

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 117/2013

Слађан Ж. Шљанић

**Добијање алуминијума, легуре за
деформисање и ливење**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић-ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- објасни основне методе добијања алуминијума,
- наведе и објасни најважније врсте легура алуминијума за деформисање и ливење,
- укаже на значај легура алуминијума и област примене и
- укаже на заварљивост алуминијума и његових легура.

Препоручена литература:

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, рукопис књиге, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.
- [2] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, Н. Ратковић: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [3] Р. Врачар: *Теорија и пракса добијања обојених метала*, Савез инжењера металургије Србије, Београд, 2010.

Крагујевац, 2016.

Ментор:

Проф. др Вукић Лазић

Садржај

1. Увод	1
1.1 Технички чист алуминијум	2
1.1.1 Отпорност алуминијума према корозији	3
1.1.2 Механичке особине чистог алуминијума	3
1.2 Алуминијум у индустрији	5
2. Минерали и руде алуминијума	6
2.1 Распрострањеност алуминијума у природи	6
2.1 Руде алуминијума	7
2.2.1 Боксити	7
2.2.2 Нефелини	8
2.2.3 Алунити	8
2.2.4 Каолини	8
3. Особине индустријске глинице за електролитичко добијање алуминијума	9
3.1 Класификација поступака за добијање глинице	9
4. Бајеров поступак добијања глинице	11
4.1 Технолошка схема Бајеровог поступка	11
4.2 Циклус Бајеровог поступка у систему Al_2O_3 - Na_2O - H_2O	13
4.3 Припрема боксита	13
4.3.1 Складиштење и хомогенизација	13
4.3.2 Уситњавање боксита	14
4.3.3 Растварање боксита	14
4.3.3.1 Услови растварања	15
4.4 Уређаји за растварање боксита	16
4.4.1 Карактеристике експандера (упаривача)	17
4.4.2 Разблаживање аутоклавне пулпе, одвајање и испирање црвеног муља	17
4.4.3 Разлагање алуминатног раствора-декомпозиери	18
4.4.4 Упаравање повратног раствора у упаривачким батеријама	19
4.4.5 Калцинација алуминијум-хидроксида	19
4.4.6 Каустификација повратне соде	20
4.4.7 Опслуживање електролизера-основне технолошке операције процеса електролизе	20
4.4.8 Електролиза глинице	21

4.4.9 Конструкција ћелије за електролизу	22
5. Поступак производње	23
5.1 Уношење (шаржирање) глинице у електролизер	23
5.2 Замена анода и регулисање растојања између електрода	23
5.3 Регулација растојања између анода	24
5.4 Изливање алуминијума	24
5.5 Кориговање састава и количине електролита	24
6. Легуре алуминијума	25
6.1 Структура и термичка обрада легура алуминијума	27
6.2 Легуре алуминијума за деформисање	30
6.2.1 Легуре алуминијума за прераду деформисањем	31
6.2.2 Ковне легуре алуминијума које таложно не ојачавају	31
6.2.3 Ковне легуре које таложно ојачавају	32
6.3 Легуре алуминијума за ливење	33
6.3.1 Ливачке легуре које таложно не ојачавају	35
6.3.2 Ливачке легуре које таложно ојачавају	37
6.4 Примери примене легура алуминијума	37
6.4.1 Легуре алуминијума за обликовање	38
6.4.2 Легуре алуминијума за ливење	39
7. Оцена заварљивости алуминијума и његових легура у преглед најважнијих метода заваривања	40
7.1 Заварљивост алуминијума и његових легура	40
7.1.1 Припрема алуминијумских предмета за заваривање	40
7.1.2 Топли пролом	42
7.1.3 Електролучно заваривање ковног алуминијума	42
7.1.4 Заваривање ливеног алуминијума	43
7.2 Методи заваривања алуминијума и његових легура	44
7.2.1 ТИГ заваривање алуминијума	44
7.2.2 МИГ заваривање алуминијума	48
8. Закључак	50
9. Литература	51

Резиме

Тема овог рада је обојени метал алуминијум. Један је од најраспрострањенијих метала у Земљиној кори, а с обзиром на своје физичке и хемијске карактеристике постао је један од најкоришћенијих метала у данашње време. Описан је начин добијања алуминијума из неких од његових најпознатијих руда. Из разлога што се у тим рудама не налази само алуминијум, већ и неки други материјали, неопходно га је из тих руда издвојити са што мањим процентом нечистоћа. То се успева електролизом индустријске глинице базним поступцима међу којима је најпознатији Бајеров поступак. Упознаћемо се и са хемијским особинама алуминијума, једињењима која гради са осталим хемијским елементима и његовим легурама за ливење и деформисање као и физичким особинама тако добијених производа. На крају рада дат је и кратак осврт на заварљивост алуминијума и његових легура.

Кључне речи: алуминијум, глиница, боксит, растварање, електролиза, легуре, ливење, деформисање

Abstract

The theme of this work is coloured metal aluminum. One of the most widespread metal in the Earth's crust, with regard to his physical and chemical characteristics has become one of the most widely used metals in present day's. Here is described a method of obtaining aluminium in some of his most famous ore's. Because in these ore's aluminium is not the only element, there are other materials there as well, it is necessary to extract him with the high percent of purity. We manage to do that with industrial electrolysis of alumina by basic procedures in which the most famous is Bayer's process. There will be words of the chemical properties of aluminum, compounds that he builds with other chemical elements and it's alloys for casting and forming, as well as physical characteristics of the product obtained this way. In the end of this paper is given a short review of weldability of aluminum and its alloys.

Key words: aluminum, alumina, bauxite, dissolution, electrolysis, alloy, casting, forming

1. Увод

Алуминијум припада групи лакших обојених метала густине 2.7 g/cm^3 , што значи да је око три пута лакши од гвожђа. Добија се из руде боксита електрометалуршким методама. Одликује се добром електричном ($38 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$) и топлотном ($209 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) проводношћу. Алуминијум је неалотропски метал јер при загревању задржава површински центрирану кубну кристалну решетку (А1) све до температуре топљења; може се обрађивати деформисањем на топло и хладно, отпоран је на атмосферску корозију, док су му својства отпорности релативно ниска. Електронска конфигурација Al (13) $\rightarrow 1s^2, 2s^2p^6, 3s^2p^1 \rightarrow \text{Al}^{+++}+3e^-$. Температура топљења је 660°C . Најчешће примесе у алуминијуму су Fe и Si¹ које потичу из почетних сировина, а тешко се одстрањују. Механичке и технолошке особине хемијски чистог Al (99.99%) и технички чистог Al (99.5%) (металуршког) дате су у табелици 11.1, одакле се уочава утицај чистоће Al на његове механичке особине. Хемијски чист алуминијум може се добити из металуршког алуминијума који се пречишћава електрометалуршким методама.

Таблица 1.1 Особине чистог Al у жареном стању при температури од 20°C [1]

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

И мале примесе негативно утичу на технолошке особине алуминијума и отпорност на корозију. Тако на пример већ при садржају Fe изнад 0.05% (граница α -чврстог раствора) појављује се еутектикум ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$) који погоршава обрадивост деформисањем и отпорност на корозију. Растворљивост Si у Al (α -чврст раствор) је вишег реда него гвожђа (види слику 6.13), а изнад граничне растворљивости појављују се груби игличасти кристали силицијума (фаза β) који на особине алуминијума утичу слично као и еутектикум ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$). При 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 $\text{Al}_m\text{Fe}_n\text{Si}$. Ефикасно уситњавање зрна ливеног Al постиже се додавањем ситних честица Ti које у растопу стварају више центара кристализације.

Алуминијумски одливци склони су ка порозности због растварања водоника који потиче из влажних пешчаних калупа²; тог проблема нема при ливењу у кокилама било гравитационо или под притиском. Сличне тешкоће настају и при заваривању

¹ Силицијум је примеса у чистом алуминијуму, али и главни легирајући елемент у ливачким легурама Al

² При ливењу у сувим калупима, у одливцима се при хлађењу око солидус температуре појављују прелине на топло, па се алуминијум лије у влажним пешчаним калупима.

алуминијумских легура, па се морају применити технологије које дају веома низак садржај водоника у металу шава (углавном поступци заваривања у заштити аргона, TIG или MIG). Легуре алуминијума прерађују се ливењем и пластичним обликовањем, па се због тога морају поседовати одговарајуће особине за ове видове прераде. Око 70% од укупне производње прерађује се пластичном деформацијом. Остали део користи се за производњу ливених калупа, праха и соли. Из ливених производа добијају се одливци различитих облика (пример калупа за један од различитих облика који могу да се добију ливењем алуминијума, слика 1.1.). Широку примену имају ливени производи од силумина (легура Al-Si са садржајем силицијума као легирајућег елемента до 3%).



Слика 1.1 Калуп за ливење једног од различитих облика од алуминијума [2]

1.1 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 MPa), па би их требало звати челично-алуминијумске жице. Слични проводници употребљавају се и за тролејбуске мреже. Такође се алуминијумске жице 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. Сем 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 (посуђе од алуминијума, слика 1.2). Од укупне количине произведеног технички чистог Al прерађује се око 35% у полупроизводе, а око 65% служи за производњу алуминијумских легура (силумина, дурала и др.).



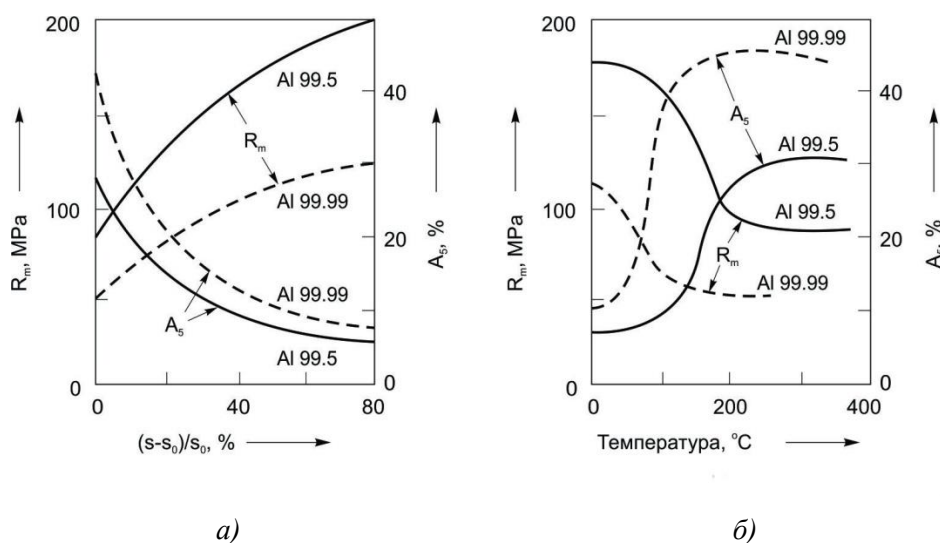
Слика 1.2 Посуђе заштићено процесом елоксирања [3]

1.1.1 Отпорност алуминијума према корозији

Природно образован оксид Al_2O_3 чини алуминијум 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).

1.1.2 Механичке особине чистог алуминијума

Технички чист алуминијум има релативно ниска својства отпорности, која могу порасти при преради на хладно. На величину деформационог ојачања, при истом степену прераде, утиче чистоћа алуминијума (слика 1.3.а); ток опорављања, тј. пораст издужења- $A_{5.65}$ и смањење јачине- R_m , при рекристализационом жарењу, дат је на слици 1.3.б. Степен прераде на хладно дефинише се односом $(s-s_0)/s_0$, где је: s_0 - почетна, а s - крајња дебелина 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 $\text{Al } 99.5$ при средњем степену прераде, износи око 150°C (сл. 1.3б). У пракси се рекристализационо жарење алуминијума обавља на температури $300\text{--}400^\circ\text{C}$.



Слика 1.3 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) [1]

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 (слика 1.4) Жице већег пречника израђују се у две фазе: најпре континуалним ливењем, затим ваљањем и на крају вучењем. Жице мањих пречника обликују се вучењем на хладно кроз калибрисане отворе у челичној плочи. Најзначајније и најбитније особина алуминијума су:

- Сребрнасто - беле је боје,
- Нема магнетна својства и изузетно је мек метал,
- За разлику од осталих метала, има малу густину - изузетно је лак,
- Добар је проводник топлотне и електричне енергије,
- Могуће га је ваљањем стањити до дебљине фолије,
- Нетоксичан је,
- Отпоран је на утицај многих киселина, али не и на морску воду,
- Као чист метал није много тврд, међутим у комбинацији са осталим металима његова тврдоћа се знатно повећава.



а)



б)



в)



г)

Слика 1.4 Алуминијумски полупроизводи добијени деформисање (а-траке; б-шипке; в-жица; г-профил) [4]

1.2 Алуминијум у индустрији

Највећи произвођачи алуминијума на свету су Кина, Русија и САД: Највећи потрошачи су такође САД, Кина и Европа. Највећа налазишта руде боксита налазе се у Аустралији, Бразилу, Гвинеји, Кини, Индији и на Јамајци. Када је реч о нашем региону, у Босни и Херцеговини налазе се изузетно велике количине боксита. Процењује се да резерве боксита у БиХ износе око 30 милиона тона. Боксита у Босни највише има у близини Милића, Босанске Крупе и Јајца, а у Херцеговини код Мостара.

Алуминијум се користи у многим индустријама. Његова повољна својства утичу на то да је потрошња и употреба Al у индустрији у сталном порасту. Алуминијум се користи за производњу: аутомобила, камиона, лаких камионских приколица, возова, авиона, бродова, јахти и трајеката. Неке од најважнијих чињеница у вези производње алуминијума у Европи су:

- Годишња потрошња алуминијума у Европи: 8 милиона тона,
- Годишња производња у Европи: 4.1 милиона тона,
- Годишња прерада секундарног алуминијума у Европи: 3,7 милиона тона,
- Годишњи европски увоз алуминијума: 2,5 милиона тона,
- Годишња потрошња алуминијума по становнику у Европи: више од 24 kg (2005),
- Глобални раст потрошње алуминијума: више од 5 % годишње.

Предности алуминијума:

- мала тежина;
- отпорност на корозију;
- жилавост на ниским температурама;
- флексибилност и обрадивост;

Мане алуминијума:

- мала јачина;
- релативно висока цена;
- мањи модул еластичности;
- лоше понашање на повишеним температурама;
- смањење механичких карактеристика у ЗУТ-у при заваривању.

2. Минерали и руде алуминијума

2.1 Распрострањеност алуминијума у природи

Алуминијум је веома заступљен у природи. Са 45%, колико га има у Земљиној кори, на првом је месту од метала, а после кисеоника (7%) и силицијума (7%) најраспрострањенији је хемијски елемент. Заједно с њима алуминијум чини 5% масе горњег слоја Земљине коре дебљине 20-30 *km*. Услед изражене хемијске активности према кисеонику, алуминијум је у природи присутан искључиво у везаном облику, у виду природних једињења (минерала, слика 2.1). Око 250 различитих минерала садржи алуминијум, од чега највећи део (око 40%) отпада на алумино силикате. Природних минерала са металима који не садрже силицијум нема много. Такав је минерал корунд (слика 2.2), који представља безводни оксид алуминијума. Обојен траговима других оксида, природни корунд, добро искристалисан, јавља се у облику драгог камена.



Слика 2.1 Проналажење и извлачење минерала алуминијума из земље [5]



Слика 2.2 Безводни оксид алуминијума-корунд [5]

Од примарних алуминијум силиката, настали су секундарни минерали, који се по правилу карактеришу повећаним садржајем алуминијума. Од тих минерала најзначајнији су: хидратисани оксиди (бемит, диаспор и хидраргилит), садржани у најважнијој руди-бокситима; каолит садржан у каолинима и глинама; алунит и др. Од аморфних минерал посебно је важан криолит, чији се растоп користи као растварач глинице при електролитичком добијању алуминијума.

2.1 Руде алуминијума

Минерали алуминијума концентрисани у природи дају руде у којима су присутни и минерали других метала, тј. јаловински минерали. Под рудом алуминијума, са гледишта њеног коришћења за добијање глинице, односно алуминијума, подразумева се природна сировина која испуњава следеће услове:

- 1) да има висок садржај алуминијевог оксида (Al_2O_3) који омогућава његово прераду по прихватљивој цени;
- 2) да је Al_2O_3 у њој присутан у таквој форми која омогућава његово издвајање у чистом облику;
- 3) да се у природи налази у облику великих рудних налазишта, односно лежишта.

Из наведеног становишта, алуминијеве руде поређане по овим захтевима су: боксит, нефелини, алунити, каолини и глине.

2.2.1 Боксити

Боксити су најважнија руда алуминијума из које се данас добија скоро целокупна светска производња глинице и алуминијума (руда боксита, слика 2.3). По хемијском саставу, боксити су сложена поликомпонентна сировина. Основне компоненте у њима су минерали: алуминијума, гвожђа, силицијума, титана, калцијума и магнезијума. По правилу, боксити увек садрже органске супстанце и мање или веће количине сумпора. 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. Са становишта Бајеровог поступка производње глинице, о којем ће касније бити више речи, данас се сматра да су боксити са модулом 10 квалитетни, са модулом 8-10 таквог квалитета да се могу прерађивати, и са модулом испод 8 лошег квалитета (Si модул= $\% \text{Al}_2\text{O}_3 / \% \text{SiO}_2$) чија прерада није економски оправдана. Изложени критеријуми важе само за бемитне и диаспорове боксите. Алуминијум је у бокситу присутан у облику хидратисаних оксида: хидралгита (гипсита)- $\text{Al}(\text{OH})_3$, бемита- AlOOH и диаспора- $\text{AlO}(\text{OH})$. Поред ових минерал алуминијум се у бокситу, у мањој мери, може налазити у виду корунда- Al_2O_3 и различитих алуминијум силиката. У зависности од минералошке форме присутног алуминијума, као основног минерала, боксити се деле на: хидрагитне (гипсане), бемитне, дијаспорне и мешовите (хидралгитно-бемитне и бемитно-дијаспорне).



Слика 2.3 Руда боксита [6]

2.2.2 Нефелини

Нефелини су по значају друга алуминијева руда, од које се комплексном прерадом у индустријском обиму производи глиница (слика 2.4). Нефелин у свом саставу поред Al_2O_3 садржи и оксиде алкалних метала Na_2O и K_2O који се комплексном прерадом полазне сировине добијају као корисни производи.



Слика 2.4 Руда нефелина [7]

2.2.3 Алунити

Алунити, или познатије алуминити, су интересантне полиметаличне сировине чијом се прерадом могу добити глиница и соли алкалних метала, натријума и калијума. По свом хемијском саставу алунит представља двојни сулфат алуминијума и калијума (или натријума) $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 4\text{Al}(\text{OH})_3$

2.2.4 Каолини

Глине и каолини су најраспрострањеније сировине које у себи садрже алуминијум. Алуминијум је у глинама садржан у облику алумино-силиката каолинита. Каолинит као основни носилац алуминијума у глинама може да се обогаћује у циљу добијања богатије сировине, која се може користити за добијање глинице и алуминијума.

3. Особине индустријске глинице за електролитичко добијање алуминијума

Глиница је дехидратисани алуминијум-оксид (Al_2O_3) који се добија пречишћавањем боксита при производњи алуминија (Бајеров процес). Алуминијум-оксид се из боксита одваја растварањем у натријум-хидроксиду, при чему се остале компоненте (силицијумови, титанијумови и оксиди гвожђа) не растварају и остају као црвени муљ. Загревањем долази до дехидратације насталог алуминијум-хидроксида и настајања чистог алуминијум оксида. Глиница за производњу алуминијума (слика 3.1). треба да има висок степен чистоће, са што мањим садржајем оксида метала који су електропозитивнији од алуминијума (Fe_2 , SiO_2 , TiO_2), јер се ти метали у процесу електролизе издвајају заједно са њим на катоди и погоршавају његове особине. Исто тако садржај оксида електронегативнијих метала (Na_2O до 0.5%) и воде (до 1%), мора бити ограничен јер мењају састав електролита. У циљу успешног растварања глиница мора да буде одређене гранулације. А с друге стране крупна глиница пропада кроз електролит и таложи се на дно електролизера. Сувише ситна глиница, плива на електролиту, споро се раствара и повећава механичке губитке. Због отпорности на високу температуру користи се као изолатор у високим пећима.



Слика 3.1 Глиница за производњу алуминијума [8]

3.1 Класификација поступака за добијање глинице

Од постојећих поступака најширу примену и највећи значај у индустријској пракси производње глинице имају базни поступци. Помоћу њих се данас производи преко 95% укупне количине глинице у свету. Код базних поступака постоји већи број начина од којих су најзначајнији:

- 1) Хидрометалуршки, или познатије Бајеров поступак и
- 2) Суви алкални или такозвани Синтер поступак.

Суштина и једног и другог поступка своди се на третирање полазне сировине-боксита натријумовим базама (NaOH или Na_2CO_3) у циљу превођења алуминијума из алуминијум-оксида у натријум-алуминат, који се раствара у води. Алуминатни раствор се затим одваја од остатка раствора (црвеног муља) и подвргава процесу разлагања са издвајањем чврстог алуминијум-хидроксида уз регенерацију базе. Раствор са регенерисаном базом се враћа у процес, док се алуминијум-хидроксид преводи у безводну глиницу. За квалитетне боксите којих данас има довољно ни један базни поступак није конкурентан Бајеровом поступку.

4. Бајеров поступак добијања глинице

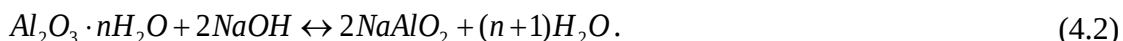
Хидрометалуршки Бајеров поступак данас је основни и доминантни поступак за производњу глинице. Применом Бајеровог поступка производи се око 90% глинице у свету. Оваква масовна заступљеност Бајеровог поступка, присутног преко 100 година у индустријској пракси, може се објаснити пре свега чињеницом, да се у природи још увек налазе велике количине квалитетних нискосилицијумских боксита. За прераду таквих боксита Бајеров поступак је најекономичнији, релативно једноставан и обезбеђује производњу глинице високог квалитета. Бајеров поступак разрадио је у периоду 1887-1892 године аустријски хемичар Карл Јосеф Бајер (*Carl Josef Bayer, 1847-1904*), по коме је и добио име. У протеклом период од открића до данас, паралелно са развојем науке и технике, Бајеров поступак је усавршен и доведен до високог техничког нивоа, с технолошким показатељима блиским теоријским вредностима.

4.1 Технолошка схема Бајеровог поступка

Бајеров поступак је затворени циклус у односу на циркулацију раствора, чија је суштина у одвијању процеса који карактерише повратна реакција:



или



При растварању боксита равнотежа наведене реакције је померена с лева на десно а при разлагању алуминатног раствора са десна на леву. Поред наведених основних процеса растварања и разлагања, Бајеров поступак садржи и низ других процеса и операција приказаних на слици 4.1. Слика је дакле, принципијелна схема са процесима и операцијама присутним у пракси, с том разликом што се у појединим комбинатима може разликовати у мање битним детаљима. Полазна сировина боксит, са додатком (или без додатка) креча, претходно се припрема дробљењем и млевењем у циљу уситњавања. Млевење је обично мокро у суспензији са каустифицираним повратним раствором. Добијена пулпа самлевоног боксита и повратног раствора, одлази у аутоклаве где се боксит, зависно од минералогског састава, раствара на 150-250°C и притиску 25-35 *bara*. Растварањем се добија пулпа коју чини алуминатни раствор и остатак од растварања, позната као црвени муљ. У раствору натријум алумината садржано је: 180-280 *g/l* Na₂O₃; 190-290 *g/l* Al₂O₃. Пулпа после растварања, прво се хлади у експандерима до температуре која одговара напону паре еквивалентне атмосферском притиску, а потом се разблажује водом од испирања црвеног муља до адекватне концентрације. Разблажена пулпа усмерава се на одвајање црвеног муља од алуминатног раствора декантацијом и згушњавањем. Одвојени црвени муљ се затим вишеструко испира водом, а потом се испран депонује на јаловиште. Алуминатни раствор добијен декантацијом као прелив згушњивача, подвргава се филтрацији у циљу издвајања механички понетих честица црвеног муља. После тога хлади се у измењивачима топлоте до 55-65°C (при чему се истовремено предгрева повратни раствор пре упаравања), а затим се шаље на разлагање у циљу добијања чврстог алуминијум-хидроксида. Пре разлагања алуминатни раствор се меша са повратним алуминијум-хидроксидом, чије честице служе као клице за кристализацију и на тој основи убрзавају процес. Разлагање се обавља лаганим мешањем и равномерним хлађењем раствора до температуре од 42-46°C. Пулпа издвојеног алуминијум-хидроксида и раствора после разлагања одлази на декантацију у згушњивачима ради

одвајања алуминијум-хидроксида. Тако згуснута пулпа са дна згушњивача у количини 25-50% филтрира се на добош вакуум филтерима, а издвојени хидроксид се, после прања, упућује на калцинацију у циљу добијања безводног оксида алуминијума-глинице.



Слика 4.1 Принципијелна технолошка схема Бајеровог поступка [9]

Преостали део хидратне пулпе у количини од 50-75% филтрира се на диск вакуум-филтерима, а издвојени хидроксид се враћа, без прања, у процес разлагања нових количина алуминатног раствора. Раствор после разлагања, тзв. матични или повратни раствор, са 48-50% неразложеног натријум алумината и количином слободног натријум хидроксида еквивалентном разложеном алуминату, одлази заједно са водом од испирања алуминијум хидроксида, у процес упаравања ради повећања његове концентрације до вредности која је неопходна у процесу растварања боксита.

Упарени раствор после корекције (тј. надокнаде његових губитака) одлази у процес растварања, односно мокрог млевења боксита, чиме је Бајеров циклус затворен.

При упаравању повратног раствора често долази до издвајања кристалне соде, која настаје реаговањем натријум хидроксида са карбонатима присутним у бокситу у процесу његовог растварања. Издвојена сода, после одвајања од упареног раствора, најчешће се подвргава каустификацији са $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ради регенерације натријум хидроксида. Каустификацијом добијени раствор NaOH се враћа у Бајеров затворени циклус, или заједно са матичним раствором у процес упаравања, или у процес испирања црвеног муља.

4.2 Циклус Бајеровог поступка у систему Al_2O_3 - Na_2O - H_2O

Код производње глинице по Бајеровом поступку алуминатни раствор пролази кроз следеће технолошке фазе:

- растварање,
- разблаживање,
- разлагање и
- упаравање.

На граници између сваке од ових фаза мењају се температуре, концентрација и каустични однос раствора натријум алумината. Ово битно утиче на засићеност раствора и њихову постојаност. Умешно подешавање засићења алуминатног раствора је најважнији услов за успешно вођење процеса добијања глинице.

4.3 Припрема боксита

Припрема боксита је значајан део технологије Бајеровог поступка. Најважнији фактори за припрему боксита за прераду су: минералошки састав, физичко-механичке особине и хемијски састав. Под припремом боксита за Бајеров поступак подразумевају се, у ширем смислу, следеће операције: складиштење и хомогенизација, обогаћивање и уситњавање (дробљење и млевење).

4.3.1 Складиштење и хомогенизација

Код већих фабрика у којима се годишње преради преко милион тона боксита, обично се за складиштење и хомогенизацију користи „бединг” систем, а код мањих погона систем „грајферног” типа. Шарже боксита које су из различитих рудних лежишта имају и различит састав. Да се услови растварања не би стално мењали, оне се хомогенизују. Хомогенизација боксита се изводи у складиштима на тај начин што се у равномерним слојевима, на тзв. рудну греду, хоризонтално наносе различите шарже боксита, а са греде (тако распоређен боксит) се скида вертикално. Овим се омогућава да се истовремено и равномерно узимају количине различитих шаржи боксита допремљених у складиште. Боља хомогенизација се постиже код „бединг” складишта због тога што се посебном машином при чеоном скидању шарже обавља додатно хомогенизација. Истовремено се користе три паралелна поља, са три рудне греде, у „бединг систему” што додатно чини рад безбеднијим. У том случају складиште се експлоатише на следећи начин: једно поље се формира, једно експлоатише, а једно је резерва.

4.3.2 Уситњавање боксита

Уситњавање боксита се састоји у дробљењу, складиштењу и млевењу. Дробљење се најчешће изводи у дробилицама чекићарама великог капацитета. У Бајеровом поступку користи се мокро млевење у млиновима са куглама, који раде у затвореном циклусу са класификатором. Као класификатори се користе хидроциклони, или механички класификатори-вибросита. Хидроциклони се чешће примењују јер су већег капацитета, једноставније конструкције и зато захтевају мањи радни простор. Класификаторима се одвајају недовољно уситњене честице боксита и поново враћају у млин. Неопходни степен уситњености зависи од природе боксита и услова за његово растварање. Из бункера боксит се додаје у млин, у који се истовремено са бокситом додаје и повратни раствор, а понекад и креч. Из млина самлевени боксит, у виду пулпе, одлази у агитатор, а из агитатора се пумпом пребацује на класификацију у хидроциклон. Недовољно уситњене честице боксита одвојене у циклону враћају се на поновно млевење. Прелив циклона као припремљена пулпа одлази на растварање боксита у аутоклавима.

4.3.3 Растварање боксита

Под растварањем боксита подразумева се процес превођења Al_2O_3 у раствор, у чијој основи лежи реакција између хидратисаних оксида алуминијума садржаних у бокситу и NaOH , уз образовање раствора натријум алумината. Ради обезбеђивања неопходних кинетичких услова за задовољавајућу брзину реакције, процес се изводи на повишеним температурама и притисцима, које обезбеђује припрема аутоклава.

Занимљиво је истаћи понашање алуминијума и силицијума за време растварања боксита:

Понашање алуминијума:

У бокситима алуминијум је углавном присутан у облику хидратисаних оксида, који у процесу растварања реагују са NaOH образујући лако растворљив натријум алуминат који прелази у раствор.

За бемит и диаспор:

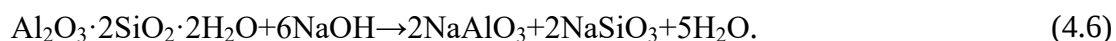


За хидраргилит:



Понашање силицијума:

Силицијум је у бокситима присутан у облику оксида SiO_2 , који може бити слободан као кварц и опал (слика 4.2), или везан у каолину и другим алумо-силикатима. У условима извођења процеса растварања боксита силицијум-диоксид реагује NaOH образујући раствор натријум-силиката:



После превођења у раствор натријум силикат реагује са натријум алуминатом образујући једињење натријум-алумино-силикат (пермутит) које је нерастворљиво и одваја се као талог.

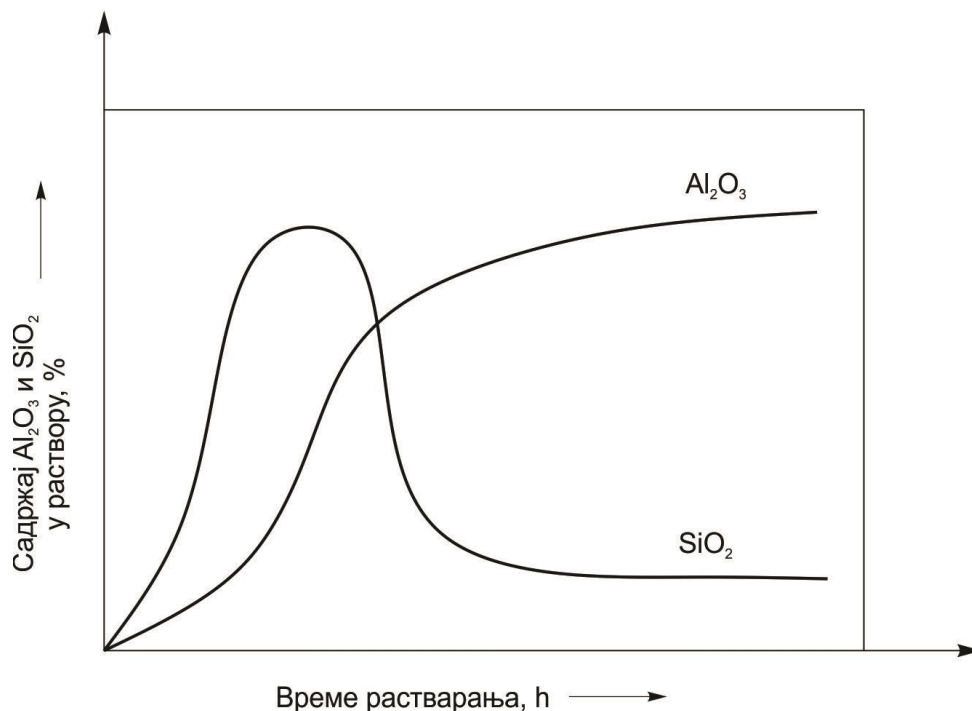


Слика 4.2 Оксид силицијума (SiO_2) који је присутан у бокситима и може бити слободан као а) кварц или б) опал [10,11]

4.3.3.1 Услови растварања

На процес растварања велики утицај имају услови самог растварања и од њих зависи степен превођења глинице из боксита у алуминатни раствор. Најважнији од тих услова су следећи:

- 1) Време растварања;
 - 2) Концентрација алкалног раствора;
 - 3) Каустични однос алкалног раствора;
 - 4) Температура растварања;
 - 5) Присуство креча;
 - 6) Величина зрна и друго.
- 1) Време растварања значајно утиче на количину глинице која из боксита прелази у алуминатни раствор. Концентрација Al_2O_3 у раствору у почетку растварања брзо расте, а затим се асимптотски приближава једној константној вредности (зависност приказана на слици 4.3). Садржај SiO_2 у раствору у почетку брзо расте са повећањем времена растварања боксита, достиже максимум после чега поново брзо опада.



Слика 4.3 Утицај времена растварања на растварање Al_2O_3 и SiO_2 из боксита [1]

- 2) Концентрација алкалног раствора који се примењује за растварање боксита, има битан утицај на процес растварања. Са повећањем концентрације раствора расте степен растворене глинице, а повећава се и концентрација добијеног алуминатног раствора.
- 3) Каустични однос алкалног раствора, односно молски однос $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ у раствору повратног алкалног раствора у затвореном Бајеровом циклусу, има битан утицај на брзину растварања боксита. Брзина растварања расте са повећањем каустичног односа алкалног раствора и обрнуто, смањује се са његовим смањењем.
- 4) Температура растварања има велики утицај на процес растварања боксита. При осталим истим условима са повећањем температуре расте растварање глинице из боксита и скраћује се време растварања. Другим речима, висок степен растварања може се постићи при врло кратком времену растварања. Оптимална температура растварања боксита се за сваки боксит одређује експериментално, тако да за хидраргилит износи 150°C , а за бемит и дијаспор до 250°C .
- 5) Присуство креча у малим количинама (3–4%) у пракси је показало да се код растварања дијаспоровог боксита повећава степен растворене глинице [9].

4.4 Уређаји за растварање боксита

Аутоклав је основни уређај у коме се одвија процес растварања, који својим конструкционим карактеристикама омогућава примену високих температура и притисака. То су херметички затворени, вертикално или хоризонтално постављени цилиндрични судови, изграђени од легираних челика, отпорни на корозивно и абразивно деловање суспензије и дејство високих притисака. Пречника су 5-3 m, висине 8-21 m и запремине 25-150 m³. Аутоклави су једноставне конструкције. Вертикални аутоклави, који су много чешће у употреби, састоје се од: цилиндричног тела, сферног врха, конкавног дна и заварених држача. Са спољашње стране прекривени су

изолационим слојем у циљу смањења губитака топлоте. Греју се искључиво воденом паром, при чему се, зависно од начина грејања и мешања разликују:

- 1) Аутоклави са уграђеним лопатастим мешачима и посредним грејањем преко цевастих грејача смештених у радном простору аутоклава и
- 2) Аутоклави са мешањем и грејањем непосредно паром, њеним убризгавањем у суспензију боксита и раствора са доње стране аутоклава.

Ради коришћења аутоклава и контролисаног извођења процеса на његовом сферном врху се налазе више отвора: за убацивање пулпе, за избацивање пулпе, односно пражњење аутоклава, за довод паре, за испуштање некондезоване паре и образованог нерастворног гаса, за улазак ради чишћења и за постављање мешача, манометра, сигурносног вентила, мерача температуре и мерача висине суспензије (пулпе) у аутоклаву. На доњем делу и на дну смештени су отвори за убризгавање паре, испуштање кондезоване паре и за пражњење аутоклава.

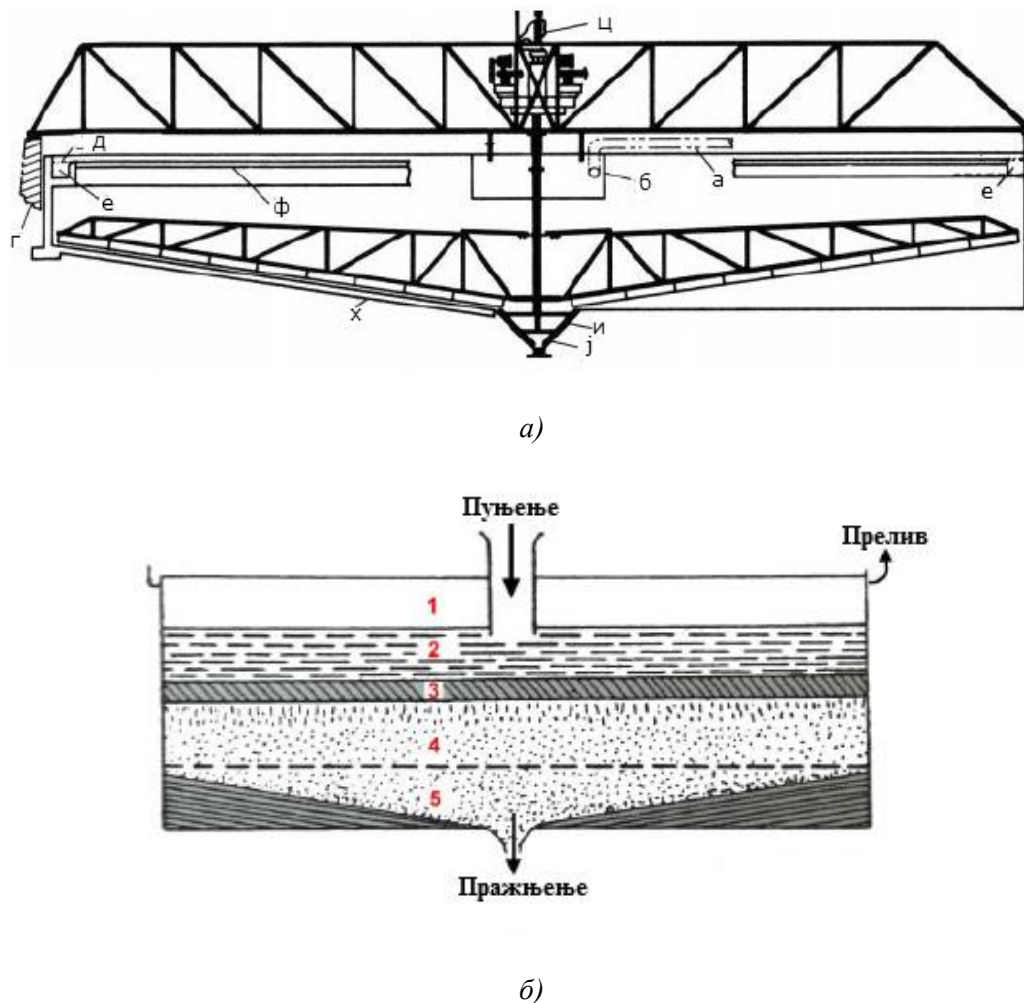
4.4.1 Карактеристике експандера (упаривача)

Пулпа алуминатног раствора и црвеног муља добијена растварањем глинице испушта се из аутоклава у самоупариваче или тзв. експандере. Њихов задатак је да пулпу брзо охладе до температуре која одговара атмосферском притиску, и да омогуће хватање и коришћење водене паре која се образује хлађењем пулпе. Конструкциона решења експандера су различита. Упаривач се састоји од следећих делова: цилиндрично-конусног трупа, цеви за одвод чисте паре, сепаратора паре, цеви за шаржирање пулпе и отвора за испуштање пулпе. Прегрејана пулпа се кроз шаржирну цев уноси у радни простор експандера. Брзина њеног уношења регулише се величином отвора на улазном делу цеви помоћу специјалног регулатора са иглом. Због пригушивања регулатором и ширења у радном простору настаје пад притиска пулпе, услед чега се пулпа упарава и хлади. Образована пара се подиже у горњи радни простор и одводи преко цеви. Пре одвођења из паре у сепаратору одвајају се капљице воде. Упаравањем се регенерише знатан део топлоте утрошене на загревање пулпе при растварању. Из тих разлога се регенерисана топлота, односно секундарна пара, користи за предгревање свеже пулпе која долази на растварање. Предгревање се изводи, или у посебним измењивачима топлоте или у аутоклавима батерије за растварање, тзв. предгрејачима. Делимично или потпуно хлађена пулпа испушта се у серији самоупаривача постепеним смањењем температуре и притиска. Запремина аутоклава у батерији није потпуности испуњена пулпом у току процеса. Изнад стуба пулпе, који покрива цевасте грејаче, налази се празан простор са ваздушним јастуком, који ублажава ударе мембранске пумпе. Осим тога у том простору се скупљају и нерастворљиви гасови настали у процесу растварања који се одводе преко цеви уроњене у конвексни врх аутоклава. Процес растварања у батеријама аутоклава је строго контролисан. Мерење параметара као што су температура, притисак, висина пулпе и неопходна регулација процеса изводи се аутоматски уз примену рачунара.

4.4.2 Разблаживање аутоклавне пулпе, одвајање и испирање црвеног муља

После растварања и хлађења у експандерима добија се пулпа концентрованог алуминатног раствора и црвеног муља. Ова пулпа се разблажује са водом од испирања муља из претходног циклуса. Разблаживање се изводи у бетонским или челичним резервоарима механичким мешањем. Укупна запремина пулпе се услед разблаживања повећава за око два пута, а однос течне и чврсте фазе расте до вредности 20:1. После разблаживања, пулпа одлази на одвајање и испирање црвеног муља.

У савременим фабрикама, одвајање и испирање, се углавном обавља згушњавањем и декантацијом. Процес се изводи у декантерима и згушњивачима. При декантирању се услед седиментације муља, образује више зона, које се међусобно разликују по односу чврсте и течне фазе. Тада настаје пет зона. Прва зона је бистри алуминатни раствор који се у виду растопа одводи преко прелива и одговарајућег система отвора и жлеба из згушњивача. Испод ње је зона слободне седиментације у коју се иначе и уводи свежа пулпа. Наредне зоне су међузоне, и на крају се налази зона грабуља или зона згуснутог муља одакле се муљ даље одводи (слика 4.4).



Слика 4.4. а) Схематски приказ згушњивача (а-доводна цев за довод суспензије; б-челични цилиндар; ц-уређај за дизање; д-висина суспензије; е-прелив; ф-брана; г-помоћни резервоар; х-резервоар; и-конусни мешач; ј-зона пражњења(конус за пражњење)); б) зоне згушњавања црвеног муља [9]

4.4.3 Разлагање алуминатног раствора-декомпозери

Као основни уређај за разлагање алуминатних раствора користи се декомпозер. У савременим условима то је затворени челични суд, цилиндричног облика са конусним дном. Пречника 7-12 m, висине до 30 m и запремине 3000-4000 m³. На горњем делу декомпозера смештени су: отвор за шаржирање раствора и алуминијум хидроксида, уређај за мешање суспензије и отвор са одводним каналом за пребацивање суспензије у други декомпозер, када су везани у серији. На доњем, конусном делу, налази се отвор за пражњење декомпозера. Зависно од врсте мешања суспензије користе се два типа декомпозера:

- 1) Први тип је са мешањем ваздухом помоћу тзв. аеролифта. То су две вертикалне цеви коаксијално постављене по оси декомпозера. Принцип рада аеролифта и мешања се састоји у томе што се после пуњења декомпозера алуминатним раствором и пулпом повратног алуминијум хидроксида, кроз унутрашњу цев, убацује ваздух под притиском. Ваздух се на излазном делу цеви меша са суспензијом и гради смешу која је по густини мања од преостале суспензије. Из тих разлога смеша се подиже у радни простор између спољашње и унутрашње цеви и са собом повлачи суседне слојеве суспензије, образујући њено непрекидно кружно кретање (мешање).
- 2) Други тип је тип са механичким мешањем.

4.4.4 Упаравање повратног раствора у упаривачким батеријама

Упаравање повратног раствора изводи се у вишестепеним упаривачким батеријама међусобно повезаних упаривача у којима се сваки појединачни упаривач представља један степен упаравања. Раствор протиче од првог до последњег упаривача у батерији. У сваком од њих се одстрањује део воде, а сразмерно томе повећава концентрација раствора, до коначне вредности у последњем упаривачу. Загревање раствора у првом упаривачу се обавља примарном паром (из енергане), а у осталима секундарном паром образованом у одговарајућем претходном упаривачу. Број упаривача у батерији је у пракси ограничен и износи 4-5. Да би се упариле велике количине раствора неопходни су упаривачи са великом грејном површином. У фабрикама за производњу глинице користе се различити и то: мембрански, са природном или принудном циркулацијом раствора. Ширу примену има упаривач мембранског типа са пењућом опном раствора. Раствор који се упућује на упаравање додаје се у упаривач у отвор у доњу комору за раствор. Упаривачке цеви попуњавају се раствором до $1/4-1/5$ висине. Када се достигне температура кључања у раствору се образују мехурићи паре који подизајући се навише повлаче са собом раствор, који се у танком слоју распоређује по унутрашњим зидовима цеви. При овим условима, коефицијент преноса топлоте на раствор је велики, што доводи до интензивнијег испаравања него код упаривача са централном цевом. Створена емулзија паре и течности доспева у сепаратор где се течност одваја од паре. Секундарна пара иде кроз цевовод, а концентровани раствор се изводи кроз отвор у следећи упаривач, или као коначно упарени раствор.

4.4.5 Калцинација алуминијум-хидроксида

Калцинација алуминијум-хидроксида је завршна фаза у технологији добијања глинице, не само по Бајеровом поступку него и по свим осталим поступцима њеног добијања. То је сложен процес који се одвија у посебним пећима. У основи састоји се од дехидратације воде и структурних трансформација. Има за циљ да преведе полазни хидроксид, у стабилну безводну глиницу. Оба технолошка процеса, дехидратације и структурне промене одвијају се загревањем алуминијевог хидроксида. Показатељи калцинације су чистоћа, крупноћа и минералоски састав, тј. фазни облик глинице.

Експериментална испитивања показала су да и крупноћа глинице зависи од крупноће полазног хидроксида и да се у процесу калцинације практично не мења. Минералоски облик глинице зависи од температурске области и времена загревања. На основу многобројних истраживања може се прихватити да се хемијско-фазне трансформације при калцинацији $\text{Al}(\text{OH})_3$ или $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ одвијају се по следећој поједностављеној шеми:

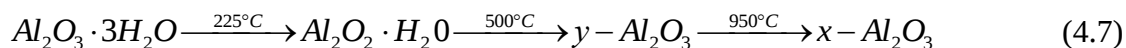


Схема показује да се одстрањивање воде из полазног хидроксида одвија у два степена. Прво се при температуре од 225°C удаљавају два молекула воде, с преласком хидраргилита у бемит, а потом на 500°C долази до удаљавања задњег трећег молекула воде, при чему се бемит трансформише у безводни Al_2O_3 . Према томе на температурама већим од 500°C је већ присутна безводна глиница. Таква глиница није погодна за електролизу јер је хигроскопна и дисперзна. Да би се то избегло, жари се на 950°C при чему почиње да се одвија њена трансформација у стабилни, нехигроскопни и по крупноћи оптималнији алуминијум-оксид. Ради опште и потпуније трансформације калцинација се изводи на 1200-1250°C.

У новије време калцинација се изводи у пећима са флуидизационим слојем, у порама пећи постоје и два система циклонских измењивача. Алуминијум-оксид, дехидратисан и загрејан на 650°C у првом систему циклонских измењивача помоћу гасова калцинације, доспева у струју топлог ваздуха, који излази из система измењивача за хлађење глинице. Струја топлог ваздуха са високим садржајем глинице затим се преко бренера, заједно са горивом, тангенцијално убацује у пећ. У пећи долази до брзе предаје топлоте честицама које се налазе у лебдећем стању. Истовремено глиница се одваја од гасова и таложи у доњи део пећи и образује флуидизациони слој, у коме се одвија процес фазне трансформације. Ваздух удубан са доње стране пећи обезбеђује одговарајуће кретање материјала, после чега се постиже равномерност температуре у слоју и стабилност струјања калцинисаног продукта у систему измењивача за његово хлађење. Калцинисана глиница хлади се у другом систему измењивача топлоте који раде под притиском. Прегрејан ваздух се, као што је речено убацује у циклонску пећ, док се гасови потом одпрашују и испуштају кроз димњак у атмосферу.

4.4.6 Каустификација повратне соде

Издвојена сода при упаравању повратних раствора може се подвргавати процесу каустификације у циљу регенерације раствора и његовог поновног коришћења за потребе производње глинице. Каустификација се изводи третирањем раствора соде кречом, при чему је у основи процеса присутна реакција између натријум-карбоната и калцијум-хидроксида. Ова реакција је повратна и правац њеног одвијања зависи од односа растворљивости калцијум-карбоната и калцијум-хидроксида. У почетку процеса, у одсуству NaOH , растворљивост креча је већа него калцијум-карбоната, па се реакција одвија с лева на десно. У новије време каустификација се не изводи, јер се спречава њена кристализација при упаравању повратног алуминатног раствора, тако што се додаје креч у воду за испирање црвеног муља и тиме одржава концентрација соде у дозвољеним границама.

4.4.7 Опслуживање електролизера-основне технолошке операције процеса електролизе

После пуштања и увођења у оптимални технолошки режим, почиње период нормалног експлоатационог рада електролизера. У том периоду опслуживање електролизера састоји се у извођењу следећих технолошких операција:

- 1) Пробијање електролитичке коре и уношења (шаржирање) глинице у електролизер,
- 2) Замена анода и регулисања растојања између електрода,

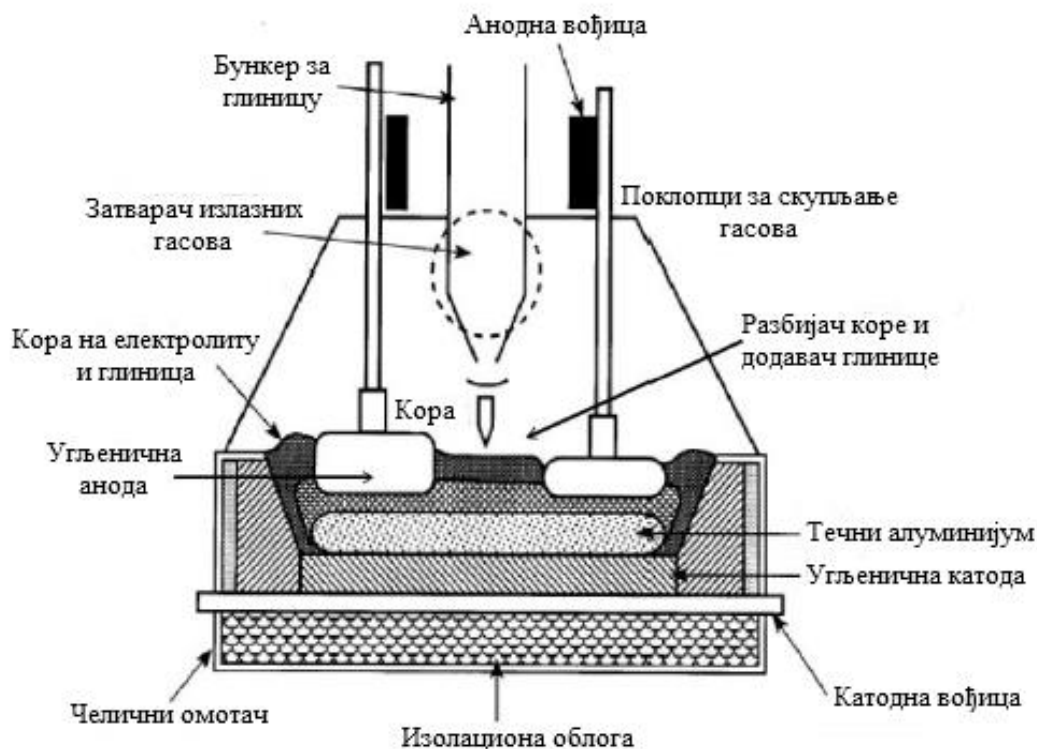
- 3) Изливања течног алуминијума и
- 4) Кориговања састава и количине електролита.

4.4.8 Електролиза глинице

Целокупна количина алуминијума у свету добија се електролизом из раствора глинице у криолиту који игра улогу електролита, а као електроде користе се блокови од угљеника (слика 4.6). Истопљени криолит испуњава све услове који су потребни за овај процес:

- криолит и глиница не смеју да садрже у себи електропозитивније елементе од алуминијума да не би дошло до запрљања катодног алуминијума;
- у истопљеном стању криолит врло добро раствара глиницу;
- растоп глинице и криолита представља смешу чија је температура топљења ($970-1098^{\circ}\text{C}$), која је релативно блиска температури топљења алуминијума (660°C);
- истопљени алуминијум који се издваја на температури електролизе од 950°C има већу густину него растоп криолита и глинице, што омогућава раздвајање ових фаза при чему алуминијум пада на дно ћелије;
- растоп криолита и глинице је довољно течан, што омогућава издвајање гасова уз истовремено мешање и уједначавање састава електролита;
- растоп криолита и глинице има добру електропроводљивост, тако да постоји релативно мали пад напона кроз електролит;
- растоп криолита и глинице је инертан у односу на зид, катоду и аноду које су од угљеничних материјала;
- на температури електролизе од 950°C испарљивост криолита је мала, и
- растоп криолита и глинице је нехигроскопан.

Сви покушаји да се уместо криолита користи нека друга материја нису дали позитивне резултате, те је из тог разлога криолит једини задовољавајући електролит за електролитичко добијање алуминијума. У пракси се обично у растоп електролита поред криолита додају још неке компоненте које имају за циљ да побољшају физичко-хемијска својства електролита, као што су AlF_3 , CaF_2 и MgF_2 . Најзначајнији од свих додатака је AlF_3 . Однос $\text{NaF}:\text{AlF}_3$ у електролиту назива се криолитски однос (К.О.), који у индустријским условима за коришћени електролит износи око 2.6-2.8, а К.О. у криолиту је 3.



Слика 4.6 Процес електролизе глинице [9]

4.4.9 Конструкција ћелије за електролизу

Прве ћелије за електролизу алуминијума конструисане су 80-тих година прошлог века. Савремене ћелије за електролизу алуминијума претрпеле су знатна побољшања у односу на прве ћелије које су се користиле, што је довело да се смањи утрошак електричне енергије од око 40 kWh/kg алуминијума на око 13,5 kWh/kg алуминијума, са тенденцијом даљег смањења. Ћелија за електролизу алуминијума састоји се из челичног омотача који је са унутрашње стране озидан ватросталном опеком а затим угљеничним блоковима. Угљенично дно служи као катода, а анода од угљеника урођена је са горње стране у електролит. Електролиза се обавља једносмерном струјом која загрева шаржу до радне температуре на основу ослобођене Џулове топлоте. У току процеса електролизе на зидовима ћелије ствара се кора од очврслог електролита која служи као заштита зидова ћелије. Постоје две врсте ћелија за електролизу алуминијума у зависности од врсте анода које се користе и то:

- ћелије са жареним електродама и
- ћелије са континуалним анодама.

Довод струје на аноду код првобитних ћелија за електролизу алуминијума вршен је ручно, а у новије време се скоро све операције аутоматизују. Додавање глинице у ћелију обавља се углавном механички преко покретних кранова, подизање и спуштање електрода изводи се аутоматски помоћу електромотора, пробијање коре електролита пнеуматским чекићима, испуштање алуминијума из ћелије вакуум лонцима итд. Увођењем механизације и аутоматизације при опслуживању ћелија за електролизу алуминијума, довело је до смањења смеше материјала и повећања квалитета готовог производа.

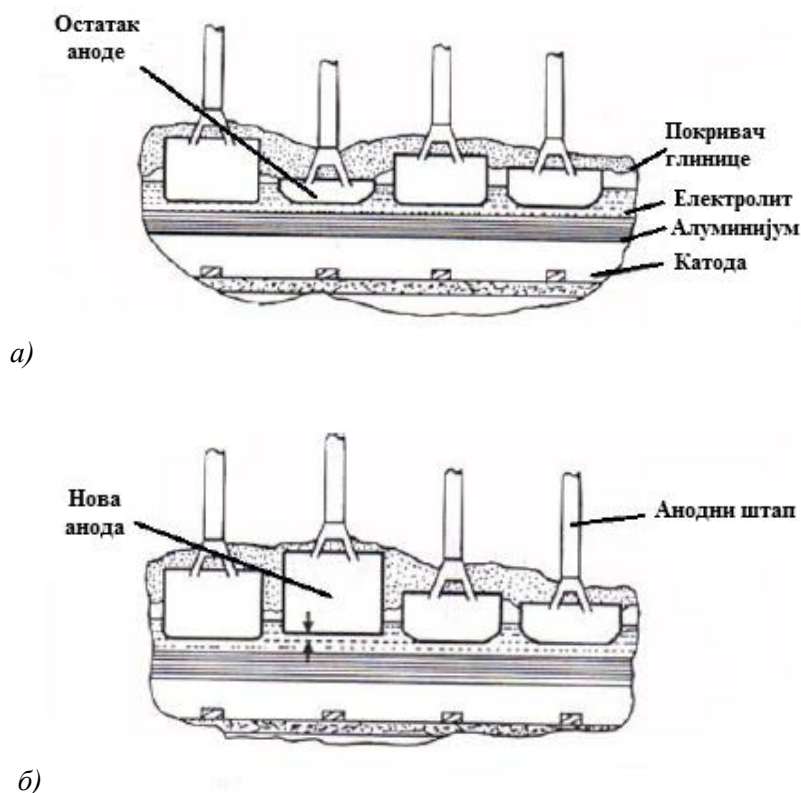
5. Поступак производње

5.1 Уношење (шаржирање) глинице у електролизер

При нормалном раду електролизера, на површини електролита се образује чврсти слој електролита тзв. електролитичка кора. Образована кора је у равнотежи са течним електролитом. На очврслу кору електролита поставља се глиница, где се она до уношења у електролит просушује и предгрева. Уношење глинице у електролит изводи се пробијањем коре и њеним урањањем у течни електролит заједно са глиницом садржаном у кори. После уношења глинице, на површини растопа електролита се поново образује танак слој очврсле коре и на њега насипа нова порција глинице. До електролизера глиница се може транспортовати на различите начине: са бункерима постављеним на електрокарама, са аутоцистернама или бункерима који су постављени заједно са уређајем за пробијање коре на порталне или конзолне кранове. Из бункера се глиница испушта гравитацијом или пнеуматски.

5.2 Замена анода и регулисање растојања између електрода

У процесу електролизе аноде се троше сагоревањем угљеника са кисеоником издвојеним анодном реакцијом. Из тих разлога истрошена анода тзв. одгорак анода, замењује се новом анодом (слика 5.1) Замена се изводи пре него што челични чепови анодног склопа дођу у додир са растопом електролита, а то одговара дебљини тела аноде који није одгорео 2-3 *cm*. Анода се замењује по тачно дефинисаном плану, што значи да анода мора остати у електролизеру тачно одређено време, које се назива време циклуса аноде. Равномеран и правилан распоред анода постиже се заменом истрошених анода по принципу шаховског поља, односно тако да нове и истрошене аноде буду поређане наизменично: нова-истрошен.



Слика 5.1 Замена аноде (а-анода пре измене; б-анода после измене) [9]

5.3 Регулација растојања између анода

Код савремених електролизера у зависности од густине анодне срује и топлотне изолације, растојање између анода и површине слоја алуминијума на дну електролиза износи око 5 *cm*. Ово растојање одређује висину слоја електролита и игра важну улогу у одржавању топлотног режима и нормалних температурских услова процеса електролизе. Његово повећање, при осталим неизмењеним условима, доводи до прегревања, а смањење до хлађења електролита.

5.4 Изливање алуминијума

При изливању алуминијума се не излива сав алуминијум из електролизера, већ се оставља његова знатна количина. Разлози за то су вишеструки: заостали метал штити катодно дно од оштећења и урушавања, течни метал испуњава неравнине катодног дна, што олакшава регулацију растојања између електрода и побољшава услове извођења процеса и слој метала олакшава равномерну расподелу топлоте по површини попречног пресека електролизера. Изливање алуминијума из електролизера се изводи употребом вакуум лонца за ливење, којим се рукује уз помоћ крана. Вакуум лонац се састоји од радног простра израђеног од челичног лима, заштићеног са унутрашње стране зидом од шамотне опеке; цеви од ливеног гвожђа, која се урања у електролит у слој метала; поклопца и кљуна, односно отвора за изливање метала из лонца. Из електролизера метал се у лонац усисава уз помоћ вакуума. Пре коришћења лонац се прогревава. Изливање се изводи тако што се прво на електролитичкој кори пробија отвор и на том делу електролит чисти од комада коре, угљене пене и глинице. После тога се у отвор електролита урања цев вакуум лонца и укључује компримовани ваздух ради стварања вакуума помоћу избацивача. Усисавање метала се прати помоћу окна на поклопцу лонца. Истовремено, метал се мери помоћу ваге уграђене на крану.

5.5 Кориговање састава и количине електролита

Састав електролита коригује се на основу одређивања његовог хемијског састава, односно његовог криолитног односа. Узорци електролита се обично узимају и анализирају сваког другог дана. За анализу се користе различите методе: колориметријска, кристалооптичка, дифрактометријска и хемиске методе. Количине NaF и AlF_3 се на основу добијених резултата коригују примењујући посебне једначине. Количина електролита у електролизеру мора такође да буде константна, што захтева надокнаду његових губитака. Губици се надокнађују додавањем свежег криолита или повратног криолита од чишћења.

6. 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 променити односно побољшати механичком или термичком обрадом, као нпр. ваљањем, ковањем, жарењем, каљењем или отпуштањем.

Неке од легура које се највише користе у техничкој пракси су:

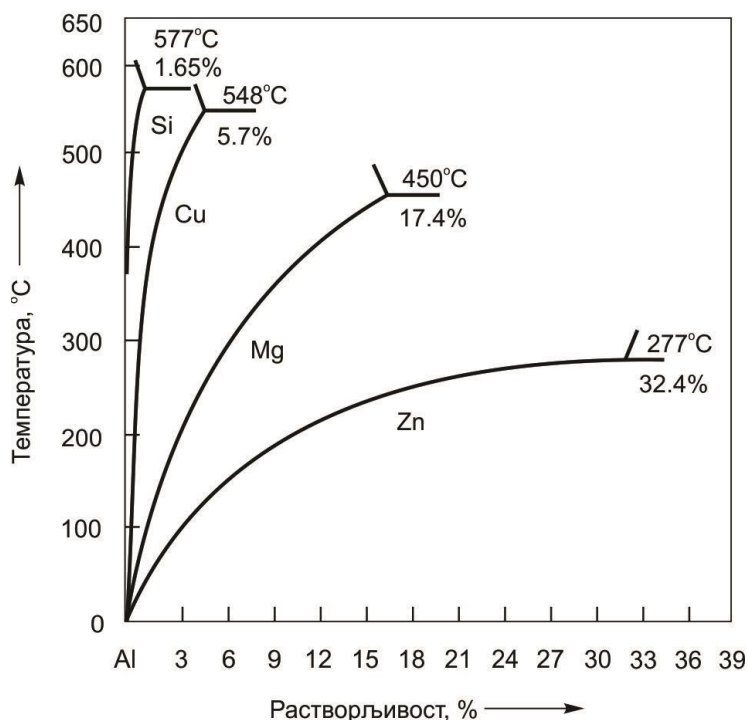
- Нерђајући челик (Fe, Cr, Ni);
- Ливено гвожђе (Fe, C, Si);
- Месинг (Cu, Zn);
- Дуралуминијум (Mg, Al, Si, Cu (слика 6.1));
- Бронза (Sn, Cu);
- Магналијум (Al, Mg);
- Амалгам (Hg, Sn, Au).



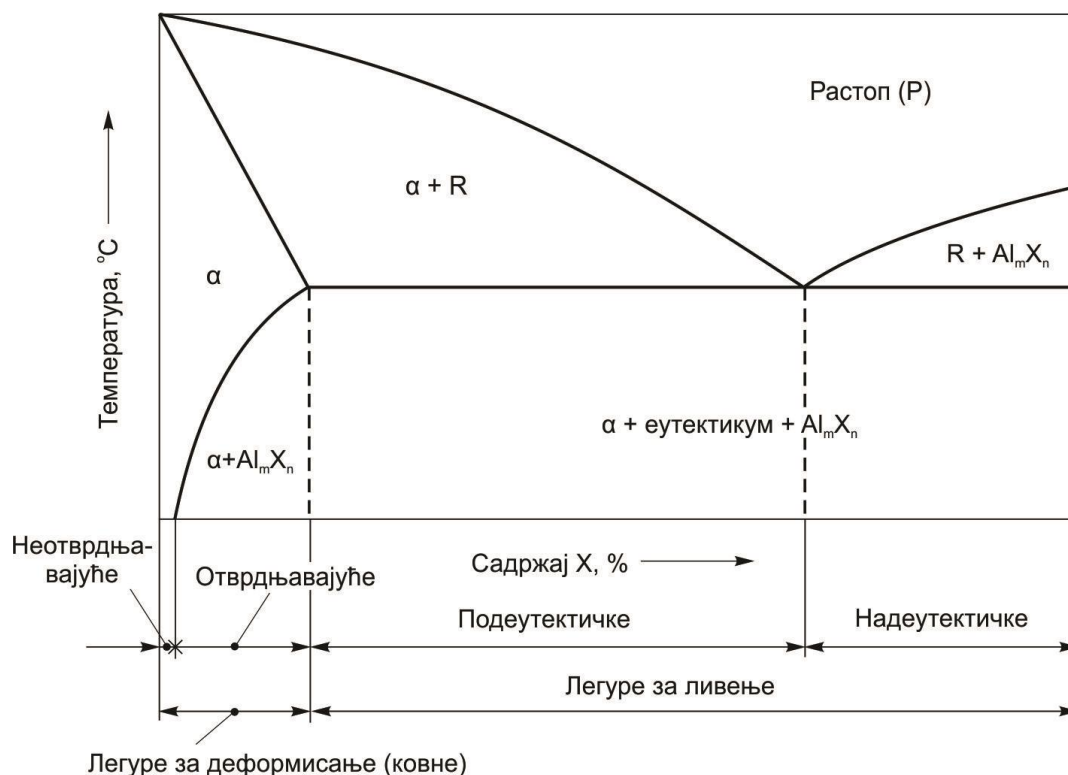
Слика 6.1 Фелне аутомобила израђене од дуралуминијума [12]

Механичке и технолошке особине чистог алуминијума (пластичност и ливкост), могу се поправити легирањем елементима: Si, Cu, Mg, Mn, Zn,..., који граде са Al ограничене чврсте растворе, а вишак образује хемијска једињења Al-легирајући елемент. Гранични чврсти раствори ових елемената у Al дати су на слици 6.2. О погодности легура алуминијума за пластичну прераду може се закључити разматрањем равнотежног дијаграма Al-легирајући елемент. У циљу упрошћења приказаћемо уопштени бинарни систем Al-X (слика 6.3), 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. Неке легуре код којих на собној температури настаје преципитација (излучивање ситних честица) таложно ојачавају. Ипак се преципитационо ојачавање понекад избегава јер пораст механичких особина може бити праћен падом корозивне отпорности.



Слика 6.2 Растворљивост Si, Cu, Mg и Zn у алуминијуму [1]



Слика 6.3 Схема бинарног равнотежног дијаграма Al-X (X-легирајући елемент) [1]

Из горепоменутог разматрања и слике 6.3 може се закључити да постоје две врсте Al-легура:

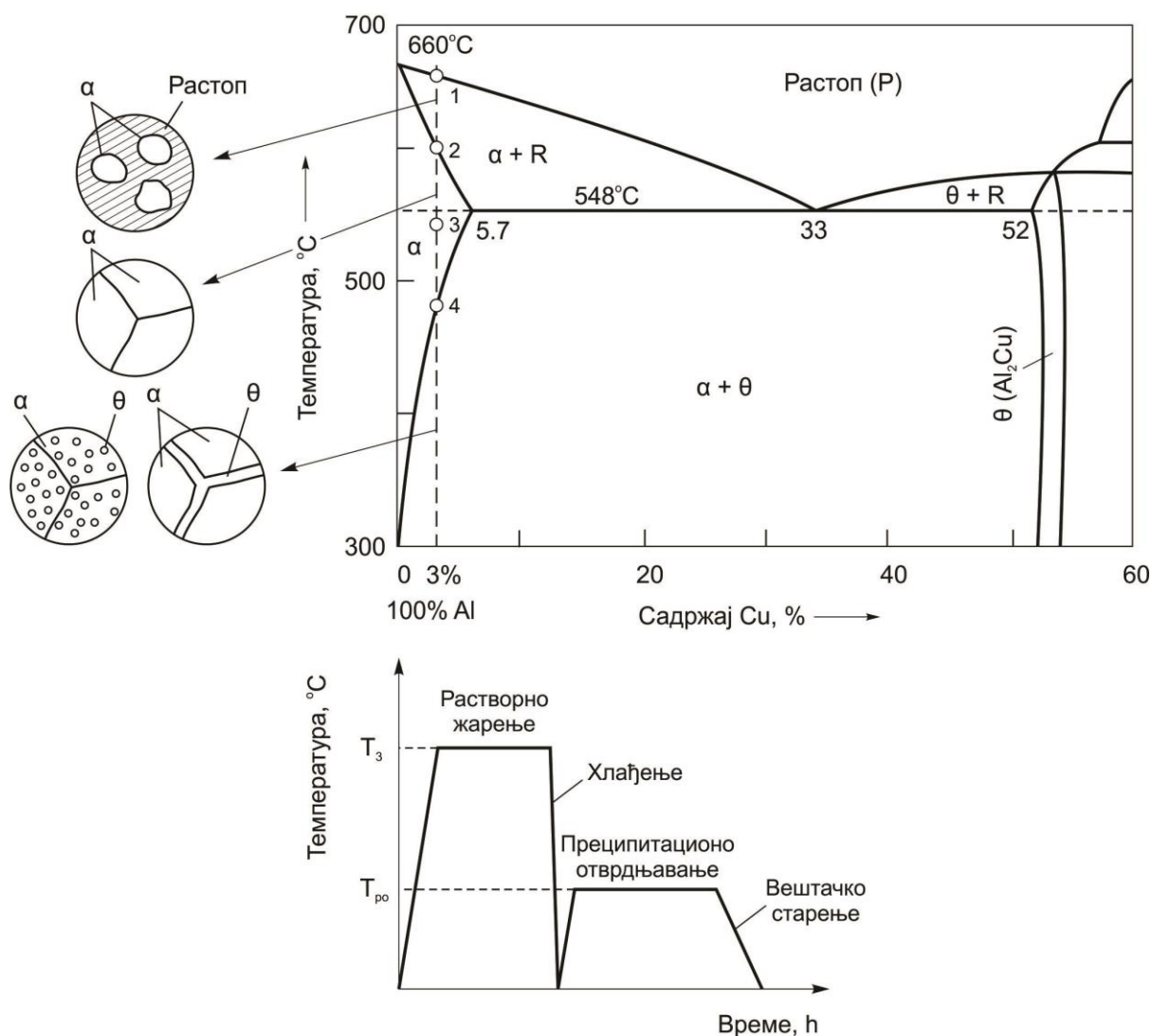
- Легуре Al за пластичну прераду (ковне легуре) и
- Легуре Al за ливење (ливачке легуре).

Неке од легура из обе групе могу преципитационо ојачавати према механизмима који ће даље, за сваку легуру посебно, бити описивани.

6.1 Структура и термичка обрада легура алуминијума

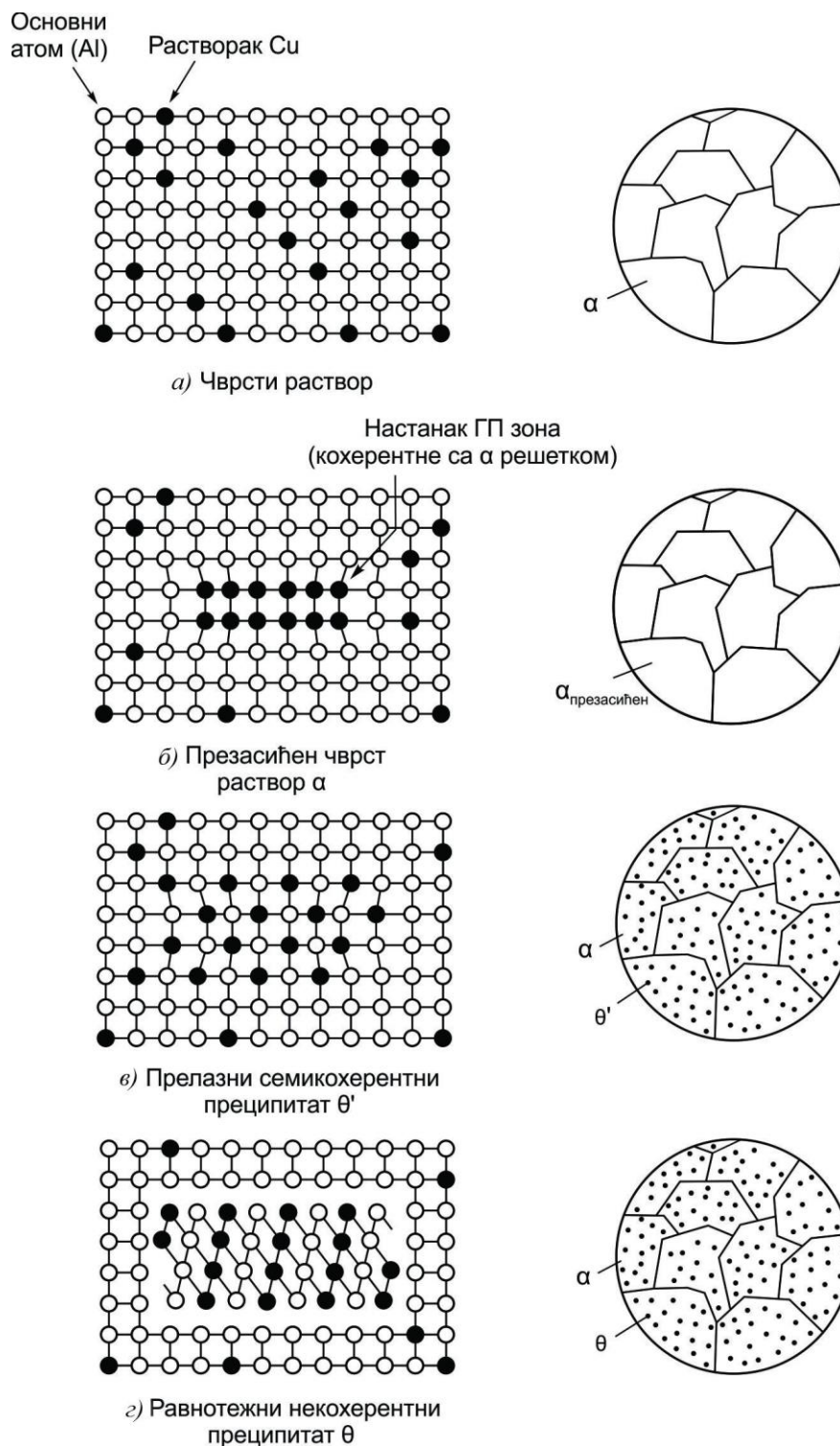
Одливци алуминијумских легура, па чак и неке легуре у стању после прераде на хладно, често имају малу јачину, уз истовремено високу истегљивост. Јачина се може повећати термичком обрадом која се састоји из загревања предмета до солвус линије, држања (прогревања) при тој температури и затим брзог хлађења у води; овако се задржава 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 (слика 6.4). 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. Загревање хетерогене ($\alpha + \theta$) структуре са 3% Cu до хомогене α -фазе и потоње брзо хлађење до собне температуре зове се растворно жарење. Пратећи легуру са 3% Cu уочава се да се загревањем она преводи у α -фазу која ће се при брзом хлађењу задржати и на околној температури. Међутим, то стање је нестабилно, па ће убрзо почети излучивање сегрегата Al_2Cu , тј. θ фазе по границама алуминијумских зрна. Релативни удео сегрегата θ расте кад се састав легуре приближава максималној растворљивости бакра (5.7%) у α -фази (слике 6.2 и 6.4).



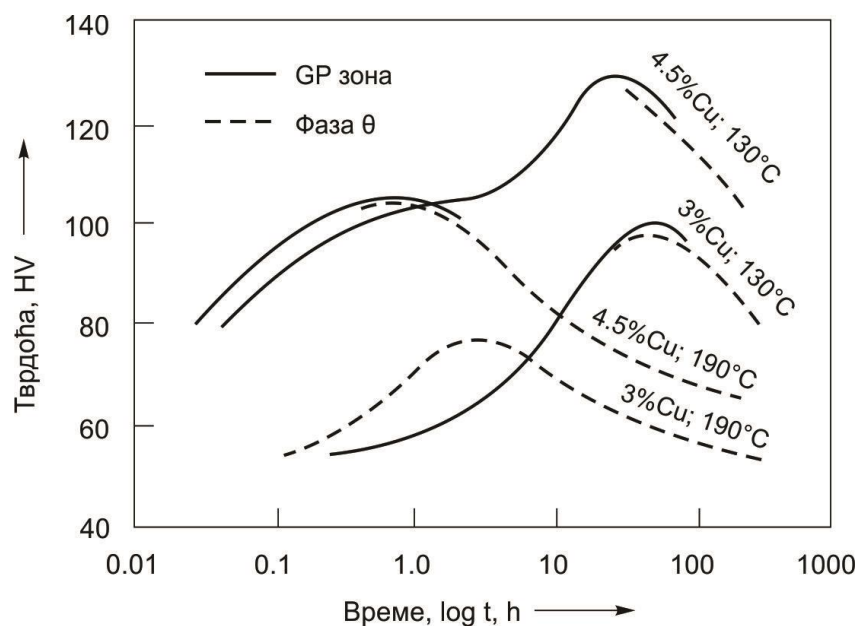
Слика 6.4 Бинарни равнотежни дијаграм Al-Cu (горе) и схематски приказ температура растворног жарења и отврдњавања (доле) [1]

На слици 6.5а, приказана је кристална мрежа алуминијума (Al) у којој су по закону случајне расподеле смештени атоми бакра (Cu). На доњим мрежама (слика 6.5 б, в, г) виде се Гини-Престонове (Guinier-Preston, 1937) зоне (GP-зоне) у којима се у току старења групишу атоми Cu. Формирање ових зона може се рашчланити у три етапе: у првој етапи (слика 6.5б), у неким областима нагомилавају се атоми бакра који имају радијус атома мањи од Al, па се решетка локално скупља, док се задржава кохеренција кристалних ћелија, што доводи до великог пораста тврдоће и ојачања легуре. Ова етапа при вештачком старењу одвија се до 100°C (слика 6.6). У другој етапи старења (слика 6.5в), настаје локална концентрација бакра тако да се образују једињења Al_2Cu која изазивају преплитање металних јона и појаву семикохерентних преципитата θ' . У трећој етапи, преципитати фазе θ групишу се у равнотежну мрежу (слика 6.5г). Даљи пораст температуре и времена старења доводи до пада тврдоће и јачине, па се каже да је легура престарела.



Слика 6.5 Схематски приказ етапа старења и микроструктура легуре AlCu3 [1]

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 посматрањем узорка под електронским микроскопом. Процес отврдњавања може се убрзати вештачким старењем, тј. прогревањем презасићене легуре до испод солвус линије и задржавањем на тој температури. Слика 6.6 приказује две легуре различитих % Cu, у појединим етапама деформације кристалне решетке (слика 6.5 а, б, в, г) и доприноси отврдњавању сегрегата θ .



Слика 6.6 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) [1]

Брзина старења расте са повећањем температуре, али изнад неке граничне температуре неће се више појавити нове GP-зоне, па остаје само преципитационо отврдњавање. Сличне промене микроструктуре, праћене ојачавањем и отврдњавањем дешавају се и код других сложенијих система као што су вишекомпонентне легуре алуминијума [1].

6.2 Легуре алуминијума за деформисање

Деформације су промене облика и димензија машинског дела које настају при напрезању. Зависе од врсте напрезања и могу да се изразе као промена пресека, угиб, нагиб, и као сложена деформација. Разликују се еластичне и пластичне деформације. Код еластичних деформација после престанка деловања силе тело се враћа у првобитни облик. Пластична деформација је супротна еластичној што значи да након престанка деловања силе на тело оно се не враћа у првобитни облик већ задржава облик који је настао током деформисања. Један од пример пластичног деформисања алуминијума јесте дубоко извлачење (слика 6.7). У зависности од комбинације матрице и извлакача могуће је постићи веома велику разноврсност финалног производа.



Слика 6.7 Један од познатијих примера дубоког извлачења легуре алуминијума (судопера)[13]

6.2.1 Легуре алуминијума за прераду деформисањем

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

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

6.2.2 Ковне легуре алуминијума које таложно не ојачавају

Овде спадају двокомпонентне легуре Al-Mn и Al-Mg (таб. 6.1). 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.

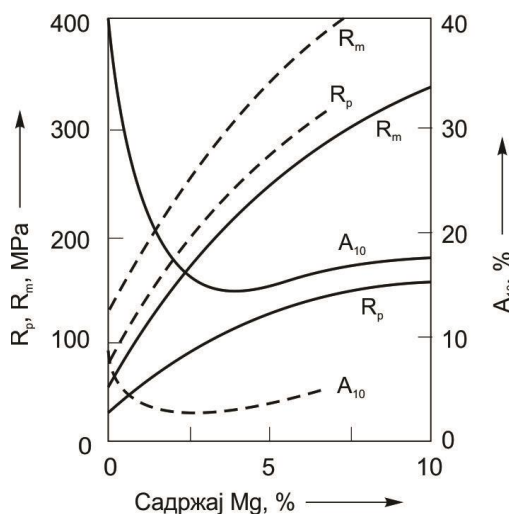
Таблица 6.1 Легуре Al за пластичну прераду (бројеви иза легирајућег елемента означавају садржај, % тог елемента) [1]

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.

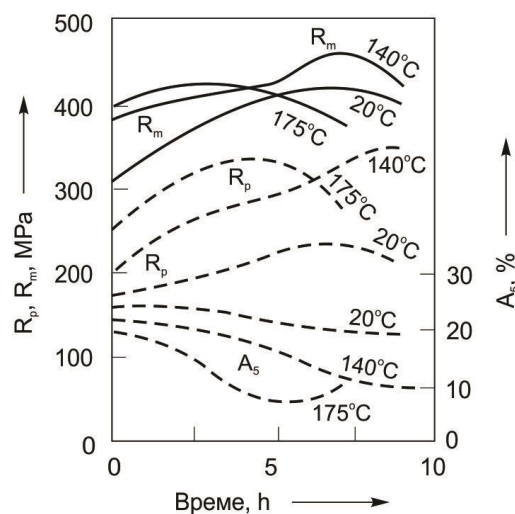
Легуре Al-Mn склоне су ка крупнозрнастој и стубичастој кристализацији, што се спречава микролегирањем са Ti, B, Zr. Ове легуре имају добру отпорност на корозију, добру заварљивост, а после прераде на хладно достижу $R_m = 200 \text{ MPa}$ (деформационо ојачање).

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 6.8 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.



Слика 6.8 Утицај Mg на механичке особине легуре Al-Mg за деформисање у жареном стању (пуна линија) и у ојачаном стању (испрекидана линија) [1]



Слика 6.9 Зависност механичких особина легуре Al-Cu4-Mg1 од времена и температуре старења (испрекидана линија) [1]

6.2.3 Ковне легуре које таложно ојачавају

Ове се легуре сврставају у три групе:

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

Највише се употребљавају легуре типа Al-Cu (види слику 6.4), те ће о њима бити више речи. 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. 6.9). Са ове слике се такође уочава да максимално ојачање одговара вештачком старењу при $140^{\circ}C$, али је оно 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 (слика 6.10). Јачина супердурала је после природног старења око 450 MPa , а после хладног обликовања и преципитације достиже 480 MPa .

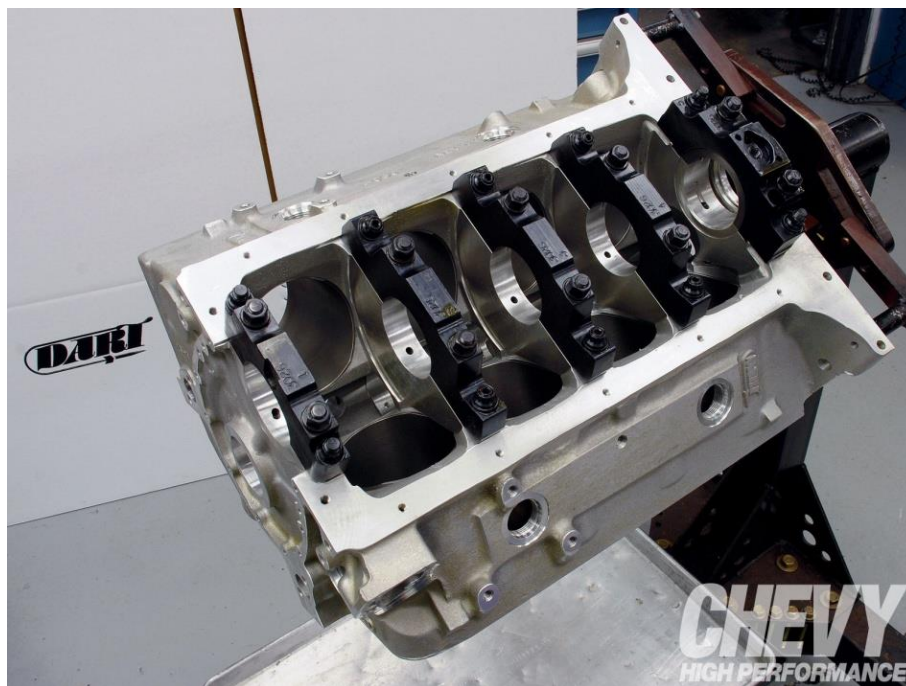


Слика 6.10 Алуминијумски тањир добијен пластичним деформисањем на хладно (операција дубоког извлачења) [14]

Легуре Al-Cu-Ni садрже додатак до 2% Ni који спречава пад тврдоће на повишеним температурама (до 200°C). После преципитације постиже се: $R_m = 400$ МПа и $A_5 = 20\%$. Легуре Al-Mg-Si такође, ојачавају старењем, али имају мању јачину а бољу жилавост и антикорозивне особине него легуре Al-Cu-Mg. Таложно отврдњавање последица је сегрегата Mg_2Si . Комбинацијом прераде на хладно и преципитације добија се R_m до око 400 МПа. Ове легуре се највише користе за транспортну опрему у прехранбеној индустрији. Новији развој уводи тернарне легуре Al-Li-Mg или кватернарне Al-Li-Cu-Mg, а за авио-индустрију и легуру Al-Li(+Zr) која има знатно већи модул еластичности (E) него алуминијум, па се маса авиона смањује за око 7.5% у односу на дурал. Ако се после природног старења не може постићи довољна отпорност на корозију, изводи се елоксирање са Al 99.5 или платирање легуром AlMn1 (таблица 6.1). Дурали и супердурали испоручују се као лимови, алуминијумом платирани лимови, отковци, штапови, цеви, профили (пре свега за авионску индустрију).

6.3 Легуре алуминијума за ливење

Ливење (енгл. *Foundry*) је поступак обраде метала без скидања струготине. Ливарство представља технологију обликовања металних предмета ливењем растопљеног метала у урађене калупе помоћу модела, да би се тако, после хлађења добио одливак. Ливење је веома погодан поступак израде машинских делова чији је облик компликован са унутрашњим контурама и неправилним каналима. Ливење се такође користи и за економичнију израду машинских делова и елемената. Применом ливених делова у бродоградњи постиже се поједностављење конструкција. У аутомобилској индустрији ливени делови се користе као блокови, главе и клипови мотора (слика 6.11). Савремена технологија и модернија опрема за ливење омогућава добијање одливака различитих димензија, тачности и квалитета површине, чиме је потреба за накнадном механичком обрадом све мање присутна.



Слика 6.11 Блок мотора добијен ливењем [15]

Готово све врсте метала и њихових легура могу да се обликују ливењем. Ипак, најширу примену имају метали и њихове легуре чије особине и карактеристике одговарају процесу ливења. Најважније особине метала и легура које долазе до изражаја при ливењу јесу степен ливкости и промена запремине при хлађењу. Нарочито добру ливкост имају сиво ливено гвожђе, цинк, калај и олово, као и већина легура обојених метала. Слабије се лију челик, алуминијум и бакар. Многи метали и легуре знатно мењају запремину приликом преласка из течног у чврсто стање. Зато су калупи за ливење увек за онолико већи за колико се дотични материјал сакупља при хлађењу: за сиво ливено гвожђе 1%, бело ливено гвожђе до 2,5%, челик 2%, за бронзу и месинг 1,5%, за легуре лаких метала 1,25%.

Најпознатији начини ливења су:

- Ливење у пешчаним калупима;
- Ливење под притиском;
- Центрифугално ливење;
- Некрекидно ливење;
- Гравитационо ливење и др.

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 (слика 6.12) 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 примесима, те се одвија природно старење и без претходног растворног жарења. Чист алуминијум је мале јачине и лоше ливкости, па се одливци од технички чистог Al 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 друге пак не.



Слика 6.12 Машина за ливење ингота [1]

6.3.1 Ливачке легуре које таложно не ојачавају

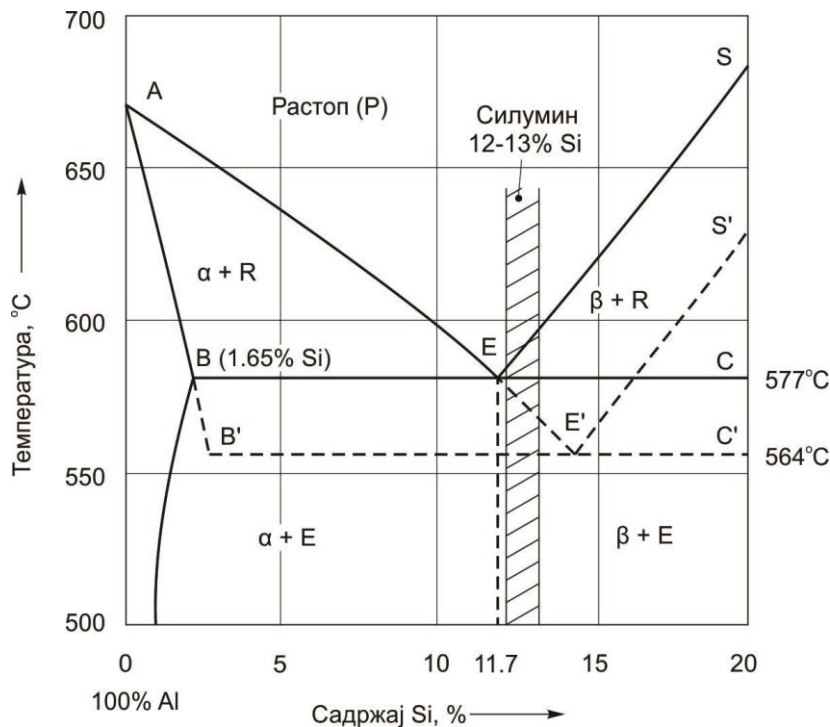
У ову групу се убрајају вишекомпонентне легуре типа Al-Si, Al-Mg и Al-Cu (таблица 6.2).

Таблица 6.2 Вишекомпонентне ливачке легуре алуминијума које таложно ојачавају [1]

Ознака хемијског састава	Примена
AlSi13Mn	Танкозидни одливци, непропустљиви за течност.
AlSi10Mn	Прибор који долази у додир са животним намирницама.
AlMg5SiMn	Ребрасте цилиндарске главе MSUS, 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 SUS).
AlSi8Cu4Mn	Високооптерећени сложени одливци (блокови 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 истегљивост, жилавост и ливачке особине. Додатком Cu повећава се заморна јачина, мада се погоршава отпорност према корозији. Најбоље ливачке особине имају еутектички силумини који садрже 9-13% Si (слика 6.13). Еутектику образују фазе ($\alpha + \beta$); β -фаза представља чисте кристале Si, јер је Al нерастворљив у Si. Силицијум брже кристалише него α -фаза (чврст раствор Si у Al), па ће α каснити у односу на бржу кристализацију чистог Si. Да се постигне равномерна кристализација ($\alpha + \beta$) и повољнија ситнозрнаста β -фаза, силумински лив се модификује додацима (0.10% Na или 2% NaCl + NaF), који умањују кристализациону способност 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 (слика 6.13), што одливку даје боље механичке особине. Модификација није неопходна при ливењу у кокилама или под притиском, јер тада настаје спонтано

потхлађивање металним калупима (предмети добијени ливењем у калупима, слика 6.14). Утицај модификације на положај еутектичке легуре силумина приказан је тачком E' на слици 6.13.



Слика 6.13 Равнотежни дијаграм легура Al-Si [1]



а)

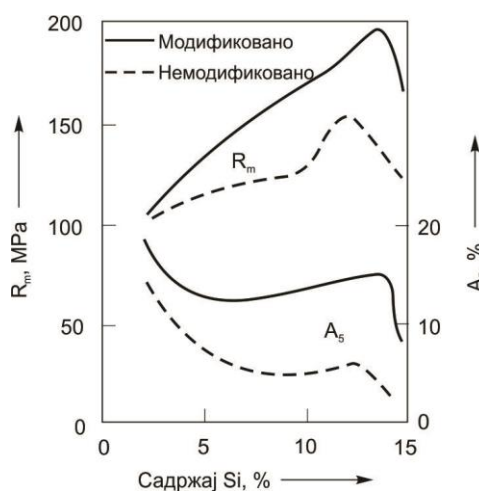


б)

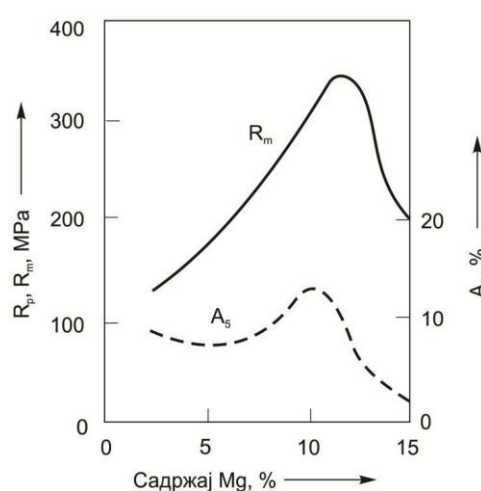
Слика 6.14 Предмети добијени ливењем у калупима: а-алуминијумски радијатори; б- пропелери авиона [16]

Силумини имају малу густину (2.65 g/cm^3), добру отпорност према корозији и добре ливачке особине, добру вискозност, мало скупљање (0.50%) и малу склоност ка прслинама, али се тешко полирају. Пораст Si доводи до повећања јачине и до благог пада истељивости силумина (слика 6.15). Легуре алуминијума припремају се за ливење у гасним јамским пећима, електропећима (отпорским и индукционим), и у пећима на чврсто или течено гориво. 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. Поред силумина за ливење се још употребљавају легуре: Al-Mg и Al-Cu и друге 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 јављају се фазе α , сегрегат β (Al_3Mg_2), као и нерастворљива фаза AlFeMnSi , а код легура ливених под притиском или у кокилама јавља се још и 6 до 7% еутектикума ($\alpha + \text{Al}_3\text{Mg}_2$). Појава еутектике при $\text{Mg} < 7\%$ последица је неравнотежне кристализације при убрзаном хлађењу у кокили. Садржај Mg утиче на промену механичких особина, као што је приказано на слици 6.16. Легуре Al-Mg лију се у песку и кокилама, лаке су (2.5 g/cm^3), високоотпорне према корозији и добро се полирају. 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 одливача. 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.



Слика 6.15 Утицај Si на механичке особине силумина ливених у кокилама [1]



Слика 6.16 Утицај Mg на механичке особине легура Al-Mg ливене у пешчаним калупима [1]

6.3.2 Ливачке легуре које таложно ојачавају

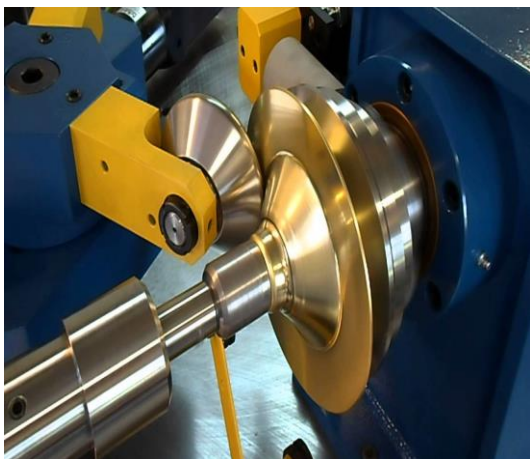
Од ливачких легура алуминијума, таложно ојачавају како силумини са додацима Cu, Mg и Ni, тако и легуре типа Al-Cu са осталим додацима наведеним у табlici 6.2. Силумини са додатком Mg преципитационо ојачавају, захваљујући сегрегату фазе β' (Mg_2Si). У ојачаном стању достижу $R_m = 200\text{--}250 \text{ MPa}$, али је издужење веома мало (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, али достигнута јачина ($R_m \approx 200 \text{ MPa}$) незнатно је већа од термички необрађених производа одливених у металним калупима ($R_m \approx 180 \text{ MPa}$) [1].

6.4 Примери примене легура алуминијума

Откривањем алуминијума и његовим успешним изоловањем из његових руда помоћу разних процеса електролизе још у XIX-ом веку довело је до масовне употребе овог обојеног метала у разним гранама индустрије. Легуре алуминијума су у данашње време нашле веома велику и разноврсну примену како у домаћинству тако и у машинству. Неке делове машиноградње готово је немогуће замислити без алуминијума и његових легура које, како је познато, могу бити легуре за обликовање и ливење.

6.4.1 Легуре алуминијума за обликовање

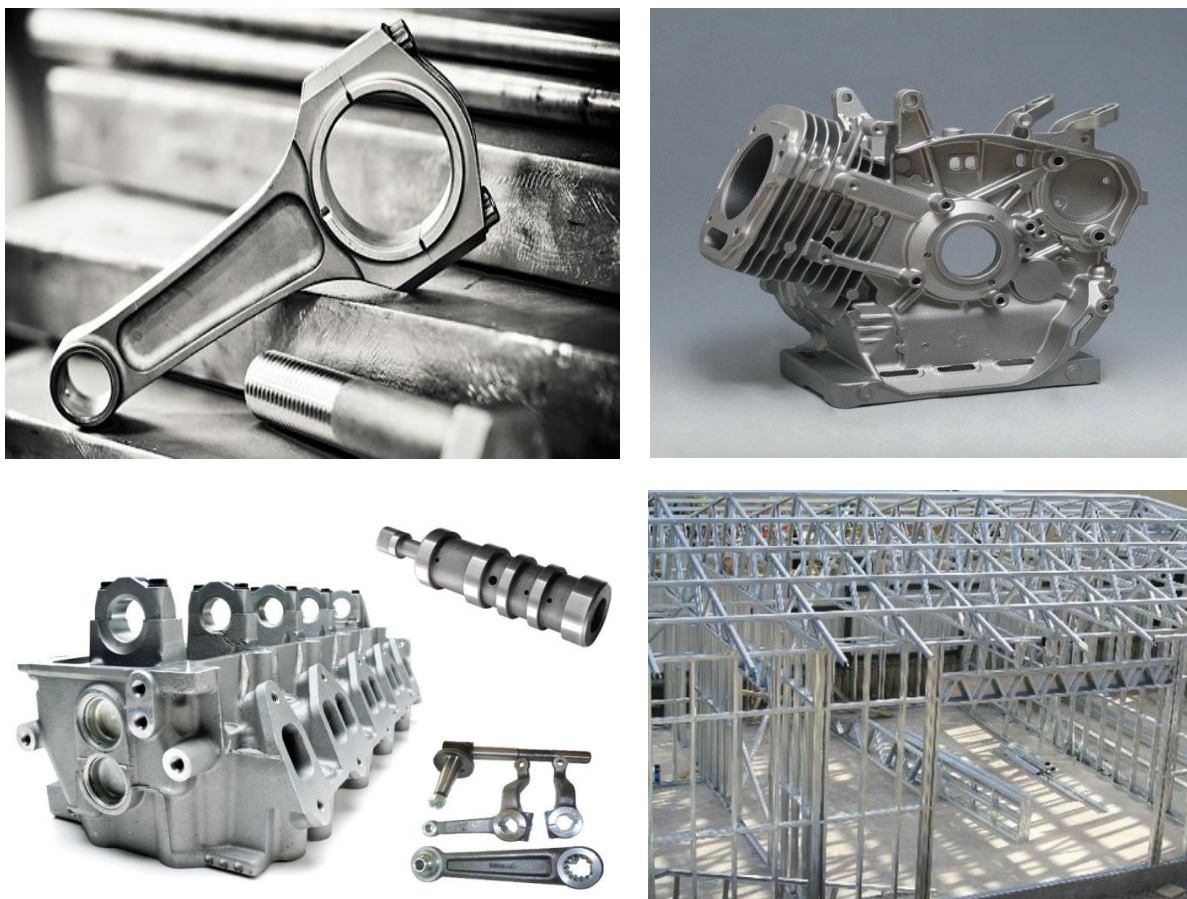
Пластичном прерадом легура алуминијума добијају се облици једноставније геометрије од легура за ливење. Легуре алуминијума и мангана најчешће се користе за неке мање оптерећене делове у хемијској и прехранбеној индустрији, као и за израду заварених резервоара за течности и гасове. Ове легуре служе за платирање. Када се алуминијуму као легирајућем елементу додају бакар и магнезијум настају познате легуре дурал и супердурал (и до 3 пута тврђа легура од обичног челика али лакша од њега) које се користе у изради авиона, друмских возила, аутомобила и једне су од најважнијих легура у машиноградњи. У зависности од легирајућег елемента и процента тог легирајућег елемента у легури са алуминијумом која подлеже пластичном обликовању добијају се и различите особине финалних производа. Неке легуре са магнезијумом, никлом и силицијумом користе се за израду компоненти турбокомпресора, у авио и ауто индустрији, прехранбеној индустрији и прецизној механици. С друге стране додавањем цинка и мангана повећава се динамичка издржљивост па се такве легуре примењују за израду судова под притиском и неких компонента за средства ваздушног и железничког транспорта. Деформисањем легура алуминијума такође се веома успешно могу израђивати закивци и високооптерећене компоненте, а легура са додатком гвожђа, силицијума и магнезијума је добар електрични проводник. Најпознатији и најједноставнији предмети од легура алуминијума израђени пластичним обликовањем јесу лименке разних врсте напитака израђене помоћу калупа и разних врста преса, затим разне врсте жица, клипњача за моторе са унутрашњим сагоревањем и тако даље (слика 6.17).



Слика 6.17 Предмети добијени пластичним обликовањем алуминијума [17]

6.4.2 Легуре алуминијума за ливење

Чист алуминијум је мале јачине и лоше ливкости па се зато одливци од технички чистог алуминијума израђују само за потребе електротехнике јер поседује добру електричну проводљивост. Легуре за ливење карактерише већи садржај легирајућих елемената, јер се тако постиже боља ливкост. Ливењем се добијају предмети веома сложене геометрије које није могуће на други начин изградити. Сложени одливци таквог типа су, на пример, компоненте у архитектури или ребрасте цилиндарске главе мотора са унутрашњим сагоревањем. Танкозидни одливци који су непропустљиви за течност и прибор који долази у додир са животним намирницама поседују 10-13% силицијума и 1% мангана, док танкозидни одливци у авио-индустрији поседују још 1% магнезијума. Додавањем силицијума, никла и бакра добијају се легуре које су погодне за рад на високим температурама, и најчешће се користе за клипове мотора са унутрашњим сагоревањем. Ако се никл замени манганом добија се легура погодна за израду високооптерећених и сложених одливка као што су блокови мотора. За израду клипова већих димензија користе се легуре са високим процентом бакра и никла као и мањим процентом магнезијума. Дакле, са повећањем процента легирајућих елемената побољшавају се физичке карактеристике, а самим тим и квалитет добијених одливака. На слици 6.18 приказани су само неки делови израђени ливењем од легура алуминијума.



Слика 6.18 Сложени предмети добијени ливењем алуминијума [18]

7. Оцена заварљивости алуминијума и његових легура у преглед најважнијих метода заваривања

Алуминијум се данас користи за израду сложених и одговорних конструкција. Будући да се велики део тих конструкција израђује заваривањем, у овом поглављу ће укратко бити указано на заварљивост алуминијума и биће приказани основни и највише коришћени методи за његово заваривање.

7.1 Заварљивост алуминијума и његових 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, посебно алуминијума с друге стране. При заваривању треба имати у виду да је термичка проводност алуминијума и свих лаких и обојених метала и легура знатно већа него техничких легура гвожђа, а температура топљења знатно 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 још 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, 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 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.

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, екструдирани профили и алуминијумске цеви.

7.1.1 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:

- склоност ка оксидацији на повишеним и високим температурама;
- топљење алуминијума се одвија без промене боје;
- температура топљења оксида алуминијума је много виша, него чистог алуминијума;
- знатно већа специфична тежина оксида алуминијума него чистог алуминијума.

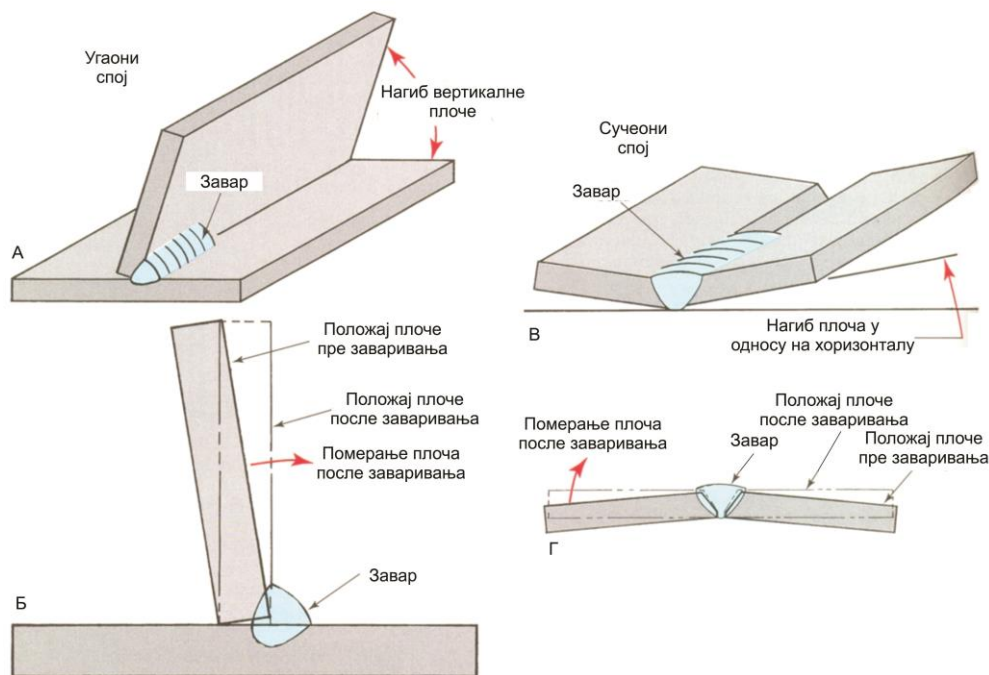
Без обзира на ове тешкоће, могу се добити шавови чија својства отпорности не заостају за основним металом. Додатни метал, се бира тако да по хемијском саставу одговара основном материјалу. Зато технолог и заваривач, пре избора додатног материјала, морају бити упознати са хемијским саставом основног материјала. Радне стране 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. Ако се загревањем алуминијум приближи температури топљења, он нагло губи чврстину. Заваривачка купка и околна површина могу се скроз 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;
- целовитост завареног споја и др.

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 заварених спојева, јер Al 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 Al .



Слика 7.1 Примери погодног постављања Al-плоче при извођењу различитих спојева [19]

7.1.2 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 најмању запремину купке.

7.1.3 Електролучно заваривање ковног алуминијума

Алуминијум и његове легуре најчешће се заварују методима ТИГ и МИГ, јер се у заштити аргона 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 (E+). 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 при електролучним поступцима.

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 прслина при хлађењу. На слици 7.2 приказана је електроотпорска машина за тачкасто заваривање алуминијума.

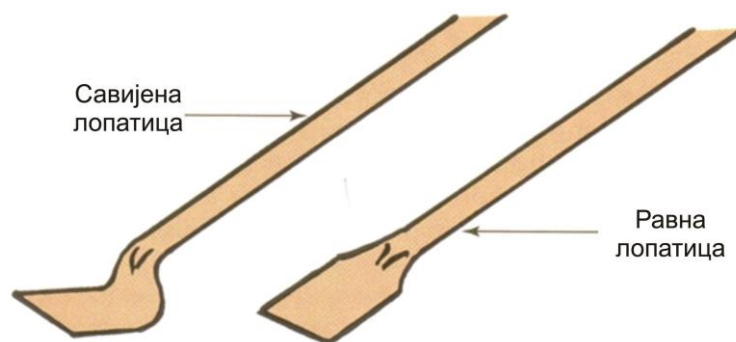


Слика 7.2 Апарат за тачкасто заваривање алуминијума [19]

7.1.4 Заваривање ливеног алуминијума

Заваривање алуминијумских одливка (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 одливка 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 одливка препоручује се предгревање на $200-280^\circ\text{C}$ и мешање купке кашикама од нерђајућег челика (слика 7.3) (жлебови су слични као код челика исте дебљине).



Слика 7.3 Мешалице коришћене за мешање растопа при гасном заваривању алуминијума [19]

7.2 Методи заваривања алуминијума и његових легура

Нежелезни метали и њихове легуре најуспешније се заварују у заштити инертног гаса (методима ТИГ и МИГ). То се односи на легуре алуминијума, бакра, магнезијума, никла, титана, берилијума и цирконијума.

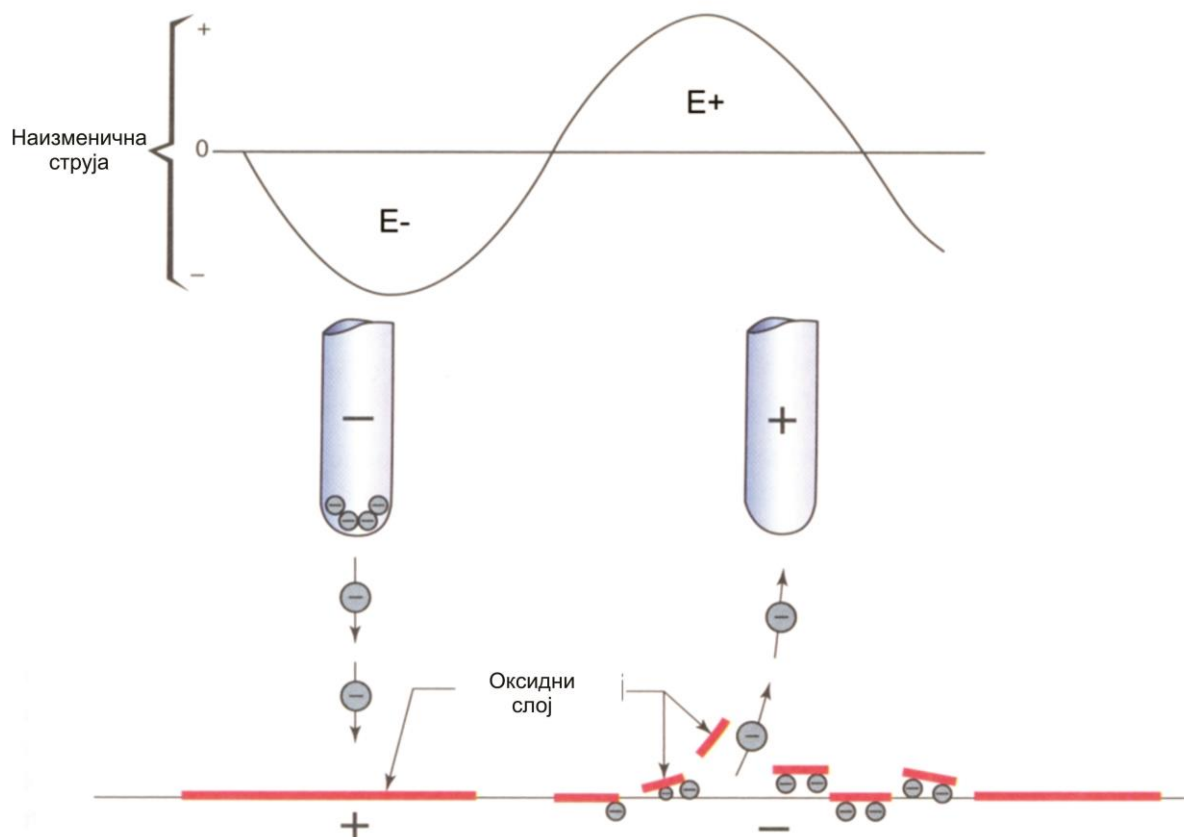
7.2.1 ТИГ заваривање алуминијума

Поред напред наведених тешкоћа на заварљивост алуминијума и његових легура, највећи утицај имају следећи фактори [20]:

- велика склоност алуминијума ка оксидацији и формирању тешко топљивог површинског оксида Al_2O_3 високе температуре топљења ($2038^\circ C$), која је око 3 пута већа од температуре топљења алуминијума ($660.4^\circ C$), а самим тим и од температуре заваривања. Густина оксида алуминијума (3.96 g/cm^3) је знатно већа од густине основног метала (2.699 g/cm^3) па оксидну скраму треба 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 при заваривању алуминијума и његових легура треба бирати поступке који дају минималан унос топлоте;
- велика термичка проводност Al (четири пута је већа од нискоугљеничних челика, а 13 пута већа од нерђајућих челика);
- велика електропроводљивост (два пута већа од бакра при истој маси јер је Al 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 $550-650^\circ C$ 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 (слика 7.4) разбија и уклања тешко топљиви оксид Al_2O_3 .



Слика 7.4 Схематски приказ катодног чишћења при ТИГ-заваривању [20]

За заваривање алуминијума и његових легура углавном се користи наизменична струја (слика 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 шави задовољавајућег квалитета [18].

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 [20]

Дебљина материјала	Врста споја	Струја заваривања.*	Раднио 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 [20]

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	95115	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	901÷10	2.4÷3.2	12.0	0.20÷0.25	2.4÷3.2	1
3.2	I	3.2	H	125150	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.

7.2.2 МИГ заваривање алуминијума

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

- није потребна употреба топитеља,
- применом једносмерне струје позитивне електроде (E+) 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 МИГ³ заваривање алуминијума [21].

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

- Пре заваривања уклонити слојеве оксида са страница жлеба и осталих површина; на минималном растојању 30÷40 *mm*.
- Пре наношења 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 зазаваривање легура алуминијума коришћен окси-ацетиленски, 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.

³ Заваривање у инертном гасу топљивом жичаном електродом, са краткоспојеним преносом додатног материјала (*Short-Arc*)

Таблица 7.3 Оријентациони подаци за МИГс заваривање алуминијума [21]

Дебљина	Тип споја	Број пролаза	Струја заваривања			Пречник електроде	Брзина заваривања	Потрошња аргона			Напомена Температура предгревања
			X ¹⁾	B ¹⁾	O ¹⁾			X ¹⁾	B 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) H, V, O - хоризонталан, вертикалан и положај заваривања изнад главе, респективно

8. Закључак

Упркос томе што је откривен релативно скоро, алуминијум је постао један од водећих метала који се користи у металској индустрији. У машинству, алуминијум и његове легуре имају веома велику и разноврсну примену. Алуминијум је материјал који је начинио значајан преокрет у металургији, али и у другим областима. Данас је немогуће замислити аутомобилску и авио-индустрију без алуминијума и његових легура.

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. Чист алуминијум има малу јачину, па као такав и ограничену примену. Стога се алуминијум легира са Cu, Mg, Mn, Si, Zn, Ni како би му се побољшале механичке карактеристике. Због позитивних особина, као што су мала густина и велика отпорност на корозију, легуре алуминијума с бакром и магнезијумом зване дуралуминијум нашле су велику примену и користе се за производњу широке групе производа - од конзерви до делова за космичке бродове. Својства легура алуминијума, пре свега механичка, углавном зависе од легирајућег елемента, јер чист алуминијум има малу јачину и велику склоност ка апсорпцији кисеоника. С обзиром на то да је процес добијања алуминијума веома сложен и скуп, то није ни дошло до осетног повећања његове производње у протеклој деценији.

Ипак, алуминијум и његове легуре налазе примену у домаћинству, нпр. у облику танке фолије за храну, док с друге стране један је од неизбежних метала у машиноградњи. Користи се за израду разних врста украсних елемената јер поседује сребрнаст сјај и добру отпорност на корозију. Алуминијум нема потврђена неповољна токсична својства, али је регистровано да неки људи могу бити алергични на овај обојени метал. Јављају се облици главобоље и мучнине када су у контакту са овим обојеним металом.

Све легуре алуминијума се могу поделити на легуре за деформисање и легуре за ливење. Легуре за ливење поседују већи проценат легирајућих елемената од легура за ковање, јер се тако побољшава њихова ливкост. 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, јер алуминијум са манганом има веома добру отпорност на корозију. Могу се користити и за израду високооптерећених компоненти као што су на пример неки судови под притиском, закивци па чак и делови авиона.

На крају треба споменути и значај алуминијума у металургији. Наиме, алуминијум има велики афинитет према кисеонику, па се због тога користи при добијању различитих метала и њихових легура (пре свега челика, титана и др.). На пример, челик легиран са око 0.2% Al назива се умирен челик и намењен је за одговорне заварене конструкције или конструкције код којих се тражи повећана жилавост на температурама испод -30°C , као и за елементе изложене динамичким и цикличним оптерећењима.

9. Литература

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, рукопис књига, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.
- [2] <http://www.pan-stil.com/wp-content/flagallery/aluminijumski-fazonski-odlivci/galerija-al-fazonski-odlivci-3.jpg> (приступљено октобра 2016.)
- [3] <http://www.hranazadusu.com/uploads/files/images/Stainless-Steel-Cookware-Set.jpg> (приступљено октобра 2016.)
- [4] <http://www.astaco.rs/b2b/images/al%20rolna%20net.jpg> (приступљено октобра 2016.)
- [5] <https://sr.wikipedia.org/sr/%D0%9B%D0%B5%D0%B3%D1%83%D1%80%D0%B0> (приступљено октобра 2016.)
- [6] <http://rus-list.ru/wp-content/uploads/2014/12/Bauxite.jpg> (приступљено октобра 2016.)
- [7] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/Nepheline_SGS_Mineral_Specimens_804.jpg (приступљено октобра 2016.)
- [8] <http://aluminazv.ba/sr/products/alumina> (приступљено октобра 2016.)
- [9] Р. Врачар: *Теорија и пракса добијања обојених метала*, Савез инжењера металургије Србије, Београд, 2010.
- [10] <http://www.srbijadanas.net/wpcontent/uploads/2013/03/%D0%BE%D0%BF%D0%B0-%D0%BB.jpg> (приступљено октобра 2016.)
- [11] <http://www.hydro.com/de/Deutschland/Uber-uns/Standorte/Grevenbroich-Hydro-Aluminum-Rolled-Products-GmbH/> (приступљено октобра 2016.)
- [12] <http://www.alternativa-forum.com/attachments/orgon/6551d1345988293-kristali-u-priro-di-11072-012059-1600x1200-.jpg> (приступљено октобра 2016.)
- [13] http://www.sargagumi.hu/image/felni/bmw/bmw_r743.jpg (приступљено октобра 2016.)
- [14] https://static.kupindoslike.com/Aluminijumski-tanjir-duboki_slika_O_32752929.jpg (октобар)
- [15] http://www.vrelegume.rs/vesti_slike/velike/1376482278_37.jpg (приступљено октобра 2016.)
- [16] <http://www.vgimport.com/assets/galleries/468/1.jpg> (приступљено октобра 2016.)
- [17] http://zanimljivostidana.com/images/Razne_SLIKE/limenke-piva-sok.jpg (приступљено октобра 2016.)
- [18] <https://encryptedtbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT0AMfYYiXkUFBLOY0WGceIH8-OnBSSBMRJxux2wnLUhnScKDDzDodZ4XTS> (приступљено октобра 2016.)
- [19] М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, универзитетски уџбеник, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [20] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић: *ТИГ заваривање-приручник*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
- [21] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић: *РЕЛ заваривање-приручник*, универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.