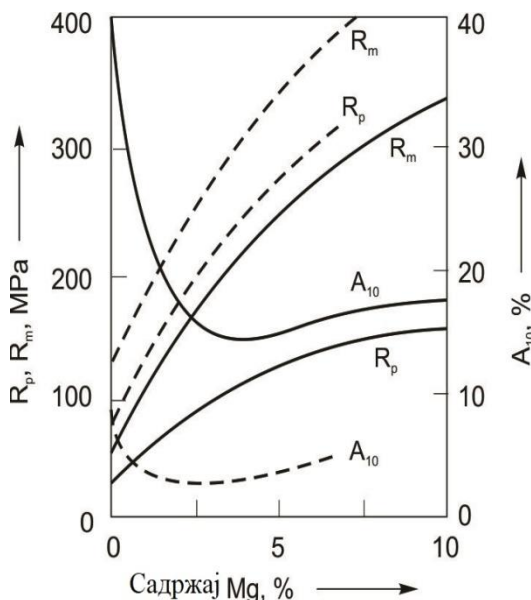
Зависност механичких особина пластично прерађених легура Al-Mg од њиховог хемијског састава и стања дата је на слици 4.2. Јако ојачане легуре Al-Mg лако се опорављају, често и на температури околине, а задржавају добре механичке особине и при ниским температурама. Отпорне су на корозију у води и у атмосфери сланих испарења.

4.4 Ковне легуре које таложно ојачавају – термички обрадиве легуре

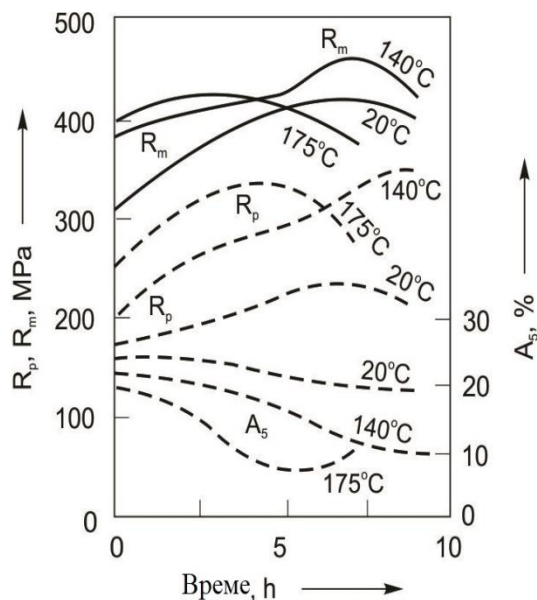
Ове се легуре сврставају у три групе:

- Al-Cu-Mg-(Ni) (дурал и супердурал),
- Al-Mg-Si и
- Al-Zn-Mg-(Cu).

Легуре састава Al-Cu4-Mg називају се дурали, а легуре са повећаним садржајем магнезијума супердурали (Al-Cu4-Mg1). Ојачавање ових легура постиже се растворним жарењем и таложним отврдњавањем које траје неколико дана. За то време излучује се тврда фаза Al_2CuMg која доводи до пораста напона течења и јачине, али пада издужење A_5 (сл. 4.3). Са ове слике се такође уочава да максимално ојачање одговара вештачком старењу при $140^\circ C$, али је ојачање праћено великим падом истегљивости. Зато је боље оставити радне предмете да природно остаре при $20^\circ C$, чиме се постиже јачина од 400 MPa код дурала и 450 MPa код супердурала. Дурали су мање отпорни на атмосферску корозију него чист алуминијум, па се често елоксирају (наносе се заштитне превлаке од технички чистог алуминијума (99.5%)). Може се обрађивати пластичним деформисањем и на топло и на хладно. Јачина супердурала је после природног старења око 450 MPa , а после хладног обликовања и преципитације достиже чак 480 MPa .



Слика 4.2 Утицај Mg на механичке особине легуре Al-Mg за деформисање у жареном стању (пуна линија) и у ојачаном стању (испрекидана линија)



Слика 4.3 Зависност механичких особина легуре Al-Cu4-Mg1 од времена и температуре старења (испрекидана линија)

Легуре Al-Cu-Ni имају додаток до 2% Ni који спречава пад тврдоће на повишеним температурама (до 200°C). После преципитације постиже се: $R_m = 400 \text{ MPa}$ и $A_5 = 20\%$.

Легуре Al-Mg-Si такође, ојачавају старењем, али имају мању јачину и бољу жилавост и антикорозивне особине, него легуре Al-Cu-Mg. Таложно отврдњавање изазива сегрегат Mg_2Si . Комбинацијом прераде на хладно и сегрегације добија се R_m до око 400 MPa. Ове легуре се највише користе за транспортну опрему и у прехранбеној индустрији.

Новији развој довео је до појаве тернарних легура Al-Li-Mg и кватернарних Al-Li-Cu-Mg, а за авио-индустрију и легура Al-Li (+Zr) која има знатно већу јачину од до сада коришћених легура, па се њиховом применом маса (тежина) авиона смањује за око 7.5%.

Ако се после природног старења не може постићи довољна отпорност на корозију, изводи се елоксирање или платирање. Дурали и супердурали испоручују се као лимови, алуминијумом платирани лимови, отковци, штапови, цеви, профили (пре свега за авионску индустрију).

5. Легуре алуминијума за ливење

5.1 Технологија ливења

Технологија ливења је део машинске (механичке) технологије која проучава начин секундарне прераде металних полупроизвода тј. методе даље прераде железарских или топионичких производа. Ливење представља технологију обликовања металних предмета ливењем растопљеног метала у формиране калупе помоћу модела, да би се после хлађења добио одливак. Ливење је веома погодан поступак израде машинских делова чији је облик сложене конфигурације са унутрашњим контурама и неправилним отворима и каналима.

Ливени предмети или одливци добијају се директним очвршћавањем растопљеног метала у одговарајућој шупљини (форми). Ливачки калуп као целина у ствари је посуда, чија унутрашњост по облику и димензијама верно одсликава предмет који ће се излити. Ливење се примењује у бродоградњи, постиже се поједностављење конструкција. У аутомобилској индустрији ливени делови се користе као блокови, главе мотора и тсл. (сл. 5.1).

С обзиром на материјал одливка разликују се:

- ливачке легуре гвожђа и
- ливачке легуре нежелезних метала (углавном алуминијума, бакра, цинка, магнезијума и других метала).

Најпознатији начини ливења су:

- ливење у пешчаним калупима,
- ливење под притиском,
- ливење у металним калупима (кокилама),
- центрифугално ливење,
- континуално (непрекидно) ливење,
- гравитационо ливење и тсл.

Технички чист алуминијум има рђаве ливачке особине, те се од њега праве само танкозидни одливци за електротехничке потребе (наставци каблова, контактни завршеци каблова и тсл.). Супротно чистом алуминијуму, Al-легуре имају врло добре ливачке особине, а заузима прво место међу свим ливачким легурама. Други је разлог што се Al-легуре лако производе и дају одливке високог квалитета добијених различитим методама ливења.

За топљење алуминијума и његових легура користе се тигл пећи (од ливеног гвожђа или графита), ложене мазутом или горивим гасом (земним гасом) као и индукционе пећи (велика продуктивност и лака регулација). Долазе у обзир и електроотпорске пећи. Алуминијумски ливови припремају се од гредице Al-легура добијених у топионици, било од отпадног материјала или у алуминијумским комбинатима. Као топител употребљава се калијум хлорид (KCl), а као средство за рафинацију користи се лакотопљиви минерал криолит.



Слика 5.1 Алуминијумски блок мотора добијен ливењем

5.2 Легуре алуминијума за ливење

За разлику од ковних, легуре за ливење карактеришу се већим садржајем легирајућих елемената (Si, Cu, Mg, Mn, Ni), што доприноси већем уделу еутектике у структури а тиме и бољој ливкости. Повољне технолошке особине Al-легура омогућавају ливење у пешчаним калупима, кокилама или ливење под притиском. Начин ливења утиче на особине одливака, слично као и хемијски састав или термичка обрада. Тако се нпр. при ливењу под притиском калупи брзо хладе, па се добија ситнозрнаста структура одливака у којима је α -фаза презасићена примесама, те се одвија природно старење и без претходног растворног жарења.

Чист алуминијум је мале јачине и лоше ливкости, па се одливци од технички чистог алуминијума израђују само за потребе електротехнике (добра електрична проводљивост). Насупрот чистом алуминијуму, неке његове легуре имају добру ливкост, те су погодне за израду танкозидних делова сложеног облика. Алуминијумске легуре лију се у влажним пешчаним калупима, у металним калупима (кокилама) или под притиском. Такође, неке ливачке легуре могу преципитационо отврдњавати, а код других тај начин отврдњавања може бити штетан због пада истегљивости и корозивне отпорности.

5.3 Ливачке легуре које таложно не ојачавају - термички необрадиве легуре

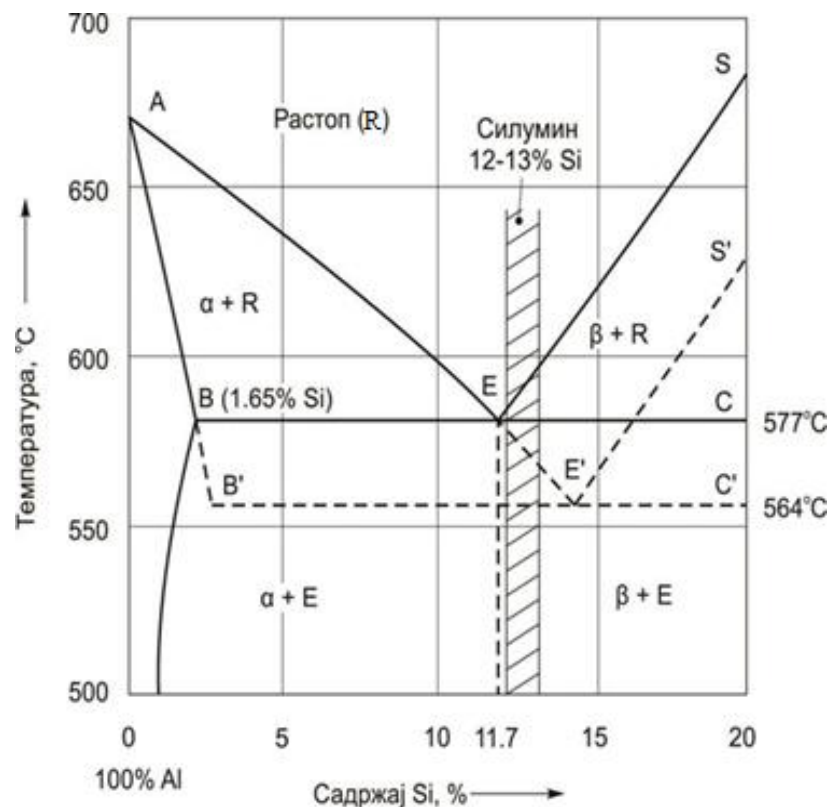
У ову групу се убрајају вишекомпонентне легуре типа Al-Si, Al-Mg и Al-Cu (таб. 5.1).

Таблица 5.1 Одабране ливачке легуре алуминијума

Ознака хемијског састава	Примена
AlSi13Mn	Танкозидни одливци, непропустљиви за течност.
AlSi10Mn	Прибор који долази у додир са животним намирницама.
AlMg5SiMn	Ребрасте цилиндарске главе СУС, компоненте у архитектури.
AlMg9MnBe	Одливци отпорни у атмосфери и морској води.
AlSi10MgMn	Танкозидни одливци у авио и ауто-индустрији.
AlSi12Ni2Cu	За рад на високим температурама (клипови мотора СУС).
AlSi8Cu4Mn	Високооптерећени сложени одливци (блок мотора).
AlCu4Ni2Mg	Клипови већих димензија.
AlCu8FeSi	Кућишта и кошуљице клизних лежишта.

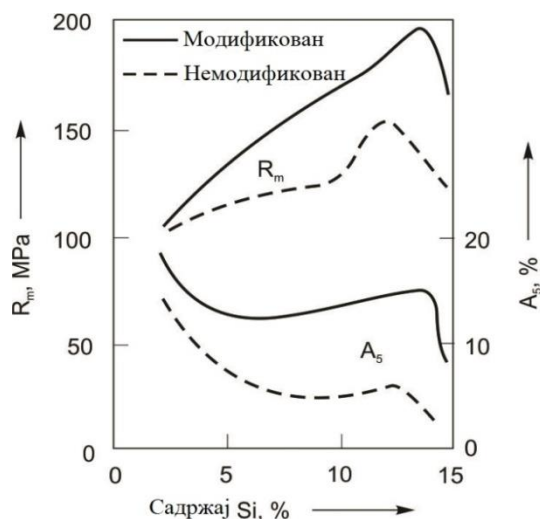
Легуре типа Al-Si, тзв. силумини садрже 5-20% Si и друге додатке, углавном Mn, који елиминише неповољан утицај примеса Fe на истељивост, жилавост и ливачке особине. Додатком Cu повећава се заморна јачина (динамичка чврстоћа), мада се погоршава отпорност према корозији. Најбоље ливачке особине имају еутектички силумини који садрже 9-13% Si (сл. 5.2). Еутектику образују фазе ($\alpha + \beta$); β -фаза представља чисте кристале Si, јер је Al нерастворљив у Si. Чист силицијум брже кристалише него чврст раствор Si у Al, па α -фаза ће каснити за β -фазом (чистим Si).

Равномерна кристализација ($\alpha + \beta$) би била повољнија, јер даје ситнозрнасту структуру. Силумински лив се модификује додацима (0.10% Na или 2% NaCl + NaF) који смањује брзину кристализације β -фазе. На тај начин растоп очвршћава уз веће потхлађивање те настаје ситан еутектикум. Захваљујући потхлађивању, еутектичка температура се снижава са 577 на 564°C (сл. 5.2), што одливку даје боље механичке особине. Модификација није неопходна при ливењу у кокилама или под притиском, јер тада настаје спонтано потхлађивање металним калупима. Утицај модификације на положај еутектичке легуре приказан је тачком E' на слици 5.2.



Слика 5.2 Равнотежни дијаграм легура Al-Si

Силумини имају малу густину (2.65 g/cm^3), добру отпорност према корозији и добре ливачке особине, добру течљивост, мало скупљање (0.50%) и незнатну склоност ка прслинама, али се тешко полирају. Пораст Si доводи до повећања јачине и до благог пада истељивости силумина (сл. 5.3).

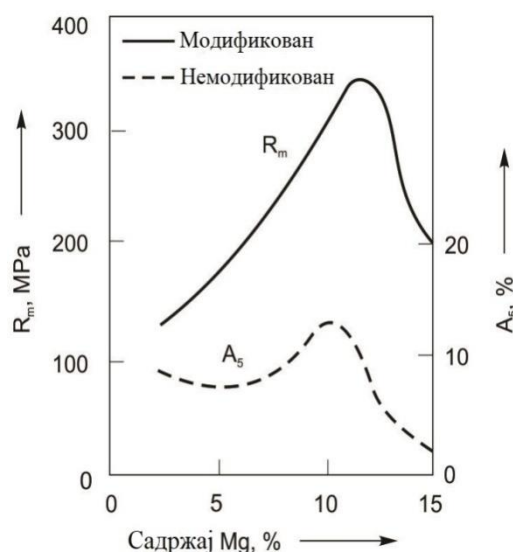


Слика 5.3 Утицај Si на механичке особине силумина ливених у кокилама

Легуре алуминијума припремају се за ливење у гасним јамским пећима, електропећима (отпорским и индукционим), и у пећима на чврсто или течном гориву. За производњу лива полазни материјали су алуминијумске гредице из топионица, повратни материјали (производни отпад), струготина, понекад и предлегури; пећ се пуни осушеним предгрејаним материјалом, а у току хлађења додају се легирајући елементи (при око 700°C). Затим се температура повећава на 800°C и лив испушта у преносни лонац у коме се обавља растварање (дегазација).

Поред силумина за ливење се још употребљавају легуре: Al-Mg и Al-Cu и тсл. Легуре типа Al-Mg садрже 3 до 11% Mg. Уз мали додатак Mn елиминише се штетан утицај примеса Fe, а додатак Si побољшава ливачке особине. У микроструктури се јављају фазе α , сегрегат β (Al_3Mg_2), као и нерастворљива фаза AlFeMnSi, а код легура ливених под притиском или у кокилама јавља се и 6 до 7% еутектикума ($\alpha + Al_3Mg_2$).

Појава еутектике при Mg < 7% последица је неравнотежне кристализације при убрзаном хлађењу у кокили. Садржај Mg утиче на промену механичких особина, као што је приказано на слици 5.4. Легуре Al-Mg лију се у песку и кокилама, лаке су (2.5 g/cm^3), високоотпорне према корозији и добро се полирају.



Слика 5.4 Утицај Mg на механичке особине легура Al-Mg ливене у пешчаним калупима

Легуре Al-Cu се употребљавају за цилиндарске главе мотора СУС. Имају велики температурски интервал кристализације, па стога и лоше ливачке особине, као и склоност ка прслинама при очвршћивању одливака. Понекад се додају Si, Zn, а ређе Ni, Mg. Ако легура има низак % Cu (нпр. мање од 3%) структура се састоји од чврстог раствора Cu у Al и секундарног преципитата Al_2Cu али без еутектике.

5.4 Ливачке легуре које таложно ојачавају

Од ливачких легура алуминијума, таложно ојачавају не само легуре Al-Cu, већ и легуре које поред Cu садрже још Mg и Ni, као и остале додатке наведене у табlici 5.1. Силумини са додатком Mg преципитационо ојачавају, захваљујући таложењу фазе β' (Mg_2Si). У ојачаном стању достижу $R_m = 200-250 \text{ MPa}$, али је издужење само (1-3%). Добра отпорност на хабање је довела до примене неких легура Al-Cu-Si за клизне лежајеве. После ливења у пешчаним калупима могу се термички ојачати, чиме се достиже $R_m \approx 200 \text{ MPa}$ што је незнатно изнад термички необрађених одливка из металних калупа ($R_m \approx 180 \text{ MPa}$).

6. Примена алуминијума и његових легура у техничкој пракси

Као што је већ више пута споменуто, алуминијум је трећи најбројнији метал у Земљиној кори и трећи најбројнији елемент у целини. Лаган је и савитљив, па алуминијум чини веома употребљивим металом који се користи за свакодневни живот. Чист алуминијум је мекан, дуктилан, отпоран на корозију, мале јачине и лоше ливкости и има велику електричну проводљивост, па се одливци од технички чистог алуминијума израђују само за потребе електротехнике. Неке области машиноградње готово је немогуће замислити без алуминијума и његових легура које, како је познато, могу бити легуре за обликовање и ливење.

Алуминијум је један од најлакших инжењерских метала, а специфични однос чврстоће и тежине (R_m/ρ) је бољи од челика. Насупрот чистом алуминијуму, неке његове легуре имају добру ливкост, те су погодне за израду танкозидних делова сложеног облика. Пошто је чист алуминијум веома мекан, а потребна нам је нешто јача легура, али ипак лагана, издржљива и способна да издржи високе температуре у авиону или аутомобилу, праве се легуре од алуминијума и бакра. За паковање хране не треба бирати легуре велике јачине, већ одабрати легуре које се могу лако обликовати и запечатити. Применом легура алуминијума и магнезијума добијају се те особине.

Алуминијум се нарочито користи као електрични проводник за пренос струје у електричној мрежи. Кад је неопходно смањити тежину, на пример код транспортних машина, смањује се тиме и потрошња горива. То се нарочито односи на свемирске летилице и авионе, као и нека друга средства транспорта. Израда алуминијских лимова је једноставан поступак који укључује пресовање сировог алуминијума између ваљака. Упркос својој једноставности, алуминијумски лим је непроцењив ресурс модерне индустрије. Алуминијски листови се широко користе у аутомобилској, амбалажној, машиноградњи, грађевинарству и ваздухопловству. На слици 6.1 је приказана примена алуминијума и његових легура у пракси.



Слика 6.1 Области примене алуминијума и његових легура у пракси

Најчешћа примена алуминијума је:

- у транспортној техници,
- у електроиндустрији (електрични проводници далековаода),
- у прехранбеној индустрији,
- за различите делове и конструкције у грађевинарству,
- за паковање роба широке потрошње и тсл.

6.1 Алуминијум у транспортној техници

Алуминијум се користи у транспорту због свог повољног односа јачине и тежине (R_m/ρ). Његова мања тежина значи да је за померање возила потребна мања снага, што доводи до мање потрошње енергената (гориво, гас, електрична струја и тсл.). Иако, алуминијум није најјачи метал, легирањем другим елементима (металима) повећава се његова јачина. Његова отпорност на корозију је додатни бенифит, елиминишући потребу за скупим антикорозивним премазима. Овакве легуре алуминијума, знатно се користе код свемирских летилица, авиона и других видова транспорта.

6.1.1 Алуминијум у аутомобилској индустрији

Значај алуминијума је посебно порастао и у индустрији аутомобила. Из литературе се може увидети да од 2010. године, око 35% светске производње алуминијума троши индустрија транспортних средстава. Како људи почињу препознавати важност економичности горива и смањења емисије CO_2 , све више произвођача аутомобила почело је да користи алуминијум у својим конструкцијама. Алуминијумски делови имају могућност да смање тежину на предњем делу возила, пружајући тако веће убрзање које може смањити потрошњу горива.

Важне механичке карактеристике ојачаног алуминијума омогућавају да буде способан да издржи одговарајућу тежину, јер се примењује за израду точкова тешких возила. За то су потребне алуминијумске фелне које издржавају висока оптерећења.

Иако се аутоиндустрија још увек у великој мери ослања на челик, потреба за смањењем потрошње горива и смањењем емисије CO_2 довеле су до много шире употребе алуминијума. Стручњаци предвиђају да ће се просечни садржај алуминијума у аутомобилу повећати за 60% до 2025. године. Ипак та предвиђања треба узети са одређеном резервом.

Најчешће се у аутомобилској индустрији алуминијум примењује за делове као што су:

- системи за заштиту људи (сл. 6.2),
- кровне шине,
- декоративни профили са посебном површинском обрадом,
- делови за шасије и вешења (сл. 6.3),
- компоненте за врата,
- компоненте за шине,
- каросерије теретних аутомобила,
- надogradње и приколице код теретних аутомобила,
- блокови главе мотора (сл. 5.1) и тсл.



Слика 6.2 Профили за заштиту од саобраћајних несрећа



Слика 6.3 Делови за шасије и вешења

6.1.2 Алуминијум у железничкој индустрији

Због својих добрих карактеристика, које поседују алуминијум и његове легуре, велику примену су нашли у железничком саобраћају. Најбољи пример јесте воз Шинкансен Е6 (сл. 6.4) у Јапану и Манглев воз (сл. 6.5) у Шангају. Алуминијум омогућава пројектантима да смање тежину возова, смањујући отпор на трење. Такође, компоненте седишта за возове се праве од легура алуминијума (сл. 6.6).



Слика 6.4 Воз Шинкансен Е6 (Eng. Shinkansen)



Слика 6.5 Маглев воз



Слика 6.6 Седишта за возове

6.1.3 Алуминијум у ваздухопловној индустрији

У ваздухопловној индустрији, за савремене летелице, алуминијум има веома велики значај. Алуминијумски лим се користи у буквално свим деловима савремене летелице, укључујући крила, труп, врата, турбине мотора (сл. 6.7), кугличне лежајеве (сл. 6.8) и тсл.

Авиони морају бити што је могуће лакши, а да притом имају потребну конструкциону моћ ношења, што омогућавају алуминијум и његове легуре. Алуминијум и његове легуре чине чак до 75-80% целокупне масе авиона. Поред мање потрошње енергената, алуминијум је такође високоотпоран на корозију.

Алуминијум је такође познат као “Крилни метал” јер је идеалан за авионе, због тога што је лаган, јак и флексибилан. Свемирске летелице, попут свемирског шатла, садрже од 50% до 90% легура алуминијума у својим склоповима.

Нарочито је употреба алуминијума и његове легуре дуралуминијума (легура алуминијума са бавром и молибденом) јако раширена у индустрији авиона и свемирских летилица. Већи део структуре данашњих комерцијалних авиона састоји се из алуминијумских лимова различитих чврстоћа и легура међусобно спојених.



Слика 6.7 Турбине мотора



Слика 6.8 Куглични лежсај

6.2 Алуминијум за електроиндустрију

Алуминијум се нарочито користи као електрични проводник далековаода (сл. 6.9). За пренос струје на велике удаљености од електрана, до домова и фабрика, могао би да се за то користи бакар, који је најбољи проводник електричне енергије, али је тежак и скуп. Да би се поправила електропроводљивост (слична бакру), једно од решења јесте израда каблова за напајање од алуминијума легираног бором, који проводи струју готово једнако добро као и бакар, али је много лакши и мање топлији у врелим данима. Обично алуминијумске легуре садрже 90-99% алуминијума. Такође, користи се када се ради о великим и дебелим проводницима као што су струјне шине и каблови за уземљење. У овом погледу алуминијум се показао погоднијим и јефтинијим од бакра. Алуминијум је такође дуктилнији од бакра, што му омогућава да се много лакше формира у жице. Његова отпорност на корозију помаже у заштити жица. Легуре алуминијума налазе велику примену и у аудио индустрији (мембране звучника) или као основа за израду компакт дискова (CD плоча, CD ROM-а и тсл.). Поред електроенергетских водова и каблова (слике 6.9 и 6.10), алуминијум се користи у моторима, уређајима и електроенергетским системима. Користи се код телевизијских и сателитских антена.

Паметни телефони, таблети, лаптопи и телевизори с равним екраном, производе се са све већим уделом алуминијума. Његов изглед чини да савремени технички уређаји изгледају глатко и софистицирано, а истовремено су лагани и издржљиви. Савршена је комбинација форме и функције која је пресудна за потрошачке производе. Све више алуминијум замењују пластичне и челичне компоненте, јер је јачи и тврђи од пластике и знатно лакши је од челика. Такође, омогућава брзо расипање топлоте, спречавајући електронске уређаје од прегревања.



Слика 6.9 Електрични далековод



Слика 6.10 Кабл на бази алуминијума и алуминијумских легура

6.3 Алуминијум у прехранбеној индустрији

Једноставност обликовања алуминијумских фолија даје индустрији амбалаже велике могућности. Од конзерви до јединственог паковања. Поред тога, алуминијум је потпуно рециклирајући материјал, што доводи до уштеда у енергији при његовој производњи. Његова висока отпорност на корозију, антибактеријска површина и нетоксична својства такође га чине идеалним када се користе за:

- алуминијумске фолије,
- лименке за пиће (сл. 6.11),
- паковање хране (сл. 6.12),
- поклопце за боце,
- посуде,
- конзерве и тсл.

Да би се направила алуминијумска фолија, потребно је да полуфабрикат од алуминијума у облику плоча/лима пролази кроз систем ваљака са одговарајућим зазорима. Смањивањем зазора остварује се жељена дебљина фолије.



Слика 6.11 Лименке за пиће



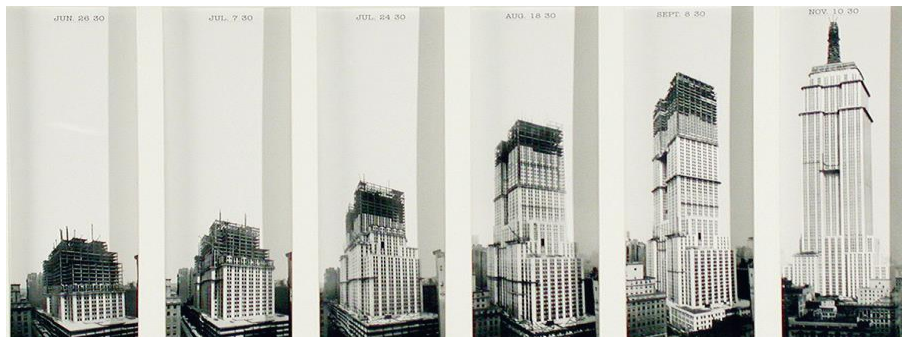
Слика 6.12 Алуминијумска фолија за паковање хране

6.4 Употреба алуминијума за различите делове и конструкције у грађевинарству

Примена алуминијума у грађевинарству примењује се код:

- кровних покривача,
- зидова завеса,
- монтажних конзола за соларне панеле,
- мостова (покретни, пешачки, друмски, војни мобилни мостови),
- кровних купола,
- зграда (слике 6.13 и 6.14),
- хала,
- просторно решеткастих конструкција (сл. 6.15),
- хелидрома (сл. 6.16),
- светионика,
- фасадних конструкција,
- скела и тсл.

Прва зграда у којој се алуминијум широко користио била је “Empire State Building” у Њујорку, саграђена 1931. године (сл. 6.13). Данас се алуминијум редовно користи у изградњи високих зграда и мостова. Мања тежина алуминијума омогућава лакши, бржи и практичнији рад. Такође, помаже у смањењу других трошкова. Зграда направљена од челика захтевала би много дубље темеље због додате тежине, што би повећало трошкове изградње.



Слика 6.13 “Empire State Building” у току изградње

На слици 6.14 је приказана “Dongdaemun Design Plaza” из Сеул-а. Истакнуте модерне зграде направљене од алуминијума укључују седиште Банке Кине у Хонг Конгу и као и многи пројекти архитекте Заха Хадиде (Eng. Zaha Hadid).



Слика 6.14 “Dongdaemun Design Plaza” из Сеула



Слика 6.15 Просторно решеткасте конструкције од алуминијума



Слика 6.16 Хелидроми од алуминијума

6.5 Алуминијум за покућство

Употреба алуминијума у покућству примењује се у:

1. Екстеријеру код:

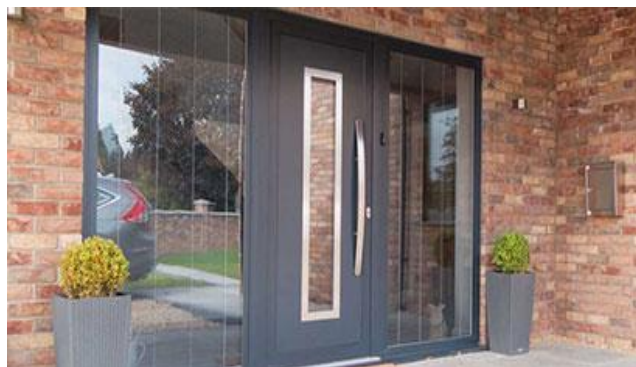
- оквира прозора (сл. 6.17),
- врата (сл. 6.17),
- клизна врата (сл. 6.18),
- зелених кућа,
- ролетни,
- ограда и тсл.

2. Ентеријеру код:

- преграда,
- квака за врата,
- ормара,
- намештаја (столови, столице, лампе, оквири за слике, декоративне плоче и тсл.),
- полица за књиге,
- кућних апарата (фрижидерима, микроталасним пећницама, телевизорима и тсл.),
- грејних и расхладних уређаја,
- кухињских алата (посуђа за кување, прибор и тсл.).



Слика 6.17 Оквири прозора од алуминијума



Слика 6.18 Алуминијумска врата



Слика 6.19 Клизна алуминијумска врата

6.6 Алуминијум за робу широке потрошње

Најчешће се користи за:

- конструкцију поклопца и других конструкционих компоненти (добijenих од алуминијумских композитних панела),
- алуминијске премазе (телескопских огледала, украсних папира, паковања и играчка (алуминијумски премаз за разлику од сребрног не пропада)),
- кованице,
- прављење спортских реквизита (рамови и точкови код бицикла, рекети за тенис и тсл.),
- аутобусе,
- чамце,
- мердевине (сл. 6.20),
- уличне знакове;
- шипке и цеви,
- жице за заваривање (сл. 6.21),
- паковање фармацеутских производа,
- резервоаре за складиштење,
- различите одливке,
- посуде под притиском и тсл



Слика 6.20 Алуминијумске мердевине



Слика 6.21 Алуминијумске жице за заваривање

7. Заваривање термички обрађеног алуминијума и његових легура

7.1 Заварљивост алуминијума и његових легура

Алуминијум је један од највише коришћених метала за израду заварених конструкција. Он се примењује у многим стандардним облицима, а може се примарно прерађивати свим познатим методима механичке технологије. Полупроизводи од алуминијума могу се спајати свим познатим методима спајања метала и легура.

Кад је реч о заварљивости алуминијума и његових легура, треба истаћи да постоје велике разлике између физичких и металуршких особина легура Fe-C с једне стране и обојених метала са друге стране. При заваривању треба имати у виду да је термичка проводност лаких и обојених метала и легура знатно већа него техничких легура гвожђа (челика и LG), а температура топљења нижа. Повећана термичка проводност условљава употребу снажнијих топлотних извора да би настало локално топљење метала по линији спајања. Дејство извора топлоте мора да буде што краће да не би дошло до прекомерног одвођења топлоте у основни материјал. Поред свега наведеног, треба истаћи да легуре обојених метала имају знатно мањи температурски интервал очвршћивања (кристализације) тј. разлику температуре почетка и завршетка кристализације. Купка има повећану склоност ка оксидацији, јер Mg, Al и Cu више апсорбују гасове из ваздуха него гвожђе. За успешно заваривање легура обојених метала неопходно је познавати особености појединих метала и легура из ове групе. Алуминијум се одликује малом тежином, задовољавајућом јачином и добром корозивном отпорношћу. Веома је погодан за нискотемпературске примене; користи се у комерцијално чистом стању или легиран са металима (Mn, Mg, Cu, Zn, Ni) и неметалом, силицијумом (Si). На тржишту се могу набавити полупроизводи од легура алуминијума у различитим облицима: ваљаном и пресованом, вученом, екструдираним, кованом или ливеном. Сви поменути полупроизводи, изузев ливеног, припадају ковном алуминијуму. Најчешћи полупроизводи добијени пластичном прерадом су: плоче, ваљани профили, екстудирани профили и алуминијумске цеви.

7.2 Припрема алуминијумских предмета за заваривање

Комерцијално се алуминијум примењује било у кованом или ливеном стању. Методи заваривања су за оба стања слични, али у поступцима постоје извесне разлике. Неке карактеристике алуминијума чине га веома тешким за заваривање. То су пре свега:

- лака оксидација на повишеним и високим температурама,
- топљење алуминијума се одвија без промене боје,
- температура топљења оксида алуминијума (Al_2O_3) ($\approx 2037^\circ\text{C}$) је много виша него чистог алуминијума (660.4°C) и
- знатно већа специфична маса оксида алуминијума ($\approx 3.8 \text{ g/cm}^3$) него чистог алуминијума (2.70 g/cm^3).

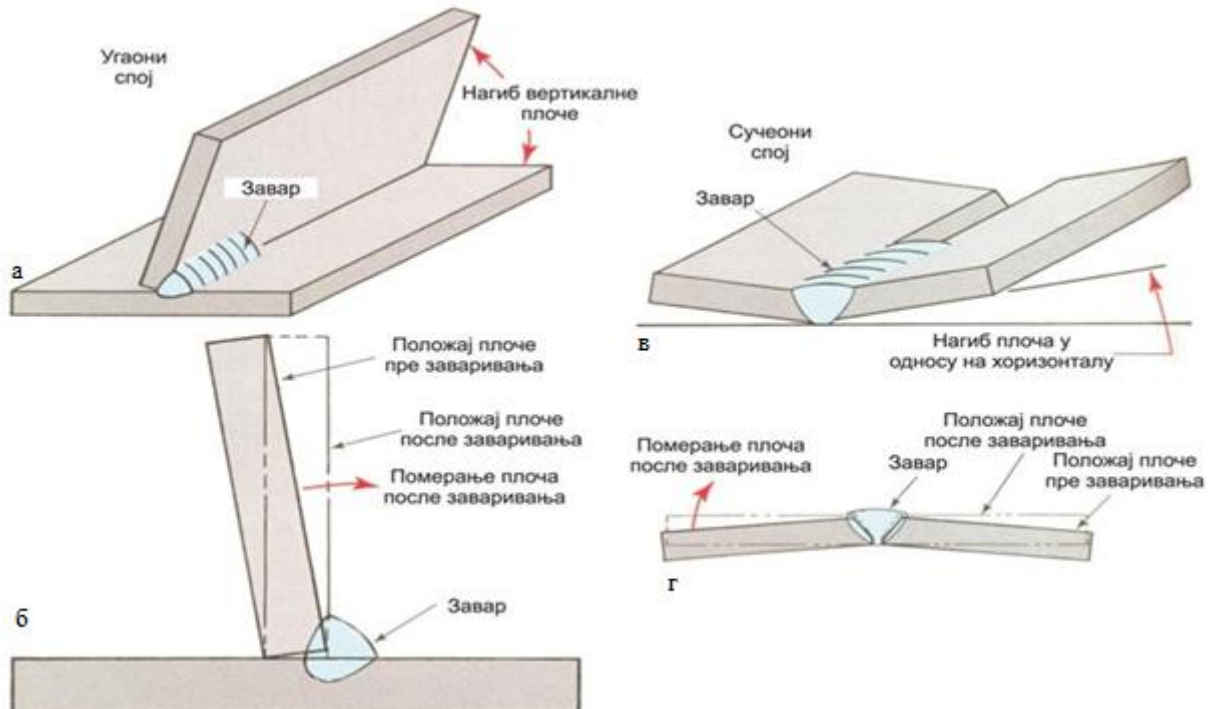
Без обзира на ове тешкоће, могу се добити шавови чија својства отпорности не заостају за основним металом. Додатни метал, се бира тако да по хемијском саставу одговара основном материјалу. Зато заваривач, пре избора додатног материјала, мора да буде упознат са хемијским саставом основног материјала. Радне странице треба очистити пре заваривања. То се постиже механички - четком од нерђајућег челика или хемијски - урањањем радних предмета у средство за чишћење, а затим испирањем у води. Морају се поштовати све мере предострожности кад год се за чишћење користе хемијски раствори.

Један проблем који се јавља при заваривању алуминијума, а није уочен код других легура јесте тзв. топли пролом. Кад се загревањем достигне температура топљења, алуминијум нагло губи чврстину. Заваривачка купка и околна површина могу се кроз проломити и пропасти кроз жлеб остављајући рупу у споју.

При заваривању алуминијума, заваривач се мора придржавати сличних технолошких услова као и при заваривању челика; то се односи на захтеве да се оствари:

- довољно претапање,
- добро уваривање,
- правилан облик шава и
- целовитост завареног споја.

При гасном (ГПЗ) и ручном електролучном (РЕЛ) заваривању често је неопходно предгревање алуминијумских радних предмета да би се умањило велико одвођење топлоте. Довољно је предгревање од 150-200°C које смањује кондукцију топлоте из купке и шава у основни материјал. За ТИГ и МИГ заваривање алуминијума предгревање није потребно, али треба нанети припојне шавове, узимајући у обзир да се алуминијум при загревању и хлађењу више шири и скупља него други метали. Ове дилатације и контракције доводе до великих деформација танких радних предмета (сл. 7.1а,в), јер алуминијум има малу крутост ($E^{Al} = 71000 \text{ MPa}$, $E^C = 210000 \text{ MPa}$). Понекад и припојни шавови не могу да спрече претерано кривљење, па је потребно спојне елементе тако поставити да се после заваривања добије правилан облик. Пример погодног размештаја Al-плоча које се заварују дат је на слици 7.1. Слично се може поступити и код других метала и легура, али водећи рачуна о томе да се они мање деформишу од алуминијума.



Слика 7.1 Примери погодног постављања Al-плоча при извођењу различитих спојева

7.3 Топли пролом

Често је потребно да се заваривани алуминијумски делови чврсто стегну и да тако остану пре, у току и после заваривања. Ако се полажу широки завари на танком лиму може се догодити топли пролом, јер алуминијум нагло губи чврстину непосредно пре топљења. То се манифестује тиме што се купка и околни метал одвајају и испадају те остаје рупа у основном металу. Ово се спречава помоћу подложне траке или плоче постављене испод жлеба. Препоручује се да трака, односно плоча буду од нерђајућег челика (18Cr10Ni). Кад је коренска страна неприступачна, проламање се може спречити технолошким мерама тј. избором параметара заваривања који стварају купку најмање запремине.

7.4 Електролучно заваривање ковног алуминијума

Алуминијум и његове легуре најчешће се заварују методима ТИГ и МИГ, јер се у аргону постиже најбоља заштита од контаминације шави и ЗУТ-а.

РЕЛ-заваривање обложеним електродама такође се користи за спајање алуминијума једносмерном струјом тако што се електрода везује на плус пол (Е+). Ипак се РЕЛ-ом заварује алуминијум, само кад се не располаже ТИГ и МИГ уређајима који дају много боље заварене спојеве.

Окси-ацетиленско заваривање (ГПЗ) алуминијума може бити успешно, али и оно заостаје за ТИГ-ом и МИГ-ом. ГПЗ се не препоручује из следећих разлога:

- гасно заваривање даје велику запремину купке, која може да се проломи на већ описан начин;
- нема ефекта катодног чишћења те се мора употребити топитељ. Ако се остаци топитеља на завареном споју не одстрани појавиће се корозија;
- гасним заваривањем одводи се из шави у радни предмет више топлоте него код осталих метода, па се добија шири ЗУТ и веће деформације него код електролучних метода.

Алуминијум се може заваривати и тачкасто (електроотпорски). Како је алуминијум врло добар проводник топлоте, јачина струје за отпорско заваривање мора да буде око 3 пута већа него за челични лим исте дебљине, а машине морају да буду знатно снажније. Оне би требало да имају могућност накнадног увођења силе искивања, чиме се умањује опасност од појаве прелина при хлађењу. На слици 7.2 приказана је електроотпорска машина за тачкасто заваривање алуминијума.

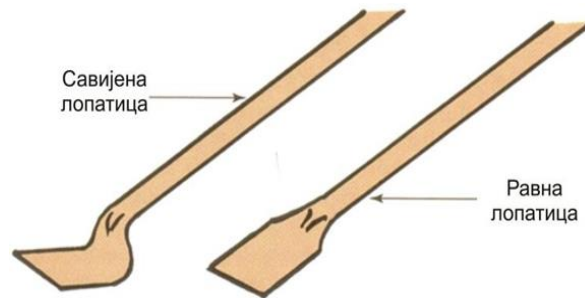


Слика 7.2 Апарат за тачкасто заваривање алуминијума

7.5 Заваривање ливеног алуминијума

Заваривање алуминијумских одливака (силумина AlSi13Mn , Al-Mg , Al-Cu) незнатно се разликује од поступака код ковних Al -легура. Одливци добијени у пешчаним или металним калупима су заварљиви, док се одливци ливени под притиском сматрају незаварљивим. Код одливака који су термички обрађени после ливења, при заваривању се у ЗУТ-у поништавају ефекти те обраде па заваривање треба извести пре термичке обраде.

При заваривању дебљих одливака препоручује се предгревање на $200\text{--}280^\circ\text{C}$ и мешање купке кашикама од нерђајућег челика (сл. 7.3) (жлебови су слични као код челика исте дебљине).



Слика 7.3 Мешалице коришћене за мешање растопа при гасном заваривању алуминијума

7.6 Методе заваривања алуминијума и његових легура

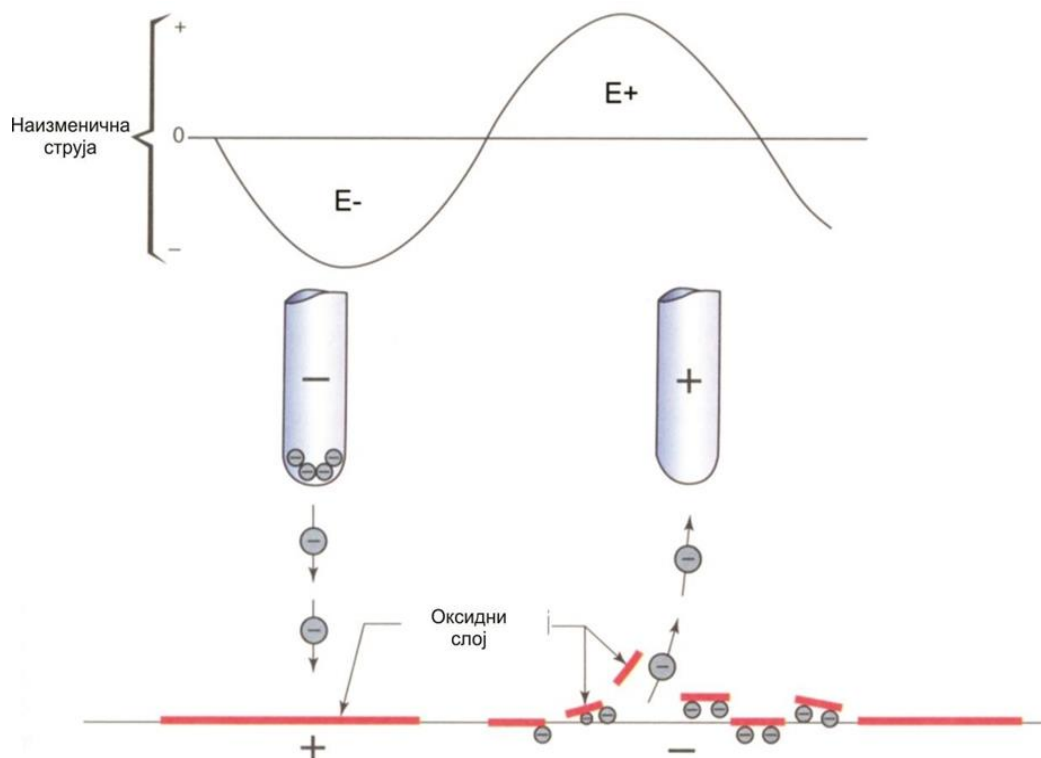
7.6.1 ТИГ заваривање алуминијума

Поред напред наведених тешкоћа при заваривању алуминијума и његових легура, највећи утицај имају следећи фактори:

- велика склоност алуминијума ка оксидацији и формирању тешко топлјивог површинског оксида Al_2O_3 високе температуре топљења (2037°C), која је око 3 пута већа од температуре топљења алуминијума (660.4°C), а самим тим и од температуре заваривања. Густина оксида алуминијума (око 3.8 g/cm^3) је знатно већа од густине основног метала (2.7 g/cm^3) па се оксидна скрама мора уклонити пре заваривања, јер у супротном Al_2O_3 тоне у металну купку и остаје у металу шава као неметални укључак;
- велико линеарно термичко ширење, што при загревању доводи до знатних деформација и заосталих напона, као и бројних грешака (прслина и деформација); зато се при заваривању алуминијума и његових легура бирају поступци који дају минималан унос топлоте;
- велика термичка проводност алуминијума (четири пута већа од нискоугљеничних челика, а 13 пута већа од нерђајућих челика);
- велика електропроводљивост (два пута већа од бакра при истој маси, јер је алуминијум знатно лакши);
- велика склоност ка апсорпцији гасова из ваздуха, што може проузроковати порозност шавова (нарочито због водоника из водене паре);
- алуминијум при загревању не мења боју што отежава визуелно праћење процеса топљења;
- легуре алуминијума су склоне ка сегрегацији у ЗУТ-у, која погоршава механичке особине споја и отпорност према корозији;
- термичка дисоцијација водене паре при $550\text{--}650^\circ\text{C}$ доводи до сједињавања Mg са водоником што ствара порозност шава код легура Al-Mg .

Све горе наведено може проузроковати грешке у завареним спојевима, познате као: топле прслине, хладне прслине и порозност.

Алуминијум и његове легуре успешно се заварују МИГ и ТИГ поступком, јер се ефектом катодног чишћења (сл. 7.4) разбија и уклања тешко топљиви оксид Al_2O_3 .



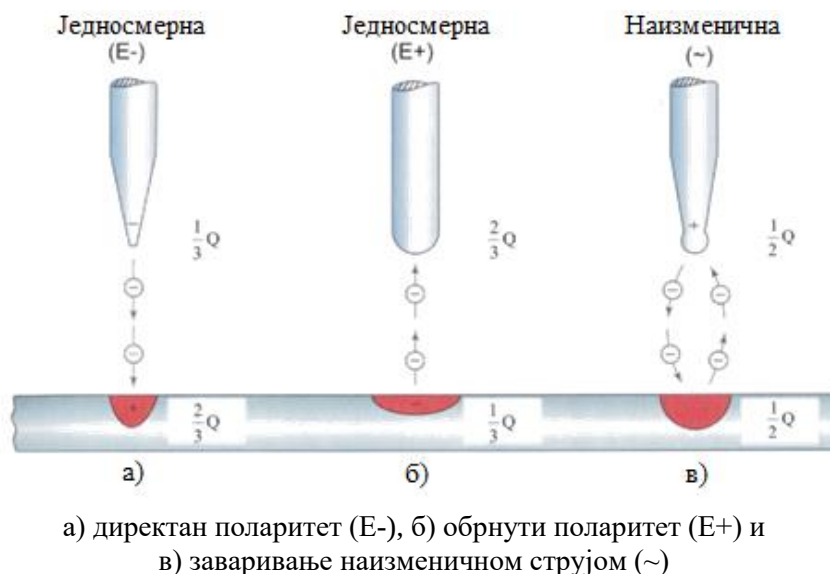
Слика 7.4 Схематски приказ катодног чишћења при ТИГ-заваривању

Алуминијум и његове легуре углавном се заварују наизменичном струјом (сл. 7.4), с тим што дужину лука треба одржавати уз што мања одступања, јер то утиче на стабилност лука. Дубина уваривања и контура завара су веома важни да се спрече грешке зване заједи. Јачина струје и величина електроде бирају се према конкретном радном предмету. Додатни метал може, али не мора увек да се употреби зависно од врсте завареног споја и дебљине метала. Добро подешавање спајаних елемената, чишћење жлеба и додатног метала и прецизна контрола процесних параметара, основни су предуслов за добијање шавова задовољавајућег квалитета.

У зависности од основног материјала и технолошких услова извођења завареног споја, за ТИГ се може користити:

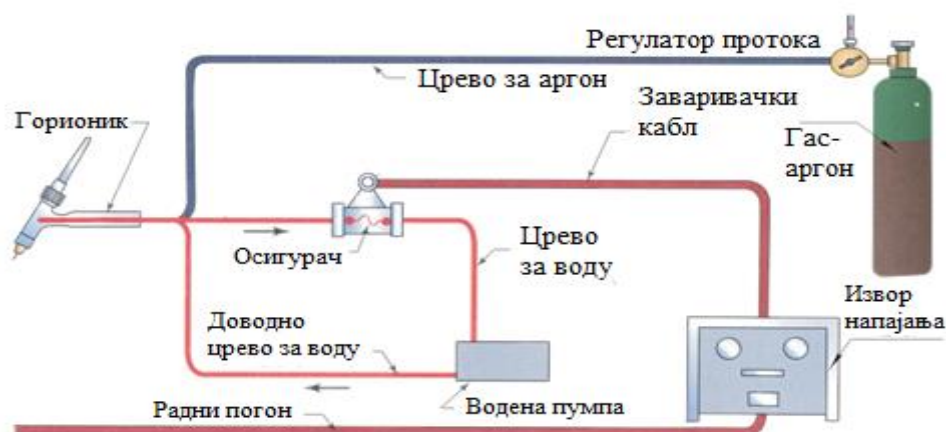
- једносмерна струја правог поларитета (E-),
- једносмерна струја обрнутог поларитета (E+),
- наизменична струја и
- пулсирајућа струја.

Једносмерном струјом правог поларитета (E-) (сл. 7.5а), добија се топлотни биланс: 2/3 топлоте у основни материјал, а 1/3 топлоте у електроду. При обрнутом поларитету (E+) (сл. 7.5б), уноси се у основни материјал само 1/3 топлоте, а електроди се предаје 2/3. При ТИГ-заваривању наизменичном струјом (сл. 7.5в), расподела топлоте је готово подједнака.



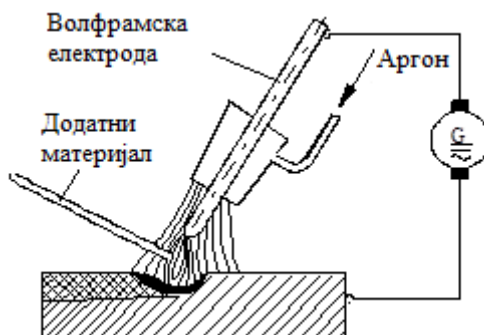
Слика 7.5 Утицај врсте струје и поларитета на расподелу топлоте при ТИГ-заваривању

Комплетна ТИГ-опрема (сл. 7.6) садржи извор напајања, горионик који има ручицу и црева за довођење заштитног гаса, као и измењиве делове: млазницу, вођицу W- електроде и луле (поклопац електроде). У додатну опрему ТИГ-уређаја спадају струјни каблови и прибор за водено хлађење.



Слика 7.6 Шематски приказ комплетне опреме за ТИГ-заваривање

Специфичност овог поступа јесте у томе што се електрични лук одржава између нетопљиве волфрамске електроде и основног материјала (сл. 7.7).



Слика 7.7 Шема ТИГ-заваривања

У таблицама 7.1 и 7.2 дате су препоруке за избор режима заваривања алуминијума једносмерном и наизменичном струјом.

Таблица 7.1 Препоруке за избор основних параметара ТИГ заваривања алуминијума једносмерном струјом позитивног поларитета

Дебљина материјала	Врста споја	Струја заваривања *	Радни напон	Пречник електроде	Проток заштитног гаса**	Брзина заваривања	Пречник додатног материјала	Број пролаза
mm	-	A	V	mm	l/min	m/min	mm	-
0.25	Прирубни спој	10÷15	10	0.5	9.5÷23.7	1.32	без	1
0.25÷0.51	I	15÷30	10	0.5	9.5÷23.7	1.32	0.5	1
0.51÷0.76	I	20÷50	10	0.5	9.5÷23.7	1.32	0.5	1
0.76÷0.81	I	65÷70	10	2.4	9.5÷23.7	1.32	0.5	1
0.86÷1.0	I	25÷65	10	1.2	9.5÷23.7	0.91	1.2	1
1.0÷1.3	I	35÷95	10	1.2	9.5÷23.7	0.61	1.2	1
1.3÷1.5	I	45÷120	10	1.6	9.5÷23.7	0.61	1.2	1
1.5÷1.8	I	55÷145	10	1.6	9.5÷23.7	0.61	1.6	1
1.8÷2.0	I	80÷175	10	1.6	9.5÷23.7	0.61	1.6	1
2.0÷2.3	I	90÷185	10	3.2	9.5÷23.7	0.61	3.2	1
2.3÷3.2	I	180÷200	12.5	3.2	9.5÷23.7	0.57	3.2	1
3.2÷6.4	I	230÷340	12.5	3.2	11.8÷28.3	0.51	4.8	1
6.4÷12.7	V	300÷450	13	4.0	11.8÷28.3	0.51	4.8	1
12.7÷19.1	V	300÷450	13	4.8	11.8÷28.3	0.15	6.4	3
19.1÷25.4	X	300÷450	10	4.8	11.8÷28.3	0.13	6.4	2
> 25.4	X	550÷570	10	6.4	18.8÷28.3	0.13	6.4	2

* - При ручном извођењу заваривања бирати мање, а при аутоматском веће вредности јачине струје.

** - Најбоље је установити оптимални проток пробама

Таблица 7.2 Препоруке за избор основних параметара ТИГ заваривања алуминијума наизменичном струјом

Дебљина материјала	Врста споја	Размак у корену жлеба	Положај заваривања*	Јачина струје	Пречник електроде	Проток заштитног гаса	Брзина заваривања	Пречник додатног материјала	Број пролаза
mm	-	mm	-	A	mm	l/min	m/min	mm	-
1.6	I	1.6	H,V,HV	70÷100	1.6÷2.4	9.5	0.20÷0.25	2.4	1
	I	1.6	O	65÷75	1.6	12	0.20÷0.25	2.4	1
2.4	I	2.4	H	95÷115	2.4÷3.2	9.5	0.20÷0.25	3.2	1
	I	2.4	V,HV	95÷110	2.4	9.5	0.20÷0.25	2.4÷3.2	1
	I	2.4	O	90÷110	2.4÷3.2	12.0	0.20÷0.25	2.4÷3.2	1
3.2	I	3.2	H	125÷150	3.2	9.5	0.25÷0.31	3.2÷4.0	1÷2
	I	2.4	V,HV	110÷140	3.2	9.5	0.25	3.2	1÷2
	I	2.4	O	115÷140	3.2	12	0.25÷0.31	3.2÷4.0	1÷2
4.8	V(60°)	3.2	H	170÷190	4.0÷4.8	9.5	0.25÷0.31	4.0÷4.8	2
	V(60°)	2.4	V	160÷175	4.0	9.5	0.25÷0.31	4.0	2
	V(90°)	2.4	HV	155÷170	4.0	9.5	0.25÷0.31	4.0	2
	V(110°)	2.4	O	165÷180	4.0	14	0.25÷0.31	4.0	2
6.4	V(60°)	3.2	H	220÷275	4.8÷6.4	14	0.20÷0.25	4.8÷6.4	2
	V(60°)	2.4	V	200÷240	4.8	14	0.20÷0.25	4.8	2
	V(90°)	2.4	HV	190÷225	4.0÷4.8	14	0.20÷0.25	4.0÷4.8	2÷3
	V(110°)	2.4	O	210÷250	4.8	16.5	0.20÷0.25	4.8	2
9.5	V(60°)	3.2	H	315÷375	6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8÷6.4	2
	V(90°)	2.4	H	340÷380	6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8÷6.4	2
	V(60°)	2.4	V	260÷300	4.8÷6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8	3
	V(90°)	2.4	V,HV,O	240÷300	4.8÷6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8	2
	V(60°)	2.4	HV	240÷300	4.8÷6.4	16.5	0.20÷0.25	4.8	3
	V(110°)	2.4	O	260÷300	4.8÷6.4	19	0.20÷0.25	4.8	3

* H - хоризонтални, V - вертикални, HV - хоризонтално-вертикални, O – изнад главе.

7.6.2 МИГ заваривање алуминијума

МИГ поступком се успешно заварују алуминијум и његове легуре из следећих разлога:

- није потребна употреба топитеља,
- применом једносмерне струје позитивне електроде (Е+) долази до катодног чишћења (разарања) оксидног слоја на основном металу,
- омогућавају се веће брзине заваривања,
- ужа је зона утицаја топлоте, односно мање деформације и
- релативно кратка обука заваривача.

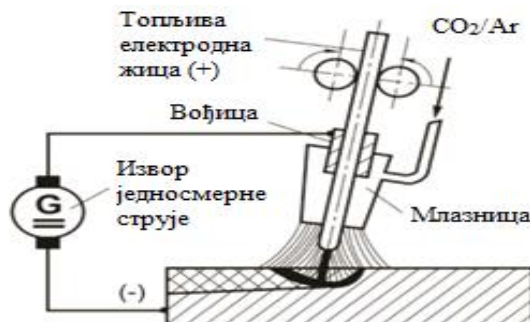
Заварују се успешно материјали углавном дебљи од 3 *mm* у свим положајима. Употребљава се најчешће електродна жица пречника 1.6 *mm*, а за материјале дебље од 8 *mm* треба применити још и предгревање. У табlici 7.3 дају се оријентациони подаци за МИГ заваривање алуминијума.

Како при заваривању алуминијума и његових легура постоје одређене тешкоће, као и при заваривању других лаких легура, треба се придржавати следећег:

- пре заваривања уклонити слојеве оксида са страница жлеба и осталих површина; на минималном растојању 30÷40 *mm*. Пре nanoшења следећег слоја неопходно је очистити површину претходног слоја,
- чишћење изводити искључиво четком од нерђајућег челика или одговарајућим стругачем. На површинама радног комада не смеју се правити дубоки зарези, јер они могу бити жариште корозије,
- припоје изводити према прописаном редоследу и на одговарајућем растојању.

Треба се на крају подсетити да је пре увођења МИГ-поступка за заваривање легура алуминијума коришћен окси-ацетиленски пламен, РЕЛ и ТИГ-поступак. Тешкоће везане за примену гасног и РЕЛ-заваривања превазиђене су проналаском ТИГ-поступка, али су остали проблеми тешко приступачних угаоних шавова и недовољно концентрисане топлоте ТИГ-а за дебеле пресеке. Готово све су тешкоће превазиђене применом МИГ- поступка нарочито за извођење угаоних шавова који чине знатан део спојева у завареним конструкцијама.

МИГ-заваривање заснива се на континуалном довођењу и топљењу електродне жице у заштити интерних гасова (Ar, He-МИГ) (сл. 7.8).



Слика 7.8 Шема МАГ/МИГ заваривања

Таблица 7.3 Оријентациони подаци за МИГс заваривање алуминијума

Дебљина	Тип споја	Број пролаза	Струја заваривања			Пречник електроде	Брзина заваривања	Потрошња аргона			Напомена Температура предгревања
			X ¹⁾	V ¹⁾	O ¹⁾			X ¹⁾	V ¹⁾	O ¹⁾	
mm		-	A			mm	m/min	l/min			
3	сучеони	1	140	-	-	1.6	0.8÷1.0	13	-	-	-
	преклопни	1	140	-	-	1.6	-	13	-	-	
	угаони	1	140	-	-	1.6	-	13	-	-	
4	сучеони	1	160÷180	150÷160	140÷150	1.6	0.7÷1.0	14	20	20	
	преклопни	1	160÷180	150÷160	150	1.6	-	14	20	20	
	угаони	1	160÷180	150÷165	160	1.6	-	14	20	20	
5	сучеони	1	200÷220	160÷180	150÷170	1.6	0.6÷0.9	15	20	20	-
	преклопни	1	200÷220	160÷180	165	1.6	-	15	20	20	
	угаони	1	200÷220	160÷180	165	1.6	-	15	20	20	
8	сучеони	2	280÷300	200÷230	200÷220	2.4	0.7÷0.9	17	25	25	150÷180°C
	преклопни	1	280÷320	220	220	2.4	-	17	25	25	
	угаони	1	300÷320	220	220	2.4	-	17	25	25	
12	сучеони	2	350÷380	240	240	2.4	0.5÷0.7	20	25	25	200÷220°C
	преклопни	2	350÷380	240	240	2.4	-	20	25	25	
	угаони	2	350÷380	240	240	2.4	-	20	25	25	
20	сучеони	2÷3	370÷390	250	250	2.4	0.3÷0.4	20	25	25	250°C
	преклопни	2÷3	380÷400	380÷400	240÷270	2.4	-	20	25	25	
	угаони	2÷3	380÷400	380÷400	240÷270	2.4	-	20	25	25	

1) Н, V, О - хоризонталан, вертикалан и положај заваривања изнад главе, респективно.

8. Закључак

Алуминијум је један од најзаступљенијих метала и трећи је најчешћи елемент који садржи 8,07% Земљине коре. Свестраност алуминија чини га најкоришћенијим металом после челика. Иако се једињења алуминијума користе хиљадама година, чист алуминијум је први пут произведен пре око 170 година. Светска потражња за алуминијумом је порасла, а истраживања су показала да се годишње произведе око 29 милиона тона. Од тога, 22 милиона тона је новопроизведен алуминијум, а 7 милиона тона је од рециклираног отпада. Употреба рециклираног алуминијума је економски и еколошки оправданија. За производњу једне тоне новог алуминијума потребно је око 20000 kWh. Супротно томе, потребно је само 5% наведене енергије да се претопи и рециклира једна тона алуминијума. Не постоји разлика у квалитету између новопроизведеног и рециклираног алуминијума.

Најчешћа руда која се користи за производњу алуминијума је боксит. Садржи највећи удео алуминијум оксида Al_2O_3 . Хидрометалуршки Бајеров поступак је један од основних и доминантних поступака за производњу глинице чијом се даљом електролизом из раствора у криолиту добија алуминијум. Криолит у овој ситуацији игра улогу електролита, а као електроде користе се блокови од угљеника.

Чисти алуминијум је мекан, дуктилан, отпоран на корозију, мале јачине и лоше ливкости и има велику електричну проводљивост, па као такав има ограничену примену. Стога се алуминијум легира са Cu, Mg, Mn, Si, Zn, Ni како би му се побољшале механичке карактеристике. Све легуре алуминијума се могу поделити на легуре за деформисање и легуре за ливење. Легуре за ливење поседују већи садржај легирајућих елемената од легура за ковање. Легуре за ливење користе се пре свега за израду делова сложене геометрије, као и за делове који не подлежу великим динамичким оптерећењима и високим температурама. Легуре за ковање се најчешће користе за нешто веће оптерећене делове у хемијској и прехранбеној индустрији, Алуминијум је један од најлакших инжењерских метала, а однос чврстоће и тежине је чак бољи од челика. У машинству, алуминијум и његове легуре имају веома велику и разноврсну примену.

Пошто је чисти алуминијум веома мекан, а потребна је нешто јача легура, али ипак лагана, издржљива и способна да издржи високе температуре у авиону или аутомобилу, праве се легуре од алуминијума и бакра. Алуминијум је такође познат као “Крилни метал” јер је идеалан за авионе, због тога што је лаган, јак и флексибилан. Свемирске летелице, попут свемирског шатла, садрже од 50% до 90% легура алуминијума у својим деловима. Алуминијум се нарочито користи као електрични проводник далековада. Алуминијум се користи у транспорту због свог повољног односа јачине и тежине. Његова мања тежина значи да је погодан за каросерије аутомобила, јер доводи до мање потрошње енергената (гориво, гас, електрична струја и тсл.). То се нарочито односи на свемирске летелице, авионе и других видова транспорта. Упркос својој једноставности, алуминијумски лим је непроцењив ресурс модерне индустрије.

Алуминијум је један од највише коришћених метала за израду заварених конструкција. Он се примењује у многим стандардним облицима, а може се примарно прерађивати свим познатим методима механичке технологије. Полупроизводи од алуминијума могу се спајати свим познатим методима спајања метала и легура.

9. Литература

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: Наука о материјалима I, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [2] Р. Врачар: Теорија и пракса добијања обојених метала, Савез инжењера металургије Србије, Београд, 2010.
- [3] В. Ђукић, А. Мајсторовић: Увод у испитивање метала, Образовни центар “Воја Радић” Школа за више образовање радника, Крагујевац, 1978.
- [4] М. Јовановић, В. Лазић: Технологија ливења и заваривања, универзитетски уџбеник, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [5] Б. Мусафија: Обрада метала пластичном деформацијом, Завод за уџбенике и наставна средства, Сарајево, 1988.
- [6] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: Технологија заваривања – приручник, Самостално ауторско издање, Крагујевац, 1996.
- [7]https://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/lmk_predavanje_6_1386242557275.pdf (приступљено октобра 2019.)
- [8]<https://science.howstuffworks.com/aluminum2.htm> (приступљено октобра 2019.)
- [9]<https://slideplayer.gr/slide/15106831/> (приступљено октобра 2019.)
- [10]<https://nastavnimaterijalvtsz.files.wordpress.com/2018/11/predavanje-7obojeni-metali-i-njihove-legure.pdf> (приступљено октобра 2019.)
- [11]<http://www.etem.rs/divisions/automotive-division> (приступљено октобра 2019.)
- [12]<http://www.planeta.org.rs/48/10TB5.htm> (приступљено октобра 2019.)