

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 178/2016

Душан Р. Милосављевић
Ливачке легуре алуминијума
Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Вукић Лазић, ред. проф. - ментор**
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Наведе најважнија својства алуминијума и његове предности и мане,
- Опише методе добијања алуминијума,
- Опише најважније легуре алуминијума и могућности поправљања најважнијих својстава (јачине, тврдоће, корозивне отпорности и тсл.),
- Да процени ливкост алуминијума и његових легура,
- Наведе најважније области примене алуминијума и његових легура,
- Да укаже на примену алуминијума при термитном заваривању шина и др.

Препоручена литература:

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, *Технологија ливења и заваривања*, основни универзитетски уџбеник, Факлутет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [2] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић, *Наука о материјалима I*, основни универзитетски уџбеник, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [3] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, Н. Ратковић, *Машински материјали*, основни универзитетски уџбеник, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [4] В. Лазић, М. Јовановић, Д. Арсић, *Рукописи и предавања* са портала е-Learning из предмета Машински материјали, Наука о заваривању и Производне технологије 1 и 2 (Факултет инжењерских наука у Крагујевцу).

Крагујевац, фебруара 2021.

Ментор:

Др Вукић Лазић, ред. проф.

Садржај

1. Уводне напомене о алуминијуму.....	1
1.1. Технолошке и механичке особине алуминијума	1
1.2. Добијање	3
2. Преглед легура алуминијума.....	6
2.1. Термичка обрада.....	8
2.2. Означавање легура алуминијума	10
3. Ливачке легуре алуминијума	14
3.1. Ливачке особине метала	15
3.1.1. Топљивост	15
3.1.2. Течљивост и ливкост	15
3.2. Легуре Al-Si (силумини).....	17
3.3. Легуре Al-Cu.....	20
3.4. Легуре Al-Mg.....	22
4. Преглед најважнијих метода ливења легура алуминијума	24
4.1. Ливење алуминијума у пешчаним калупима.....	25
4.1.1. Израда калупа и језгара	28
4.1.2. Поступак изливања	32
4.2. Ливење алуминијума у металним калупима	34
4.3. Центрифугално ливење	35
4.4. Прецизно ливење.....	37
4.4.1. Ливење топљивим моделима	37
4.4.2. Ливење под притиском.....	39
4.4.3. Ливење у гипсаним калупима.....	40
4.4.4. Ливење у шкољкастим калупима	41
4.4.5. Ливење у двоструким калупима	42
5. Грешке ливачких легура и методе за њихово отклањање	44
5.1. Металне израслине.....	45
5.2. Шупљине.....	46
5.3. Нецеловитост	47
5.4. Површинске грешке одливака	48
5.5. Непотпун одливак	48
5.6. Нетачне димензије и облик	48
5.7. Укључци и неправилна структура	49
6. Примена ливачких легура алуминијума у техничкој пракси	50
6.1. Транспорт.....	50
6.1.1. Авио-индустрија и свемирски програм	50

6.1.2.	Друмска возила	51
6.1.3.	Шинска возила	53
6.2.	Архитектура.....	54
6.3.	Алуминујум у електроници.....	55
6.4.	Термитно заваривање	56
7.	Закључак.....	59
8.	Литература	61

Резиме

Успешно ливење одливака засновано је на познавању технологије ливења конструкционог тима. Пројектовање готовог дела и калупа, одабир ливачког материјала и материјала калупа као и одређивање погодне машинске и термичке обраде само су неке од кључних одлука конструкционог тима које утичу на квалитет финалног производа. Технологија ливења "ослања" се на изучавање машинских материјала и њихових легура. У овом раду биће представљен алуминијум и значај његових легура, описан процес ливења и указано на својство ливкости, детаљно описани поступци и методе ливења, указано на негативан утицај ливачких грешака и методе за њихово отклањање. На крају биће речи о употреби алуминијумских одливака што ствара слику о доприносу и значају овог метала.

Кључне речи: алуминијум, ливење, силумини, калупи, ливачке грешке.

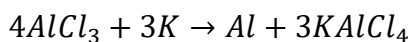
Abstract

Successful casting is based on knowledge of the casting technology of construction team. The design of the finished part and the mold, the selection of the casting material and the mold material, as well as the determination of a suitable machine and thermal processing are just some of the key decisions of the construction team that affect the quality of the final product. Casting technology "relies" on the study of machine materials and their alloys. This paper will present aluminum and the importance of its alloys, describe the casting process and point out the importance of casting, describe in detail the procedures and methods of casting, point out the negative impact of casting defects and methods for their elimination. In the end, it will be about the use of aluminum castings, which creates an image of the contribution and importance of the metal of the future.

Key words: aluminum, casting, silumin, molds, casting defects.

1. Уводне напомене о алуминијуму

Нови метал који је британски хемичар Хамфри Дејви открио почетком 19. века и назвао га алуминијум изазвао је интересовање људи у свету науке. Први га је издвојио дански хемичар Ханс Кристијан Ерстед у реакцији алуминијум хлорида са калијум амалгамом, где је калијум служио као редукционо средство.

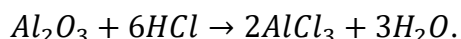


У то време технологија производње није била развијена као данас, па је алуминијум имао високу цену и сматрао се оличјем престижа, па се користио за украсне предмете попут фигура, накита, тањира и есцајага намењених богатима, а индустријска производња почиње од 1885. године. До данас улога алуминијума у свакодневном животу човека константно расте, легуре алуминијума замењују друге материјале па се за њега већ дуго прича да је материјал будућности.

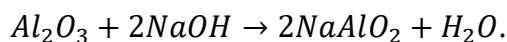
Хемијски елемент алуминијума има хемијску ознаку Al, атомски број 13. После силицијума и кисеоника, трећи је елемент по заступљености на планети Земљи, а први метал по заступљености. Земљина кора (литосфера) сачињена је највише од Al-7,51%, Si-25% и O₂-50% па се назива сиал (Si+Al). Припада групи нежелезних лаких метала чија је густина $\rho < 5000 \text{ kg/m}^3$, заједно са Li, Mg, Be и Ti. Легуре ових метала највише се користе у авиацији, транспорту и конструкцијама где је потребна мала тежина. Као легирајући елемент за добијање веома лаких легура користе се берилијум и литијум који је најлакши од свих метала. Од лаких метала у пракси се највише користи на првом месту алуминијум, а затим магнезијум и титан.

1.1. Технолошке и механичке особине алуминијума

Спада у групу лаких обојених метала због густине од $2,7 \text{ g/cm}^3$, што је око 3 пута лакше од гвожђа односно челика. Карактерише га добра топлотна ($209 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) и електрична ($38 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$) проводљивост. Сврстава се у метале са ниском температуром топљења која износи око 660°C . При загревању задржава површински центрирану кубну решетку до температуре топљења (неалотропан метал). Краси га изузетна обрадивост деформисањем на топло и на хладно, као и отпорност на атмосферску корозију, и корозију у морској води. Електронска конфигурација атома алуминијума је $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$, оксидациони број је +3. Заштиту од корозије добија реакцијом са кисеоником из атмосфере чији је оксидациони број -2 па се формира слој Al_2O_3 , који штити материјал од даље оксидације, дебљине $0,1 \mu\text{m}$. У активним срединама боље се показује чистији алуминијум. Корозиона отпорност се може додатно повећати поступком елоксирања, што се односи на повећање дебљине оксидног слоја Al_2O_3 , па та дебљина достиже $10 \mu\text{m}$ (максимум $40 \mu\text{m}$), што је довољно за потребе хемијске и прехранбене индустрије. Није отпоран на хидроксиде попут NaOH или KOH, као ни на халогене киселине (HCl, HF). У контакту са HCl долази до реакције алуминијум оксида (заштитног слоја) и хлора уз издвајање воде:



Натријум хидроксид се користи у поступку добијања алуминијума о чему ће бити више речи, а када се нађу у контакту реагују уз издвајање натријум алумината и воде, по реакцији:



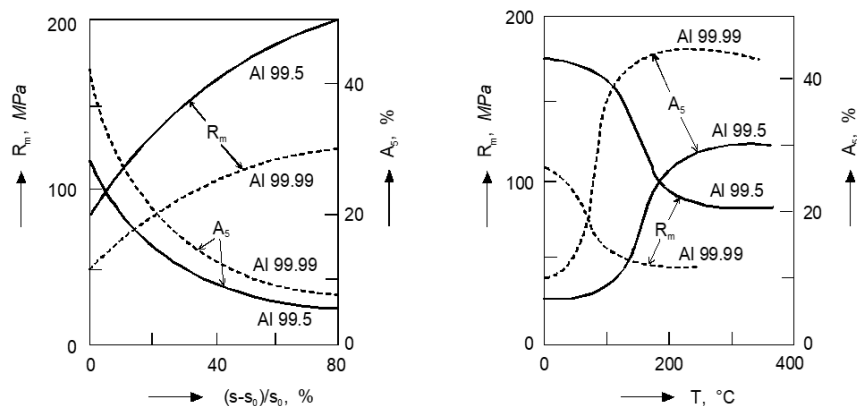
Механичке и технолошке особине Al се разликују код хемијски чистог (99,99%) и технички чистог (99,5%) што је приказано у табели 1.1. У циљу добијања што чистијег алуминијума, он се рафинише (пречишћава) електрометалуршким методама. У пракси се не користи хемијски чист већ само технички чист Al, чије су најчешће примесе Fe и Si, које потичу из руда полазних сировина и веома тешко се уклањају.

Табела 1.1 Особине чистог Al у жареном стању при температури од 20°C

Механичке особине		Al 99.99	Al 99.5
Техничка граница течења	$R_{p0,2}$, МПа	15	50
Јачина на кидање	R_m , МПа	50	80
Издужење	$A_{5.65}$, %	45	30
Контракција	Z , %	90	70
Модул еластичности	E , МПа	69000	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		

При садржају изнад 0,05% Fe појављује се еутектичка фаза ($\alpha + Al_3Fe$) која негативно утиче на корозивну отпорност и обрадивост деформисањем. На исти начин утиче и Si у количинама изнад границе растворљивости од 11.7% због грубих игличастих кристала који ремете структуру решетке. Од укупно произведеног Al, 35% се прерађује у полупроизводе, а 65% служи за производњу легура, највише силумина.

Технички чист алуминијум има ниску јачину која се може повећати деформационим ојачањем на хладно. Са слике 1.1 (лево) се види да при порасту степена прераде расте и чврстоћа, а сразмерно порасту чврстоће опада дуктилност, где је A_5 издужење, R_m затезна чврстоћа, а $(s-s_0)$ степен прераде тј. разлика почетне и крајње дебљине деформисане траке (лима). На величину деформационог ојачања при истом степену прераде утиче чистоћа алуминијума при чему технички алуминијум више ојачава. Уочљиво је и да је код хемијски чистог Al мања разлика чврстоће и дуктилности при вишим степенима прераде.

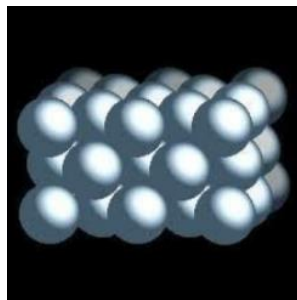


Слика 1.1 Промена затезне чврстоће R_m и истегљивости $A_{5,65}$ у зависности од: степена прераде на хладно $(s-s_0)/s_0$ (лево); у зависности од температуре рекристализационог жарења $((s-s_0)/s_0 = 50\%$, време жарења 1 h) (десно)

У току опорављања, код алуминијума се догађа полигонизација где издужена зрна постају кружног облика, што успорава раст и стварање нових зрна. Код веома чистог алуминијума, уколико је његов степен прераде висок, рекристализација може почети и на собној температури. Слика 1.1 (десно) представља промену чврстоће и истегљивости у зависности од температуре жарења у трајању од једног часа, код алуминијума чији је степен прераде 50%.

Са дијаграма се види да при порасту температуре рекристализације јачина опада, а истегљивост расте. За технички Al при 50% степена прераде рекристализациона температура износи око 150°C, када долази до нагле промене јачине и издужења. У пракси рекристализационо жарење се изводи на 300-400°C. Прерада на топло обавља се на температури изнад температуре рекристализације, 350-500°C.

Микроструктуру Al чини површински центрирана кубна решетка Al (сл. 1.2). Оваква оријентација распореда атома алуминијума ствара густо спаковане равни које се понашају као равани клизања при дејству силе, па је могућа деформација на хладно, сходно тзв. Шмидовом закону.



Слика 1.2 Површински центрирана кубна решетка алуминијума

1.2. Добијање

У природи се не може наћи у хемијски чистом стању због великог афинитета према кисеонику и силицијуму. Руда из које се добија Al је боксит који се састоји од алуминијумових хидроксида, примеса SiO_2 , оксида и хидроксида Fe и других метала.

При високим температурама вулканских процеса настаје безводни минерал корунд Al_2O_3 који је високе тврдоће и температуре топљења. Корунд бива обојен у присуству оксида других метала попут гвожђа, кобалта, хрома, и на тај начин настаје драго камење као што су рубин, смарагд, сафир и аметист.

Поступак добијања алуминијума изводи се дробљењем и млевењем руде боксита (сл. 1.3). Млевени боксит се затим суши на 250°C па се меша са NaOH (каустична сода) и добија се воденаста суспензија (каша) која садржи fine честице руде. Смеша се затим кува у аутоклаву на температури од 170°C и притиску од 7-8 бара где се алуминијум оксид преводи у натријум алуминат NaAlO_2 , док се остатак садржаја руде таложи. Овај раствор се затим одваја, пропуштањем кроз низ филтера, од талог који се назива црвени муљ (сл. 1.4) сачињен од оксида гвожђа, силицијума и титана. Овако издвојеном NaAlO_2 додаје се мала количина AlOH што доводи до преципитације и увећања броја центара кристализације па се издваја чист чврст Al(OH)_3 . Овај талог се суши на температури око 950°C да би се уклонила вода и добија се глинаца Al_2O_3 .



Слика 1.3 Млевање боксита

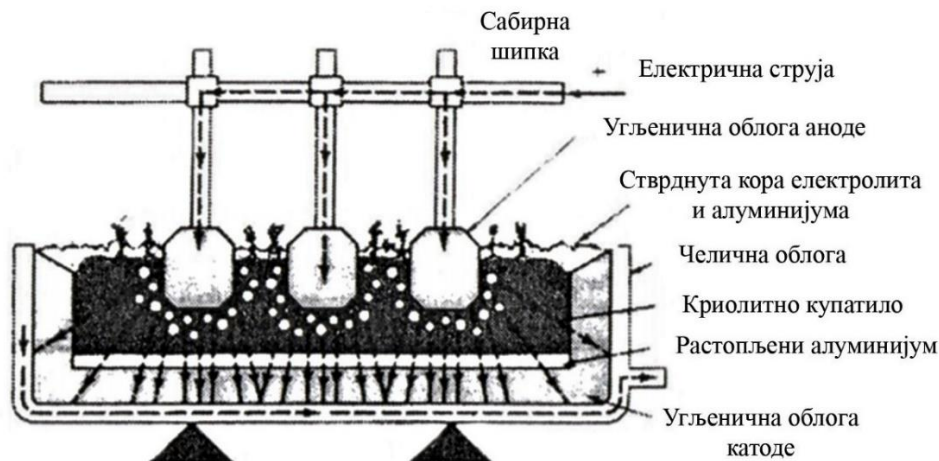


Слика 1.4 Црвени муљ, постројење у Штаду, Немачка

Алуминијум се добија електролизом глинице у електричним пећима где јака једносмерна струја пролази између катоде и аноде кроз електролит који је растоп глинице и криолита (натријумов минерал Na_3AlF_6) на 950°C (сл. 1.5). Струја која пролази кроз електролит изазива дисоцијацију:



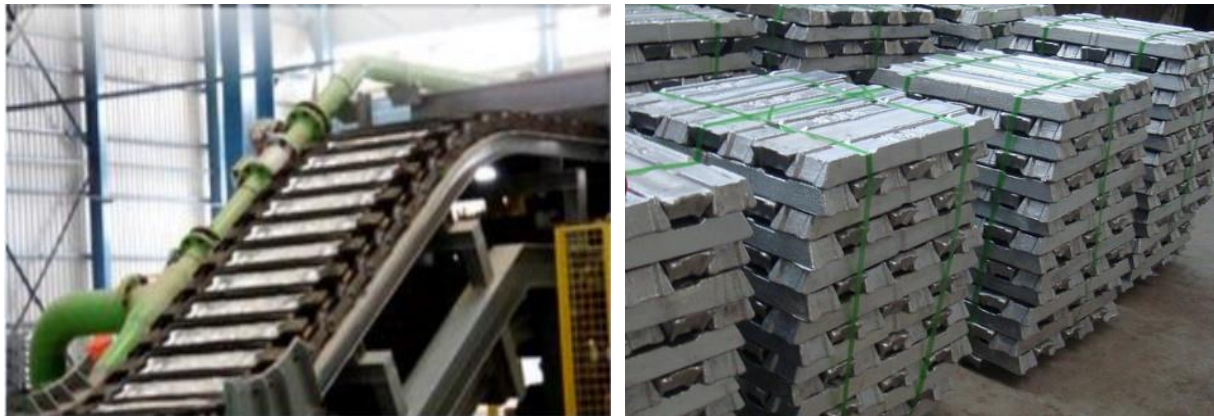
Алуминијум пада на дно тј. на катоду а кисеоник на аноду где прелази у CO и CO_2 . Електролиза се врши уз угљеничне електроде и овакав начин електролизе назива се електролиза растопа. Као резултат добија се течни алуминијум чистоће 99.5-99.9% који се са дна транспотрује пумпама и лије у трапезастим металним инготима. Иако се стално испитују нове методе, може се рећи да је до данас овај начин добијања алуминијума најисплативији.



Слика 1.5 Процес електролизе

За производњу једне тоне металуршки чистог алуминијума потребно је две тоне Al_2O_3 , четири тоне Na_3AlF_6 и око 20.000 kWh, што је утрошак енергије скоро десет пута већи него за производњу исте количине челика.

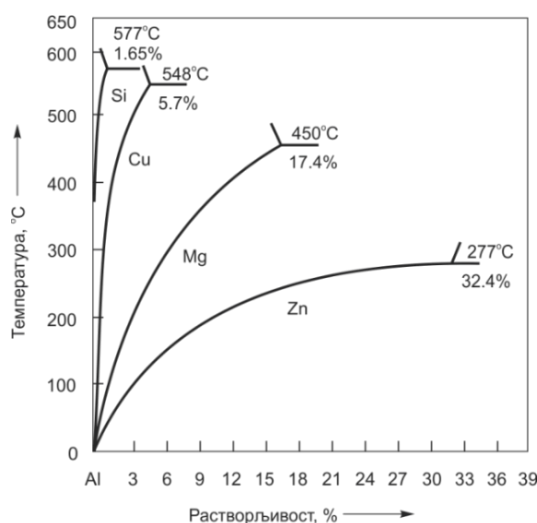
Инготи су ливени трупци правугаоног или кружног облика који су погодни за ковање, пресовање и ваљање. Добијају се изливањем течног метала у кокиле, што је приказано на слици 1.6.



Слика 1.6 Ливење трапезних алуминијумских ингота

2. Преглед легура алуминијума

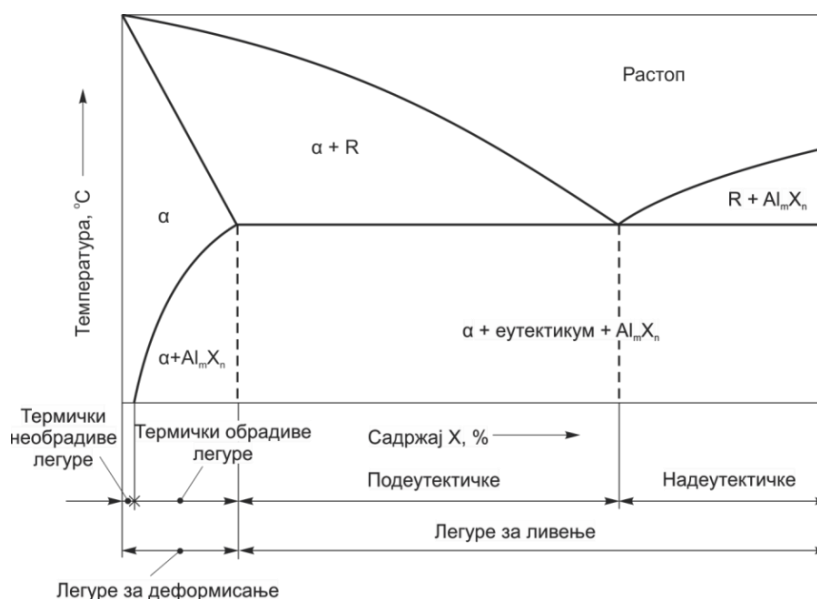
Да би се добиле боље механичке и техничке особине материјала (чврстоћа, тежина, обрадивост, отпорност на корозију, електрична проводљивост), технички чист алуминијум, у течном стању се може легирати са Si, Fe, Cu, Mg, Mn, Zn, Ni, Ti, Be, Li, Cr, Mo, који могу чинити до 15% масе, тако што се при високим температурама растопљеном Al додају легирајући елементи, а затим се легура хлади погодном брзином. На тај начин настају легуре које чини засићени чврсти раствори алуминијума, док нерастворљиви остатак гради хемијска једињења. Засићен чврст раствор алуминијума одређен је растворљивошћу легирајућих елемената у њему на одређеној температури што се види за Si, Cu, Mg и Zn на слици 2.1. Растворљивост гвожђа у алуминијуму је само 0,052% па су због тога алуминијум и челик међусобно незаварљиви.



Слика 2.1 Растворљивост Si, Cu, Mg и Zn у алуминијуму

Све легуре алуминијума се могу поделити у две групе:

1. Легуре за пластичну обраду и
2. Легуре за ливење.



Слика 2.2 Шема бинарног равнотежног дијаграма Al-X (X- легирајући елемент)

Са равнотежног дијаграма Al-X (Al-легирајући елемент) на слици 2.2 види се уопштена подела бинарног система на легуре за деформисање и легуре за ливење. Легуре које загревањем могу прећи у хомогено стање у потпуности (α фаза) погодне су за пластично деформисање због добре истегљивости (ковање, ваљање, пресовање) и једном речју се називају ковним легурама. Легуре које садрже еутектикум се лију.

Легуре за пластично деформисање деле се на термички необрадиве легуре које имају релативно мали проценат легирајућих елемената, па на собној температури њихову структуру чини α фаза, и на оне које термички ојачавају и на собној температури имају засићени чврсти раствор α и једињење које нерастворљив остатак легирајућег елемента гради са алуминијумом Al_mX_n . Легуре које су термички необрадиве (таложно не ојачавају) су Al-Mn и Al-Mg двокомпонентне легуре које се користе за цеви, жице, профиле. Код Al-Mn легура растворљивост у α фази је мала, свега 1.5%, а преко тога настаје једињење Al_6Mn које лоше утиче на механичке особине. Магнезијум је знатно више растворљив у Al, али такве легуре имају лошу истегљивост што није погодно за пластичну обраду. Легуре термички обрадиве (које таложно ојачавају) су Al-Cu-Mg-(Ni), Al-Mg-Si и Al-Zn-Mg-(Cu). Најзначајнији за индустрију међу њима су дурали и супердурали Al-Cu₄-Mg, Al-Cu₄-Mg₁ који имају велику улогу у производњи летилица и друмских возила. То су легуре са углавном бољим механичким особинама од ливачких легура, добре заварљивости, погодне за ковање, дубоко извлачење, савијање, истискивање, обраду на топло и на хладно.

Легуре за ливење се састоје из засићеног чврстог раствора алуминијума α , нерастворљивог остатка који гради једињења и еутектичке фазе. Главни легирајући елементи су силицијум, бакар, магнезијум и цинк, неке од ових легура и њихове примене истакнуте су у табели 2.1. Ливачке легуре које таложно не ојачавају су вишекомпонентне легуре типа Al-Si, Al-Mg и Al-Cu.

Табела 2.1 Одабране ливачке легуре алуминијума

Ознака хемијског састава	Примена
AlSi13Mn	Танкозидни одливци непропустљиви за течност
AlSi10Mn	Прибор који долази у додир са животним намирницама
AlMg5SiMn	Ребрасте цилиндарске главе, 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)
AlSi8Cu ₄ Mn	Високооптерећени сложени одливци (блок мотора)
AlCu4Ni2Mg	Клипови већих димензија
AlCu8FeSi	Кућишта и кошуљице клизних лежишта

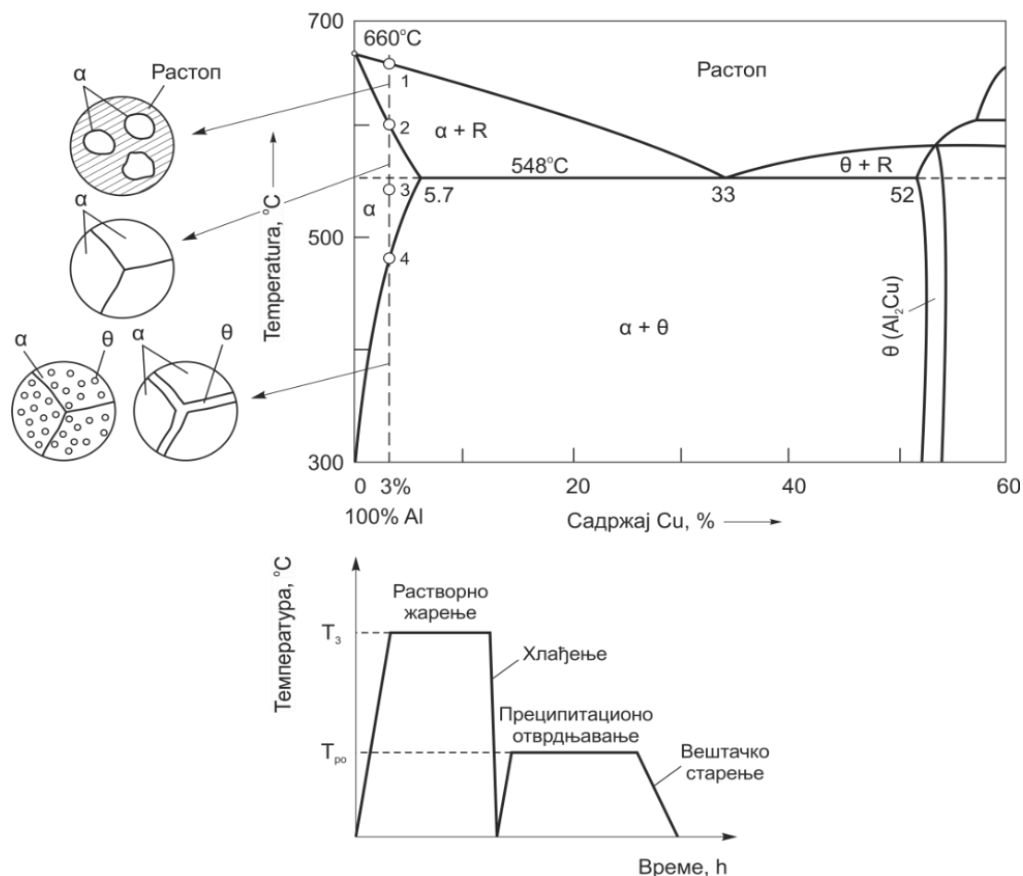
Ливачке легуре које таложно ојачавају су легуре са додацима Cu, Mg, Ni. Силумини са додатком Mg ојачавају градећи β' фазу Mg_2Si па легура достиже 200-250 МПа при малом издужењу од 1-3%. Неке термички обрадиве легуре Al-Cu-Si због добре отпорности на хабање користе се за клизна лежишта. Заједничко за све ливачке Al легуре јесте да имају особину ливкости, дакле могу да се лију. Кристалишу

у две или више фаза где основну фазу чини алуминијум са у њему раствореним легирајућим елементима, додацима и нечистоћама, и еутектичке фазе.

2.1. Термичка обрада

Одливци Al легура, као и неке легуре након обраде деформисањем, имају малу јачину а високу дуктилност. Овај проблем решава се термичком обрадом попут жарења, хомогенизације, природног и вештачког старења. Термички поступак који се најчешће користи је пресићење и обухвата загревање дела на одређену температуру испод солидус линије, прогревање неко време на тој температури и потом нагло хлађење у води при чему материјал задржава структуру на собној температури какву је имао на повишеној. Након термичког третмана дешава се таложно ојачање, уско везано са старењем материјала, где се таложне дисперговане честице које делују као препрека дислокацијама и на тај начин легура бива ојачана. Термичка обрада алуминијума се умногоме разликује него код челика. Процес старења ојачава део на повишеној или собној температури током периода од четири до пет дана, при чему се 90% ојачавања догоди током првог дана.

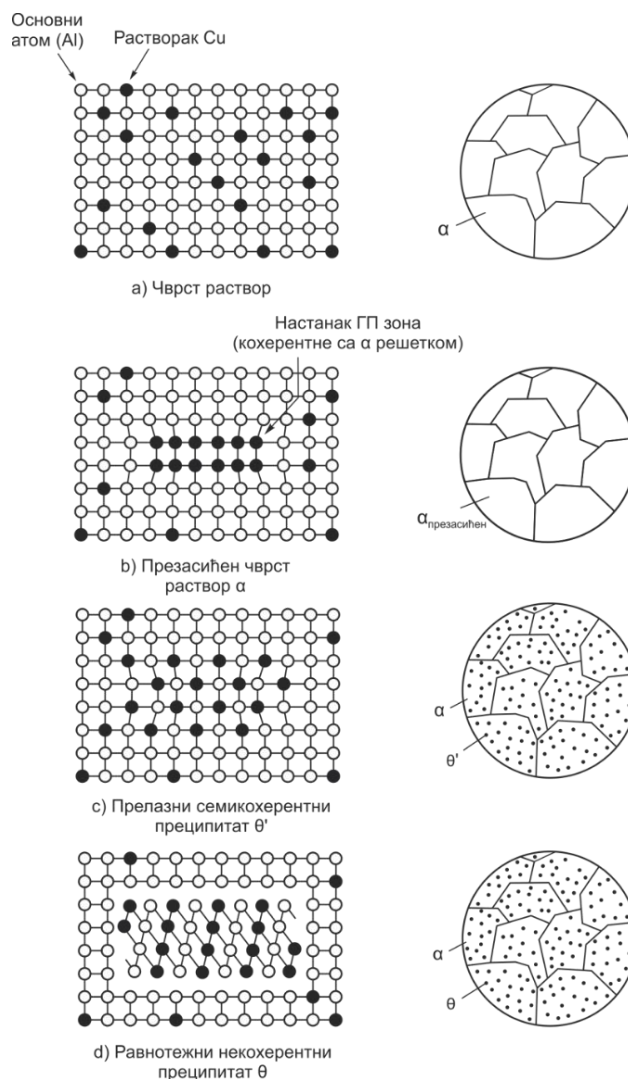
Хомогенизација је битна термичка обрада одливака од Al легура. Када део у калупу почне да се хлади, прво отврдњавају спољашњи делови одливка који су у директном контакту са калупом. Њихову структуру чине зрна Al са малим уделом легирајућих елемената који се постепено таложу и очвршћавају ка средини одливка. Добија се нехомогена структура, што за последицу има образовање унутрашњих напона и различиту јачину у различитим деловима одливка. Одливак се хомогенизује загревањем на температуру нешто испод топљења, зависно од легуре од 450 до 550°C. После достизања ове температуре део се полако хлади и добија се хомогена структура.



Слика 2.3 Бинарни равнотежни дијаграм Al-Cu

Термичко ојачање се може видети на примеру бинарне легуре Al-Cu (сл. 2.3). При температури од 548°C и уделу Cu од максимално 5.7%, структуру легуре чини хомогена α фаза, док је растворљивост Cu на собној температури свега 0,1% што се види са датог дијаграма. Ако се легура загреје до испод солидус линије и на њој прогреева, реч је о растворном жарењу, при брзом хлађењу из α фазе са раствореним, на пример 3% Cu јавља се хетерогена структура ($\alpha + \theta$) коју чини чврст раствор фазе α и сегрегат θ (Al₂Cu) који се задржава на границама зрна, а чији удео бакра у легури расте ка максималној растворљивости у фази α . На примеру легуре AlCu₃ може се објаснити процес термичког ојачања, формирањем Гиније-Престонових зона, који се састоји из 3 етапе:

1. Равнотежно жарење које обухвата загревање легуре у области чврстог раствора α , изнад сегрегационе тачке од 490°C али испод солидус линије. На тој температури легура се задржава док се сав сегрегат не раствори у α фазу.
2. Следи каљење, тј. нагло хлађење раствора до собне температуре у води, што онемогућава сегрегацију и као резултат настаје пресићено, термодинамички нестабилно стање α' . Ово стање је подложно распаду услед старења или излагању топлотној или механичкој енергији.
3. Старење као наредна етапа у ојачању доводи до формирања ГП-зона (сл. 2.4), може бити природно на температури околине или вештачко на повишеним температурама. Брзина старења зависи од температуре и од хемијског састава легуре. Код легуре са 3% Cu старење се одвија при 130°C тако што се у првој фази старења некохерентно распоређени атоми бакра који имају мањи радијус од атома алуминијума, локално нагомилавају и образују сопствену тетрагоналну решетку, па се решетка α фазе на тим местима скупља али се задржава кохеренција (нема оштре фазне границе) са решетком алуминијума. Тако почиње формирање Гиније-Престонове зоне која деформише кристалну решетку α фазе и ствара напонско стање тако што спречава померање дислокација и на тај начин ојачава легуру.



Слика 2.4 Шематски приказ етапа старења и микроструктуре легуре AlCu3

У другој фази старења, настају једињења Al_2Cu која доводе до прелазних метастабилних семикоherentних преципитата, фазе θ' која има тетрагоналну решетку и полукоherentна је. У трећој фази долази до груписања преципитата фазе θ у равнотежне мреже које губе коherentност са равнима решетке основе. Тако цео систем долази у равнотежно стање које чине две фазе α и θ .

Таложно ојачање је веће када је процентуални удео бакра у легури ближи максималној растворљивости у чврстом раствору α . Старење се убрзава са повећањем температуре, али изнад одређене температуре не настају ГП-зоне без којих ојачање није успешно.

2.2. Означавање легура алуминијума

Међународно прихваћен стандард означавања алуминијумских легура јесте Амерички стандард АА систем (Aluminum Association inc.). АА група је организација за трговину, производњу, рециклажу алуминијумских продуката, као и њихову стандардизацију и обухвата готово све познате легуре алуминијума које су у употреби.

Легуре за пластично деформисање означавају се четвороцифреним бројем где први број означава серију односно главни легирајући елемент, други број ако се разликује од 0 означава модификацију одређене легуре, док последња два броја

идентификују одређену легуру у низу. На пример, легура 5356, први број 5 нам указује на то да је легура из серије 5000, што су легуре где је главни легирајући елемент Mg. Број 3 нам говори да је то трећа модификација оригиналне легуре 5056, а број 56 говори о којој се легури ради из серије 5000. Модификације легура су регистроване и могу се наћи у "IADS" документацији. Једини изузетак код означавања деформационих легура јесте серија 1000 код које последње две цифре приказују минимални проценат алуминијума изнад 99%, на пример легура 1350 има минимални проценат алуминијума 99,50%.

- Легуре серије 1000 се уопштено називају меким легурама. Најчешће се користе у електро и хемијској индустрији, али се могу наћи и у облику цеви, шипки, жице, фолије. Садрже најмање 99% алуминијума, и обично само трагове других елемената углавном Fe и Si.
- Серију 2000 чине "тврде легуре". Оне се најчешће користе у авио-индустрији и у војне сврхе. Бакар је главни легирајући елемент ове групе, али легуре могу да садрже и значајне количине силицијума, мангана, магнезијума, никла или титан. Одликују се високом чврстоћом, али захтевају третман термичког ојачања да би се постигле максималне карактеристике, па се по механичким особинама могу приближити нисоугљеничном ваљаном челику. Добра обрадивост одликује легуре ове серије, док им је корозивна отпорност слаба страна.
- Серија 3000 је још један скуп "меких легура". Главни легирајући елемент је манган, а такође често садрже бакар и магнезијум. Ова серија је прилично отпорна на корозију али није погодна за машинску обраду. Примена укључује лимове, плоче и цеви.
- Серија 4000 садржи Si као главни легирајући елемент. Ове легуре служе за прављење жица, а погодне су за заваривање и лемљење.
- Серија 5000 је следећи скуп "тврдох легура" које су легиране релативно високим процентом магнезијума и садрже манган, хром, титан, као и друге примарне легирајуће елементе. Поседују добру отпорност на корозију у морској води, па налазе широку примену у бродоградњи. Користе се у виду плоча, лимова, жица, цеви, проводника, отковака, електрода за заваривање и фолије. Ову серију одликују добра својства јачине и могућност спајања заваривањем. Легуре нису погодне за пластичну прераду на хладно, а излагање повишеним температурама смањује њихову отпорност на корозију.
- Код легура серије 6000 користе се магнезијум и силицијум као главни легирајући елементи. Легуре ове серије заузимају и највећи део тржишта алуминијумских производа. Многе од ових легура су релативно јефтине, широко доступне и јаке. Погодне су и за завршну машинску обраду, поседују добру отпорност на корозију, обрадивост, могућност заваривања и обликовања. Такође се могу термички обрађивати. Могу се растворно жарити и старити, све до стања T6.
- Легуре серије 7000 садрже највећи проценат цинка као главног легирајућег елемента, док су силицијум, никл и манган код њих ретко заступљени. Оне нуде високе механичке особине, добру машинску обрадивост и термички су обрадиве али имају слабу отпорност на корозију. Такође се често користе у авио-индустрији и војним применама. Примењују се у облику лимова, плоча, жица, шипки, конструкционих облика, цеви, отковака итд.
- Серија 8000 постоји као серија осталих Al легура које нису обухваћене у претходних 7, пример су Li легуре.

Када су у питању легуре за ливење, оне се по АА систему означавају са 3 цифре, плус једна цифра после тачке. Прва цифра дефинише главни легирајући елемент који се односи на:

1. серија са минимум 99% Al;
2. серија Al-Cu легура;
3. Al-Si са додацима других елемената;
4. бинарне легуре Al-Si;
5. легуре Al-Mg;
6. легуре Al-Zn;
7. легуре Al-Sn;
8. легуре осталих елемената.

Друге две цифре указују на модификацију легуре, изузев за легуре серије 1xx.x код којих друге две цифре показују минимални проценат алуминијума у легури. Цифра после тачке може бити 0 или 1, Нула означава да је реч о одливку, а 1 да се ради о инготу.

Свака легура која прође било механичку или термичку обраду бива означена словним ознакама које карактеришу својства која легура добија обрадом. Код легура за пластично деформисање накнадним термичким обрадама се подвргавају легуре из серија 2000, 6000 и 7000, док се легуре серија 1000, 3000 и 5000 не обрађују термички, већ ојачавају деформисањем на хладно. Ливачке легуре се готово све обрађују термички после ливења. У табели 2.2 и табели 2.3 дате су ознаке легура које показују како се оне механички односно термички третирају.

Табела 2.2 Ознаке за обраду легура

F - Фабричко стање	Ова ознака се користи за производе који су подвргнути преради на хладно или топло и где нема специјалне контроле процеса. Производ који има ову ознаку нема захтевани лимит механичких својстава.
O - Жарено стање	Ова ознака се користи за производе који су подвргнути пластичној преради с циљем да се обезбеди најнижа чврстоћа.
H - Напонско ојачање	Само за производе подвргнуте преради на хладно у циљу повећања јачине и тврдоће.
T - Растворно жарено	Ова ознака коришћена је у систему легура које су намењене термичкој обради.

Табела 2.3 *Ознаке термичких обрада легура*

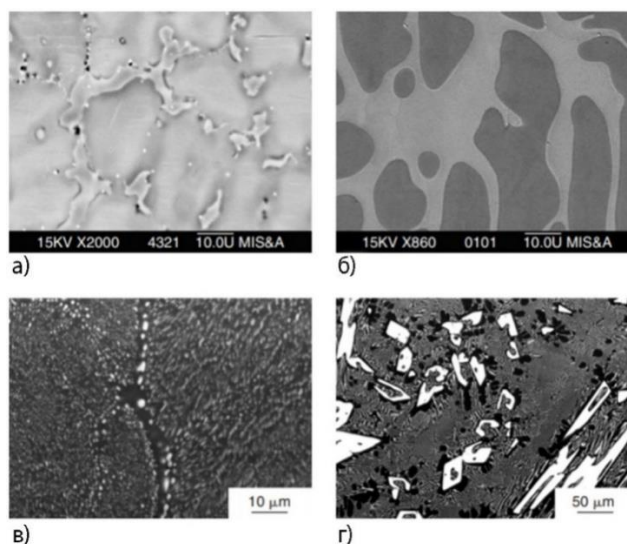
Типичне термичке обраде за екструзију	
О	Потпуно жарење
T1	Хлађено са радне температуре обликовања и природно старено
T2	Хлађено са радне температуре обликовања, хладно обликовано и природно старено
T3	Растворно жарено, хладно обликовано и природно старено
T4	Растворно жарено и природно старено
T5	Хлађено са радне температуре обликовања и вештачки старено
T6	Растворно жарено и вештачки старено
T7	Растворно жарено и престарено
T8	Растворно жарено, хладно обликовано и вештачки старено
T9	Хлађено са температуре обликовања, хладно обликовано и вештачки старено

3. Ливачке легуре алуминијума

Човек одвајкада има потребу да лије нежелезне легуре. Археолошке ископине указују да је бакар први ливени метал кога је човек користио пет миленијума пре Христа, а ливачке легуре бакра се и данас примењују. У неолитским локалитетима у Великом Лаолу код Петровца на Млави пронађена су ливена бакарна оружја и оруђа која је човек лио у шупљине направљене у стени, претходно истопивши бакар у керамичим посудама. Камене калупе су потом разбијали и служили се одливцима. Ливачке легуре алуминијума поседују веће количине легирајућих елемената Si, Cu, Mn, Mg, Ni, садржане су од растворљивих примеса, нерастворљивог остатка и већег удела еутектике. Механичке особине су им релативно лоше док им технолошке особине омогућавају ливење у влажним пешчаним калупима, у металним калупима (кокилама) или ливење под притиском, а сам начин ливења одређује особине легура као и термичка обрада и хемијски састав. На пример, код ливења под притиском, хлађење лива је брзо и добија се ситнозрнаста структура одливака где је α фаза презасићена па се старење одвија без претходног растворног жарења. Технички чист Al има малу тврдоћу и тешко се лије, па се његови одливци користе само за потребе електротехнике због добре проводљивости. Ливачке легуре алуминијума се деле на оне које термички не ојачавају и које термички ојачавају. Све ливачке Al легуре у зависности од процентуалног удела еутектике могу се поделити у 4 групе:

1. Легуре типа "чврстог раствора", карактерише их неуравнотежена еутектичка реакција која нестаје термичком обрадом Т6, то су неке легуре Al-Cu и Al-Mg;
2. Подеутектичке легуре код којих еутектика има двофазну структуру;
3. Еутектичке, код којих је еутектика главна микроструктурна компонента;
4. Надеутектичке легуре које имају прекомеран удео еутектике.

Удео еутектичких фаза одређује карактеристике легуре. Разлике се могу видети под микроскопом, (сл. 3.1) а), б), в) и г) одговарају типовима легура по уделу еутектике, респективно.



Слика 3.1 Микроструктура одливака са различитим уделом еутектике

Еутектичке фазе које формирају легирајући елементи са алуминијумом умногоме одређују одлике одливка. Из тог разлога квалитетан одливак чини легура таквог састава да легирајући елементи формирају фазе које ће побољшати механичке и технолошке особине, ливкост или елиминисати утицај нечистоћа.

3.1. Ливачке особине метала

Скуп ливачких карактеристика материјала које утичу на добијање одливка добрих физичко-механичких особина једном речју назива се ливкост. Особине метала које чине ливкост су: топљивост, течљивост, растворљивост гасова у течном металу, сегрегација неких састојака, температурска промена запремине и друге особине које имају утицај на топљење, изливање и кристализацију метала.

3.1.1. Топљивост

Способност легура метала да при загревању мирно пређу из чврстог стања у течност и да образују хомоген раствор, назива се топљивост. Процењује се на основу температуре топљења, температурском интервалу кристализације легуре и количини топлотне енергије потребне за топљење. Према температури топљења изводи се подела на:

1. Легуре са високом температуром топљења (титан, гвожђе и никл),
2. Легуре са средњом температуром топљења (бакар) и
3. Легуре са ниском температуром топљења (алуминијум, калај, магнезијум, цинк, олово).

Легуре које у свом саставу имају еутектичку фазу по правилу имају добру топљивост, од којих су најпознатије бинарне легуре Al-Si, Fe-C и Cu-Sn, легуре са ниском температуром топљења, специфичном топлотом и латентном топлотом топљења. Температура топљења (T_f), је температура на којој почиње прелазак у течност стање метала, специфична топлота је количина енергије потребна да се преда легури како би једна јединица масе променила своју температуру за једну јединицу температуре (c_p) а латентна топлота (r) је количина енергије која се прима или ослобађа из легуре при промени агрегатног стања.

3.1.2. Течљивост и ливкост

Течљивост је способност метала да у што већој мери испуни најудаљеније шупљине калупа. Течљивост (ϕ) легура у растопљеном стању зависна је од унутрашњег трења које се јавља при релативном кретању два слоја растопа један у односу на други. Тај отпор се назива динамичка вискозност (η) који зависи од врсте материјала и температуре топљења, приказано у табели 3.1.

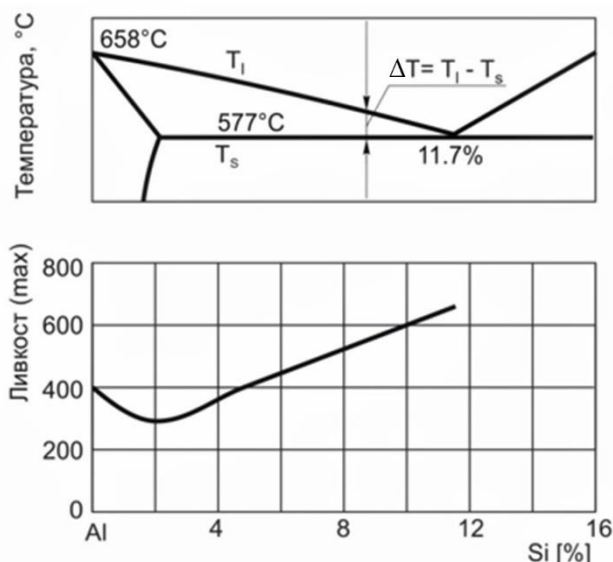
Табела 3.1 Вискозност неких растопљених метала и H_2O

Материјал	Температура, °C	Динамичка вискозност (η), kg/ms (Pa·s)
Чисто гвожђе	1600	0,0040
Угљенични челик	1555	0,0026
Сиви лив	1250	0,0021
Бакар	1200	0,0032
Алуминијум	800	0,0027
Цинк	500	0,0037
Калај	300	0,0017
Вода	20	0,0010

Вискозност течности се смањује са порастом температуре а између солидус и ликвидус температуре вискозност нагло опада. За ливачке легуре је најбитнија течљивост на температури ливења која је углавном 100-150°C изнад ликвидус линије. Проба ливкости спроводи се у спиралном калупу где се ливкост одређује на основу дужине изливене спиралне шупљине. Течљивост легуре престаје у спирали услед хлађења лива, унутрашњег трења, отпора зидова и ваздуха па када ови отпори надмаше хидостатички притисак лива, тада течење престаје и легура кристалише.

На ливкост као технолошку особину лива утичу:

1. Густина лива, специфична и латентна топлота, јер утичу на температурски опсег у коме је лив у течном стању;
2. Хемијски састав легуре директно утиче на ликвидус и солидус температуре. Хемијски састав еутектичких легура позитивно утиче на ливкост јер су легуре блиске еутектичкој оне са малом разликом ликвидус и солидус температуре што значи да те легуре при мањим температурама прелазе у течно стање односно при хлађењу дуже остају течне (сл. 3.2).



Слика 3.2 Ливкост легура Al-Si у зависности од интервала $\Delta T = T_l - T_s$, односно садржаја Si у силиумину

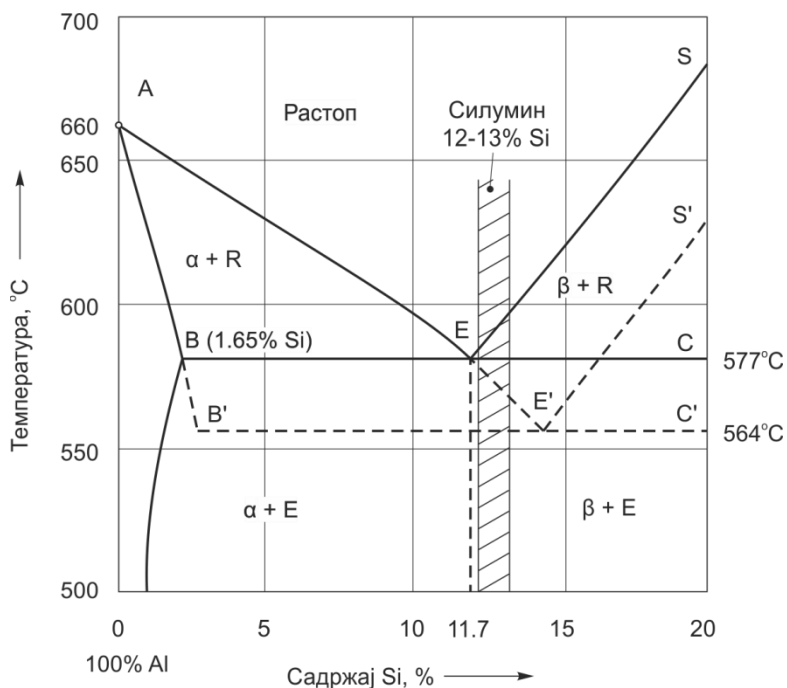
3. Широки опсег очвршћавања лоше утиче на ливкост због могуће појаве дендритних ликвација које настају при брзом хлађењу услед неравномерне кристализације, и зоналних ликвација унутар легуре у течном стању пре ливења.
4. Вискозност утиче негативно на течљивост и ливкост, јер је растопу потребно више времена да попуни запремину шупљине услед савладавања унутрашњег трења.
5. Површински напон лива ствара потешкоће за попуњавање танкозидних одливака, јер спречава лив да се лако разлије.
6. Нечистоће и оксидни раствори у ливу смањују ливкост.
7. Температура ливења утиче на ливкост (уколико калуп и начин ливења то дозвољавају) јер услед веће температуре лива он има више времена да попуни калупну шупљину пре почетка кристализације.
8. Брзина струјања лива која је одређена дебљином зидова калупа, конструкцијом уливног система и спољним факторима, начином ливења (под притиском, центрифугално ливење). Лив брже протиче кроз дебље калупне шупљине а уколико

код гравитационог ливења постоји левак веће запремине доливањем растопа он се потискује и брже попуњава калуп.

9. Калуп утиче на ливкост због храпавости унутрашњих површина шупљине које повећавају отпор кретању, и због различитог коефицијента акумулације топлоте (b_k) код различитих типова калупа. Калупи са мањом вредношћу коефицијента акумулације топлоте као што су песак и глина спорије одводе топлоту у контакту са ливом па се он спорије хлади. Да би се смањила температурска разлика калупа и лива због конвекције, калупи се предгревају пре ливења.

3.2. Легуре Al-Si (силумини)

Силумини су легуре мале густине од 2.65 g/cm^3 , имају добру корозивну отпорност и изузетне ливачке особине, као што су велика течљивост, мало температурско скупљање (0,5%) и незнатну склоност ка прслинама. Тешко се полирају са порастом Si који доводи до повећања јачине и благог пада истегљивости. Ове легуре могу да садрже 4-22% силицијума и чине око 90% свих Al одливака. То је резултат њихове добре ливкости, отпорности на пукотине приликом ливења уз добра технолошка својства при готово свим методама ливења. Силумини носе ознаке 3xx и 4xx а поред силицијума основни елементи у њима су Cu, Mg, ређе Zn и Ni. Ови елементи повећавају чврстоћу на рачун смањења еластичности. Легуре са уделом од 4-9% Si су подеутектичке легуре, што значи да еутектичка компонента има двофазну структуру, пример је бинарна легура Al-Si са 7% Si. Са уделом од 10-13% добијају се еутектички силумини код којих је еутектика главна компонента и који имају најповољније особине. Од 14-22% Si настају надеутектички силумини. Доња граница од 4% одређена је потребом за остваривањем минимално тражене тврдоће и добре ливкости, док је горња граница 22% одређена минималном потребом пластичне деформације, јер је силицијум крт и са повећањем његове фазе расте и кртост. Бинарне легуре Al-Si (сл. 3.3) не налазе практичну примену, јер термички не ојачавају, него тек додавањем бакра односно магнезијума долази у обзир каљење и старење и из тог разлога се користе углавном вишекомпонентни силумини. Силицијум је погодан легирајући елемент, јер се раствара у Al и гради с њим користан еутектикум који знатно одређује ливкост легуре. Еутектику образују фазе ($\alpha+\beta$) где је α фаза растворени силицијум у алуминијуму, а β фаза је сачињена од чистих кристала силицијума јер је Al нерастворљив у Si и брже кристалише од α фазе. Равномернија кристализација даје повољнију ситнозрнасту структуру еутектике, па се силуминска фаза модификује додавањем 0,1% Na или 2% NaCl+NaF који смањују брзину кристализације. Добија се легура која очвршћава уз веће потхлађивање и настаје ситнозрнаст еутектикум па се еутектичка температура снижава са 577 на 564°C (тачка E', сл. 3.3) што даје боље механичке особине. Ова модификација/корекција легуре није неопходна код ливења у кокилама, под притиском или центрифугалним ливењем, јер тада калуп потхлађује лив.



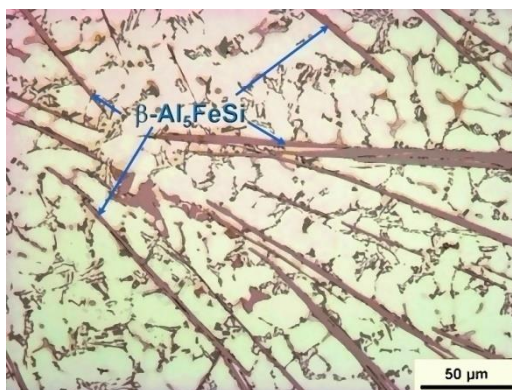
Слика 3.3 Бинарни дијаграм Al-Si

Магнезијум се по правилу може наћи у концентрацији од 0,2-0,6%, а врло ретко може надмашити 1%. Разлог за овако мали опсег удела Mg јесте што он има највећи утицај на Al-Si легуре од свих осталих легирајућих елемената и нечистоћа. Доња граница од 0,2% одређена је потребом за таложењем секундарне фазе Mg_2Si која доводи до преципитационог ојачања легуре па достиже јачину $R_m = 200-250$ МПа. Горња граница такође постоји због фазе Mg_2Si , јер са њеним повећањем пластичност и издужење драстично опадају.

Бакар је метал који у Al-Si легурама највише доприноси ојачању и може бити у износу чак до 8%, што практично значи да је у неким AlSiCu легурама концентрисанији од Si као на пример Al-5Si-7Cu. Концентрација бакра изнад 4% међутим није практична, јер је његова максимална растворљивост у Al нешто већа од 4%, док нерастворени Cu образује еутектичку фазу која легури даје изразито лошу пластичност.

Цинк је лако растворљив у Al, као и у неким другим фазама легуре, па је његов максимални удео у AlSiZn 12%. Он се међутим сматра као слаб легирајући елемент, јер су његови ефекти на побољшање особина легуре мали и нема перспективу за обогаћивање ових легура у будућности.

Гвожђе у Al легурама обично представља нечистоћу и знатно погоршава ливкост и механичке особине. Он у потпуности улази у једну од фаза, било еутектике или основног раствора, и погоршава морфологију те фазе што се одражава и на особине легуре. Из тих разлога постоје ригорозна ограничења у стандардима Al легуре која ограничавају садржај Fe у неким случајевима чак на $<0,1\%$. Најнеповољнији утицај има β фаза Al_5FeSi која кристалише у игличасту структуру која касније иницира пукотине (сл. 3.4).



Слика 3.4 Микроструктура игличасте β фазе

Манган се силуминима додаје како би елиминисао нечистоће, првствено Fe. Он са Fe и Si формира једињење $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$. Ова фаза утиче повољно због скелетне морфолошке структуре, а истовремено спречава формирање Al_5FeSi . Укупна количина Mn и Fe не би смела да прелази 1.5%, јер у том случају настаје формирање колонија кристала $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ што није добро због крупних зрна овог једињења. Растворљивост Mn у Al је мала, а удео Mn не надмашује 0,5% код силумина.

Никл у Al-Si легурама формира са Fe Al_9FeNi што је еутектичко једињење чија структура може имати различиту морфологију, како скелетну тако и фино распрострањену, зависно од хемијског састава легуре и брзине хлађења па може имати негативне утицаје на легуру. Такође, настаје еутектика Al_3Ni која има позитиван ефекат на промене у микроструктури услед повишене температуре као и на мало температурско ширење те се ове легуре користе за ливење блокова мотора где се Ni може наћи од 2-3%.

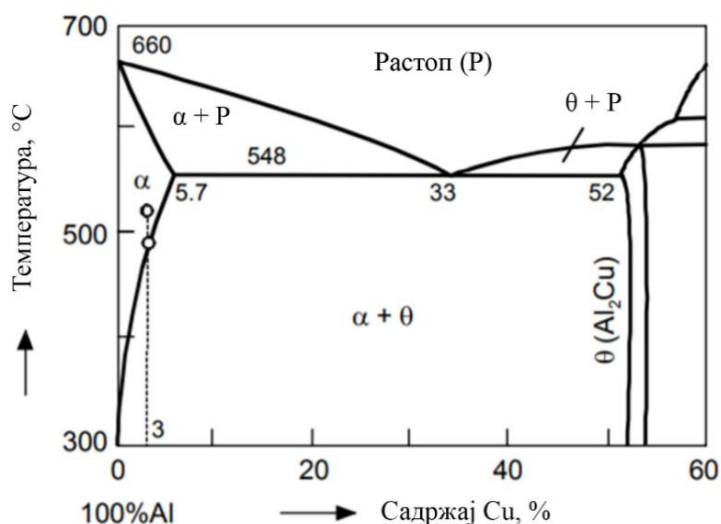
Берилијум је најбољи легирајући елемент у улози везивања непожељног Fe, јер формира једињење $\text{Al}_4\text{Be}_5\text{Fe}_2$ који даје повољна механичка својства легури. За везивање 0,6% Fe потребно је 0.5% Be. У овим легурама дозвољена је већа концентрација Fe али није препоручљива изнад 1%.

Код Al-Si легура, у матрици се поред силицијума могу наћи Cu, Zn и Mg, док сви остали елементи улазе искључиво у састав фаза легуре. Често се користе мали додаци стронцијума и натријума за модификацију Al-Si еутектике, а титан и бор делују на уситњавање зрна, јер стварају више центара кристализације. Поред гвожђа за највеће нечистоће у овим легурама сматрају се олово и калај који имају ниску температуру топљења. Њихово присуство занемарљиво лоше утиче на механичке особине на собној температури али током ливења узрокују вруће прслине/пукотине па се њихов удео ограничава на неколико стотих делова процента. За ливење вишекомпонентних Al-Si легура у пракси се користи технички чист алуминијум, или као алтернатива бинарне еутектичке легуре Al-Si. Уколико се користе постојеће Al-Si легуре то умногоме олакшава посао легирања али је вероватно да ће вишекомпонентна легура садржати релативно висок проценат нечистоћа па се овај принцип легирања не практикује за одливке врхунског квалитета, него се рециклирање и употреба секундарног Al и Al-Si користи у масовној производњи. Секундарне легуре убрзавају поступак легирања и смањују тражену топлотну енергију, јер већ имамо растворени Si у Al за шта је и потребно највише енергије, па им је стога значајно нижа цена. Најважније особине за Al и Al-Si одливке су затезна чврстоћа, релативно издужење и Бринелова тврдоћа (HB) на собној температури. Одливци се подвргавају тестовима који подразумевају ова три вида испитивања, а у зависности од захтева испитује се заморна јачина, термостойаност, жилавост, отпорност на стварање прслина/пукотина. Управо

повећана концентрација нечистоћа представља разлику између примарних и секундарних легура, па је загарантовани ниво механичких особина секундарних легура нижи. Силумни се углавном користе као грађевински материјали и због тога су њихове механичке особине важна одлика, а у пракси индустријске легуре имају квалитет тек нешто изнад минимално траженог.

3.3. Легуре Al-Cu

Сврставају се у серију 2 легура за ливење. Њихову структуру чини раствор Al-Cu са траговима других елемената и нечистоћа, који садржи до 5% Cu и еутектика Al_2Cu у коју улазе примесе, најчешће Ni, Fe и Mn. Удео еутектике није велик што омогућава висок ниво пластичности, али је тежак задатак одредити оптималну концентрацију бакра у комбинацији са другим елементима, за шта се користе сложени вишекомпонентни дијаграми. Оптимална концентрација бакра у већини индустријских легура је око 5%, док је температура загревања за каљење/растворно жарење око $540^{\circ}C$ што се види са дијаграма на слици 3.5. Ове легуре поседују способност дисперзионог очвршћавања што практично значи да се после ливења добија прилично чврст материјал, али то има своју негативну страну, јер се ове легуре тешко лију и подложне су прслинама при очвршћивању одливка. Ливење у кокилама изазива проблеме, па се за ове легуре користе пешчани калупи за једнократну употребу. Недостатак им је и ниска корозивна отпорност.



Слика 3.5 Део бинарног дијаграма Al-Cu

Вишекомпонентне легуре са базом AlCu могу да садрже и манган, магнезијум, силицијум, титан, цинк, хром, гвожђе, као и понекад кадмијум и сребро, чији су утицаји на легуру описани.

Манган је чест легирајући елемент у AlCu легурама и може се наћи у концентрацији до 1% при чему се у потпуности раствара у Al после очвршћавања. Пре ливења, током загревања формира талог $Al_{20}Cu_3Mn_2$ који за последицу има високу чврстоћу легуре на повишеним температурама. Присуство других елемената попут Si, Fe, Ni и у комбинацији са манганом утиче негативно, јер га везују у еутектику док би у супротном био растворен у матрици Al.

Никл у присуству бакра формира једињења Al_6Cu_3Ni или $Al_3(Ni,Cu)_2$. То су изузетно термички стабилна једињења, која позитивно утичу на механичка својства при повишеним температурама. Формирање ових једињења је као мач са две оштрице -

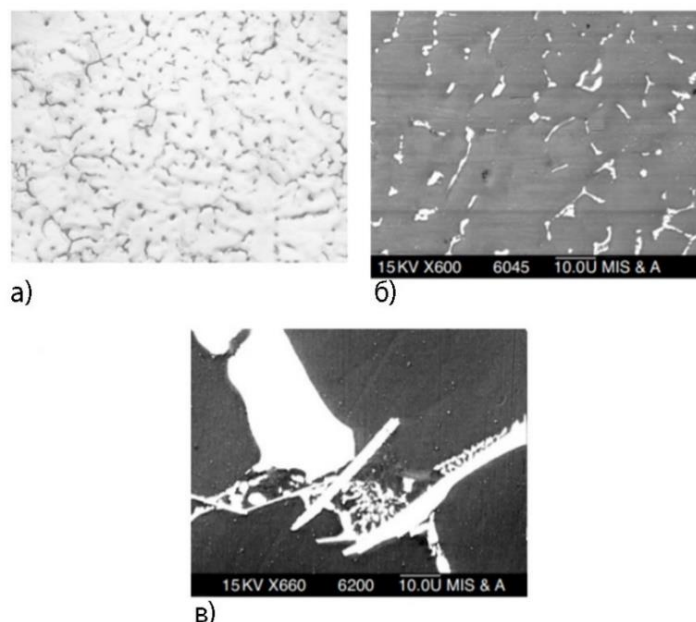
смањује удео бакра у матрици чврстог раствора Al што значи нижу чврстоћу на собној температури.

Магнезијум се сматра нечистоћом и у потпуности је избачен из руских стандардних AlCu легура. То се објашњава формирањем фазе Al_2CuMg која се у току очвршћавања таложи и неравномерно очвршћава што успорава процес и намеће изузетно лошу ливкост. AlCuMg легуре су погодне за пластично деформисање, углавном се кују.

Гвожђе има двојаки негативан утицај, први је формирање фаза са пожељним бакром, манганом и никлом, а други формирање поменуте фазе Al_5FeSi са примесама или траговима Si, што га карактерише као једну од највећих нечистоћа AlCu легура. Присуство гвожђа утиче негативно на механичке особине, на жилавост, на формирање прелина, на пластичност, док је утицај на ливкост негативан али мали, због чега се његова концентрација ригорозно контролише.

Силицијум улази у састав малог броја Al-Cu легура као легирајући елемент, док је углавном непожељан; разлог томе је што не формира никакве фазе које доприносе легури, већ је скоро у потпуности растворен у Al матрици а то се одражава бољом ливкошћу на штету јачине на собној температури. Лош је за термичку стабилност легуре а будући да је то најважнија карактеристика AlCu легура и да се у ту сврху праве њени одливци, Si се ограничава на мале уделе, рецимо легура 224.2 је ограничена на $>0,02\%$ Si. Неке легуре Al-Cu-Si користе се за клизне легајеве због добре отпорности на хабање.

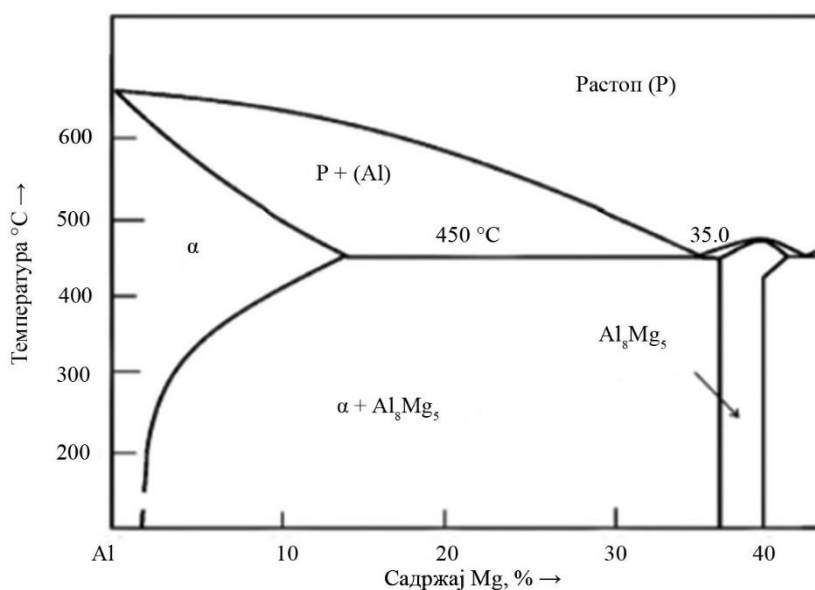
Остали елементи користе се као помоћни и немају кључну улогу у саставу легуре, већ појачавају ефекат дисперзионог очвршћавања. То су титан, цирконијум, кадмијум, хром, германијум и сребро, док су последња два елемента комерцијално неисплатива због њихове цене у односу на мали допринос легури. Микроструктура неких индустријских Al-Cu легура приказана је на слици 3.6.



Слика 3.6 Приказ микроструктуре неких типичних индустријских AlCu легура, (а) легура Al са 5% Cu, 1% Mn, 0.1% Fe ливена у металном калупу, (б) Al са 5% Cu, 1% Mn, 0.6% Fe, T4, (в) Al са 10% Cu, 2% Si, 0.5% Mg, 0.5% Fe, ливена у песку

3.4. Легуре Al-Mg

Легуре Al-Mg (сл. 3.7) одговарају првом типу легура "чврстог раствора", осим малог броја које у себи садрже силицијум који гради еутектикум, па се сврставају у подеутектичке легуре. Садрже 3-11% Mg и поседују добру корозивну отпорност, жилавост, добру заварљивост. Осетљиве су на присуство нечистоће гвожђа, првенствено због негативног утицаја на механичке особине али пре свега на корозивну отпорност, што је повезано са катодним особинама које имају фазе у којима Fe учествује. Корозивна отпорност и добра могућност полирања красе ове легуре.



Слика 3.7 Бинарни дијаграм Al-Mg

У концентрацијама до 5-6% Mg формира се мала количина еутектике Al_8Mg_5 док је највећи део Mg растворен у алуминијумској матрици. Магнзијум утиче на чврстоћу матрице па за максималну чврстоћу потребно је његову концентрацију остварити што је више могуће ближе максималној. Како концентрација расте преко 5-6%, тако се ливкост побољшава а корозивна отпорност погоршава. Током загревања пре ливења, фаза Al_8Mg_5 се потпуно раствара у Al, и издваја се при хлађењу после изливања. Бинарне легуре Al-Mg се подвргавају термичком третману T4 у коме долази до природног старења где се, у погледу микроструктуре, честице фазе Al_8Mg_5 формирају на границама зрна и субзрна.

Цинк се код тернарних легура Al-Mg-Zn, раствара у Al у току загревања, а у току отврдњавања формира фазу $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$. Присуство цинка у комбинацији са магнезијумом у раствору матрице даје могућност значајно већег раста чврстоће услед старења. Укупан садржај Zn и Mg не би требало да надмаши 6-7% после чега долази до пада отпорности на корозију.

Манган се често користи у овим легурама у количинама око 1%. Растворљив је у металној матрици и значајно побољшава њене особине, међутим, у присуству Fe и Si то није случај него формира фазу $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_2\text{Si}_3$ која има скелетну структуру што је морфолошки повољно, осим тога везује Fe и тиме спречава његов лош утицај при учешћу у неким другим фазама и због тога је манган од изузетне важности за Al-Mg легуре

Силицијум побољшава ливкост али у комбинацији са Mg гради фазу Mg_2Si која смањује пластичност, а постоји и опасност да у реакцији са гвожђем додатно учествује

у нарушавању особина легуре градећи већ поменуте фазе. У неким легурама се користи својство силицијума да допринесе ливкости па се може додати у количини од 1,5-2%, док је у већини легура сматран нечистоћом и строго се контролише.

Гвожђе у тернарној Al-Mg-Fe легури формира са Al фазу Al_3Fe која је неповољне игличасте структуре што нарушава механичке особине, међутим у реалним легурама где су укључени Mn и Si, највероватније је формирање скелетне фазе $A_{15}(FeMn)_3Si_2$. Код већине легура присуство гвожђа је непожељно и контролише се, изузев неких легура за ливење под притиском са високим процентом магнезијума код којих је дозвољено чак до 1% Fe. Такве легуре не смеју да се лију у пешчаним калупима, јер би дошло до формирања велике количине Al_3Fe фазе, грубих и крупних кристала.

Бакар важи за нечистоћу у AlMg легурама а разлог томе је формирање фазе Al_6Mg_4Cu која осетно смањује својства пластичности и корозивне отпорности, што је велики недостатак у односу на мало повећање чврстоће. Може се наћи у малом броју легура максимално до 1%.

4. Преглед најважнијих метода ливења легура алуминијума

Технологија ливења спада у производну технологију секундарне прераде металних полупроизвода који се добијају у железарама или топионицама. У производне технологије спадају и обликовање на хладно и топло, машинска обрада резањем, спајање (заваривање и сродни поступци, термичка обрада, металургија праха и др. Ливење је најстарија производна технологија позната још 5000 година пре Христа. Ливење подразумева испуњавање празног простора (шупљине) калупа истопљеним металом (ливом) који се потом у калупу хлади и из њега касније вади одливак. Димензије одливака се могу кретати у широком спектру, од неколико милиметара до 20 m, дебљине зида од 0,5 до 500 mm, тежине и до 300 t, сходно намени траженог дела.

Сви методи израде одливака разликују се по:

1. Начину на који се у калупну шупљину доводи течан метал (гравитацијом, одоздо, под притиском, центрифугално или вакуумски).
2. Стању ливачке легуре зависно од температуре прегревања лива (T_p) изнад ликвидус температуре (T_1) ($T_p = T_1 + 60 - 160^\circ\text{C}$).
3. Калупној шупљини која може пре изливања бити испуњена ваздухом, гасом, пенастим полимерима се у њој налази вакуум.

Од свих железних и нежелезних ливачких материјала, у пешчаним калупима се лију 75-90% одливака од легура гвожђа и 10-20% одливака од нежелезних метала, док се у кокилама лије око 10% железних метала, углавном темпер лив, а 80-90% нежелезних метала, углавном Al легуре.

Израда свих одливака састоји се из четири главне фазе:

- 1) Израда модела који може бити од дрвета, глине, гипса, воска, цемента, бетона, полимера или металних легуре (Pb, Sn, Al, Cu и Fe),
- 2) Израде калупа и језгара,
- 3) Топљења ливачког метала и његово изливање у калуп и
- 4) Вађење чврстог одливка после кристализације из калупа, избијање језгара, одсецање уливног система и по потреби завршна обрада, машинска или термичка.

Припреме за ливење почињу од конструкционог цртежа дела, израде цртежа одливка, па до завршних третмана (машинске обраде, термичке и хемијско-термичке обраде и др.). На основу конструкционог цртежа одливка припрема се и прописује технологија ливења. Припрема се цртеж модела, језгара, уливног система (уливна чаша, левак, попречни канали, спроводник, разводник) и др. Поред тога, припрема се и састав калупне и језгрене смеше.

Топљење сировина које учествују у легури тј. легирање алуминијума одвија се у тигл пећима (од ливеног гвожђа или графита) ложене мазутом или земним гасом, електролучним или индукционим пећима. За производњу алуминијумског лива користе се поменути инготи из топионице, од рециклираног или новог алуминијума. Како би се смањили трошкови топљења и транспорта, одливци се све чешће производе у матичном комбинату алуминијума уместо у ливницама.

Да би се лив очистио од нечистоћа које се формирају сагоревањем и топљењем алуминијума у пећима, потребно је извршити дегазацију. Долази до апсорпције водоника у лив који је непожељан и он се отклања дегазацијом тј. пропуштањем неког

инертног гаса кроз лив. Бољи али вишеструко скупљи је аргон од азота. Ови гасови не реагују са водоником и на тај начин га везују и уклањају како се не би задржао у ливу. Уколико се водоник не уклони из лива он бива "заробљен" на површини у шљаци и после изливања, при кристализацији ствара гасне мехурове и друге врсте грешака. Дегазација се може вршити у самој пећи али је боље решење уколико за то има услова да се врши на самом уливном каналу у калуп, јер то смањује могућност поновне апсорпције до тренутка отврдњавања. Пожељно је лив пропустити кроз специјалне филтере који задржавају нечистоће и неметалне укључке.

4.1. Ливење алуминијума у пешчаним калупима

Ливење у песку је чест и најповољнији начин ливења за мале и средње серије алуминијумских легура, али и осталих ливачких материјала (70-75% свих одливака) који не захтевају прецизну поновљивост облика. Разлог за честу примену пешчаних калупа је та што је могуће изливање одливака вишетонске масе и комплексне геометрије у односу на остале методе ливења где то није случај. Пешчани калупи се користе једнократно, јер се после очвршћивања одливка разбијају, а потом мешавина од које је калуп био направљен поново користи за прављење другог калупа. Процес ливења у песку обухвата:

1. Израду модела,
2. Припрему сировина за ливење метала (лива),
3. Топљење сировина,
4. Припрему материјала за израду калупа и језгара,
5. Израду калупа и језгара,
6. Изливање течног метала (лива) у калуп,
7. Вађење одливка после кристализације,
8. Чишћење и машинска дорада одливка и
9. Контролу квалитета.

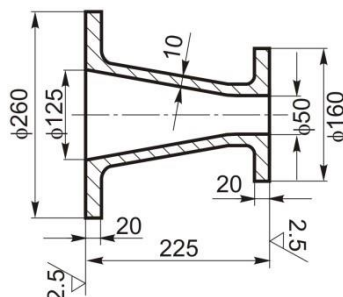


Слика 4.1 Изливање алуминијума у пешчаном калупу, ливница "Петровић", Стара Пазова

Легуре алуминијума лију се у влажним пешчаним калупима (сл. 4.1). Уколико се алуминијум лије у сувим пешчаним калупима долази до појаве прслина на топло око солидус температуре при хлађењу. Да не би дошло до грешака порозности одливка због растварања водоника из калупне масе, растопљеној легури треба додавати модификаторе који утичу на ток кристализације и ситнозрнасту структуру. Додавањем титана легури добија се више центара кристализације и ситнозрнаста структура.

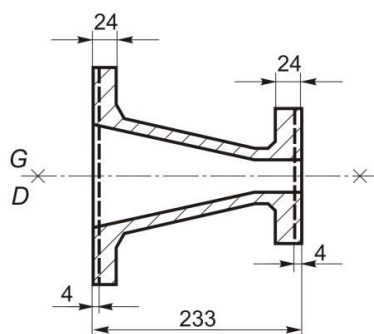
На примеру ливења у песку цевне спојнице за спајање две цеви различитих пречника описан је целокупан процес ливења у песку. Конструкциони цртеж (сл. 4.2) направљен од конструкционог тима приказује попречни пресек овог осно симетричног одливка. Облик и димензије дела креирани су на основу тражених радних услова и

отпорности материјала. Рупе у одливку које су веће од $\varnothing 20$ mm добијају се постављањем пешчаног језгра, а мањи отвори се буше на готовом одливку. Језгро треба да обезбеди конусни отвор $\varnothing 125/50$ mm а отвори који се буше након добијања одливка су позиционирани на венцима дела и имају улогу да се завртњевима спојница учврсти за венац цеви.



Слика 4.2 Конструкциони цртеж одливка

Цртеж сировог одливка (сл. 4.3) формира се у ливници и садржи облик и димензије сировог одливка пре његове завршне обраде. То значи да се димензије увећавају за потребну машинску обраду, за технолошке додатке, за додатке нагиба вертикалних зидова и за цурење лива. Додају се подаци за разраду технолошке документације попут положаја одливка у калупу, подаци о уливном систему и хранитељима.



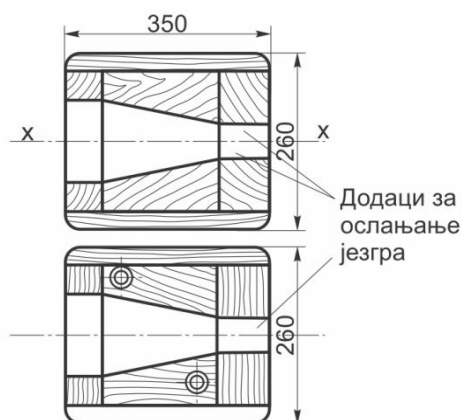
Слика 4.3 Цртеж сировог одливка

Наредни корак је израда модела од дрвета (сл. 4.4) по коме се формира калупна празнина. Димензије модела добијају се увећавањем димензија цртежа сировог одливка за коефицијент топлотног скупљања при отврђавању и машинске завршне обраде легуре која се лије. Може бити израђен из једног или више делова зависно од комплексности геометрије и од начина вађења из калупа. Површине језгара и модела морају да буду fine и глатке како би одливак био тачних димензија. Унутрашње шупљине добијају се помоћу језгара која се ослањају на језгарне марке, које такође мора модел да садржи. За израду модела користи се дрво, бетон, цемент, гипс, пластичне масе или најчешће метал због своје димензионе стабилности. Уместо модела може се користити метода шестарења, помоћу шаблона.

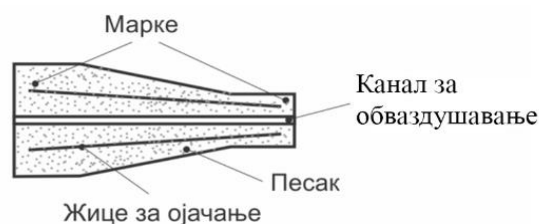


Слика 4.4 Дрвени модел

Израда пешчаног језгра врши се у језгренику (језгарна кутија) приказаном на слици 4.5. Језгро се прави по облику отвора који треба да формира на одливку, и са продужетком који се назива језгрена марка која не служи да формира облик одливка већ се језгро преко ње ослања у калупу током изливања, отврдњавања и хлађења лива. У језгра (сл. 4.6) се постављају уздужне жице за ојачање које попут арматуре одржавају целовитост језгра да би могло да одоли статичном и динамичном оптерећењу при уливању. По средини језгра израђује уздужни канал за обваздушвање.



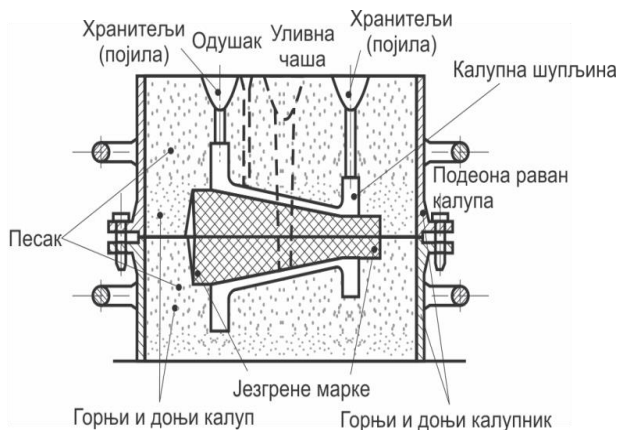
Слика 4.5 Језгреник



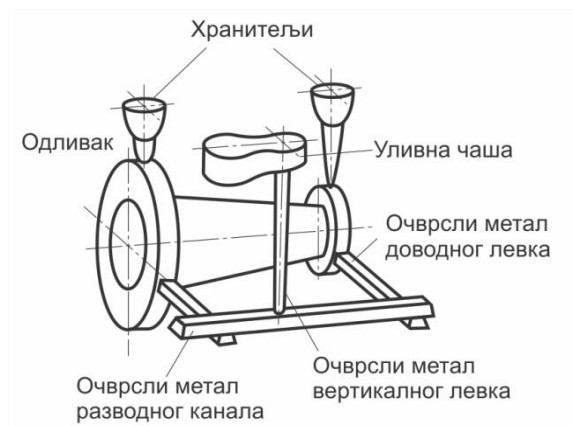
Слика 4.6 Ливачко језгро

Пешчани калуп се израђује ручно или машински у калупници (кутији од сивог лива, челика, алуминијумских легура или од дрвета) што је приказано на слици 4.7. Углавном су калупи дводелни, а уливни канал се прави тако да пролази кроз оба дела калупа. Уливање у калуп одоздо назива се сифонско ливење и у том случају канали за одвођење гасова се постављају у горњем делу калупа, јер их лив ка тамо потискује. Довођење лива у калуп изводи се слободним падом, дејством силе гравитације.

Када се одливак охлади (сл. 4.8) следи разбијање пешчаног калупа и избијање језгра/језгара. Потом се одсеца уливни систем, чисти се одливак, одсецају се "изгубљене главе" (очврсли лив у каналима хранитеља). Следи додатна термичка обрада или машинска обрада.



Слика 4.7 Ливачки калуп



Слика 4.8 Сиров одливак са чврстим ливом у уливном систему и хранитељима (појилима)

4.1.1. Израда калупа и жезгара

Израда калупа и жезгара је процес од посебног значаја за добијање квалитетног одливка, јер истраживања говоре да су чак 50% грешака одливака проузрокована лошом мешавином припремљеном за калуп. Калуп и жезгра се израђују од ливачког песка (који је по саставу кварцни песок), глине (везивно средство) са примесама, воде и осталих састојака. Песак, глина и примесе мешају се у хомогену масу/смесу у одређеном односу, па се маси додаје вода.

Кварц (SiO_2) је основна компонента ливачког песка чија је температура топљења изнад 1700°C , док остале примесе и глина имају ниже температуре топљења и тиме снижавају ватросталност калупа. Да би песок био погодан, мешавина треба да задовољи услов ватросталности, одређене гранулације зрна песка, гасну пропустљивост и садржај глине и примеса. Како би се повећала ватросталност, песку се као једна од примеса додаје цирконски песок ZrSiO_4 чија је T_{top} око 2000°C . Пречник зрна кварцног песка треба да буде већи од $0,02 \text{ mm}$. Кварцни песок је најраспрострањенији минерал у природи, појављује се у кристалним облицима: камену, тридимит-кристобалиту и кварцном стаклу. Сваки кварцни песок садржи већу или мању количину глине, па се по томе могу поделити на:

- чист кварцни песок до 3% глине,
- сиромашан песок, 3-8% глине,
- богат песок, 8-15% глине и
- врло богат песок $>15\%$ глине.

Глина за калуповање састоји се од каолина ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и бентонита ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Улога глине у мешавини за калуп јесте да обезбеди пластичност (обликовање нажељени облик), чврстоћу и да делује као везивно средство између зрна кварца и осталих примеса. Иако се глина налази у саставу чистог кварцног песка, од њега се не могу израђивати калупи, јер је удео глине мали и везивна моћ кој је слаба па се додаје већи удео глине. У мешавини са 5-12% воде смеша постаје подложна обликовању и сједињавању у мешавину. Порастом удела глине повећава се чврстоћа калупа али опада ватросталност и пропустљивост гасова и ваздуха кроз поре калупа, па се тежи ка што мањем садржају глине у ливачком песку. Из тог разлога је бољи бентонит од каолина, јер везује већи број молекула воде и има већу моћ повезивања зрна песка. Бентонит се користи и као везиво у маси за израду жезгара, 1% бентонита

замене 2-3% обичне глине за калуповање. У циљу испуњења услова које језгра морају да испуне у погледу физичко-механичких особина због спољашњег оптерећења које изазива изливање лива, језгра се праве од сложенијих и квалитетнијих смеша него пешчани калупи. Зато се дешава да пројектанти замене глину као везивно средство језгра са синтетичким смолама као што су водено стакло, формалдехид, фуран, карбамид.

Примесе језгара и калупа служе да појачају тражене особине смесе, да не дође до лепљења одливка за калуп и пригарања. За ту намену користе се графит, талк, угљена прашина, кречњак, оксиди гвожђа и оксиди алкалних метала (калцијума, натријума, магнезијума).

Начин припреме мешавине треба да буде правилан, тј. да се добије хомогена и уједначена маса погодна за обликовање. Материјал за припрему мешавине песка је већим делом повратни, већ коришћен песак који се освежава новим материјалом и заједно с њим се меша док не постане хомоген. Калупи се израђују у рамовима, кутијама или помоћу шаблона са осом ротације, а језгра набијањем мешавине за језгра у тзв. језгрене кутије.

Особине које калуп треба да поседује су:

Ватросталност – способност калупа да остане постојан при високим температурама у контакту са растопљеним металом. При недовољној ватросталности калупне и језгрне мешавине долази до пригарања на површини одливака. У циљу спречавања пригарања, унутрашње површине калупне шупљине се пре ливења премазују мешавином графита, млевеног кокса, воде и везива, или премазом млевеног графита, прашкастог угља или декстрином. Улога премаза је да при изливању метала они сагоревају и праве заштитни слој гасова, продуката сагоревања између лива и калупа у првој фази кристализације. Удео кварца у мешавини треба да обезбеди ватросталност калупа; што су зрна кварца већа а концентрација примеса и везива мања, ватросталност је већа.

Пластичност – могућност обликовања калупа према моделу и задржавања његовог облика јасних/оштрих ивица и контура. Пластичност треба да буде задовољена како не би дошло до стварања пукотина у калупној мешавини, и да би се добиле тачне димензије одливка.

Гасна пропустљивост – је особина калупа да пропушта ваздух и гасове који се испуштају при сагоревању органских честица калупне масе у контакту са ливом. Уколико је гасна пропустљивост калупа недовољна, гасови и паре остају заробљени у калупној шупљини и добија се одливак са гасним мехуровима и другим грешкама, или може због притиска доћи до осипања калупа. На пропустљивост утиче квалитет песка (зрна треба да буду већег пречника и округла), удео везива у мешавини и боља је пропустљивост ако се песак мање сабија при калуповању.

Чврстина – способност калупа да не дође до ширења, пуцања, промене димензија приликом транспорта, да се одупре спољашњем оптерећењу, хидростатичком притиску при изливању легуре. Да би се повећала чврстина калупа ливачком песку се додаје везиво у одговарајућој размери.

Термохемијска стабилност – омогућава хемијску инертност калупа и лива. Важно је да ливачки песак не садржи примесе које ће у контакту са течним металом (ливом) да неповољно реагују и тиме да доведу до грешке после кристализације или утичу лоше на механичке особине одливка.

Прилагодљивост - је особина калупне и језгрене мешавине да прате запреминско скупљање и линеарне промене метала при кристализацији. Ова карактеристика ливачког песка омогућава ливење без стварања прслина/пукотина на одливку при хлађењу услед великих унутрашњих напона.

Дуготрајност – је способност поновне употребе смеше. Добра калупна смеша треба после ливења незнатно да мења физичко-хемијске особине. Под утицајем високе температуре течног метала део зрна песка може да напукне и упије лив, а глина да пређе у спрашено стање и изгуби везивне особине и пропустљивост. Ливачки песок чија је трајност велика се после отврдњавања метала разбија и поново користи у комбинацији са свежим песком.

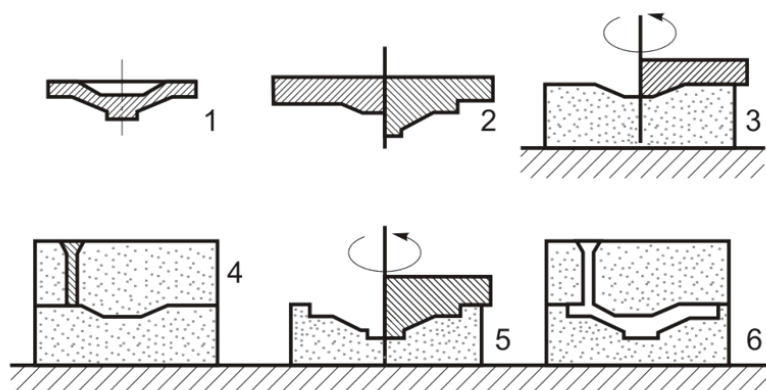
Пешчани калуп би требало да садржи уливни систем, канале за одвођење сабијеног ваздуха и појила. Појила постоје како би олакшало попуњавање калупне шупљине. Постављају се на периферним местима одливка, где је могуће да не доспе лив из уливног канала услед хлађења. Без појила може доћи до појаве грешака недоливености или појаве лункера. Оптимална резерва лива у појилима је 5-7% од укупне запремине одливка.

Делови пешчаног калупа су:

- 1) калупне шупљине (део калупа који се испуњава течним металом);
- 2) зидови калупа (ливачки песок сабијен између модела и калупнице) и
- 3) лица (унутрашње површине калупа које долазе у додир са течним металом).

Разликују се отворени и затворени пешчани калупи, отворени калупи имају слободно очврсну горњу површину, а код затворених калупа одливак је са свих страна опкољен зидовима калупа. Поступак прављења калупа назива се калуповање, а кутије у којима се калуповање обавља калупнице. Да би се модел после калуповања извадио из калупа он мора да буде дводелан. Подеона раван калупа бира се тако да се модел лако из њега вади а то је по правилу раван дуж највеће осе симетрије одливка.

Шестарење (сл. 4.9) се користи код кружних одливака тако што се шаблон направљен, најчешће од дрвета, ротира око осе управне на раван калупа где урезан профил шаблона оставља отисак у песку. Овај метод је погоднији од употребе модела код калупа са иловачом.



- 1- Кружни одливак, 2-Облик шаблона, 3-Израда горњег дела калупа, 4-Горњи део калупа, 5-Израда шупљине, 6-Склопљен калуп

Слика. 4.9 Израда калупа помоћу шаблона (шестарењем)

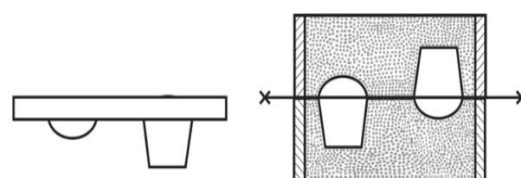
Поред ове две методе израде калупа може се користити и калуповање у поду ливнице што се примењује за одливке великих димензија.

Припрема за ливење после израде модела обухвата пуњење калупнице песком, позиционирање модела и сабијање песка око њега, израда уливног система и одушака, вађење модела, дорада и сушење калупа и отежавање горњег дела калупа, како се не би настало подизање горње калупнице под дејством силе притиска течног метала и гасова.

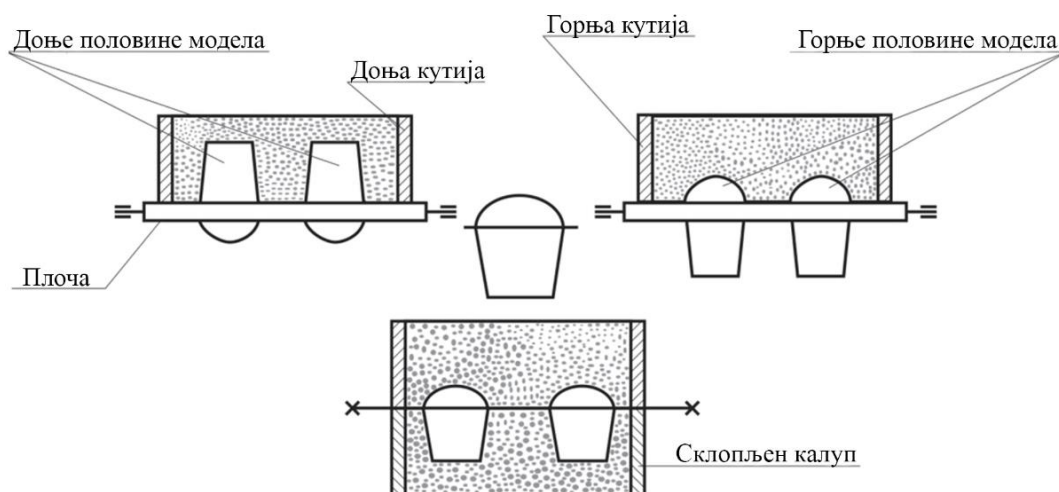
За потребе вишесеријске и масовне производње примењује се машинско калуповање које даје предности у односу на ручно у погледу димензионе тачности одливка, то јест смањује додатну машинску обраду. Машинско калуповање изводи се моделним плочама (сл. 4.10.). То су металне плоче за које су причвршћени модели, могу бити једностране (сл. 4.11) и двостране (сл. 4.12), позиционирају се на машину помоћу центрирача и врши се калуповање. Материјал за плоче је ливено гвожђе или челични лив, а модели који се монтирају су од алуминијума или бакра. На металне плоче могу бити причвршћени дрвени модели или се изједна плоча и модел могу правити од гипса.



Слика 4.10 Једнострана моделна плоча

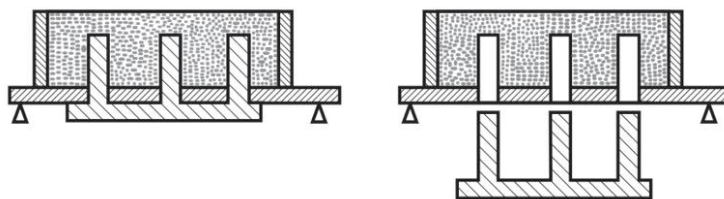


Слика 4.11 Обртна плоча



Слика 4.12 Калуповање са двостраном моделном плочом

Гребенасте плоче (сл. 4.13) користе се за израду калупа за ливење зупчастих летви или зупчастих венаца и за делове са танким спољашњим ребрима попут цилиндара мотоцикала од силумина и других ваздушно хлађених мотора са унутрашњим сагоревањем. Ивице гребена додатно сабијају и ојачавају ливачки песок



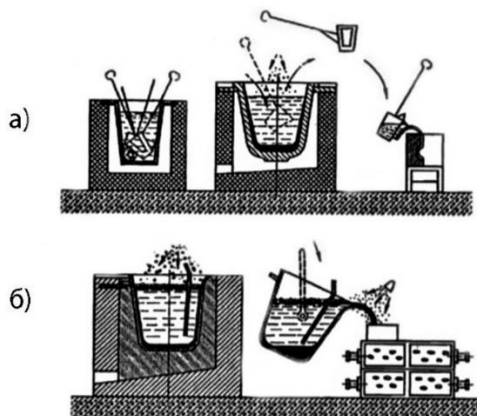
Слика 4.13 Гребенаста плоча

Калуповање се може изводити специјалним методама помоћу CO_2 и методом помоћу цементне масе. Метода калуповања помоћу CO_2 подразумева употребу сувог кварцног песка у који се као везиво додаје водени раствор натријум силиката (водено стакло $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) које чини 5-7% смеше. Ови калупи очвршћавају довођењем CO_2 под притиском од 60-70 бара. Натријум-силикат реагује са CO_2 и добија се веома чврста маса за 6-20 секунди. Мана овог поступка је тешко разарање и ослобађање одливка после ливења па се употребљава углавном као маса за језгра.

Цементне масе се састоје од кварцног песка, цемента (8-12%) и воде. Ова маса налази примену у малосеријској и појединачној производњи масивних и дебелозидних одливака ливеног гвожђа и челичног лива. Време стврдњавања калупа је 24-48 h које се може убрзати додавањем CaCl_2 и MgCl_2 5-6% на 8-10 h. Ова метода је погодна због ниске цене цемента, лаке припреме масе, добре отпорности калупа и димензионалне постојаности при ливењу, мана је отежано моделирање због прилепљивања масе за модел.

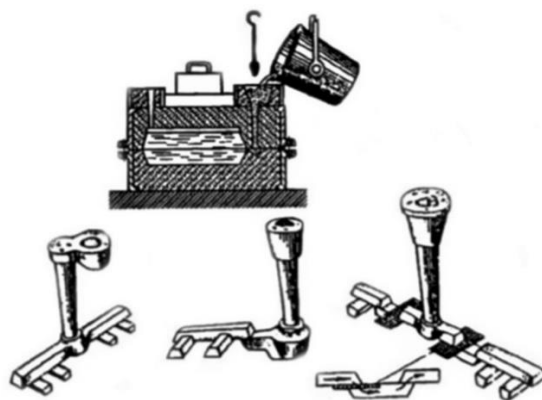
4.1.2. Поступак изливања

Ливење легура се изводи пресипањем директно из лонца или помоћу ливачке кашике (сл. 4.14), довољно брзо да се лив не охлади превише услед топлотних губитака, а довољно споро да се не наруши геометрија калупне шупљине услед динамичког оптерећења на зидове калупа које изазива лив.



Слика 4.14 Изливање течног метала кашиком а) и нагињањем лонца б)

Температура лива у току ливења зависи од састава легуре али је битно да не дође пребрзо до кристализације и да се одржи погодна вискозност растоп па се легура претходно загрева на довољно већу температуру од температуре топљења. С друге стране што је већа температура лива, то су веће шансе за хемијску реакцију са калупом и појава пригарања. За легуре алуминијума то је 70-100°C изнад температуре топљења основног метала, од 750 до 850°C. Изливање легуре се врши кроз уливни систем (сл. 4.15) који садржи низ правилно распоређених канала тако да се целокупна калупна шупљина испуни растопом за погодно време.



Слика 4.15 Уливни систем за одливке

Како би се утицало на равномерно хлађење у калуп се могу уметнути специјалне металне плоче. После изливања одливка он се хлади и при паду температуре испод ликвидус линије отпочиње формирање првих кристала примарне фазе легуре, кристализација се наставља, али настају и сопствени унутрашњи напони који требало да буду минимални и одливак се у калупној шупљини скупља до потпуног очвршћивања тј. до солидуса. Одливци алуминијумских легура се ваде из калупа при температури око 200-300°C. Вађење одливка се изводи ручно или механички разарањем калупа и одвајањем језгара, после чега се одливак хлади до собне температуре, избија или одсеца уливни систем и чисти одливак. Очишћен део се по потреби механички дорађује и уколико је предвиђено за дату легуру прописује и термичка обрада.

Завршна контрола квалитета одливка обухвата контролу геометрије, хемијског састава легуре, структуре, механичких особина, спољашњих и унутрашњих грешака и тсл. Геометрија се испитује мерним инструментима, а понекад се мери и маса одливка. Подвргава се тестовима којима се утврђују најважније механичке особине. Спољашње грешке се идентификују визуелно или уколико то није могуће методама без разарања. Унутрашње грешке попут укључака или унутрашњих прелина откривају се методама без разарања, као што су радиографија (γ или x - зраци) и ултразвучна дефектоскопија. На унутрашње грешке се не може утицати и по правилу оне су непоправљиве, док се спољашње грешке понекад могу дорадити, зависно пре свега од њихове величине и облика. Одливци који садрже непоправљиве грешке враћају се на поново претапање.



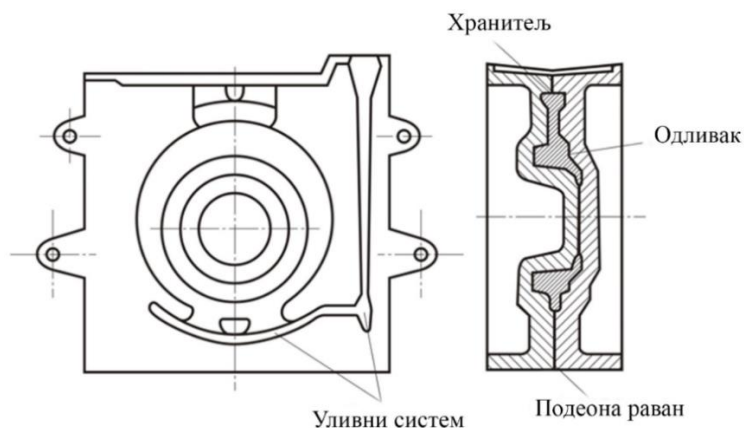
Слика 4.16 Грешке алуминијумских одливака ливених у песку

На слици 4.16 су приказане најчешће грешке Al легура ливених у песку, а то су укључци, шупљине и нетачне геометријске величине. Поред ових могу се срести површинске израслине, прекид континуитета масе, недостатак материјала на површини одливка, непотпун одливак, нетачне мере. и др.

4.2. Ливење алуминијума у металним калупима

Метални калупи или кокиле спадају у трајне калупе. Израђују се од перлитно-феритног сивог лива без слободног цементита, нискоугљеничних челика, легура алуминијума или у најбољем случају од ватроотпорних челика. Израђују се поступцима машинске обраде или ливењем што зависи од материјала кокиле, захтева за тачност одливка и броја кокила који треба произвести. Највећу примену налазе за ливење обојених метала, а поготову легура алуминијума, али могу се лити и други метали и њихове легуре. Конструирају се тако да се лако обавља вађење одливка, а подеона раван може бити хоризонтална или вертикална. За спајање делова кокиле служе различити механизми попут ексцентричног затварача, "лабудовог врата" или система полуга.

У кокилама се лију делови масовне и вишесеријске производње једноставније геометрије (сл. 4.17). Одливци алуминијума ливени у кокилама највећу примену налазе у ауто и авио-индустрији, за израду кућишта електромотора и сличне намене. Дугог су века па се у једној кокили може излити до 50000 одливака од Al легура. Метални калупи имају висок коефицијент акумулације топлоте, па одливци брже кристалишу и задржавају финуситнозрнату хомогену структуру. Како би се радни век кокиле продужио, пре сваког ливења она се предгрева на 200-300°C за кокиле од сивог лива или 150-250°C за кокиле од алуминијумових легура; такође наносе се премази на унутрашње зидове калупа који смањују размену топлоте у циљу смањења унутрашњих напона који настају уливањем лива који је на око 500°C вишој температури. Премази се праве од воде, кварца, графита, талка, машинског уља и тсл.



Слика 4.17 Метални калуп (кокила)

Треба напоменути да је могућност пригушивања осцилација веома важно својство одливака који раде у условима динамичке промене оптерећења, као што су блокови СУС мотора, клипни прстенови. Ради поређења на слици 4.18 је дат приказ пригушења вибрација за сиви лив, угљеничне челике и ливачке легуре алуминијума.

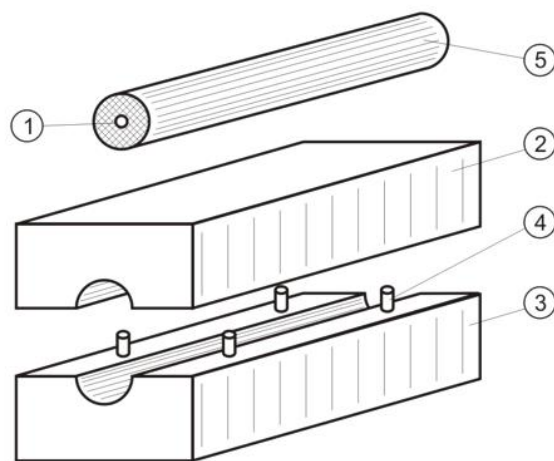


Слика 4.18 Пригушивање осцилација у одливцима: а) сивог лива, б) угљеничних челика и в) легура алуминијума

Метални калупи се састоје из матрица, језгара уколико су потребна, система за одвођења ваздуха и гасова, уливног система и система за вађење одливка. За разлику од пешчаних калупа, овде се калупи праве тако да одливак има косине према разделној линији калупа како би могао да се извади из калупа за шта служи механизам за вађење одливка који га "истисне" из калупне шупљине. После вађења одливка, машинском обрадом се одстрањују косине где је то потребно. Код вишеделних калупа треба водити рачуна о начину довођења лива због гасне непропустљивости калупа. Могу се лити одливци дебљине зида 3-100 mm, масе до 5 t. Дебљина зида кокиле (d_2) се одређује у зависности од дебљине зида одливка (d_1), у милиметрима по обрасцу:

$$d_2 = 13 + 0,6d_1$$

Језгра се праве углавном од смеше кварца и воденог стакла, ојачана уздужним жицама (5) како би издржала притиске изливања и отврдњавања лива. Израда се врши у дводелом језгренику (2,3) приказано на слици 4.19. Кутија језгреника се склапа и позиционира правилно помоћу чепова за центрирање (4), те се на крајевима стеже обујмицом. Језгрена смеша се набија у шупљину језгреника и ојачава арматуром. Обујмице се скидају, раставља се језгреник и вади језгро које се пре употребе премазује графитном емулзијом и суши.



1-Цилиндрично језгро, 2-Горња половина језгреника, 3-Доња половина језгреника,
4-Чепови за центрирање, 5-Челичне жице (арматура језгра)

Слика 4.19 Језгреник за израду пешчаног језгра

Предности кокилних одливака у односу на одливке ливене у песку јесте већи обим производње одливака са мање грешака и шкарт одливака и производња димензионално тачнијих делова. Недостаци су димензионално ограничење на мање одливке, гасна непропустљивост калупа и брзо хлађење. Укупна цена производње је већа него код ливења у песку.

4.3. Центрифугално ливење

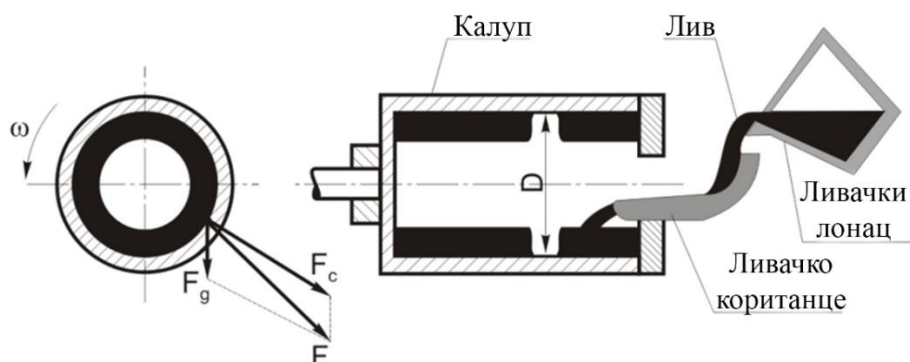
Центрифугално ливење је ливачки поступак у коме калуп ротира око осе при брзини од око 1500 o/min па се под дејством центрифугалне силе лив прибија уз површину калупа и тако очвршћава. Користи се за добијање цилиндричних и ваљкастих одливака, а могуће је лити сива гвожђа, бронзу, обојене метале и њихове легуре масе чак до 3 тоне. При ротацији, услед веће густине лива од укључака и испарења они формирају грешке само са унутрашње стране одливка које се накнадно механички одстрањују. Одливци овако добијени имају већу густину, бољу

микроструктуру и мању тенденцију ка унутрашњим напонима и прслинама што је важно за легуре алуминијума.

Према положају осе ротације око које калуп ротира, разликује се:

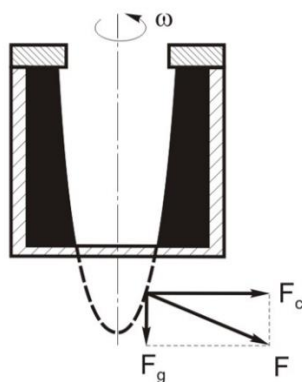
- Центрифугално ливење око хоризонталне осе и
- Центрифугално ливење око вертикалне осе.

Центрифугално ливење у хоризонталном положају (сл. 4.20) изискује довољно велик број обртаја да би центрифугална сила (F_c) била знатно већа од гравитационе силе (F_g). Овај услов је неопходан да би се постигао погодан притисак лива на унутрашњи зид калупа и тако добио цилиндрични одливак једнаке дебљине зида у свим зонама оп. Однос интензитета центрифугалне силе према сили земљине теже зове се коефицијент гравитације (k).



Слика 4.20 Шема центрифугалног ливења у хоризонталном положају

Код ливења око вертикалне осе (сл. 4.21) површина унутрашњег зида одливка добија параболичан облик. Да би се смањила разлика у дебљини зида у различитим деловима одливка однос висине одливка и пречника треба да буде мањи од 1:1,5.



Слика 4.21 Шема центрифугалног ливења у вертикалном положају

Углавном се користе метални калупи, а могу се користити и пешчано-глинени. Пре сваког ливења калуп се чисти од претходног ливења, предгрева се на 150-200°C и облаже се ватросталним премазом.

Неке од предности центрифугалног ливења су: нема потребе за језгрима, утрошак материјала је минималан, добија се добра структура одливка, накнадна механичка обрада је углавном незнатна и цена одливка је економичнија у односу на друге ливачке методе. Недостатак је могућа појава ликвација и тракасте структуре по попречном пресеку одливка.

4.4. Прецизно ливење

Методама прецизног ливења добијају се одливци изузетно тачних димензија са минималним одступањима тако да је накнадна машинска обрада дела минимална или је нема. Површински квалитет ових одливака је $R_a \leq 10-20 \mu m$, а димензионална одступања су реда веичине десетих делова милиметра, док је одступање при ливењу у пешчаним калупима ± 1 до $\pm 2 \text{ mm}$. У прецизно ливење спадају:

- 1) Ливење топљивим (изгубљеним) моделима (димензионално одступање ± 0.03 - $\pm 0.1 \text{ mm}$);
- 2) Ливење под притиском (димензионално одступање ± 0.05 до $\pm 0.2 \text{ mm}$);
- 3) Ливење у гипсаним калупима (димензионално одступање ± 0.13 до $\pm 0.25 \text{ mm}$);
- 4) Ливење у шкољкастим калупима (димензионално одступање ± 0.25 до $\pm 0.38 \text{ mm}$) и
- 5) Ливење у керамичким калупима (димензионално одступање ± 0.1 до $\pm 0.3 \text{ mm}$).

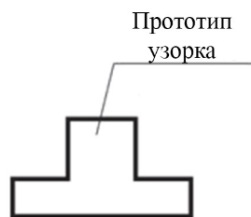
4.4.1. Ливење топљивим моделима

Принцип ливења помоћу топљивих модела познат је човечанству од пре Христа, али се појавом савременијих техника и материјала издвојио као један од најпрецизнијих метода. До 20. века ова метода се користила за изливање углавном уметничких и украсних предмета од легура бакра, злата и сребра. Данас се користи за изливање прецизних одливака за војне потребе, медицине и др.

Ливење изгубљеним моделима састоји се из следећих операција:

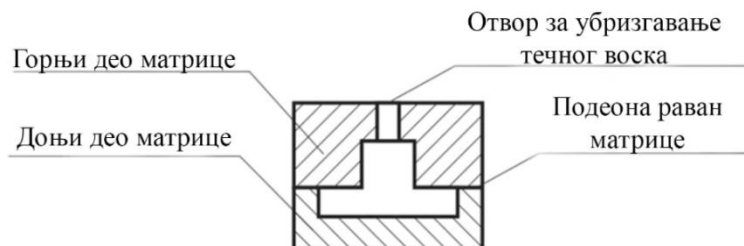
- израде матичног модела (матрице) и модела уливног система од воштаних супстанци, масних киселина или синтетичких материјала,
- повезивања воштаних модела са моделом уливног система помоћу лемилице,
- израде једноделног керамичког калупа,
- уклањања модела топљењем,
- загревања калупа,
- изливања ливачке легуре,
- чишћења одливка од керамичке масе и
- избијања уливног система.

Први корак при ливењу топљивим моделима је израда матичног модела. Топљиви модели се праве у вишеделним матрицама како би из њих могли лако да се изваде, метална матрица може да буде израђена механичком обрадом или ливењем. Матрице добијене машиском обрадом се праве од угљеничних челика или алуминијумских легура, предвиђени број модела за њих је 30000 до 120000. Ливењем се израђују матрице од бабита Sn-Cu-Sb (калај + 6% бакра + 11% антимоно, $T_f=380^\circ\text{C}$). Бабит је мекан метал и лако се оштети па се у њему може произвести 5000 до 7000 воштаних модела. При изради матрице воштаног модела треба узети у обзир скупљање воштане масе при прелазу у чврсто стање, и ширење материјала матрице на повишеној температури; за већину материјала укупно скупљање је око 1,55%.



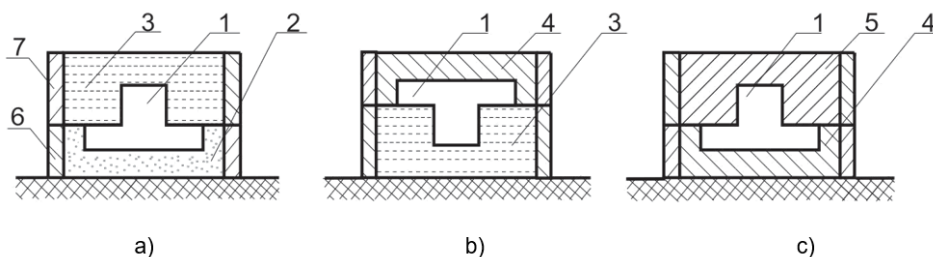
Слика 4.22 Стварни модел

Челична матрица прави се по прототипу узорка облика и димензија топљивог модела. На слици 4.23 приказана је матрица добијена машинском обрадом.



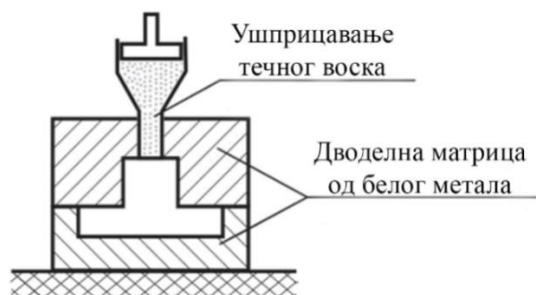
Слика 4.23 Дводелна челична матрица израђена машинском обрадом

Израда ливене матрице врши се уз помоћ стварног модела од никла приказаног на слици 4.22. Матрица се добија поступком приказаним на слици 4.24 тако што се стварни модел ставља у доњу калупницу (4) где се око њега сабија пластична глина (2), а горња калупница (5) попуњава се смешом гипса и воде (3). Када се глина стврдне, разбија се и избацује, остаје шупљина која се попуњава течним белим металом. Исто се ради и са гипсом који је са горње стране и после отврдњавања белог метала добија се дводелна матрица. Матрица се раздваја, модел од никла се вади и на његовом месту остаје празнина еквивалентна стварном моделу. Пре почетка ливења топљивих модела треба пробушити отвор за уливање воштане масе у горњем делу матрице (сл. 4.24).



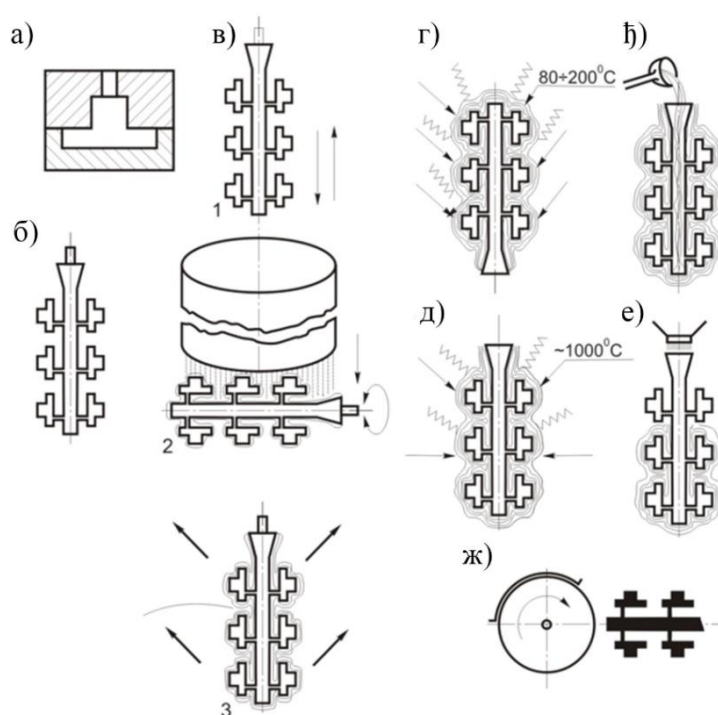
1-Матични модел, 2-Пластична глина, 3-Гипсана маса, 4-Доња половина матрице од белог метала, 5-Горња половина матрице од белог метала (шрафуре 4 и 5 приказују очврсли бели метал)

Слика 4.24 Израда ливене матрице од белог метала: а) матични модел, б), в) уливање течног белог метала у доњу односно горњу половину калупа



Слика 4.25 Ливена матрица за израду модела

Више воштаних модела (сл. 4.25а), леми се заједно за један вертикалн уливни левак који заједно формирају моделни грозд (б). Грозд се више пута потапа (в) у суд са колоидном смешом самлевоног кварцног песка и везива етил-силиката или желатинске масе силицијумске киселине. Натопљени моделни грозд се цеди од вишка колоидне смеше и на њега се наноси керамички материјал просејавањем. Поступак се понавља 4-8 пута, док се око моделног грозда не формира довољно дебео слој калупног материјала. Између операција наношења калупне смесе врши се сушење на ваздуху или деловањем хемијским средством. Када је калуп формиран око моделног грозда, он се уклања топљењем на температури 80-200°C, зависно од хемијског састава воштаног модела (г). Пре ливења калуп се жари (д) на око 1000°C, па се калупна шупљина испуњава течним металом (ђ). После отврђавања одливака калупна смеша се разара и одливци чисте од ње (е), одсеца се заједнички уливни левак (ж). За наредно ливење поступак се целоупно понавља, једино се користи иста матична матрица за добијање нових воштаних модела.



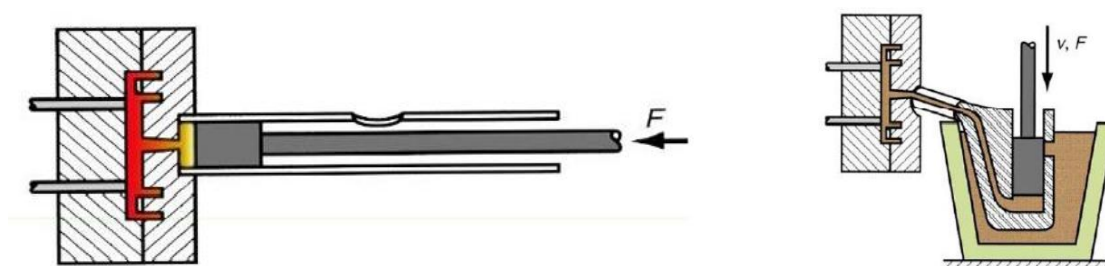
Слика 4.25 Шема прецизног ливења изгубљеним моделима

4.4.2. Ливење под притиском

Код ливења под притиском лив се доводи у калуп помоћу клипа тако да лив под притиском заузима простор калупне шупљине. Калупи су метални од висококвалитетног челика, погодни за ливење у масовној производњи одливака не тежих од 25 kg. Добијају се одливци веома прецизних димензија и мале хрпавости површина, а могуће је ливење и сложенијих облика. Ова метода је погодна за алуминијумске легуре, као и друге обојене метале чија је температура топљења ниска. Легуре гвожђа нису погодне да се лију овом методом зато што услед брзог хлађења настају одливци велике кртости, поред тога високе температуре загревања течног метала које су потребне за изливање легура гвожђа доводе до корозије унутрашњих зидова калупа. Будући да је реч о калупима високог квалитета са минималном толеранцијом димензионалних одступања важно је водити рачуна о њиховој дуготрајности и економској исплативости.

Постоје два начина ливења под притиском, а то су са хладном (сл.4.27 лево) и са топлом (сл. 4.27 десно) компресионом комором. Калупи са хладном комором се састоје из покретног и непокретног дела и коморе која може бити хоризонтално или вертикално постављена. Лив се потискује клипом кроз комору притиском од 40 до 100 МПа и попуњава калупну шупљину, док се гасови одводе кроз канале. Одржавање калупа подразумева њихово предгревање пре сваког одливка и чишћење након вађења одливка. Калупи са топлом компресионом комором имају такву комору која пролази кроз лонац са топљеним металом и клип коморе усисава лив у комору при повратном ходу, док у радном ходу под притиском 10-30 МПа потискује лив у калуп.

Ливење под притиском има своје специфичности кад су у питању шупљине у одливку односно језгра. Језгра се специјално фиксирају у гнезда у калупу како би остала на свом месту и одолела притиску којим лив делује на њих. После кристализације се не ваде из одливка већ се топе при термичкој обради.



Слика 4.27 Шематски прикази ливења Al легура под притиском са хладном компресионом комором (лево) и са топлом компресионом комором (десно)

Предности оваквог начина ливења су тачне димензије, глатке површине одливка, брза масовна производња (попуњавање калупа за 0,01-0,6 s), добре механичке особине услед брзог хлађења. Недостаци су висока цена калупа и уређаја за ливење, ограниченост масе и димензија одливка.

4.4.3. Ливење у гипсаним калупима

Гипсана маса са водом може се употребити за ливење једино нежелезних легура. Највише се лију алуминијумски одливци велике масе и прецизних димензија. Максимална радна температура гипсаних калупа је 1200°C, па ливење метала са високом тачком топљења није изводљиво. Легуре гвожђа није реално лити овом методом и зато што сумпор из гипса реагује са гвожђем и тако деградира особине легуре. Ови калупи имају малу гасну пропустљивост која се мора повећати да би се добио квалитетан одливак. Пропустљивост се повећава додавањем материја које физичким деловањем повећавају порозност, применом додатака које гипсану масу чине пенастом или посебним физичко-хемијским третманом калупа и језгара који утичу на микроструктуру гипса.

Основа калупне масе може бити:

- гипс добијен сувим поступком $\beta\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ или
- гипс добијен мокрим аутоклавним поступком $\alpha\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (боља својства отпорности).

Додаци који се додају гипсу могу бити цемент, азбестни прах, кварцно брашно и бентонит. Брзина, начин и време мешања смесе утичу на добијену структуру калупа. Смеса се хомогенизује у мешалицама од 1800-3000 o/min када гипсана маса пени, повећава јој се запремина и добија гасне микромехурове који се у калупу и језгрима спајају и настају гасни мехурови. Калупи и језгра отврдњавају најпре на собној

температури, а затим се суше на температури до 250°C што укупно траје до 40 минута у зависности од масе и облика калупа. Талк и магнезијум-оксид се могу додати како би се смањило време везивања и спречило формирање прслина калупа. Модели се израђују од материјала отпорних на воду из калупне смеше, то су углавном легуре бакра, алуминијума, полимери или еластични модели од силиконских гума. Гипсана маса у току отврдњавања значајно повећава запремину што се мора узети у обзир за конструкцију модела и уливног система. Да не би дошло до лепљења модела за масу калупа он се обично пресвлачи анти-лепљивим премазима.

Изливање се може изводити гравитационо, центрифугално, под притиском или вакуумским поступком. Језгра од гипса се такође могу користити и за ливење у песку или у кокилама. У гипсаним калупима могу се лити одливци комплексне геометрије, уских толеранција, малих димензионалних одступања и делови висококвалитетних површина. Гипс има малу топлотну проводљивост, па се ливени алуминијум споро хлади, спорије него у пешчаним калупима. То даје времена течном металу да у потпуности попуни калупну шупљину сложеног облика. Дуже хлађење с друге стране ограничава обим производње. На слици 4.28 приказано је вађење одливка из гипсаног калупа.



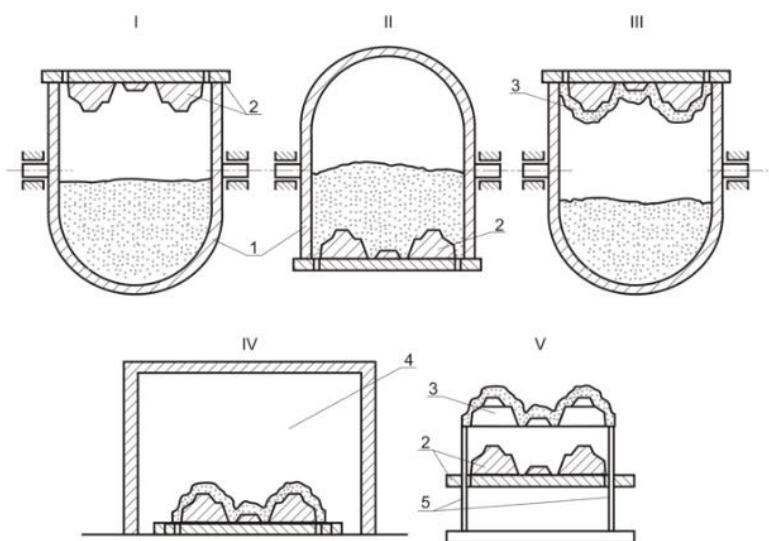
Слика 4.28 Фигура рибе ливена у гипсаном калупу

4.4.4. Ливење у шкољкастим калупима

Овај начин калуповања је новијег датума, настао је средином 20-ог века у Немачкој а први га је употребио Јоханес Кронинг. Шкољкасти калупи су танкозидне масе које чини смеша чистог кварцног песка са 3-10% фенол-формалдехидне синтетичке смоле. Ливење калупа у љусци применљиво је за железне и нежелезне метале; најчешће се користи ливено гвожђе, угљенични челик, легирани челик, нерђајући челици, легуре алуминијума и легуре бакра. Могу се лити сложени и танкозидни одливци. Типични делови су мале до средње величине и захтевају високу тачност, као што су кућишта зупчаника, главе цилиндра ваздушно хлађених СУС мотора и клипњаче.

Користи се метална моделна плоча да би се добила калупна шупљина. Плоча се премазује силиконским уљем. Поступак калуповања приказан је на слици 4.29. У резервоар се ставља калупна смеша (1) а на њеном врху је причвршћена загрејана моделна плоча (2). Посуда се окреће за 180° и дејством гравитације калупна маса прекрива моделну плочу попуњавајући простор око њених површина. Загрејана

моделна плоча топи синтетичку смолу која везује зрнца кварцног песка. Посуда се враћа у почетан положај па калупна маса која се није везала пада на дно суда, а око моделне плоче се задржава везани слој калупне смеше (3) (4-10 mm, зависно од времена задржавања у обрнутом положају).



1-Резервоар калупне смеше, 2-Моделна плоча, 3-Готова полушкољка,
4-Пећ за печење шкољке, 5-Избијачи шкољке

Слика 4.29 Поступак израде шкољкастих калупа.

Када се формира слој шкољке довољне дебљине, заједно са металном плочом се одваја од посуде и суши у пећи (4) где смеша још очвршћава. Шкољка се од плоче одваја посебним избијачем (5). На исти начин се израђује и други део шкољке, убацују језгра уколико постоје, па се два дела спајају лепљењем или стежањем кланфом. Након изливања метала смола сагорева, па се после кристализације одливка калуп распада и део лако вади. У поређењу са ливењем у песку, из ових једнократних калупа добијају се одливци тачнијих димензија, квалитетнијих површина и са мањом могућношћу настанка грешака.

4.4.5. Ливење у двоструким калупима

Процес ливења у двоструким калупима по Шаву је поступак прецизног ливења адекватан за производњу прецизних одливака са високим квалитетом површине. Подразумева примену шкољкастог калупа и шамотног калупа. Шкољкасти калуп је унутрашњи и треба да буде дебљине 10 mm израђен од ситнозрнастих керамичких материјала (MgO ; $ZrO_2 \cdot SiO_2$; $CaO \cdot ZrO_2$; $MgO \cdot Al_2O_3$; Al_2O_3 и SiO_2) високе температуре топљења, чије су честице везане хидролизованом етил-силикатом и желатинском масом за отврдњавање. Масу за отврдњавање чине амонијачна вода, нишадор (NH_4Cl) и амонијум карбонат $(CNH_4Cl)CO_3$. Спољашњи калуп је од уситњеног шамота (зрна величине 3-5 mm) и воденог стакла ($Na_2O \cdot SiO_2$) у износу 7-10% укупне шамотне масе. Водено стакло везује зрна шамота у реакцији са CO_2 под притиском. Језгра се израђују од керамичких маса. Улога керамичког шкољкастог калупа је да обезбеди добру пропустљивост и да одслика контуру модела, док шамот обезбеђује ватросталност, чврстину, термичке и хидрауличне варијације при уливању и кристализацији одливка.

Двоструким калупима могу се лити готово сви ливачки материјали, али се због економичности лију масивни делови до 3 t, легуре са високом температуром топљења, како би се искористио потенцијал високе ватросталности. Стварни модели праве се од

метала, дрвета или полимера. Модели поређани респективно по одрживости димензија се праве од: месинга, челика, легура алуминијума, стирен и акрил силиконског каучука, епокси смоле, гипса и дрвета. Поступак ливења је следећи:

- у калупници се израђује гипсани део калупа око увећаног модела;
- у горњем и доњем делу калупа уграђују се одушак и уливак, као и уливна чаша у горњем делу;
- после калуповања пропушта се CO_2 кроз смешу гипса и Na_2SiO_3 ради стврдњавања, увећани модел се избацује и поставља се стварни модел, између њега и гипсаног калупа остаје празан простор;
- кроз уливну чашу се убацује вискозна керамичка смеша, док не попуни простор између стварног модела и шамотног калупа;
- калуп се жари/загрева на 1000°C , уклања се калупница, склапају доња и горња половина калупа и гравитационо излива течни метал кроз уливну чашу.

Уливни систем пројектује се као за ливење у пешчаним калупима с тим што није неопходно сифонско ливење, већ се може лити директно у калупну шупљину због отпорности калупа на механичке и термичке ударе. Треба планирати боље обваздушаваше одушцима, јер је калуп мало гасно пропустљив. У табели 4.1 дата су очекивана димензиона одступања у зависности од димензија одливка.

Табела 4.1 Димензионална одступања која се очекују код одливака од челичног лива

За димензије:	Одступање, mm
До 25 mm	$\pm 0,08$
25 до 75 mm	$\pm 0,13$
75 до 200 mm	$\pm 0,38$
200 до 375 mm	$\pm 0,76$
Изнад 375 mm	$\pm 1,14$

Углавном се израђују металопрерађивачки одливци: кокиле, калупи за ливење под притиском, калупи за индустрију пластичних маса, гума, стакла и др. Могу се лити делови за хемијску, прехранбену индустрију, делови турбина, делови у војном наоружању, а у последње време користи се у авио и аутомобилској индустрији.

5. Грешке ливачких легура и методе за њихово отклањање

Провера израде одливка се обавља у различитим стадијумима процеса ливења, а одливци који је прођу овај вид контроле подвргавају се завршној контроли квалитета и анализи грешака. Контрола квалитета подразумева хемијски састав, геометрију одливка, механичке особине, херметичност и присуство спољашњих и унутрашњих грешака. Геометрија одливка се проверава мерним инструментима, а масе мерењем на калибрисаној ваги. За проверу механичких особина лију се посебни одливци који се испитују, или се одсеца узорак од траженог одливка. Тестови на херметичност за одливке од којих се то очекује подразумевају хидро или пнеуматске пробе под притиском који је већи од радног притиска под којим је део намењен да ради. Спољашње и површинске грешке се одређују визуелном методом где је то могуће, а за оне које нису видљиве користи се метода пенетрације, магнетна или луминесцентна метода. Унутрашње грешке попут укључака шљаке, шупљина, порозности, прслина откривају се методама без разарања, а то су радиографија и ултразвучна метода.

Све грешке ливења деле се у две групе:

- 1) Поправљиве грешке и
- 2) Непоправљиве грешке.

Како би се грешке лакше уочиле и уколико је могуће уклониле, класификују се и означавају у две групе на следећи начин:

- Класе грешака на основу визуелног изгледа грешке се словно означавају:
 - A. металне израслине;
 - B. шупљине;
 - C. нецеловитост (прекид континуитета масе);
 - D. површинске грешке;
 - E. непотпун одливак;
 - F. нетачне димензије или облик;
 - G. укључци и неправилна структура.
- Према врсти лива и методи ливења грешке се означавају на начин приказан у табели 5.1 и табели 5.2:

Табела 5.1 Означавање грешака према врсти лива

Челични лив (ČL)	1
Сиви лив (SL)	2
Нодуларни лив (NL)	3
Црни темпер лив (CteL)	4
Легури лаких метала	5
Легури тешких обојених метала	6

Табела 5.2 Означавање грешака према методи ливења

Ливење у сировим пешчаним калупима	a
Ливење у сувим калупима	b
Ливење у језгреним калупима	c
Ливање у шкољкама	d
Ливење у шкољкама са керамичком љуском	e
Прецизно ливење	f, g
Ливење у кокилама	h
Ливење под притиском	i
Центрифугално ливење	k
Континуално ливење	l

Услов да одливак са грешком не буде проглашен шкартом јесте или да грешка не утиче битније на карактеристике одливка, па се може толерисати, или да се грешка може отклонити. На основу последица које грешке остављају на одливку, могу се поделити у три групе:

1. Неотклоњиве грешке, оне код којих је санација одливка технолошки и економски неоправдана,
2. Отклоњиве грешке су оне које се отклањају применом додатних мера на одливку иако нису биле предвиђене, али које су исплативије од поновног ливења дела и
3. Поправљиве грешке се најчешће изводе заваривањем, исправљањем или на неки други начин.

5.1. Металне израслине

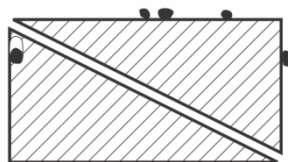
У ову групу убрајају се грешке прелива и формирања куглица.

Прелив (сл. 5.1) је метална израслина која се јавља у подеоној равни калупа или на ослонцу језгара, означава се са A111. Може се јавити код свих ливачких метала и метода ливења a, b, c, d, e, f, g, h, i. Ову грешку узоркују велики зазори између горњег и доњег дела калупа или између језгара и језгрених марки. Метод за спречавање ове грешке је израда модела и језгара тачних димензија, као и обрада површина калупа и језгара.



Слика 5.1 Шематски приказ прелива а) на подеоној равни калупа и б) на ослонцу језгра

Металне куглице (сл. 5.2) су грешке означене симболом A3111 које се појављују као глатке израслине пречника мањег од 10 mm распоређене појединачно. Могу бити и у унутрашњости на местима оштрих углова, ивица и цепова, као гасни мехурови у облику капи или фосфидних перли. Могу се формирати код свих ливених метала и метода ливења a, b, c, d, e, f, g, h. Настају као последица нечистоћа (фосфора) који се нагомилава ка површини одливка у току хлађења. Спречава се елиминисањем фосфора и растворених гасова из лива.

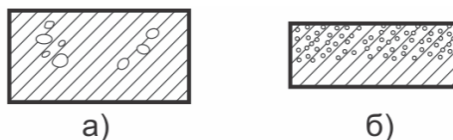


Слика 5.2 Шематски приказ кугли и перли

5.2. Шупљине

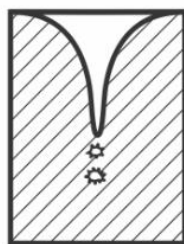
Класу шупљина чине грешке гасни мехурови и поре, спољни лункери (улегнуће) и порозност.

Гасни мехурови и поре (сл. 5.3) су грешке које настају код свих ливачких материјала, и метода ливења а, б, с, d, е, f, g, h, симбол им је В111. Карактеришу се као најчешће грешке алуминијумскох одливака. Узрокују их мехурови гасова који се формирају у току очвршћавања лива. Углавном су унутрашње грешке, унутрашња површина им је глатка. Овај проблем се решава прављењем калупа довољне пропустљивости за гасове, пројектовањем адекватног уливног система и смањењем садржаја водоника и кисеоника у ливу.



Слика 5.3 Шематски приказ а) гасних мехурова и б) поре

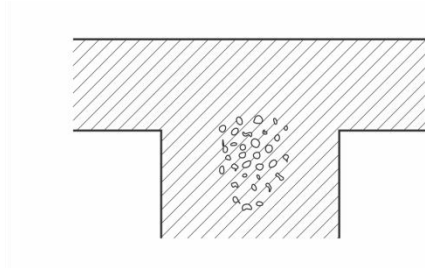
Лункери (сл. 5.4) су шупљине на спољним површинама или у унутрашњости одливка које настају због недостатка течног метала да се испуне удаљени делови калупне шупљине. Лункери имају симбол В211, настају код одливака свих материјала и метода ливења а, б, с, d, е, f, g, h. Изгледа као отворена левкаста шупљина чија је унутрашња површина храпава, прекривена дендритним кристалима. Ова грешка настаје на дебљим деловима одливка када из њих лив отиче и попуњава делове одливка тањих зидова. Узрок појаве је запреминско скупљање лива и недовољно напајање дебљих делова на местима где може доћи до ове грешке. До лункера долази када нема довољно метала у хранитељима који треба да попуне празнине на местима где они могу да настану, правилним димензионисањем хранитеља грешка се спречава.



Слика 5.4 Шематски приказ спољашњег лункера

Порозност (шупљикавост, гасна порозност, сл. 5.5) је грешка која се може појавити код свих ливачких материјала и методама ливења а, б, с, d, h и i, и означава се ознаком В311. Честа је грешка код легура лоше ливкости, код одливака веће масе на местима која последња очвршћавају попут прелаза са веће на мању дебљину зида и при уливном каналу. Шупљине настају услед касног изласка гасова, непосредно пре кристализације. Грешка се може избећи већим садржајем дезоксидатора, снижавањем

нечистоћа, прављењем калупа боље гасне пропустљивости, односно правилним постављањем канала за одвођење гасова.

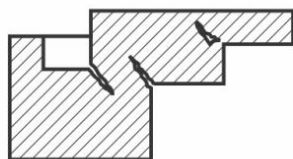


Слика 5.5 Шематски приказ порозности

5.3. Нецеловитост

Нецеловитост структуре одливка (сл. 5.6) обухвата грешке топле прслине и хладне спојеве.

Топле прслине су међукристалне грешке које настају на деловима одливака који последњи отврдњавају и где се нагло мења дебелина зидова. Прслине се означавају са С134 и могу настати код свих ливачких материјала и при свим методама ливења. До ових проблема долази ако лив нема слободно скупљање при очвршћивању за шта је "одговоран" садржај сумпора. Смањивањем S и конструкцијом дела без наглих пресека дебелине зидова смањује се вероватноћа за појаву ове грешке.



Слика 5.6 Шематски приказ топлх прслина

Хладни спојеви (сл. 5.7) – С311 се могу образовати код свих ливачких материјала независно од начина ливења. Овакви спојеви настају на местима одливка која лив треба да попуни доливањем са више страна. Та места су углавном танкозидна, већих површина па ова врста грешака настаје услед лоше ливкости метала где се укрштају два млаза охлађеног лива. Грешка се спречава повећањем температуре ливења и бољом конструкцијом уливног система.



Слика 5.7 Шематски приказ хладних спојева

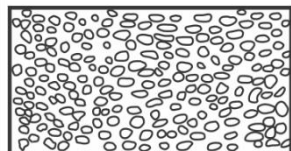
Разлика између топлх и хладних прслина је у томе што топле прслине настају на границама металних зрна на местима најмање чврстине, нагле промене пресека, и њихов ток ширења је интеркристални (између граница кристала). Хладне прслине су транскристалне грешке што значи да се простиру и по границама зрна и преко њих. Смер деловања затежућих напона обликује прслину, код једносмерних напона ствара се прслина управна на тај правац, а код напона затезања у два међусовно управна правца прслине ће бити међукристалне али разгранате и криволинијске. Склоност ка

прслинама имају материјали већег напона течења ($R_{p,0,2}$), модула еластичности (E) и коефицијента термичког ширења (α). Калупи код којих је већа шанса за појаву прслине су они са ниском вредношћу коефицијента акумулације топлоте (песак, гипс). До појаве прслина може доћи и после достизања собне температуре одливка услед заосталих унутрашњих напона. Такве прслине настају када се поремети равнотежно стање напона излагањем спољним силама при транспорту дела, машинској обради или у току експлоатације.

5.4. Површинске грешке одливака

Групу D – површинске грешке чине храпаве површине одливака.

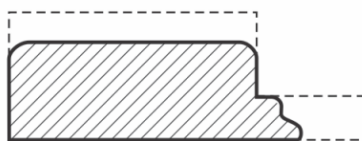
Храпава површина (поморанцина кора, сл. 5.8) носи ознаку D134 и може настати код свих ливачких легура када се лију у песку. До грешке долази када се лије у пешчаном калупу чија смеша није измешана у погодној пропорцији са новим песком, већ је доминантан стари песак који је киселог карактера (pH вредност око 5). Калуп зато треба правити у смеси са новим песком, односно старом песку додати глину бентонит са содом да би се постигла слабо базна pH вредност (до 8).



Слика 5.8 Шематски приказ храпаве површине

5.5. Непотпун одливак

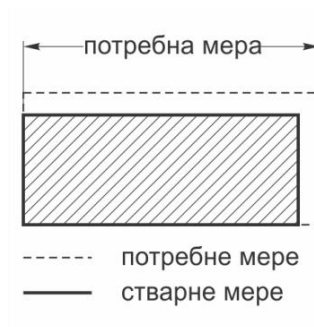
Непотпун одливак (сл. 5.9) има грешку која се зове недоливеност и обележава са E121. Настаје код ливачких материјала 1, 2, 3, 4, 5 и 6 при методама ливења a, b, c, d, e, f, g, и h и то на местима одливака која су танкозидна и удаљена од уливног канала. Ову грешку може да узрокује лоша ливкост, ниска температура ливења, уливни систем малог попречног пресека, и при ливењу у металним калупима лош систем одвођења гасова, па одливак изгледа као да му недостаје један део. Правилном конструкцијом уливног система и система одвођења гасова на калупу и постизањем адекватне температуре ливења до ове грешке неће доћи.



Слика 5.9 Шематски приказ недоливености

5.6. Нетачне димензије и облик

Нетачне димензије или облик (сл. 5.10) су грешке настале код материјала 1, 2, 3, 4, 5 и 6 услед ливења методама a, b и c, препознатљиве по нетачним димензијама одливка у односу на модел и цртеж. Грешка се дешава када дође до померања горњег калупа у односу на доњи, и језгара у односу на калуп. Узроци су велики зазори између делова калупа, рупа и завртњева који спајају два дела калупа и зазори између језгара и ослонаца језгара. Узрок грешке може бити и лоша процена при прорачуну температурског скупљања метала. Правилним пројектовањем модела језгара и калупа спречава се настанак грешке.

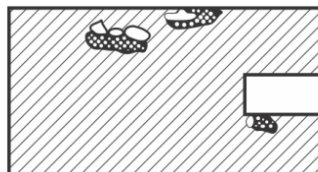


Слика 5.10 Шематски приказ нетачних мера одливка

5.7. Укључци и неправилна структура

Укључци се убрајају у класу грешака G коју чине укључци троске.

Укључци троске (сл. 5.11) могу се појавити код свих ливачких легура без обзира на метод ливења, ознака им је G121. Троску чине неметални укључци који доспевају у лив из пећи за припрему лива (троска од кречног камена или соли за рафинацију лива). При брзој кристализацији лива, троска (згура) испливава на врх ливачког лонца или се таложи у уливном систему. Када се нађе у калупној шупљини задржава се при врху одливка или на ивицама услед отврдњавања, па на тим местима одливак буде порозан. Спречава се скидањем троске са врха ливачког лонца или при испуштању из пећи, додавањем сувог кварцног песка или креча чиме се згушњава троска и лакше одваја.



Слика 5.11 Шематски приказ укључака троске

6. Примена ливачких легура алуминијума у техничкој пракси

У 21-ом веку производи од алуминијумских легура употребљавају се свакодневно. Готово свако домаћнство има алуминијумску фолију којом се облаже храна, напите паковане у алуминијумске лименке или боје, лакове, освеживаче у течном или гасовитом стању паковане у конзерве, боце и друге амбалаже од Al легура. Као што је већ речено, хемијска инертност према великом броју хемикалија чини Al погодним материјалом за паковање прехранбених производа. Мала маса и погодне физичко-хемијске особне отварају пут примене Al легура у транспорту, грађевинарству, архитектури, електроници и многим другим гранама индустрије.

6.1. Транспорт

Саобраћај се мења из године у годину постављањем нових захтева које превозна средства треба да испуне. Пре само 50 година на улицама су се могли видети аутомобили другачијег изгледа и лошијих преформанси, док данас углавном имају аеродинамичан облик и боље карактеристике. Томе је допринео шири спектар избора материјала склопова и машине који диктирају економски и еколошки захтеви.

6.1.1. Авио-индустрија и свемирски програм

Улога алуминијума и његових ливачких легура за коју не би могло да се нађе адекватна замена, јесте производња разних типова летелица. У 19. веку гроф Ferdinand von Zeppelin користио је алуминијум за рамове целелина и указивао на његову малу густину и отпорност на корозију. Први авион браће Wright (Orville Wright и Wilbur Wright) који је полетео 1903. године имао је у себи мотор од 12 коњских снага (8.95 kW) који је модификован алуминијумским блоком мотора који је тежио 30 kg како би авион био лакши, а остатак конструкције је био од дрвета и челика. За ту прилику је први пут у историји извршено термичко ојачање легуре изливеног блока мотора. Дрво и челик су убрзо замењени алуминијумом и од почетка 1920-их година праве се алуминијумски авиони. Алуминијум се издвојио због мале тежине, а задовољавајуће јачине, да се одупре условима кретања од 800-1000 km/h и на висинама 9-12 km. Како би се уштедело на тежини летелица, алуминијум се користи и у изради делова у унутрашњости авиона, као што су седишта, преграде, врата. Око 80% тежине модерног комерцијалног авиона без терета чини технички алуминијум и његове легуре. Захваљујући корозивној отпорности неке авио-компаније не фарбају своје авионе тако штедећи на маси и цени боје. Појавом млазних мотора и прекоокеанских летова, захтеви за бољим материјалима су се повећали што је и довело до открића неких до тада непознатих легура. Легуре за обраду деформисањем се више користе од ливачких легура, јер примену налазе углавном у самој конструкцији авиона, спољашњим облогама и ентеријерским компонентама, док ливачке легуре налазе примену за неке делове мотора.

Унутрашњост летелице углавном се прави од легуре 2014 због добре заварљивости, чврстоће, жилавости, добре обрадивости, а ниске отпорности на корозију. Легура 2024 има велику затезну чврстоћу од око 480 МПа након старења и одличну отпорност на замор због чега је погодна за прављење трупа и крила.

Легура 5052 има највећу чврстоћу од свих деформационих легура које се не могу термички ојачавати, дуктилна је па се користи за делове комплексних облика.

Легура 6061 се користи углавном код малих лаких авиона за труп и крила због добре заварљивости и обрадивости.

Легуре 7050 и 7068 су најјаче доступне легуре за деформацину обраду. Делови се тешко заварују али су обрадиви, отпорни на замор, велике затезне чврстоће, па примену налазе у војним авионима од Другог светског рата.

За потребе војног ваздухопловства развијају се суперлегуре алуминијума погодне за услове рада суперсоничних авиона. У тој области на светској сцени издвојила се некадашња совјетска, а данас руска компанија Сухој (Сухой). Од 1939. године до данас фабрика је произвела мноштво легендарних авиона попут "Тупољев Ту-160" и авиона "СУ" програма. Војни авион, ловац и пресретац "Су-57" конструисан 2009. године, један је од најбољих модерних авиона, направљен од легура титана и алуминијума високе чврстоће (сл. 6.1). Такође, велику примену Аl и његове легуре налазе и у авионском путничком саобраћају (сл. 6.2).

Трка ка Месецу која је уследила за време Хладног рата између САД-а и СССР-а омогућила је нови спектар употребе легура алуминијума. Свемирске ракете чине легуре алуминијума као примарни конструкциони материјал. У историји човечанства ратови су били покретачи иновација и технолошког напретка како би се остварила предност над непријатељем, па је тако у хладном рату створена прва литијумска легура алуминијума. Одлазак на Месец програма "Аполо" достигао је свој циљ захваљујући адекватном одабиру материјала летелице и опреме астронаута. Вештачки сателити лансирани у Земљину орбиту такође су сачињени од алуминијума, чију еру је започео совјетски "Спутњик 1".



Слика 6.1 Сухой "Су-57"



Слика 6.2 Путнички авион "AIRBUS A 330"

6.1.2. Друмска возила

Када је реч о производњи аутомобила, камиона, мотоцикала и других друмских возила, алуминијум је последњих година материјал чија примена константно расте. Прелазак са употребе фосилних горива на електро погон у циљу смањења емисије штетних гасова изискује знатно мању масу возила, па се челик, где год је то могуће, замењује легурама алуминијума или полимерима и композитима.

Сигурност возила је примарна при одабиру материјала од којих је оно сачињено. На сигурност возача и путника утичу многи фактори конструкције од којих је најзначајнија величина, а не тежина возила. У последњих неколико деценија производе се углавном аутомобили већих габарита него што је то било раније, чија је сигурност далеко изнад аутомобила старијег датума. Каросерија највише утиче на сигурност возила, деформационо ојачан метал приликом удара треба да апсорбује енергију гужвањем и на тај начин заштити путнике. Алуминијуске легуре велике чврстоће

деформационо обликоване то испуњавају, па се каросерије нових модела аутомобила марки Форд, Мерцедес-Бенц, Тесла и друго, израђују од алуминијума.

Издржљивост легура алуминијума показала је велики потенцијал за употребу у производњи тенкова и војних оклопних возила. Америчка војна индустрија увелико производи оклопна возила попут "Bradley Fighting Vehicle" и "HMMWV" (High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle) са конструкционим деловима од алуминијумских легура које су замениле челик (сл. 6.3). Алуминијум се у овој улози показао задовољавајуће упркос екстремним условима за која су ова возила намењена. Истовремено, трошкови потрошње горива и одржавања возила иду у прилог томе да у будућности Al-легури заузму битну позицију у производњи ратне опреме.



Слика 6.3 "HMMWV" са алуминијумском каросеријом

Еколошке карактеристике возила све више добијају на значају услед глобалних еколошких промена. Замена челика алуминијумом је један од еколошких циљева у производњи транспортних возила на првом месту због смањења укупне масе возила. Према истраживању америчког одељења за енергетику "Oak Ridge National Laboratory" употреба алуминијума уместо челика, смањује потрошњу енергије просечног аутомобила за 20% а емисију CO₂ за 17%. Поред тога уштеду доноси и могућност рециклаже склопова од Al легура који услед експлоатације дотрају. Преласком на еколошки прихватљива возила као што су хибриди и електрични аутомобили још више постаје изражен проблем тежине возила, јер што је возило теже то је потребно више енергије за његово покретање, а капацитети батерија ових аутомобила су ограничени. Дакле, заменом челика алуминијумом код возила на електрични погон смањује се маса возила а последице тога су смањена потрошња енергије, већа максимална брзина и убрзање, и повећава се могући пређени пут са једним пуњењем батерије до чак 25%.

Преформансе аутомобила треба задовољити у модерном саобраћају и динамичној вожњи. За алуминијум се може рећи да чини ауто бољим. Инжењери су прво почели да конструишу тркачке аутомобиле од алуминијума управо због високих захтева за преформансама (сл. 6.4), што се временом почело примењивати и на путничка и теретна возила. Конструисањем аеродинамичне алуминијумске каросерије добија се возило којим се лако убрзава, брзо кочи и лакше управља по путу.



Слика 6.4 "Porsche 911 turbo S 2020" направљен од Al легура

Ливени алуминијумски делови који се највише израђују за потребе ауто индустрије су блокови мотора, главе клипова, статори и резервоари хладњака.

Алуминијумске фелне су незаобилазан продукт који сваки модеран аутомобил има. Почеле су да се производе 90-их година прошлог века за тркачке аутомобиле и за кратко време замениле су челичне фелне. Предност у односу на фелне од челика је свакако у мањој маси што побољшава преформансе возила. Поред тога, топлотна проводљивост алуминијума утиче на трајност и равномерно трошење гума као и на мање загревање кочиних дискова односно добоша. Алуминијумске фелне се израђују са већом димензионалном тачношћу, добијају се савршено округле фелне високе јачине које апсорбују вибрације па је удобност при вожњи боља. Визуелни изглед је свакако привлачнији (сл. 6.5).



Слика 6.5 Алуминијумска фелна

6.1.3. Шинска возила

Слично као у аутомобилској индустрији, у индустрији шинских возила алуминијум постаје све применљивији материјал. Кровне конструкције, под, делови

ентеријера искључиво су израђени од алуминијума што се поставља као стандард модерних брзих возова. Услед великих захтева за јачином, алуминијумски делови који су претходно били од челика су дупло лакши. Легуре које се користе код ових возова су серије 5000 и 6000, а за посебне захтеве чврстоће и 7000. Јапански брзи возови "Схинкансен" садрже углавном легуру 5083, док је немачки "Transrapid" сачињен претежно од легуре 5005. Каблови који служе за пренос електричне енергије и за инсталације у железничком саобраћају све се више праве од алуминијумских жица уместо бакарних. За те потребе узимају се легуре са великим уделом алуминијума због боље електропроводљивости.

Из аспекта уштеде енергије, употребом алуминијумских возова и вагона могу се вишеструко смањити трошкови. Челични возови троше више енергије при кретању, убрзавању, кочењу и то се одражава на потрошњу тешких теретних и путничких возова који имају лакши терет, али се често заустављају на приградским и градским станицама. Заменом челика алуминијумом у железничком саобраћају штеди се и до 60% енергије, што је више него у било којој грани транспорта, а трошкови производње се отплаћују у просеку две и по године експлоатације. Загађење животне средине и емисија CO₂ значајно опадају уз мању потребу за уложеном енергијом. Челични делови који су незаменљиви код модерног воза су точкови и системи ослањања, па је маса оваквог воза око три пута мања од челичног. Предвиђа се да ће у будућности и алуминијум бити замењен са још лакшим материјалима – композитима од угљеничних влакана.

У протеклих неколико година, поред Јапана и земаља ЕУ, као гигант у производњи брзих возова и железничке инфраструктуре издвојила се Кина која је до краја 2018. године имала 20.000 km брзе пруге у промету што је више од остатка светских брзих железничких пруга заједно.

6.2. Архитектура

Од настанка и почетка употребе алуминијума у 19. веку, његов потенцијал у архитектури се остварио најпре за кровне конструкције које треба да буду лаке. Најранији пример употребе алуминијума у архитектонској градњи датира из 1895. године са плафонским плочама цркве "Светог Едмунда мученика". Године 1897. архитекта Рафаел Ингами је алуминијумским плочама прекривао куполу цркве "San Gioacchino" у Риму (сл. 6.7). Ова два случаја употребе алуминијума имала су декоративну улогу. Ото Вагнер је први користио ливену легуру алуминијума у архитектури године 1906. за скулптуралне елементе у "Postsparkasse" (поштанска штедионица у Виени). Након тога у 20. веку долази до све веће употребе ливеног алуминијума због мале масе и добре постојаности облика на спољашњим условима. Позната зграда "Empire state building" добија прве ливене спандрел панеле који функционишу и данас. Неколико година касније елементе од ливеног алуминијума добија и "Rockefeller" зграда такође у New York-у. Када је чувени Немачки архитекта Валтер Адолф Гропијус изјавио да је алуминијум материјал будућности, архитекте Лауренце Коцхер и Алберт Фреи који су се угледали на њега, конструисали су целу кућу од алуминијума чија се реплика налази данас у музеју уметности у Palm Springs-у (сл. 6.6).



Слика 6.6 Кућа од легура алуминијума, Palm Springs



Слика 6.7 Алуминијумска купола цркве "San Gioacchino"

Године 1949. архитекта Jean Prouvé конструише такозвану "Metropole aluminium house", монтажну кућу од алуминијума која је могла лако да се транспортује са једне локације на другу. Тиме је стекао славу и 1954. дизајнирао у Паризу "Aluminium Centenary Pavillion" који је сачињен од ливених и екструдираних делова. Норман Фостер 1974. проналази алуминијумске изолационе плоче за кров и за фасаду центра за визуелне уметности "Norwich Sainsbury", а исте године Бранко Крашевац дизајнирао је облогу за Телевизијски центар у Љубљани, од ливених алуминијумских плоча. Пример савремене архитектуре у 21. веку је "Dallas Nasher Arts Center" од Ренза Пиана који има алуминијумски плафон.

Одливци од алуминијума се данас интензивно користе у изградњи за фасаде, кровне структуре и декоративне делове објеката. За ове потребе најчешћа метода ливења је у песку. Са напретком технологије ливења могуће је ливење масивних носећих структурних делова и делова сложених облика високог квалитета.

6.3. Алуминујум у електроници

Електрични уређаји које свакодневно користимо попут телевизора, паметних телефона, лап-топ рачунара, веш машина, фрижидера и многих других, временом су усавршавани да буду функционалнији, чвршће конструкције, лакши и бољих топлотних карактеристика. Алуминијумске веш машине и крупни кућни апарати почели су да се производе након Другог светског рата а производња малих кућних апарата почела је 70-их година 20. века. Махине за прање, сушење веша, фрижидери и шпорети правили су се од алуминијумских оквира који је био обложен премазом од белог емајла и доприносио естетици уређаја. Крајем 80-их година у моди су били кућни апарати од брушеног алуминијума. Од 2003. године почиње ера алуминијумских преносивих рачунара, а 2008. "Apple" ствара "PowerBook G4" лап-топ чија је производња била револуционарна због увођења "unibody" процеса производње где се кућиште прави од једног блока алуминијума. Модерни просечни HD телевизор дијагонале екрана 39 инча тежак је око 40 килограма због алуминијумског кућишта, док би еквивалентан телевизор са челиком уместо алуминијума тежио 100 kg, па не би било тако лако фиксирати га за зид.

Поред дизајна и конструкције електричних уређаја алуминијум се користи и за електричне компоненте и електричну мрежу. Електрична проводљивост алуминијума је $\sigma = 3,5 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ (на 20°C) то га рангира на четврто место проводника, после сребра,

бабра и злата. У поређењу са бабром, потребно је да жица алуминијума буде 50% већег пречника од бакарне како би кроз њу пролазила иста количина струје, међутим та жица ће бити лакша од бакарне. Легуре за производњу жица и каблова су из серија 1000, 6000 и 8000.

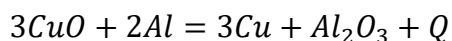
Поступак производње Al жица састоји се из континуалног ливења шипке, која се затим ваља после чега се постиже жељена дебљина кабла углавном 4-23 mm. Алуминијум се користи у сабирницима, разводним уређајима и намотајима кондензатора. Хладњаци и резервоари трансформатора се лију. Обновљиви извори добијања електричне енергије попут система соларних панела и ветротурбина садрже механичке делове од ливених легура алуминијума.

6.4. Термитно заваривање

Алуминијумско или термитно заваривање је метода заваривања челичних предмета која се заснива на већем афинитету алуминијума него гвожђа ка кисеонику. Термитну смешу чине оксиди гвожђа и технички чистог алуминијум у односу 78:22. Термитна смеша се топи до температуре од 1537°C у лонцу од термостатног челика обложеног MgCO₃. Магнезијум се тада разлаже на 2Mg+O₂ уз ослобађање велике количине топлотне енергије. Следе реакције:

$3FeO + 2Al = 3Fe + Al_2O_3 + Q_1$	Из 1000 g термита добија се 378 g троске + 622 g Fe, 2901 kJ и 2800°C
$3Fe_3O_4 + 8Al = 9Fe + 4Al_2O_3 + Q_2$	Из 1000 g термита добија се 446 g троске + 554 g Fe, 3303 kJ и 2800°C
$Fe_2O_3 + 2Al = 2Fe + Al_2O_3 + Q_3$	Из 1000 g термита добија се 476 g троске + 524 g Fe, 3550 kJ и 2960°C

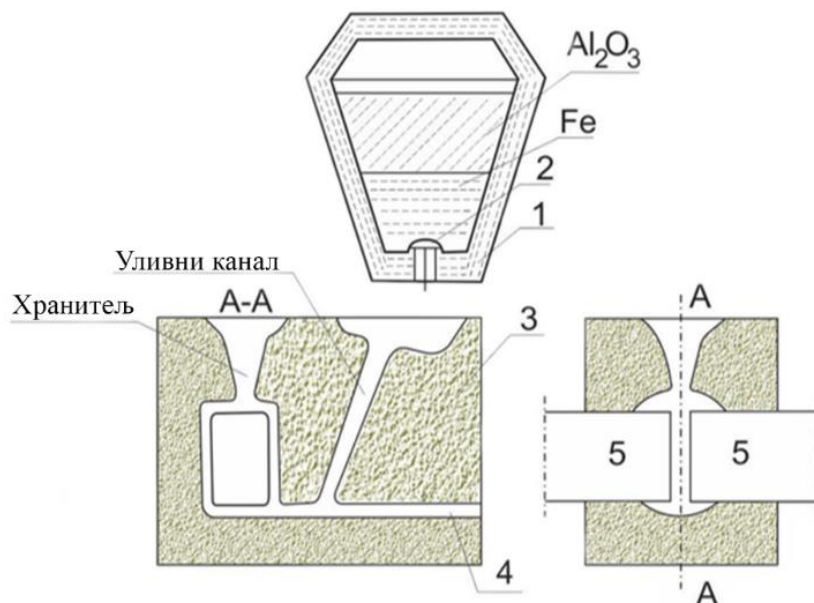
Под дејством топлоте (температуре од око 2482°C) мешавина Fe + Al₂O₃ се топи. Гвожђе је теже и пада на дно лонца, а Al₂O₃ се задржава на површини. Кроз отвор на дну лонца течнo гвожђе се излива директно у калуп који формира шав. У зависности од метала који се заварује, смеси се додају легирајући елементи C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo да би се добио метал шава сличног хемијског састава. При заваривању сивог ливеног гвожђа, њему се додају угљеник и феро-силицијум који утичу на издвајање угљеника у виду графита. Могу се заваривати и легуре бабра термитом од CuO и Al који на високим температурама реагују:



Разликују се термитно заваривање топљењем (сл. 6.8) и заваривање притиском (сл. 6.9).

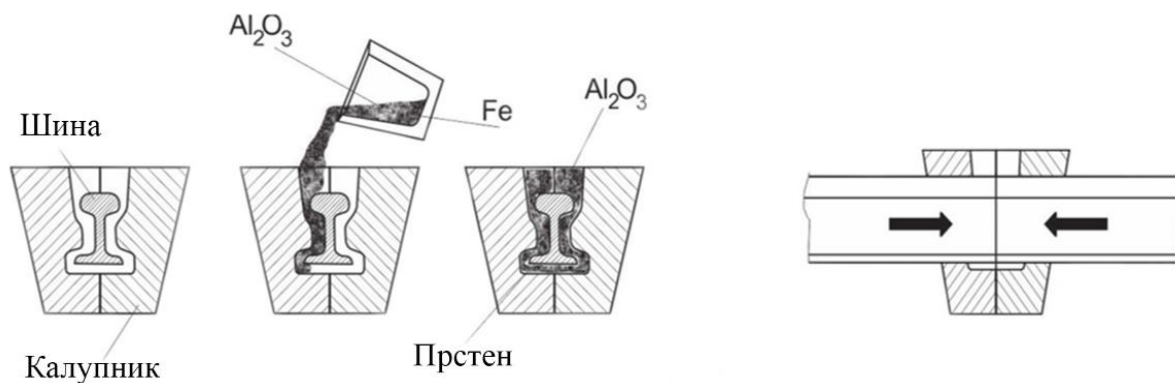
Заваривање топљењем приказано је на слици 6.8 и подсећа на ливење у песку осим разлике припреме течнoг метала и што калуп образују песок и странице радног предмета који се заварују. Гвожђе температуре око 2482°C растапа странице жлеба (5) до дубине уваривања и након очвршћавања добија се заварени спој. Пешчани калуп (3) се израђује по моделу воска који се улива око жлеба. Калупу треба додати уливни канал, хранитеље и канал (4) за загревање топљивог модела. Када очврсне калуп, восак се топи и цеди кроз тај канал, а потом се канал зачепа глиненим чепом. Испушта се гвожђе са дна лонца, попуњава шупљину калупа и радних предмета који се делимично топе и настаје сучеони шав. После хлађења одсецају се уливни систем, хранитељ и канал за загревање топљивог модела. Овај процес заваривања је јефтин, а опрема лако

преносива па се примењује за настављање железничких и трамвајских шина, вртила, осовина и сличних делова. У завареном споју се не појављују заостали напони па није потребна накнадна термичка обрада.



Слика 6.8 Шема термитног заваривања топљењем

Термитно заваривање притиском (сл. 6.9) изводи се тако што се смеша излива са врха лонца. Троска Al_2O_3 прва долази у додир са жлебом и предаје му топлоту па постаје пластичан. Изливањем и гвожђа са дна лонца оно испуњава шупљину падајући на њено дно. Затим се притискивањем сучељених делова који се заварују истискује троска из калупа и остаје само гвожђе. После очвршћивања уклања се калуп, разбија венац и машински обрађује шав.



Слика 6.9 Шема термитног заваривања притиском



Слика 6.10 Метални шав добијен термитним заваривањем железничке/трамвајске шине

Термитно заваривање притиском примењује се за железничке и трамвајске шине (сл. 6.10), заваривање шипки, цеви и других делова.

7. Закључак

Будући да је историјски посматрано алуминијум релативно скоро откривен, он је за кратак временски период достигао велику примену. Будући да су алуминијум и његове легуре мале запреминске масе, одличне топлотне и електричне проводљивости, високе корозивне отпорности у многим агресивним срединама и одличне машинске обрадивости, за алуминијум и његове легуре се може рећи да су материјали са одличним односом физичко-хемијских особина.

Алуминијумске легуре деле се на легуре за обраду деформисањем и легуре за ливење, које су одређене садржајем легирајућих елемената. Механичке особине чистог алуминијума (јачина, тврдоћа) су веома ниске и оне се могу поправити: пластичном обрадом на хладно или легирањем, тј. тзв. термичком обрадом и ливењем. При термичкој обради легура, нпр. типа $AlCu3$ најпре се изводи загревање (растворно жарење) до температуре која је блиска еутектичкој уз нагло хлађење у води чиме се добија презасићен чврст раствор алуминијума бакром. Потом се та легура излаже природном или вештачком старењу и тиме поправљау механичка својства (пре свега тврдоћа односно јачина). При таложном преципитационом ојачању и старењу долази до формирања тзв. ГП-зона које спречавају кретање дислокација и на тај начин ојачавају легуру. Најзначајније легуре добијене овим методима јесу дурали и супердурали, а од ливачких легура најпознатији су силумини.

Силумини су легуре алуминијума и силицијума и имају широку примену због добрих механичких и хемијских својстава, као и због изванредне ливкости, посебно за оне еутектичког састава. Напоменуто је да ливкост важно технолошко својство које чини скуп карактеристика које чине метал погодним за ливење од којих су кључне течљивост, капиларност, вискозност, температура ливења, зонална ликвација и тсл. Силицијум даје легури потребну јачину и добру ливкост, а најпогоднији су еутектички силумини због мале резлике у температури између солидус и ликвидус температуре. Најчешће нечистоће код силумина и већине других ливачких алуминијумских легура су гвожђе, метали са ниском температуром топљења (калај, олово) и испарења гасова која изазивају гасне мехурове (кисеоник, водоник). Циљ добијања повољне ливачке легуре јесте легирање елементима који побољшавају физичко-хемијске особине и елементима који неутралишу штетан утицај нечистоћа, које градећи с њима фазе које не нарушавају својства легуре, или их у најбољем случају побољшавају (везивање гвожђа у условно пожељну фазу $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ како не би настало непожељна једињења Al_5FeSi , Al_3Fe и др.). За производњу квалитетног одливка, поред добијања погодне легуре за ливење, треба одабрати калуп адекватан легури, димензијама и намени будућег дела, у коме ће се изводити ливење, то јест одабрати начин ливења.

Легуре алуминијума су погодне за ливење у готово свим врстама калупа и скоро свим методама ливења због добре ливкости и ниске температуре топљења. Иако је ливење могуће готово свим методима, у пракси се не употребљавају све методе из економичних разлога (нпр. ливење у двоструким калупима). При одабиру калупа узимају се у обзир: димензије траженог одливка, потребна димензионална тачност, хемијска инертност лива и калупа, потребна брзина хлађења лива, обим производње, укупна цена ливења одливка и др. Суштина је да треба за добијање датог одливка користити економски најисплативији начин ливења који испуњава захтеве тачности, цене и квалитета. За ливење висококвалитетних одливака примењују се поступци прецизног ливења од којих су за Al легуре најпогодније ливење у гипсаним калупима и ливење топљивим моделима. Потреба за вишесеријском и масовном производњом

омогућава ливење под притиском у металним калупима којим се брзо добијају одливци високог квалитета, али цена калупа не оправдава појединачну и малосеријску производњу. Не постоји идеалан одливак у пракси изливен без грешке али када бисмо пробали да га замислимо био би то део без грешака и укључака који нарушавају хомогеност и механичка својства.

Грешке се најчешће појављују као последица присуства неметалних укључака, неизбежних испарења гасова у току ливења, лошег одабира или конструкције калупа (лошег пројектовања хранитеља и уливног система, неприлагођене брзине хлађења, стања калупне смесе и др.), лоше конструкције модела, неадекватног хемијског састава легуре и тсл. Појављују се и као резултат сваког пропуста направљеног од конструкционог цртежа одливка, па до завршне машинске или термичке обраде одливка. Треба тежити да грешке буду сведене на најмању меру, да буду поправљиве како одливак не би био проглашен у шкарт и враћен на поновно претапање и изливање, што доводи до накнадних трошкова (радне снаге, времена, материјала, ресурса и др.)

Употреба алуминијумских одливака обухвата широк дијапазон делова различите намене. Највећу примену има код машина и уређаја чији услови рада изискују малу масу, добру електро и термопроводљивост и високу корозивну отпорност за рад у агресивним срединама. Све већа употреба алуминијумских легура заснована је најпре на комерцијалним али и еколошким разлозима.

8. Литература

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, *Технологија ливења и заваривања*, основни универзитетски уџбеник, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [2] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић, *Наука о материјалима 1*, основни универзитетски уџбеник, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац 2017.
- [3] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, Н. Ратковић, *Машински материјали*, основни универзитетски уџбеник, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [4] В. Лазић, М. Јовановић, Д. Арсић, *Рукописи и предавања* са портала е-Learning из предмета Машински материјали, Наука о заваривању и Производне технологије 1 и 2 (Факултет инжењерских наука у Крагујевцу).
- [5] V. S. Zolotarevsky, N. A. Belov, M. V. Glazoff, *Casting aluminum alloys*, Moscow institute of steal and alloys, Alcoatehcnical center, USA, first edition 2007.
- [6] <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/understanding-the-aluminum-alloy-designation-system.cfm>, приступљено новембра 2020.
- [7] <http://www.eling.rs/opremaAl.html>, приступљено новембра 2020.
- [8] <https://www.spotlightmetal.com/aluminum-sand-casting-a-781373/#:~:text=The%20Aluminum%20Sand%20Casting%20Process,metal%20is%20poured%20into%20them>, приступљено децембра 2020.
- [9] <https://aluminiuminsider.com/aluminium-alloys-automotive-industry-handy-guide/>, приступљено децембра 2020.
- [10] <https://aluminiumandalloys.com/alcab-aluminium-castings-in-architecture-beyond/>, приступљено децембра 2020.