

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 737/2014

Ненад З. Сретков

Ливење, преглед најважнијих ливачких легура и њихова примена завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Вукић Лазић, ред. проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Основне студије: МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

Студијско подручје (усмерење): ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Предмет: ПРОИЗВОДНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

Кандидат: Ненад Сретков 737/2014

ПРИЈАВА ЗАВРШНОГ РАДА

Тема рада:

ЛИВЕЊЕ, ПРЕГЛЕД НАЈВАЖНИЈИХ ЛИВАЧКИХ ЛЕГУРА И ЊИХОВА ПРИМЕНА

Задатак:

Садржај овог завршног рада треба да обухвати следеће најважније циљеве за које кандидат мора да буде оспособљен:

- 1) да детаљније проучи технологију ливења, ливачке особине метала и укаже на веома комплексно својство ливкости,
- 2) да наведе најважније метале и легуре за ливење и опише њихова најважнија својства,
- 3) да наведе и детаљније опише данас највише коришћене методе ливења,
- 4) да укаже и укратко опише најопасније грешке у одливака и
- 5) да наведе примере примене ове веома важне производне технологије.

У Крагујевцу, 10. 03. 2016. године.

Ментор:

Др Вукић Лазић, ред. проф.

Препоручена литература:

- [1] М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [2] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, Н. Ратковић: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [3] Р. Ковач: *Технологија израде одливака*, ФТН Издаваштво, Нови Сад, 2006.
- [4] З. Гулишија: *Основи ливачке технологије*, Научна књига, Београд, 1992.
- [5] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.

У Крагујевцу, 10. 03. 2016. године.

Ментор:

Др Вукић Лазић, ред. проф.

РЕЗИМЕ

У оквиру завршног рада је проучен процес ливења, а затим је дат преглед најважнијих ливачких легура и њихова примена. Приказане су и објашњене ливачке особине метала, особине легура за ливење, а поред тога дат је преглед метода ливења, ливачких грешки и смернице за њихово отклањање.

Кључне речи: *ливeње, легуре за ливење, ливачке грешке*

SUMMARY

Within the final paper, the casting process was examined and it was given the review of the most important casting alloys and their use. It was presented and explained casting properties of alloys and in addition, an overview of the casting methods, imperfections that occur in this process and guideline for their removal.

Keywords: casting, casting alloys, casting imperfections

САДРЖАЈ

1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ	1
2. ЛИВАЧКЕ ОСОБИНЕ МЕТАЛА	2
2.1. Топљивост	3
2.2. Течљивост.....	3
2.3. Запреминске промене растопа и одливка при хлађењу	4
2.4. Скупљање у чврстом стању и запреминске промене при фазним трансформацијама	6
2.4.1. Улегнућа услед скупљања (лункери).....	7
2.4.2. Унутрашњи напони у одливцима	8
2.4.3. Унутрашњи структурни напони у одливцима.....	9
2.4.4. Кривљење (савијање) одливака	9
2.4.5. Прслине и пукотине	10
3. МЕТАЛИ И ЛЕГУРЕ ЗА ЛИВЕЊЕ	14
3.1. Ливачке легуре гвожђа.....	15
3.1.1. Сиво ливено гвожђе	16
3.1.2. Темперовано гвожђе	17
3.1.3. Нодуларно гвожђе	18
3.1.4. Компактно гвожђе	18
3.1.5. Бело ливено гвожђе.....	19
3.1.6. Челични лив	19
3.1.6.1. Угљенични челични лив	21
3.1.6.2. Легирани челични лив	22
3.1.6.3. Челични лив за израду алата	23
3.1.6.4. Челични лив отпоран на повишеним температурама.....	23
3.1.6.5. Ватростални челични лив	25
3.2. Метали и легуре са високом температуром топљења.....	25
3.3. Метали и легуре са средњом температуром топљења	27
3.4. Метали и легуре са ниском температуром топљења.....	29
4. ПРЕГЛЕД НАЈВАЖНИЈИХ МЕТОДА ЛИВЕЊА.....	32
4.1. Ливење у пешчаним калупима	32
4.2 Ливење у металним калупима - кокилама.....	34
4.3 Центрифугално ливење	35
4.4 Прецизно ливење	37
4.4.1 Ливење у гипсаним калупима	38
4.4.2 Ливење топљивим (изгубљеним) моделима	38
4.4.3 Ливење под притиском	40
4.4.4 Ливење у шкољкастим калупима.....	41
5. ЛИВАЧКЕ ГРЕШКЕ	43
5.1. Врсте и изглед ливачких грешки	43
5.2. Отклањање ливачких грешки и присуство дозвољених грешака	52
5.2.1. Поправка гитовањем	53
5.2.2. Поправка заваривањем	53
5.2.3. Поправка коничним навојним чеповима	53
5.2.4. Поправка интеграцијом	54
6. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ ЛИВЕЊА	55
7. ЗАКЉУЧАК	58
8. ЛИТЕРАТУРА	59

1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ

Ливење представља поступак обраде метала без скидања струготине док се технологија којом се врши обликовање металних предмета и добијање одливака (ливењем у припремљене калупе уз помоћ модела) назива ливарство.

Велики број метала и њихових легура, односно готово све врсте метала и њихових легура, могу да се обликују ливењем. Ипак, најширу примену имају метали и њихове легуре чије особине и карактеристике одговарају процесу ливења. Најважније особине метала и легура које долазе до изражаја при ливењу јесу степен ливкости и промена запремине при хлађењу. Када се говори о металима и њиховим легурама реч је заправо о ливачким легурама гвожђа (сиво ливено гвожђе, темперовано ливено гвожђе, нодуларно ливено гвожђе, компактно ливено гвожђе, бело ливено гвожђе, челични лив - угљенични, легирани, за израду алата, отпоран на повишеним температурама, ватростални) и металима и легурама са високом, средњом и ниском температуром топљења (легуре титана, гвожђа и никла; легуре бакра; легуре алуминијума, магнезијума, цинка, олова и калаја).

Ливење се обавља уз помоћ различитих поступака ливења и то ливењем у пепчаним калупима, ливењем у шкољкастим калупима, металним калупима, ливењем под притиском, испарљивим (тиољивим) моделом, у гипсаним калупима и центрифугалним ливењем.

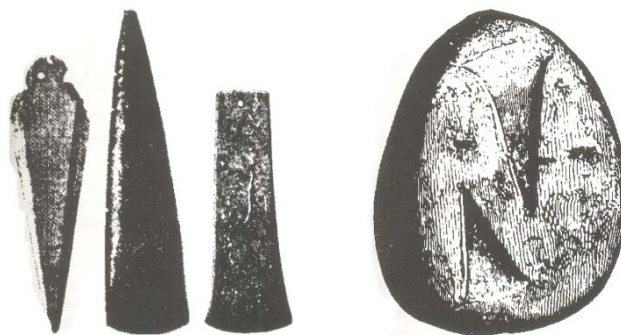
Савремена технологија и модернија опрема за ливење омогућава добијање одливака различитих димензија, тачности и квалитета површине, чиме је потреба за накнадном механичком обрадом сведена на најмању меру. Међутим, ипак се дешава да процес ливења буде праћен одређеним грешкама, које је иначе могуће поделити у неколико класа и то: металне израслине, шупљине, нецеловитост, површинске грешке, непотпун одливак, нетачност мере и геометрије одливка, укључици и неправилна структура. Међутим, постоје грешке које се могу толерисати, као и оне које се могу отклонити и то наношењем двокомпонентних металних китова, тзв. гитовањем, заваривањем, а ту је и поправка коничним навојним чеповима.

2. ЛИВАЧКЕ ОСОБИНЕ МЕТАЛА

Ливарство се може дефинисати као технологија обликовања металних предмета ливењем растопљеног метала у калупе помоћу модела, да би се после хлађења добио одливак [1]. Другим речима, технологија ливења је део машинске технологије која проучава начине секундарне прераде металних полупроизвода односно поступке после примарне прераде изведене у топионицама или железарама.

Ливење је један од најстаријих метода секундарне прераде метала. Да је тако говоре и археолошка истраживања захваљујући којим је откривено да ливени бакарни предмети потичу чак из 4500-те године пре Христа.

На слици 1 је могуће видети открића са неолитских локалитета у Великом Лаолу код Петровца на Млави - реч је о бакарним ножевима, мачевима, секирама и сличним предметима. Као што је приказано, у каменој стени се дубила шупљина која одговара употребном предмету, а после тога се у керамичком лонцу претапао метал и сипао у удубљење камена. После очвршћивања (кристализације) метала, камен бива разбијен, а изливени предмет ослобођен [1].



Слика 1 - Бакарни нож и секире (лево) изливени у шупљини стене (десно)

Ливење, као метод прераде метала у готове производе, односно поступак ливења је од давнина до данас остао исти односно непромењен . И данас се припрема калупна шупљина односно форма, метал се топи у пећи и сипа у ту празнину која је по облику и димензијама верна спољна копија предмета који се израђује. Са овим у вези ваља истаћи да ливачки калуп као целина заправо представља посуду чија унутрашност по облику и димензијама верно одсликава предмет који ће се излити [1].

Ливењем се све врсте метала и њихових легура могу обликовати. Ипак, најширу примену имају метали и њихове легуре чије особине и карактеристике одговарају процесу ливења. Најважнија особина метала и легура које долазе до изражаја при

ливењу су степен ливкости - реч је о скупу термофизичких особина погодних за ливење. Уједно, то је особина која не зависи само од врсте лива, већ и од ливачког калупа.

У ливачке особине лива спадају:

- топлљивост,
- течљивост,
- растворљивост гасова у течном металу,
- сегрегација неких састојака,
- промена запремине при загревању и хлађењу и друге особине које утичу на понашање метала при топљењу, самом наливању и очвршћавању.

2.1. Топљивост

Топљивост је способност металних легура да при загревању мирно пређу из чврстог стања у течност и да при томе образују хомоген растоп. Пожељно је да се промена агрегатног стања одвија без претераног прштања и стварања гасних мехурова уз малу промену почетног хемијског састава и чистоће.

Топљивост се, кад је реч о легурама, најчешће процењује према температури топљења, температурском интервалу очвршћавања легуре и количини топлоте потребне за топљење. Према температури топљења и ливења, разликују се:

- метали и легуре са високом температуром топљења (легура титана, гвожђа и никла),
- метали и легуре са средњом температуром топљења (легура бакра),
- метали и легуре са ниском температуром топљења (легура алуминијума, магнезијума, цинка, олова и калаја).

2.2. Течљивост

Течљивост (φ) растопљених метала и легура дефинише се као реципрочна вредност динамичке вискозности, тј. отпора, односно унутрашњег трења, које се јавља при релативном кретању једног слоја течности у односу на други ($\varphi=1/\eta$).

Из табеле 1 се види динамичка вискозност (η) неких течних метала (калај, алуминијум, сиви лив, цинк, угљенични челик итд.), има на довољно високој температури, релативно ниску вредност; при томе се течљивост растопљених метала може разврстати упоређујући их са вискозитетом воде [1].

Табела 1 – Температура прегревања лива и вискозност неких растопљених метала у H_2O

Материјал	Температура лива, °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

Течљивост метала и легура расте са температуром прегревања лива, тј. загревања легуре осетно изнад ликвидус температуре, а при температури између ликвидуса и солидуса течљивост нагло опада. Ливкост такође утиче на способност лива (растопљеног метала) да попуни најудаљеније делове ливачког калупа. Стандардизована проба ливкости различитих ливачких легура изводи се у спиралном калупу, а мерило ливкости је дужина изливене спирале до тренутка када престане даље течење. Практично се лив слободним падом насипа у чашу спиралног калупа и мери колика је дужина спирале. Течење метала успорава се због унутрашњег трења (вискозност), отпора зидова калупа, као и отпора ваздуха и нарочито пада температуре лива у току ливења [1].

2.3. Запреминске промене растопа и одливка при хлађењу

Промене запремине растопа у калупу у зависности од времена кад те промене настају могу се разложити на: запреминско скупљање при хлађењу течне фазе, промену запремине при очвршћивању (кристализацији), скупљање очврслог одливка при даљем хлађењу до собне температуре, промену запремине при фазним трансформацијама полиморфних метала и легура у чврстом стању (посебно код легура Fe-C).

Скупљање метала при хлађењу у течном стању одређено је физичким законима који дефинишу смањење запремине течности са падом температуре. То скупљање, у опсегу од температуре ливења (T_{liv}) до ликвидус температуре (T_l), дато је изразом:

$$\varepsilon_{vl} = \frac{V_{liv} - V_l}{V_l} = \alpha_{vl} (T_{liv} - T_l),$$

где је:

ε_{vl} - специфично запреминско скупљање течне фазе,

V_{liv} - запремина растопа при температури ливења и

V_l - запремина растопа при ликвидус температури.

У идеалном случају равномерног хлађења, кад се течан метал у свакој тачки одливка хлади истом брзином, настаје униформно скупљање целокупне течне фазе, што се одражава падом нивоа те фазе у калупу. Код већине метала $\varepsilon_{vl} \approx 10^{-4}$ што значи да се запремина растопа при паду температуре за 150°C грубо речено смањује за 1.5%. Од овог правила одступа бакар који се при хлађењу из течног стања шири.

Скупљање растопа при преласку течне у чврсту фазу може да доведе до појаве шупљина у одливку, тзв. лункера. Они настају кад нема довољно резервног лива у хранитељима да се попуни цела калупна шупљина. При формирању кристалних решетки између ликвидуса и солидуса појављују се ваканције (празнине) које у условима брзог хлађења могу остати непопуњене атомима компонената легуре. Оне легуре које при кристализацији излучују нову фазу мале специфичне масе могу се при кристализацији ширити. То тзв. ширење при очвршћивању настаје при кристализацији сивог и нодуларног лива, јер се излучује графит густине $\rho_{gr} = 2.23 \text{ g/cm}^3$ која је неколико пута мања од густине аустенитне металне основе ($\rho_{austenita} = 8.08 \text{ g/cm}^3$). Релативна промена запремине при очвршћивању (кристализацији) легура дата је изразом:

$$\varepsilon_{vk} = \frac{\Delta V}{V},$$

где је:

ΔV - промена запремине легуре при очвршћивању (скупљање-ширење). Са изузетком чистих метала и еутектичких легура, кристализација легура се увек одвија у одређеном температурском интервалу.

2.4. Скупљање у чврстом стању и запреминске промене при фазним трансформацијама

Промена запремине при даљем хлађењу очврслог одливка, последица је његовог хлађења испод солидус температуре; скупљање је сразмерно коефицијенту термичке дилатације и температурској разлици $T_s - T_0$, тј. солидусне и околне температуре.

У том интервалу, код неких метала настају и фазне промене. Релативно запреминско скупљање одливка при хлађењу до собне температуре, (ε_{vs}) дато је изразом:

$$\varepsilon_{vs} = \frac{V_s - V_0}{V_0} = \alpha_{vs} (T_s - T_0) \pm \varepsilon_{vf},$$

где је:

V_s - запремина одливка при солидус температури,

V_0 - запремина одливка при околној (собној) температури,

$T_s - T_0$ - коефицијент запреминског скупљања чврсте фазе

T_s - солидус температура,

T_0 - температура околине,

ε_{vf} - релативна промена запремине при фазним променама (+ скупљање, - ширење).

Промене запремине при фазним трансформацијама настају код легура гвожђа: Fe-C, Fe-Fe₃C. На пример, при промени аустенита запремина расте за 1.24%. Распадом аустенита са 0.77% C настаје перлит, што је праћено повећањем запремине за 0.83%, док се при образовању мартензита из аустенита (при брзини хлађења већој од критичне) запремина повећава за 2.68%.

Скупљање које у чврстом стању доводи до промене димензија одливка, дато је изразом за линеарно скупљање ε_{ls} у температурском интервалу ($T_s - T_0$):

$$\varepsilon_{ls} = \frac{l_s - l_0}{l_0} = \alpha_{ls} (T_s - T_0) \pm \varepsilon_{lf} = \frac{\varepsilon_{vs}}{3},$$

где су:

l_s - димензије одливка при солидус температури,

l_0 - димензије одливка при собној температури,

α_{ls} - коефицијент линеарног скупљања чврсте фазе (средња вредност у температурском опсегу ($T_s - T_0$)),

ε_{lf} - релативна промена димензија при фазним трансформацијама.

Претходни израз важи у пуној мери само за слободно скупљање, тј. уз претпоставку да је контракција слободна ако се не омета ни *механички* (отпором калупа и језгра) нити *термички* (различитим скупљањем појединих делова одливка - неравномерним скупљањем).

При хлађењу одливака у условима неравномерног температурског поља, настаће локалне запреминске промене различите величине, а понекад и знака. Крајња промена облика и димензија одливка и појава грешака настаје због различитих запреминских промена у појединим деловима одливка или пак неравнотежног дејства спољних сила (гравитације, отпора калупа и језгра и тсл.).

Разлика између слободног и неслободног скупљања одливка проузрокује његово деформисање. Оно може бити видљиво (кривљење) или скривено (немогућност да се остваре очекиване димензије одливка). Линеарно скупљање има практичан значај за одређивање неопходних додатка за скупљање при изради модела.

2.4.1. Улегнућа услед скупљања (лункери)

Лункери су шупљине било на спољним површинама или унутар очврслог одливка, а настају због недостатка течног метала да се испуне удаљени делови калупа, јер лив у периферне делове одливка доспева на самом крају процеса ливења. Правилним обликовањем калупа и другим технолошким мерама, могу се удаљени делови који се последњи кристалишу локализовати у близини појила тј. резервоара течног метала.

Коефицијент релативног смањења запремине при скупљању $\check{C}L$, SL и NL је ε_{VK} . Вредност ε_{VK} за челик, мења се у зависности од садржаја угљеника (% C), према изразу:

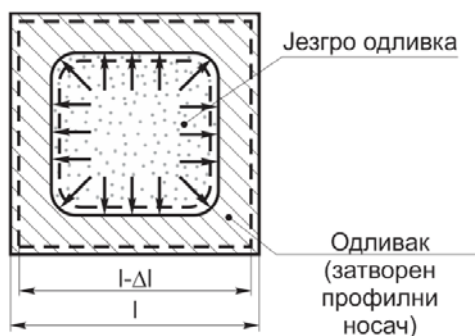
$$\varepsilon_{VK} = 2.0 + 3 \cdot (\% C).$$

При високом садржају угљеника не настаје скупљање већ ширење ливеног гвожђа. Управо за $C = 3.5\%$, код ливеног гвожђа, скупљање и ширење се изједначавају (SL обично садржи: $2.8-3.5\% C$), а NL ($3.0-3.6\% C$), што значи да ће код одливака од нодуларног лива, са максималним садржајем "C", при хлађењу од солидус до собне температуре (од T_S до T_0) настати ширење, а не скупљање.

2.4.2. Унутрашњи напони у одливцима

Унутрашњи напони у одливцима углавном настају због неравномерне промене запремине у појединим деловима одливка услед хлађења различитим брзинама. На појединим местима у одливку унутрашњи напони могу настати и при неслободном скупљању због различитих отпора неких делова калупа или језгра.

Спољашњи напони настају у току хлађења одливка од сила отпора калупа и језгра, које спречавају дилатацију, те одливак остаје притиснут. Ови су напони, по правилу затежући, јер је одливак спречен да се слободно шири, слично притиснутој опрузи која тежи да се растерети. Код одливака, прелазни унутрашњи напони делују само дотле док постоје отпори против слободног ширења (дилатације). На слици 2 приказан је попречни пресек шупљег одливка (кутијаст носач) чије слободно скупљање ка средишту кутије спречава отпор језгра.



Слика 2 - Ометено скупљање одливка

Величина унутрашњих напона се може одредити на основу идеалног скупљања Δl , које би у условима слободне контракције настало при паду температуре за $\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta T$. У области високих температура готово да нема релаксације напона.

Кад при хлађењу одливак доспе од високих у област повишених температура (за челик $T < 650^\circ\text{C}$), почиње да важи Хуков закон па настаје релаксација напона према изразу $\sigma_s = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$, те се део унутрашњих напона поништава еластичним деформацијама.

Унутрашњи напони настају и зато што се поједини делови одливка неравномерно скупљају (за различите величине Δl). Резултанта свих унутрашњих напона у сваком тренутку биће једнака нули ако одливак за све време остаје у равнотежи.

Термички (дилатациони) унутрашњи напони (σ_T) јављају се због различитих брзина хлађења појединих делова одливка. Отуда произлазе разлике у ширењу појединих делова одливка, јер се они не могу скупљати сходно законима физике. Крајњи резултат биће *термички напони притиска* у танким деловима одливка, односно *затезујући напони* у дебелим деловима.

2.4.3. Унутрашњи структурни напони у одливцима

Јављају се при фазним трансформацијама легура Fe-C, јер новонастале структурне компоненте имају различиту специфичну запремину у односу на првобитну и околну.

Кад год се структурне трансформације не одвијају истовремено у свим деловима одливка појавиће се унутрашњи напони. Типичан пример је делимична трансформација аустенита у мартензит у деловима одливка који се хладе брзином већом од критичне - то доводи до локалног повећања специфичне запремине за 2.68%. Пошто се мартензитна трансформација одвија при температури испод 300°C, то значи у еластичној области, резултат ће бити појава унутрашњих напона. Распад аустенита у проеутектоидне фазе (α или Fe_3C) одвија се на вишој температури и уз мањи пораст запремине, па настаје пластично деформисање.

Резултујући ливачки напони (σ) представљају збир *напона скупљања* - σ_s , *термичких* - σ_T и *структурних* - σ_{str} :

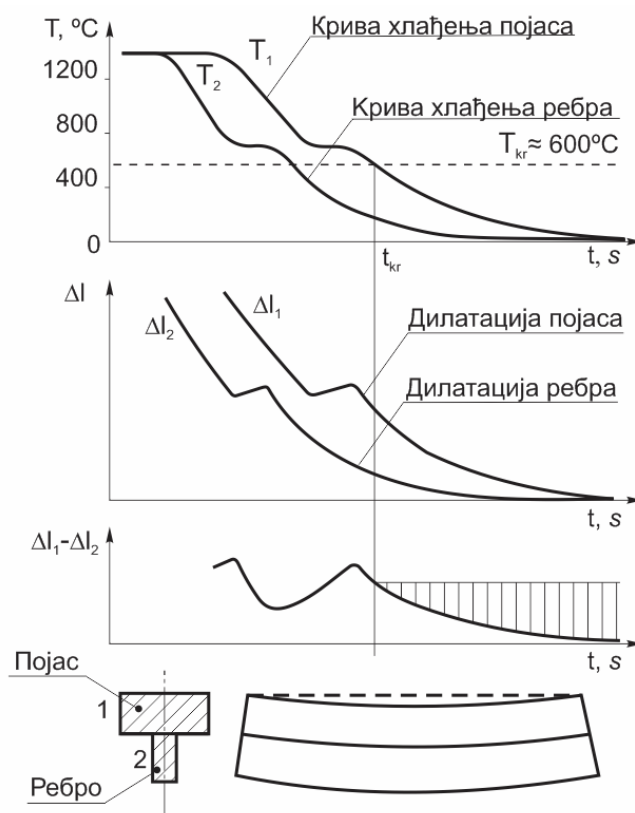
$$\sigma = \sigma_s + \sigma_T + \sigma_{str} .$$

Одређивање укупних унутрашњих напона суперпонирањем горњих компонената напона доста је непоуздано. Из искуства је познато да је код дебелих пресека највећа опасност од прслина док се код танких пресека напони скупљања и термички напони поништавају, па је појава прслина ређа, али су деформације чешће.

2.4.4. Кривљење (савијање) одливака

Ако се унутрашњи напони поклапају са осама симетрије одливка, они се задржавају у одливцима као заостали и никад се не испољавају осим ако дође до њиховог суперпонирања (сабирања) са радним напонима. Кад су заостали напони асиметрични настаће деформисање одливка - *кривљење*. Као пример, узима се одливак у облику Т-профила који има танко ребро (2) и дебео појас (1) (слика 3). На високим

температурама при очвршћивању, почетне разлике у скупљању изравњавају се пластичним деформисањем.



Слика 3 - Појава деформација при скупљању одливка

Видљиве деформације настају од тренутка кад температура целог носача падне испод T_{kr} која одваја пластичне од еластичних деформација. Деформисање почиње у тренутку кад у област еластичних деформација улази дебљи појас, те се његово скупљање убрзава. Разлика попречног скраћивања дебелог појаса и танког ребра $\Delta l_1 - \Delta l_2$ после критичног тренутка, доводи до појаве напона који савијају Т-профил ливеног носача.

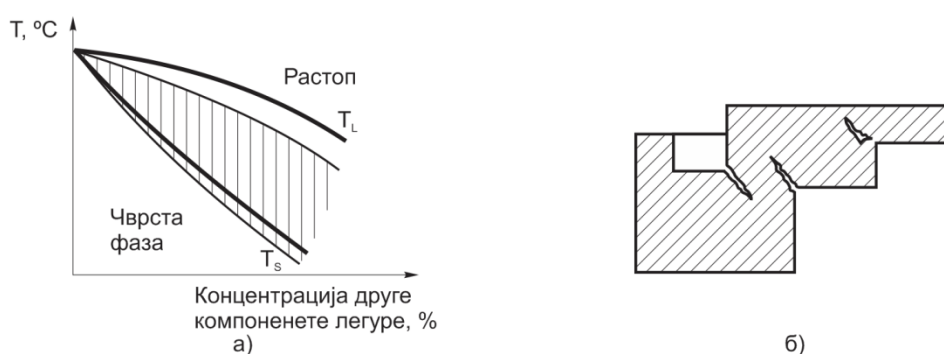
Да би се спречило савијање ливених носача потребно је при континуалном ливењу израђивати симетричне профилне носаче исте дебљине, чиме се постиже равномерно хлађење истом брзином у свим тачкама.

2.4.5. Прслине и пукотине

Грешке целовитости одливка у које спадају прслине и пукотине, појављују се, по правилу, у одређеним температурским интервалима при очвршћивању и даљем хлађењу одливка.

Кристализационе прслине управо настају у температурском интервалу очвршћивања у периоду кад првобитно образовани кристали даље расту на рачун преосталог растопа. Пошто при томе на непотпуно формиране кристалне решетке, делују и затежући напони, долази до декохезије (разарања) тек насталих кристалних решетки, јер се течна фаза не може одупрети дејству затежућих напона (између ликвидус и солидус температуре, легура је у двофазном стању: чврстом и течном). Кад се одливак охлади испод солидус температуре, течна фаза прелази у чврсто стање, те се материјал може одупрети и силама затезања. Зато се при даљем хлађењу не стварају нове прслине, али већ настале се могу даље ширити. Температурски интервал између ликвидуса и солидуса, у коме настају ове тзв. *вруће прслине*, приказан је шрафираном површином на слици 4а.

Друга температурска област у којој могу настати пукотине јесте област нижих температура при којима код већине метала опада пластичност и жилавост. С обзиром на то да ове грешке целовитости настају при температури испод 300°C зову се *хладне прслине (пукотине)*. Оне се неће јавити код материјала добре пластичности, јер унутрашњи напони подлежу релаксацији (поништавају се локалним преласком еластичних деформација у пластичне). Наиме, напони затезања дати су Хуковим законом код материјала високе пластичности, еластичне деформације прелазе у пластичне па настаје релаксација. На том принципу заснива се и жарење за попуштање напона; јер при жарењу такође настаје промена чиме се умањују или елиминишу унутрашњи напони.

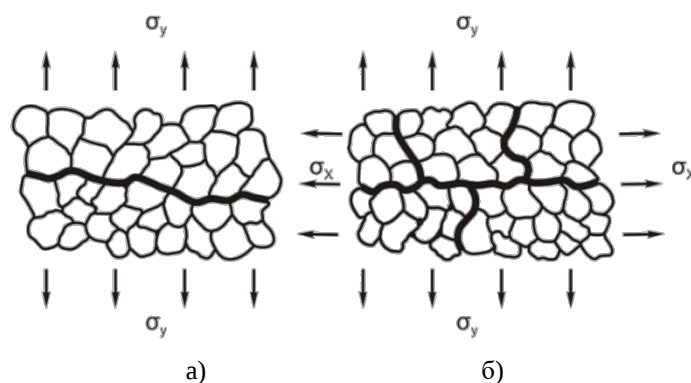


Слика 4 - Ефективни температурски интервал појаве и раста топлих прслина (а) и шематски приказ топлих прслина у одливку (б)

Разлика између врућих и хладних прслина је у следећем: *солидусне (вруће) прслине* се образују на местима најмање чврстине (деформационе способности) тј. на границама металних зрна, наглих промена пресека (слика 4б); њихов ток је

интеркристални (слика 5б), а површине прелома су оксидисане. Хладне прсине су транскристалне, што значи да се простиру како преко металних зрна (као и између њих, слика 5а). Једносмерни затежући напони стварају прсине управне на правац деловања напона (слика 5а).

Кад је у питању дејство напона затезања у два управна правца (σ_x и σ_y), прсине ће опет бити међукристалне али разгранате и криволинијског облика (слика 5б).



Слика 5 - Облик прсина при једноосном и двоосном затезању

Склоност метала и легура ка појави прсина је већа код материјала који имају виши напон течења ($R_{p0.2}$), модул еластичности (E) и коефицијент термичког ширења (α). Прсине се чешће јављају при ливењу у калупима ниског коефицијента акумулације топлоте (b_k). Стога се за главне ливачке метале и легуре, дају њихове термофизичке константе E , α и коефицијент акумулације топлоте (табела 2).

Табела 2 - Неке термофизичке константе ливачких легура

Материјал	Температурски интервал кристализације, °C	Коеф.термичког ширења, m/mK	Коеф. b^k , $m^{-2} C^{1/2} K^{-1}$	Модул еластичности, МПа
Челик	20-100 20-600	11.5-12.5 12.0-14.5	12000-15000	$210 \cdot 10^3$
Сиви лив	20-100 20-600	8.0-9.0 12.0-14.0	13000-15000	$(60-140) \cdot 10^3$
Бакар	20-100	16.6	36000	$\approx 127 \cdot 10^3$
Алуминијум	20-100 20-500	23.7 27.7	23000	$(66-68) \cdot 10^3$
Магнезијум	20-100 20-500	26.1 29.9	18000	$(42-45) \cdot 10^3$

Највећу отпорност на прсине имају челици са садржајем угљеника од 0.17 до 0.20% (легура око перитектичке тачке у дијаграму Fe-Fe₃C), јер имају добра својства

пластичности. Склоност ка врућим прслинама расте код челика са већим садржајем сумпорних, као и силикатних примеса по границама металних зрна, тј. код челика са високим % C, Si и S.

Графитна ливена гвожђа (SL и NL) се при кристализацији шире, па се не може говорити о прслинама при ливењу у сличном опсегу температура као код челика.

Пукотине се могу појавити при хлађењу у еластичној области (испод 650°C код средњеугљеничних челика). Настају ако унутрашњи напони надмаше јачину на кидање (нема резерве пластичности, $R_m - R_{p0.2}$). Код нискоугљеничних челика, појава напона већих од напона течења довешће до трајних деформација без појаве пукотина.

Код готових одливака произведених са заосталим унутрашњим напонима, пукотине могу настати и после хлађења до околне температуре, ако се одливци изложе релативно малим активним силама или ако се поремети равнотежно стање напона. То се може догодити при непажљивом утовару и транспорту одливака или машинској обради радних површина одливака (нпр. блока мотора са унутрашњим сагоревањем).

У овом случају долази до поремећаја успостављеног метастабилног равнотежног стања које се лако нарушава деловањем активних сила или машинском обрадом.

3. МЕТАЛИ И ЛЕГУРЕ ЗА ЛИВЕЊЕ

Метали су хемијски елементи, који се налазе претежно на левој страни Менделјејевог периодног система елемената и преовлађују у тим колонама. Метали се карактеришу својом тачно дефинисаном температуром топљења. Метали су добри проводници топлоте и електричне струје.

Метали спадају у кристална једињења код којих су у чврстом стању атоми распоређани правилно односно према одређеној просторној мрежи или решетки. Решетка је састављена од многобројних основних ћелија, кристалних јединки.

Многи метали имају при различитим температурама и притисцима различите кристалне структуре. Процес очвршћавања односно кристализације састоји се, у основи, из два процеса: настанка зачетака (клица, ембриона, нуклеуса) нове фазе и раста насталих кристала.

Многи метали могу да се растварају један у другом у различитим односима и при томе да граде легуре. Особина легура зависе од њеног састава, од начина њене кристализације, начина термичког третирања и тсл. Данас су у употреби бројне легуре метала и метала и метала и неметала.

У претходном поглављу је истакнуто да готово све врсте метала и њихових легура могу да се добију ливењем. Нарочито добру ливкост имају сиво ливено гвожђе, цинк, калај и олово, као и већина легура обојених метала док се слабије лију челик, алуминијум и бакар.

Табела 3 - Термофизичке константе неких ливачких легура

Материјал	Температурски интервал кристализације, °C	Коефицијент термичког ширења $\alpha \cdot 10^{-6}, K^{-1}$	Коефицијент b_0 $m^{-2}s^{1/2}K^{-1}$	Модул еластичности Е, МПа
Челик	20-100 20-600	11,5-12,5 12,0-14,5	120000-15000	$210 \cdot 10^3$
Сиви лив	20-100 20-600	8,0-9,0 12,0-14,0	13000-15000	$(60-140) \cdot 10^3$
Бакар	20-100 20-1060	16,6 20,3	36000	$\approx 127 \cdot 10^3$
Алуминијум	20-100 20-500	23,7 27,7	23000	$(66-68) \cdot 10^3$
Магнезијум	20-100 20-500	26,1 29,9	18000	$(42-45) \cdot 10^3$

Најважније легуре за ливење се деле на:

- ливачке легуре гвожђа: ливено гвожђе и челични лив и,
- ливачке легуре нежелезних метала: лаки метали и легуре (густина мања од 4.5 kg/dm^3) и тешки метали и легуре (густина већа од 4.5 kg/dm^3) [2].

3.1. Ливачке легуре гвожђа

Легура гвожђа подразумева групу легура са масеним уделом угљеника изнад 2%. Као пратећи легирајући елементи најчешће се употребљавају силицијум, манган, хром и никл. Ако се угљеник у микроструктури охлађеног гвожђа налази у облику графита онда говоримо о легури под именом сиво ливено гвожђе. Ако се пак угљеник у микроструктури охлађеног гвожђа налази у облику цементита (Fe_3C) онда се легура назива бело ливено гвожђе.

Легура гвожђа се као материјал умногоме разликује од челика. Специфична тежина гвожђа се налази између 7.100 и 7.250 kg/m^3 и нижа је од специфичне тежине челика односно специфичне тежине чистог гвожђа, која је у принципу иста и износи око 7.850 kg/m^3 . Због високог садржаја угљеника ливено гвожђе се не може ковати.

Подеутектичка гвожђа имају еквивалент угљеника до 4,3%, еутектичка око 4,3%, а надеутектичка више од 4,3%. Подеутектичке и надеутектичке врсте ливеног гвожђа имају нешто вишу температуру топљења од еутектичких.

Уколико је у питању сиво ливено гвожђе онда имамо материјал који услед исталоженог ламеларног графита поседује лошије механичке особине од челика, поготово када је реч о пластичности. С друге стране, гвожђе поседује бољу топлотну проводност, одличну ливкост и бољу издржљивост када је у питању задржавање оригиналног облика (због ниске пластичности), као и повишену отпорност на корозију у односу на челик. Ако уз то додамо изузетну способност амортизације осцилација, јасно је зашто су постоља (фундаменти) већине гломазних машина израђена управо од гвожђа. Механичке карактеристике, као и корозивна постојаност могу се додатно побољшати додатком легирајућих елемената као што су: силицијум, манган, хром и никл.

Боље механичке особине се постижу модификацијом ламеларно исталоженог графита у облику нодула (сферни облик) у нодуларном ливу или у облику вермикула (лат. *vermiculus* - црв) у вермикуларном ливу, у процесу одстрањивања раствореног кисеоника и сумпора (рафинације) уз помоћ магнезијума.

Ливена гвожђа представљају групу легура (тројне легуре: Fe-C-Si) које при преласку из течног у чврсто стање пролазе кроз еутектичку трансформацију те тако стварају графитну еутектику која се састоји из чврстог раствора C у γ -Fe и графита. Ливена гвожђа садрже 2-4% C, 0.50-3% Si, Mn, P и S, остало Fe.

Говорећи даље о ливеном гвожђу, ваља поновити да постоји неколико најважнијих врста и то:

- сиво ливено гвожђе,
- темперовано ливено гвожђе,
- нодуларно ливено гвожђе,
- компактно ливено гвожђе,
- бело ливено гвожђе.

3.1.1. Сиво ливено гвожђе

Ова врста гвожђа очвршћава по стабилном дијаграму стања Fe-C у коме се део угљеника јавља у облику графитних ламела, које су међусобно повезане и називају се еутектичке ћелије односно графитне ламеле.



Слика 6 - Микроструктура сивог лива (тамне пруге су ламеле графита)

Графитне ламеле образују вишак угљеника који се није растворио у аустениту. Преостали угљеник у ливеном гвожђу образује металну матрицу која може бити: феритна, феритно-перлитна и перлитна. Иначе, графитне ламеле не преносе затежуће напоне, а пресецају металну основу тј. матрицу ливеног гвожђа што се одражава на малу јачину на кидање као и на ниску вредност својстава пластичности и жилавости, али не и на притисну јачину, јер и графит преноси силу притиска.

Према јачини на кидање могуће је разликовати трговачки (SL000) и машински лив (дели се на класе SL100, SL150, SL200, SL250, SL300, SL350, SL400) [5].

Табела 4 - Класификација сивог лива са ламеларним графитом

Ознака врсте		Пречник епрувете, mm		Затезна чврстоћа, МПа		Савијање	
Нова	Стара	Од одливеног узорка	Епрувете за испитивање затезањем	На стандардној епрувети	На посебној епрувети	Распон симетрије ослоња у mm	Савојна чврстоћа, МПа
SL 100	SL 120	30 30	20 20	100 120			
SL 150	SL 140	30 13	20 8	140	230	260	340
		20	12.5		180	400	320
	SL 150	30 45	20 32	150	110	600 900	300 270
SL 200	SL 180	30 13	20 8	180		260	340
		20	12.5		280	400	390
		30	20	200	160	600	360
	SL 220	45 30	32 20	220	160	900 900	330 330
SL 250		13	8		330		
		20	12.5		280		
		30	20	250		400	460
	SL 260	45 30	32 20	260	210	600 900	420 390
	SL 300	20 30 45	12.5 20 32	300	330 260	600 900	480 450
SL 350		20	12.5		380		
		30	20	350		600	540
		45	32		310	900	510
SL 400		30	20	400		600	690
		45	32		360	900	570

3.1.2. Темперовано гвожђе

Ова врста лива се добија од већ израђених и очврсlih одливака у кокилама, чија је структура бело ливено гвожђе (угљеник је везан у облику цементита Fe_3C). Одливци белог ливеног гвожђа су крти и непримењиви те се зато излажу додатној термичкој обради под називом темперовање, који се може извести у неутралној атмосфери азота када се добија црни лив или у оксидишућој средини када се добија бели темпер лив [3].

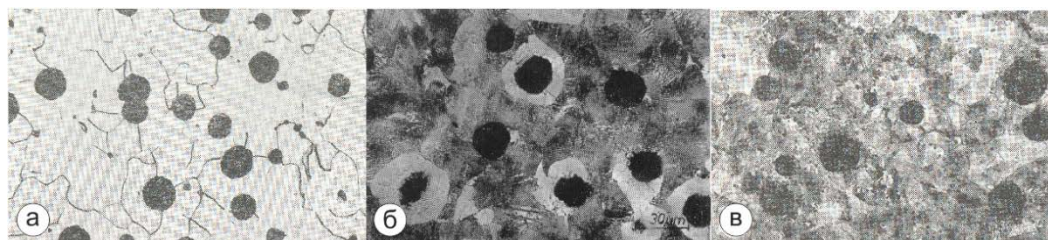
Табела 5 - Оријентациони хемијски састав темперованог лива

Врста лива	Хемијски састав у %				
	C	Si	Mn	P	S
Бели темперовани лив	2,8-3,2	0,8-0,4	0,2-0,5	0,10	0,10-0,025
Црни темперовани лив	2.2-2.8	1.4-0.8	0,2-0,5	0,15	0,15

3.1.3. Нодуларно гвожђе

Нодуларно ливено гвожђе се одликује тиме што је угљеник у металној маси распоређен у облику графитних лоптица (сфера) тзв. нодула (отуда и назив нодуларно ливено гвожђе). Добија се након што се сивом ливеном гвожђу додаје магнезијум што доводи до заокругљивања графита при кристализацији легура Fe-C.

Метална матрица нодуларног лива може бити: феритна, феритно-перлитна и перлитна.



Слика 7 - Структуре нодуларног лива: феритног (а), феритно-перлитног (б), перлитног (в)

За добијање ове врсте лива може се употребити куполна, као и индукциона пећ која је иначе и погоднија, јер даје лив који је мање склон ка појави унутрашњих лункера у одливку.

3.1.4. Компактно гвожђе

Компактно гвожђе представља релативно нову врсту ливеног гвожђа. У прво време се овај материјал сматрао неуспешним нодуларним ливом. Графит формиран код вермикуларног лива је по облику негде у средини између ламела и нодула; има бројне ролнице графита које потичу од кристализационих центара у којима је почело

формирање графитне еутектичке кристалне решетке. Вермикуларни лив се добија слично као и нодуларни - довољно је само увести 0.015% магнезијума уз мали додатак титана који доприноси повезивању графита. Вермикуларни лив може бити: феритни и перлитни.

3.1.5. Бело ливено гвожђе

Као што је напоменуто раније у раду, бело ливено гвожђе настаје услед везивања угљеника са гвожђем у облику цементита [13]. Одливци белог ливеног гвожђа су крти и неприменљиви те служе за добијање претходно поменуте врсте ливеног гвожђа - темперованог гвожђа.

3.1.6. Челични лив

Познато је да се легура гвожђе-угљеник, где је садржај угљеника до 2,14 %, назива челик. Челик иначе може да садржи и одређене случајне примесе које не треба да пређу количину предвиђену одговарајућим стандардима.

Челични лив треба да има добру ливкост, мали интервал очвршћавања, мање запреминско и линеарно скупљање, добре пластичне особине на високим температурама, минимално апсорбовање гасова и минималну сегрегацију.

У поређењу са ливеним гвожђем, челични лив има веће ливачко скупљање и вишу температуру ливења. Са овим у вези треба истаћи и да особине челичног лива зависе и од врсте пећи у којој се растоп припрема, јер то утиче на садржај нечистоћа у одливку. Управо зато се уз ознаку додаје и начин топљења који може бити из електричне пећи (Сименс Мартенове пећи базичне облоге и Сименс Мартенове пећи киселе облоге) и из конвертора.

У вези са челичним ливом ваља истаћи да је отпоран на корозију, а као главни елемент који чини челик отпорним на корозију је хром. Челици са 13-18% Cr имају мартензитну структуру, са 25-30% феритну, а са више од (18%) и преко 1% C ледебуритну, док са 18-25% Cr и 7-10% Ni имају аустенитну структуру [3].

Говорећи даље о челичном ливу, неопходно је посветити више пажње механичким својствима, те ће у табели која следи више речи о томе.

Табела 6 - Механичка својства челичног лива

Врста челичног лива	Ознака (JUS)	Механичка својства							Намена
		Стање	Затезна чврстоћа, МПа	Граница течења, Мпа	Издужење, %	Контракција, %	Жилавост, Ј	Тврдоћа, НВ	
Угљенични челични лив	ČL 0345	N	380	180	25	25	50	110	У нормализованом стању за средње и високо оптерећене машинске делове
	ČL 0346	N	380	180	25	25		110	
	ČL 0445	N	450	220	22	20	40	130	
	ČL 0446	N	450	220	22	17		130	
	ČL 0545	N	520	250	18	17	30	155	
	ČL 0546	N	520	250	18	-		155	
	ČL 0645	N	600	360	15	-	20	175	
Побољшан челични лив	ČL 0646	N	600	360	15	-		175	У побољшаном стању за средње и високо оптерећене машинске делове
	ČL 4730	P	600-750	400	16	-	60	160-220	
	ČL 4731	P	700-900	500	12	-	40	205-265	
Отпоран на вишу температуру	ČL 4732	P	900-1050	700	8	-	20	250-375	За делове оптерећене тем. до 500 степени
	ČL 1330	N	450-600	250	22	-	50	135-190	
	ČL 7130	N	450-600	250	22	-	50	135-190	
Отпоран на хабање	ČL 7431	N	500-650	300	20	-	50	145-205	За делове оптерећене тем. до 500 степени
	ČL 3460	K	600	300	25	-	-	170-240	
	ČL 3134	N или P	800	400	7	-	-	170-230	
Отпоран на темп. од 1100 до 1200°C	ČL 4271	N	-	-	-	-	-	220-300	За делове индуст. пећи
	ČL 4576	P	450	-	4	-	-	220-300	
	ČL 4577	P	650	-	10	-	-	150-220	
	ČL 4578	N	450	-	8	-	-	150-220	
	ČL 4578	P	650	-	8	-	-	150-220	
Нерђајући и хемијски отпоран	ČL 4171	N	650	450	12	-	-	170-240	За делове и индуст. целулозе
	ČL 4571	P	800	20	-	-	-	-	
	ČL 4573	N	450	210	20	-	-	-	

Стање: N - нормализовано, P - побољшано, K – каљено.

Према хемијском саставу се разликују угљенични конструкциони челични ливови и легирани челични ливови. У табели 7 је могуће видети детаљнију поделу - врсте челичног лива [5].

Табела 7 - Хемијски састав челичног лива

Врсте челичног лива	Ознака	Хемијски састав у %								
	(JUS)	(DIN)	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Ni	Mo
Угљенични челични лив	ČL 0345	GS- 38	0,11	0,30	0,50	0,035	0,035			
	ČL 0346	GS- 38,3	0,18	0,50	0,80	0,035	0,035			
	ČL 0445	GS-45	0,17	0,30	0,5'	0,035	0,035			
	ČL 0446	GS-45,3	0,24	0,50	0,80	0,035	0,035	-	-	-
	ČL 0545	GS- 52	0,26	0,30	0,50	0,035	0,035			
	ČL 0546	GS- 52,3	0,33	0,50	0,80	0,035	0,035			
	ČL 0645	GS-60	0,37	0,80	0,50	0,035	0,035			
	ČL 0646	GS- 60,3	0,45	0,50	0,80	0,035	0,035			
Челични лив за побољшање	ČL 4730	GS- 25 CrMo4	0.22-0.28	0.30-0.50	0.50-0.80	0.035	0.025	0.8-1.2		0.2-0.3
	ČL 4731	GS- CrMo4	0.30-0.37	0.30-0.50	0.50-0.80	0.035	0.025	0.8-1.2		0.2-0.3
	ČL 4732	GS- 42CrMo4	0.38-0.45	0.30-0.50	0.50-0.80	0.035	0.025	0.8-1.2		0.2-0.3
Челични лив отпоран на повишеним температурама	ČL 1330	GS-C25	0.18-0.25	0.30-0.50	0.50-0.80	0.035	0.025	-	-	0.3
	ČL 7130	GS-22Mo4	0.18-0.25	0.30-0.50	0.50-0.80	0.035	0.025	-	-	0.35-0.4
	ČL 7431	GS-17CrMo55	0.15-0.20	0.30-0.50	0.50-0.80	0.035	0.025	-	-	0.45-0.55
Челични лив отпоран на хабање	ČL 3460	12MnCrL	1.10-1.13	0.40-0.60	12.0-14.0	0.10	0.05			
	ČL 3134	2MnL	0.40-0.45	0.25-0.50	1.5-2.0	0.035	0.025			
Челични лив отпоран на температури од 1100 до 1200°C	ČL 4271	G-X45CrSi29	0.30-0.60	1.0-2.5	< 1.0	0.045	0.030	27-30		
	ČL 4576	G-X40CrNiSi27-4	0.20-0.50	1.0-2.5	< 1.5	0.045	0.030	26-28	3.5-5.0	
	ČL 4577	G-X35CrNiSi	0.20-0.50	1.0-2.5	< 1.5	0.045	0.030	24-26	11-14	-
	ČL 4578	G-X40CrNiSi24-20	0.20-0.50	1.0-2.5	< 1.5	0.045	0.030	24-26	19-21	
Нерђајући и хемијски отпоран челични лив	ČL 4171	G-X20Cr14	0.15-0.25	< 1.0	< 1.0	0.045	0.030	12.5-14	5	1.0
	ČL 4571	G-X10CrNi18-8	< 0.12	< 2.0	< 2.0	0.045	0.030	17.5-19.5	8-10	
	ČL 4573	G-X10CrNiMo18-8	< 0.12	< 1.0	< 2.0	0.045	0.030	17-19.5	11	2-2.5

3.1.6.1. Угљенични челични лив

Легуре гвожђа са угљеником намењене за ливење називају се челични ливови. Према хемијском саставу се разликују угљенични конструкциони челични ливови и легирани челични ливови. У поређењу са ливеним гвожђем, челични лив има веће ливачко скупљање и вишу температуру ливења. Са овим у вези треба истаћи и да особине челичног лива зависе и од врсте пећи у којој се растоп припрема, јер то утиче на садржај нечистоћа у одливку. Управо зато се уз ознаку додаје и начин топљења који може бити из електричне пећи (Сименс-Мартенове пећи базичне облоге и Сименс-Мартенове пећи киселе облоге) и из конвертора [5].

Од угљеничних челика се израђује око 2/3 челичних одливака. То су одливци сложене конструкције, различите масе и дебљине зидова, а раде се за потребе разних области машинске технике.

Основни елемент који одређује механичка својства угљеничних челика је угљеник. Повећањем садржаја угљеника, повећава се тврдоћа и чврстоћа, а смањује пластичност.

Утицај угљеника на механичка својства челичног лива је различит код нискоугљеничних, средњоугљеничних и високоугљеничних челика. Највећи утицај има у прве две групе, док је код треће групе знатно слабији.

Табела 8 - Механичка својства угљеничног челичног лива

Врста челичног лива	Затезна чврстоћа, МПа	Напон течења, МПа	Издужење, %	Контракција, %	Жилавост, Ј	Савијање, -
ČL300	380	190	25	35	-	-
ČL 301						D=2a
ČL 400	250	230	22	30	-	-
ČL 401					40	D=2a
ČL 500	520	260	18	25	-	-
ČL 501					30	D=2a
ČL 600	600	300	15	-	-	-
ČL 601					20	-
ČL 602	620	350	15	-	-	-
ČL 603					20	-
ČL 700	700	420	12	-	-	-

D - пречник трна, а - дебљина епрувете.

3.1.6.2. Легирани челични лив

Легирани челични лив има посебна физичка и хемијска својства. Избор легирајућих елемената је условљен углавном наменом одливка и њиховим конструкционим и технолошким својствима.

При легирању челика једним елементом најчешће се користи: силицијум, никл, хром, манган, бакар, ванадијум, док се при сложенем легирању користе комбинације више елемената: хром-молбиден, манган-молбиден, хром-молбиден-ванадијум, силицијум-титан, хром-манган-силицијум, никл-манган, никл-молбиден итд. [3].

Легирани челични лив према садржају легирајућих елемената може бити:

- нисколегирани,
- средњелегирани и
- високолегирани.

3.1.6.3. Челични лив за израду алата

Челици за израду алата имају постојану (стабилну) чврстоћу и на повишеним температурама, на којима се прерађује материјал у топлом стању. Легирани су: хромом, молбиденом, никлом, вандијумом. Хемијски састав у процентима и механичке особине ових челичних ливова су дате у табели која следи.

Табела 9 - Хемијски састав и механичка својства челичног лива за алате

Хемијски састав у %				Затезна чврстоћа, МПа	Напон текућа, МПа	Издужење, %	Жилавост,
С	Mn	Si	Mo				
0,15-0,25	0,40-0,60	0,80-1,50	0,30-1,3 0,2 V	585-1079	>373	8-22	30-200
0,15-0,25	0,40-0,60	0,80-1,50	0,2 V	588-1079	>373	8-22	30-200
0,25-0,35	0,50-0,80	1,00-1,50	0,2-0,3	785-1079	-	-	-
0,35-0,50	0,60-1,00	0,70-1,20	0,2-0,5	735-1079	451-686	8-18	40-90
0,35-0,50	0,60-1,00	0,70-1,20	2,0 Ni 0,2 V	735-1079	441-686	8-18	40-90
0,40-0,50	0,80-1,20	2,00-3,00	0,4-0,5 0,2 V	883	686	> 1	40
0,70-1,50	0,30-0,40	1,00-4,00	0,30; 1,5 V	785-117	-	-	-

3.1.6.4. Челични лив отпоран на повишеним температурама

Када је реч о овим челицима/челичним ливовима, треба истаћи да су они отпорни на разарање и пластичну деформацију до температура од 550°C. Користе се за израду делова који су на повишеним температурама изложени знатним механичким оптерећењима. Најчешће се ова врста челичног лива легира хромом, молбиденом и вандијумом. Користе се за израду арматуре за прегрејану пару, делова турбина итд.

Даље се у раду наводе табеле 10 и 11, које илуструју хемијски састав и механичка својства ове врсте челичног лива.

Табела 10 - Хемијски састав челичног лива отпорног на повишеним температурама

Ознака (DIN)	Хемијски састав у %						
	C	Mn	Si	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo
GSC25	0.20-0.28	0.50-0.80	0.30-0.50	0.050	0.050	-	-
GS22M04	0.18-0.20	0.50-0.80	0.30-0.50	0.040	0.040	До 0,30	0,35-0,45
GS22CrMo5	0.18-0.25	0.50-0.80	0.30-0.500	0.040	0.040	0,80-1,10	0,20-0,30
GS22CrMo54	0.19-0.25	0.50-0.80	0.30-0.50	0.040	0.040	0,80-1,10	0,40-0,50
GS22Mp V22	0.18-0.25	0.50-0.80	0.30-0.50	0.050	0.050	0,30	0,20-0,25
GS22Cr MoV32	0.19-0.25	0.50-0.80	0.30-0.50	0.050	0.050	0,60-0,90	0,20-0,30

Табела 11 - Механичка својства челичног лива отпорног на повишеним температурама

Ознака (DIN)	Затезна чврстоћа, МПа		Напон течења, МПа		Граница пузања, МПа					Издужење, %	Жиљавост, J
	20°C	200°C	200°C	300°C	400°C	400°C	450°C	500°C	525°C		
GSc25	441	242	235	167	127	118	78	39	39	22	50
GS22Mo4	441	265	235	206	167	147	118	88	22	50	50
GS22CrMo5	490	294	274	245	206	196	147	98	59	20	40
GS22CrMo54	520	294	274	235	225	196	147	98	20	40	40
GS22MoV22	441	265	235	206	167	167	147	118	88	22	50
GS22CrMoV32	520	294	284	274	235	225	196	147	98	29	40

3.1.6.5. Ватростални челични лив

Ова врста челичног лива је легирана са Cr и Si, а додаје се и Ni (у циљу побољшања механичких својстава). Отпорност ових челика на дејство растопљеног метала је различита. Они немају задовољавајућу отпорност на дејство растопљеног алуминијума, његових легура и цинка. У табели 12 је детаљније представљен хемијски састав, као и механичка својства ватросталног челичног лива.

Табела 12 - Хемијски састав и механичка својства ватросталног лива

Хемијски састав у %				Механичка својства			Отпорност на температуре
C	Si	Cr	Ni	Затезна чврстоћа, МПа	Напон течења, МПа	Издужење, %	
0,20-0,30	3,0-3,5	3.5	-	490-588	294	>10	850
0,25-0,35	2,3-2,8	12.3-13.5	-	588-735	520	>8	950
0,50-0,70	2,0-2,5	19.0-21.0	-	735-833	392	>7	1050
0,50-0,70	1,8-2,3	28.0-30.0	-	490	-	-	1150
1,2-1,4	1,8-2,3	28.0-30.0	-	490	-	-	1100
0,30-0,50	1,0-1,5	26.0-28.0	3.5-4.5	588-735	343	>20	1150
0,30-0,50	1,8-2,3	21,0-23,0	9,0-10,0	588-735	343	>35	1000

3.2. Метали и легуре са високом температуром топљења (легура титана и никла)

Титан и његове легуре - титан има својство полиморфије јер се из течног стања (на 1665°C) кристалише у просторно центрирану кубну решетку (β), а даљим хлађењем на 882°C прелази у хексагоналну густо паковану решетку (α). Титан је метал релативно мале густине ($4,5 \text{ g/cm}^3$), што у комбинацији са добрим механичким својствима (велика

чврстоћа и тврдоћа) даје велику специфичну јачину. Осим тога, титан је изузетно отпоран на корозију и има добру ватроотпорност. Слично Ni, примена титана и његових легура је ограничена због високе цене, и своди се на конструкционе делове гасних мотора и турбина, транспортну технику, као и опрему у прехранбеној, хемијској и петрохемијској индустрији.

Мехничка својства (у жареном стању) су:

- модул еластичности $E = 126 \text{ GPa}$,
- затезна чврстоћа $R_m \sim 330 \text{ MPa}$,
- напон течења $R_{p0.2} \sim 240 \text{ MPa}$,
- процентуално издужење $A \sim 30\%$.

Легуре титана се деле према структури на α , β и $\alpha+\beta$ титан, од којих се ове последње групе највише користе. Типични пример је легура Ti са 6% Al и 4% V, затезне чврстоће преко 1000 MPa, која се користи за делове млазних и ракетних мотора.

Никл и његове легуре - Никл кристалише по површински центрираној кубној решетци, изузетно је отпоран на корозију, има добру ватроотпорност и магнетичан је до 360°C. Ова два својства су основни разлози примене Ni и његових легура у машинству, а основна препрека за ширу примену јесте висока цена.

Физичко-мехничка својства никла су: густина $\rho = 8,89 \text{ g/cm}^3$, температура топљења $T_t = 1453^\circ\text{C}$, коефицијент линеарног ширења $\alpha = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$, топлотна проводљивост $\lambda = 92 \text{ W/mK}$, модул еластичности $E = 205000 \text{ MPa}$, затезна чврстоћа $R_m \sim 500 \text{ MPa}$ (у жареном стању), напон течења $R_{p0.2} \sim 150 \text{ MPa}$ (у жареном стању), процентуално издужење $A \sim 50\%$ (у жареном стању).

Никл се користи као легирајући елемент у нерђајућим челицима и као основни елемент у ватроотпорним легурама. Најчешће коришћене легуре никла су монел, инконел и хастелој. Монел је легура никла са Cu ($\sim 30\%$), уз додатак Fe у неким варијантама (монел 400), Al и Ti (монел K500) или Si (монел 411). Монели се користе као антикорозивне легуре у прехранбеној и хемијској индустрији. Инконел је легура Ni са Fe и Cr ($\sim 15\% \text{ Cr}$, $\sim 10\% \text{ Fe}$), уз додатак Nb (инконел 610) или Si (инконел 705). Инконели се користе као ватроотпорне легуре за делове гасних мотора и турбина, опрему у прехранбеној, хемијској и петрохемијској индустрији. Хастелој је легура Ni са Mo и Cr која се такође одликује високом отпорношћу на корозију и ватроотпорношћу, па се користи за делове млазних мотора [13].

3.3. Метали и легуре са средњом температуром топљења (легура бакра)

Бакар као чист метал, има широку примену у електротехници за израду проводника због изванредних физичких својстава, електричне и топлотне проводљивости.

Бакар се одликује:

- великом пластичношћу и способношћу образовања великог броја техничких легура са добрим механичким и технолошким својствима,
- кристалише по површински центрираној кубној решетки,
- после злата и сребра има највећу електричну проводљивост ($\rho = 58 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$) у односу на остале метале,
- топлотна проводљивост бакра је шест пута већа у односу на гвожђе, односно, два пута већа од топлотне проводљивости алуминијума,
- поседује високу отпорност на корозију (посебно електрохемијску),
- температура топљења чистог бакра је 1083°C .

Табела 13 - Механичка својства бакра у зависности од стања прераде

Особине	Стање прераде		
	Ливено	Жарено	Хладно деформисано
Затезна чврстоћа, МПа	150-200	210-240	300-440
Напон течења, МПа	-	40-80	200-390
Издужење, %	25-15	50-35	25-2
Тврдоћа, HBS	50	40-50	75-90

Бакар се углавном добија из сулфидних руда ($\sim 80\%$ светске производње), пре свега халкопирита CuFeS_2 , затим бакар-моносулфида CuS , борнита 5CuS_2 , Fe_2S_3 и пирита FeS_2 . Други, по значају, извор за добијање бакра су оксидне руде бакра: куприт, азурит и малахит. Садржај бакра у рудама није висок, често око 1–2%, па је и поступак прераде и добијања бакра веома сложен. Упрошћена схема добијања бакра из сулфидних руда се састоји из следећих главних операција:

- обогаћивања руде бакра флотацијом у циљу добијања концентрата који садржи 20–25% бакра,
- делимичног пржења и топљења у пламеним пећима при чему се добија бакренац са око 30-40% бакра,
- продувавања бакренца у конвертору у циљу добијања бакра чистоће 9-98,5% низом хемијских реакција,
- рафинације у пламеним пећима (рафинисани бакар) оксидационим поступком (топионички бакар) или електролизом (електролитички бакар).

Када је реч о легурама бакра, треба поћи од тога да као конструкциони материјал чист бакар нема задовољавајуће особине и ширу примену (табела 13), за разлику од његових легура. Најважнији легирајући елементи у легурама бакра су Zn, Sn, Al, Be, Ni, Mn, Si, Ag и Au.

Према бившем југословенском стандарду (JUS), легуре бакра се означавају словним и бројчаним симболима. Прва словна ознака припада хемијском симболу бакра, као основном металу, после које се у низу наводе хемијски симболи легирајућих елемената по утицајности и бројчане ознаке које показују њихов процентуални садржај. Легуре бакра се деле на: легуре Cu за гњечење и легуре Cu за ливење. Приказ најзначајнијих легура бакра дат је у табели 14.

Табела 14- Најзначаније легуре бакра

Легуре	Назив	Ознака
Cu-Zn	Месинг	Cu-Zn37 Cu-Zn38Pb Cu-Zn36Pb1
	Специјални месинг	Cu-Zn20Al Cu-Zn28Sn Cu-Zn40Al1
Cu-Sn	Калајна бронза	CuSn6 CuSn6Zn
Cu-Ni-Zn	Алпак	CuNi10Zn45Pb CuNi25Zn15
Cu-Ni	-	CuNi5 CuNi30Fe
Cu-Al	Алуминијумска бронза	CuAl8 CuAl8Fe

Легуре бакра са цинком код којих је садржај бакра већи од 50% (остатак је Zn) су познате под именом *месинзи*.

Легуре Cu са Sn су калајне *бронзе*. Ове легуре налазе примену у машиноградњи због изузетне отпорности према корозији, високе тврдоће и чврстоће, као и велике

отпорности према хабању (завртњеви, зупчаници, фина сита, пропелери). Као и код месинга, особине калајних бронзи зависе од њихове структуре, односно садржаја Sn.

Бакар са калајем образује дијаграм стања легура са делимичном растворљивошћу у чврстом стању. Према дијаграму стања постоји читав низ једнофазних и двофазних области, али су од интереса само легуре са највише до 22% Sn.

3.4. Метали и легуре са ниском температуром топљења (легура алуминијума, магнезијума, цинка, олова и калаја)

Алуминијум и његове легуре - После легура на бази Fe-C, алуминијум је други по реду метал који се користи у савременој машинској техници. Употребљава се као чист метал у електротехници, металопредавачкој, прехранбеној и хемијској индустрији, али му је много значајнија примена у виду различитих вишекомпонентних легура које се широко употребљавају у машинској и аутомобилској индустрији [9].

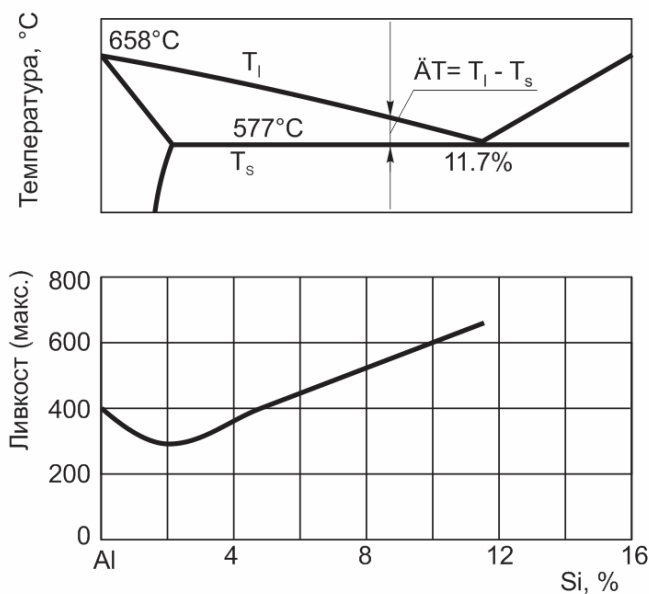
Алуминијум је елемент који припада трећој групи Менделеејевог периодног система. Кристалише се по површински центрираној кубној решетки. Алуминијум се одликује и великом електричном проводљивошћу, која је 57% електричне проводљивости Cu који се у техници користи као еталон. Температура топљења чистог алуминијума је 660°C. Механичка својства алуминијума су релативно ниска. Има добру отпорност према корозији, и у атмосферским условима током времена образује се на површини заштитна превлака оксида алумијума Al_2O_3 .

Алумијум се у природи не среће у самосталном облику, већ у облику различитих минерала којих има веома много. Иако их према литературним подацима има око 250, не користе се сви као руде за добијање алуминијума. Основна руда из које се сложеним процесом прераде добија алуминијум је боксит у коме је алуминијум везан у облику хидроксида, мада се користе и друге руде као што су апатит, алунит и др.

Најважнији легирајући елементи који значајно побољшавају особине чистог алуминијума су Cu, Mg, Mn, Si, Zn и Li. Легуре алуминијума се деле на легуре за гњечење (деформабилне) и легуре за ливење.

Легуре алуминијума се означавају словним и бројчаним симболима у основној ознаци и бројчаним симболима који следе основну ознаку и од ње су одвојени тачком (JUS). Прва словна ознака у основној ознаци припада хемијском симболу Al, као

основном металу, после које се у низу наводе хемијски симболи легирајућих елемената по утицајности, и бројчане ознаке које показују њихов процентуални садржај. Бројчани симболи који се налазе иза основне ознаке су двоцифрени и означавају стање легура алуминијума.



T_l , T_s – ликвидус и солидус температуре

Слика 8- Ливкост легура Al-Si у зависности од интервала $\Delta T = T_l - T_s$, односно % Si у силумину

Магнезијум и његове легуре - Магнезијум се кристалише по хексагоналној густо пакованој решетки, има веома малу густину ($1,74 \text{ g/cm}^3$) и релативно ниску температуру топљења (650°C).

Цинк се кристалише по хексагоналној густо пакованој решетки, има густину $7,13 \text{ g/cm}^3$ и температуру топљења 420°C , и релативно лоша механичка својства (мала чврстоћа и тврдоћа). Стога се његова примена у машинству своди на галванске превлаке које се наносе на челичне лимове у циљу што боље заштите од корозије. Легуре цинка се користе као нискотопљиве легуре за лемове. Легуре цинка за ливење се користе за одливке сложеног облика, који нису оптерећени, јер имају велику течљивост и лако попуњавају калупе сложеног облика.

Олово припада групи обојених метала, лако се обрађује, лако се раствара у киселинама, а одликује га и јако добра пластичност, као и отпорност на корозију и мала маса (тежина) [12]. Највише олова се троши за производњу оловних акумулатора, израду оловних цеви и лима, некад за канализацијске инсталације у домаћинству. Врло добро зауставља јонизујућа зрачења (рендгенске и γ -зраке), па се од олова израђују заштитне радиолошке облоге, блокови, цигле, прегаче, рукавице и тсл. Велике

количине олова се троше за израду муниције. Тврдо олово је легура са 1-12% антимона (Sb). Ове легуре имају добра механичка својства и отпорне су на корозију. Употребљавају се за израду оклопа енергетских каблова, оловних цеви и акумулаторских плоча (легиран са 1-5% Sb), за заштиту од радиоактивног зрачења (2-9% Sb), за штампарске легуре (16-25% Sb) и др. Легуре олова са садржајем 40-60% калаја (еутектичка смеша садржи 61,9% Sn) користе се као материјали за меко лемљење, те за пресвлачење гвоздених површина оловом за заштиту од корозије. Тернарна еутектика, који садржи 84% Pb, 12% Sb и 4% Sn, употребљава се као материјал за лемљење. Легуре олова с додатком 0,3-0,5% арсена користе се за израду меке сачме, а са додатком 2% арсена за тврду сачму [5].

Калај је метал мале тврдоће који има дијамантску кубну кристалну структуру. Постоји калај познат под називом бели калај који је растегљив и веома кован као и сиви калај који је крт. Калај индустријског квалитета са 99,8% калаја не подлеже трансформацији због инхибиционог ефекта малих количина бизмута, антимона, олова и сребра присутних као нечистоће. Легирајући елементи као што су бакар, антимон, бизмут, кадмијум и сребро повећавају његову тврдоћу. Калај је склон лакој формирању тврде, крте интерметалне фазе, што је обично непожељно. Он генерално не формира широк опсег чврстих раствора у другим металима, и постоји мали број елемената који имају знатну чврсту растворљивост у калају. Једноставни еутектички системи, међутим, се јављају са бизмутом, галијумом, оловом, талијумом и цинком.

4. ПРЕГЛЕД НАЈВАЖНИЈИХ МЕТОДА ЛИВЕЊА

Када је реч о најважнијим методама ливења, могуће је извршити поделу на: ливење у пешчаним калупима, ливење у металним калупима – кокилама, центрифугално ливење и прецизно ливење односно ливење: ливење у гипсаним калупима, ливење топљивим (изгубљеним) моделима, ливење под притиском, ливење у шкољкастим калупима и др.

4.1. Ливење у пешчаним калупима

Ливење у пешчаним калупима (ливeње у песку) је један од највише коришћених поступака за добијање одливака. Велики проценат свих одливака који се користе у машинској индустрији су добијени овим начином ливења.

Процеси код којих се растопљени метал улива у шупљину калупа, у њему очвршћава и добија облик готовог предмета-одливка. Примењује се за ливење: кућишта, блокова мотора, постоља машина, цевовода, главе цилиндара и тсл.

Предмети добијени ливењем представљају полупроизвод који се накнадно обрађује машинском обрадом да би се добио завршни облик и димензије.

Полазни материјал за ливење у калупима у песку је растопљени метал: сиви лив (SL), челик, лаки и обојени метали.

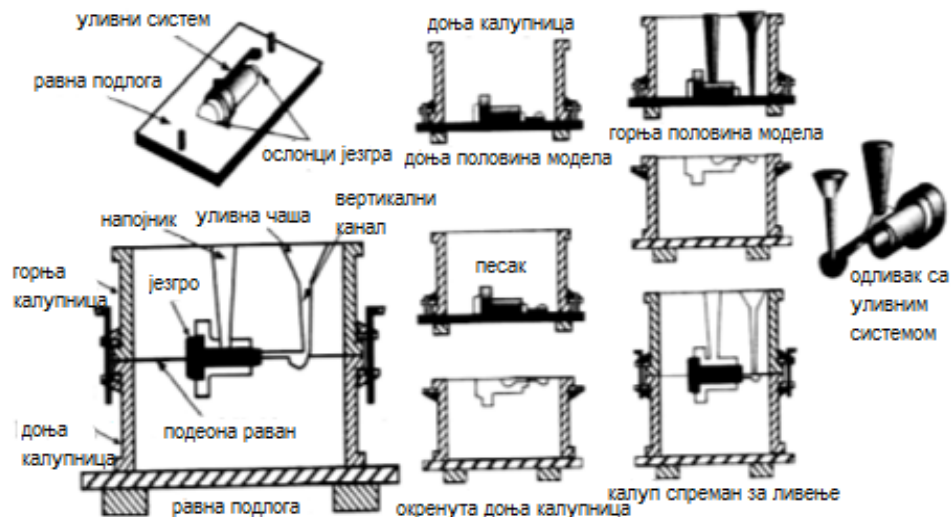
Основне карактеристике процеса ливења су:

- продуктивност (од 1-60 ком/х, зависно од величине одливка);
- припрема процеса: неколико дана до неколико недеља;
- велики је губитак материјала (20-50%), али се отпадак може искористити;
- користи се и за појединачну и малосеријску (дрвени модели), средњесеријску и великосеријску производњу (метални модели);
- трошкови алата: ниски;
- цена опреме: ниска;
- трошкови радне снаге: умерени до високи, рад је напоран;
- накнадна обрада: по правилу иде чишћење одливка и машинска обрада.

Конструкционе карактеристике добијеног предмета:

- веома сложени предмети, важно је правилно обликовање уливног система и постављање подеоне равни;

- додаци за машинску обраду: 1,5-6 mm;
- тежина одливака: од 20 g до 400 t;
- квалитет површине: по правилу лош;
- средња површинска храпавост: 3,2-50 μm ;
- остварене толеранције мера: од $\pm 0,5$ mm до неколико mm, зависно од димензија одливка и врсте материјала [13].



Слика 9 - Ливење у пешчаним калупима

Поступак ливењам у пешчаним калупима обухвата следеће операције:

- топљење метала у ливничким пећима,
- припремање калупне мешавине за израду калупа и језгара,
- израда калупа и језгара,
- уливање растопљеног метала у калуп,
- очвршћавање метала у калупу,
- разарање калупа и вађење одливка,
- контрола, чишћење и обрада одливка.

Калупи се праве од калупне мешавине коју чине: ливачки песак (преостала мешавина од претходног ливења и свежи кварцни песак), везиво, угљени прах и вода. Особине калупне мешавине су пластичност, ватросталност, чврстоћа калупа, гасна пропустљивост, лако истресање одливка [10].

4.2 Ливење у металним калупима - кокилама

Ливење у металним калупима - кокилама је врста ливења где је дебљина зидова одливака од 3-100 mm. Може се излити велики број одливака у истом калупу. Радни век им је ограничен. Предности у односу на ливење у пешчаним калупима: повећана геометријска тачност одливка, значајно смањена храпавост површина (повећан квалитет површина), мањи додаци за накнадну обраду резањем, побољшање механичких и експлоатационих својстава, повећање продуктивности и др. Очвршћавањем метала у металним калупима добијају се одливци ситнозрне структуре који имају боља механичка својства у односу на одливке добијене у пешчаним калупима. Недостаци овог поступка ливења су: израда металних калупа је скупа и захтева знатно дуже време, кокиле имају велику топлотну проводљивост и то отежава (онемогућава) ливење сложених танкозидних одливака великих габарита, ограничено ливење одливака на бази легура гвожђа и угљеника. Овим се поступком највише лију одливци од легура лаких и обојених метала.

Поступак ливења се састоји од:

- контроле кокиле,
- чишћења калупне шупљине,
- загревање и премазивање кокиле специјалним премазима за уливни систем и шупљину калупа,
- постављање језгара (металних или пешчаних),
- затварање калупа,
- ливење (да би се продужио радни век кокила, користе се обложене кокиле са кошуљицом од кварцног песка).

Дакле, кокила је метални калуп у који се улива растопљен метал под дејством гравитационе силе где одливак очвршћава. Кокила се тада отвара/раздваја и одливак се избацује.

Полазни материјали за ливење у кокилама су растопљени метали: легуре бакра, алуминијума и магнезијума.

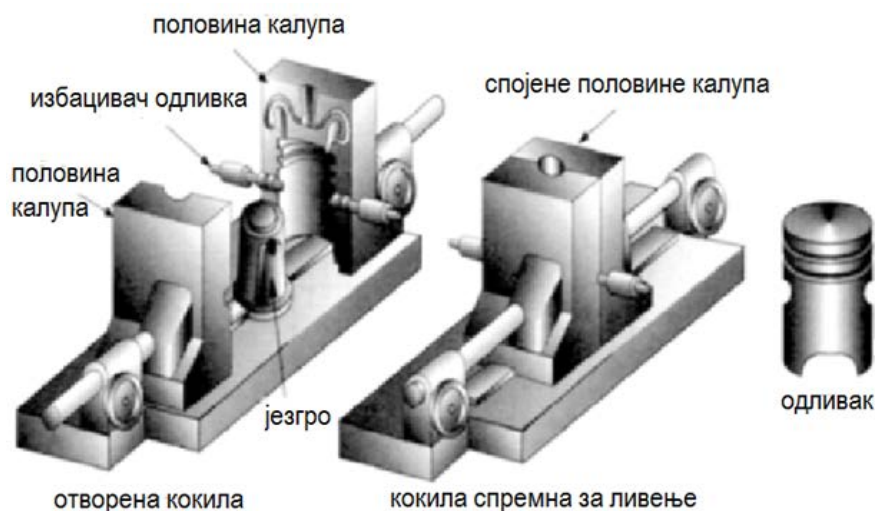
Основне карактеристике процеса ливења у кокилама су:

- висока продуктивност: од 5-100 ком/h;
- дуга припрема процеса: неколико недеља;
- искоришћеност материјала висока (мало је отпадног материјала);

- користи се за великосеријску производњу (најмање количине су 500-1000 одливака);
- трошкови алата: средњи;
- цена опреме: средња;
- трошкови радне снаге: ниски до средњи;
- накнадна обрада: мала до средња.

Конструкционе карактеристике добијеног предмета (одливка) су:

- сложеност облика, ограничена могућношћу лаког вађења из кокиле;
- додаци за машинску обраду: 0,8-1,5 mm;
- тежина одливака од 100 g до 300 kg, најповољнији су мали одливци до 5 kg;
- квалитет површине добар;
- средња површинска храпавост: 0,8-6,3 μm ;
- остварене толеранције мера: од $\pm 0,25$ mm до неколико mm, зависно од димензија одливка и врсте материјала.



Слика 10 - Ливење у металним калупима

4.3 Центрифугално ливење

Центрифугално ливење је метод ливења којим се лију ротациони (ваљкасти, цилиндрични) делови на принципу знатно веће центрифугалне силе од силе земљине теже. Процес се састоји из уливања претходно растопљеног метала/лива у метални калуп који се обрће око хоризонталне или вертикалне осе. Под дејством центрифугалне силе лив се разлива по унутрашњој површини калупа и касније очвршћава.

Овде до изражаја долазе кокиле за центрифугално ливење: кокиле које се обрћу око вертикалне осе (за одливке мале дужине) и кокиле које се обрћу око хоризонталне осе (за дуже одливке). Предности овог поступка је што нема потребе за језгрима, смањен је трошак материјала јер нема уливног система, добра је структура одливка, додаци за механичку обраду су мали. Ово је најекономичнији поступак за добијање чаура, цеви и делова сличног облика [13].

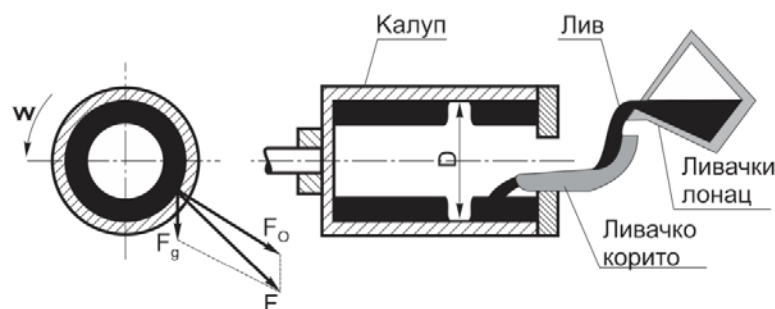
Полазни материјал за центрифугално ливење је растопљени метал: SL, челик, лаки и обојени метали, стакло, пластика и керамика.

Карактеристике овог процеса ливења су:

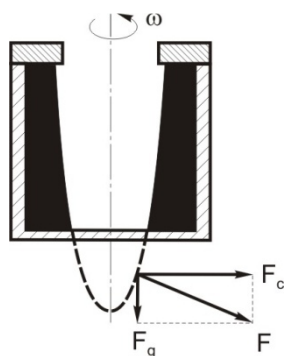
- продуктивност: и до 50 ком/h;
- дуга припрема процеса: неколико недеља;
- искоришћеност материјала је висока, јер нема уливног система и хранитеља;
- користи се за великосеријску производњу, али може и за мање серије;
- трошкови алата: средњи;
- цена опреме: средња до велика;
- трошкови радне снаге: ниски до средњи;
- накнадна обрада незнатна, али обавезна обрада унутрашњих површина.

Конструкционе карактеристике добијеног предмета:

- сложеност облика ограничена;
- додаци за обраду: 1,5-6 mm;
- добре механичке особине;
- величина одливка: од $\varphi=0,25$ m до $\varphi=1,8$ m;
- квалитет површине добар;
- средња површинска храпавост: 1,6-12,5 μm ;
- остварене толеранције мера: од $\pm 0,1$ mm до ± 1 mm, зависно од димензија одливка.



Слика 11 - Центрифугално ливење (хоризонтални положај)



Слика 12 - Центрифугално ливење (вертикални положај)

$$k = \frac{F_c}{F_g} = \frac{m \frac{v^2}{R}}{mg} = \frac{\frac{R^2 \omega^2}{R}}{g} = \frac{R \omega^2}{g} = \frac{R \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2}{g} = \frac{R \cdot n^2 \cdot \pi^2}{900 \cdot g} \approx \frac{R \cdot n^2}{900}$$

јер је: $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$, где је: n- број обртаја у минути

Кад се узме R у cm и $g = 9.81 \text{ cm/s}^2$ добија се израз за минимални број обртаја калупа:

$$n = 30 \sqrt{\frac{k}{R}}, \text{ где је:}$$

R- унутрашњи полупречник калупа у cm и

k- коефицијент гравитације који се усваја према врсти калупа:

k=	75- за калуп са пешчаном облогом
	80- за метални калуп
	100- за ливове са уским температурским интервалом очвршћавања ¹

4.4 Прецизно ливење

Овај назив упућује на то да се овом методом могу постићи облик и тражене димензије одливака уз минималну машинску обраду одливка или чак и без те обраде. У ове методе договорно се сврставају технологије којима се производе одливци од разних ливачких легура, са површинским квалитетом $R_a \leq 10 - 20 \mu\text{m}$ и димензијским одступањима реда величине десетих делова милиметра. У прецизно ливење спадају:

- Ливење у гипсаним калупима (± 0.13 до $\pm 0.25 \text{ mm}$),

¹ Интервал очвршћивања (кристализације) легура представља разлику ликвидус (T_l) и солидус температуре (T_s) ($\Delta T = T_l - T_s$).

- Ливење топљивим (изгубљеним) моделима (± 0.03 до ± 0.1 mm),
- Ливење под притиском (± 0.05 до ± 0.2 mm),
- Ливење у шкољкастим калупима (± 0.25 до ± 0.38 mm)

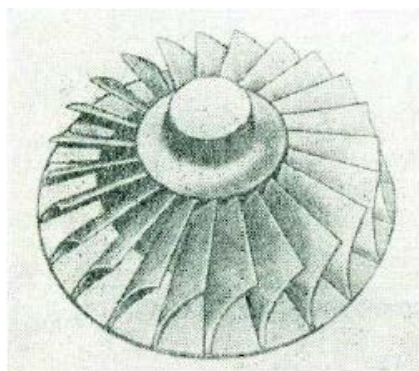
4.4.1 Ливење у гипсаним калупима

Гипс замешан са водом може се употребљавати као маса за калуповање, али искључиво за ливење одливака од алуминијума.

Негативна особина ове калупне смеше је веома мала пропустљивост зидова калупа. Пропустљивост калупа и језгра може се повећати на три начина:

- Додавањем гипсаној маси материја које својим физичким деловањем повећава порозност калупа;
- Применом додатка за пењење, који стварају пенасти гипс знатно веће пропустљивости;
- Посебним физичко-хемијским третманом гипсаних калупа и језгра којим се добија макроструктура довољне пропустљивости.

Могуће је добити одливке сложеног облика, доброг квалитета површина као и уских толеранција димензија [5].



Слика 13 - Вентилатор са еластичним лопатицама од легура алуминијума, изливен у пенастом гипсаном калупу

4.4.2 Ливење топљивим (изгубљеним) моделима

Ливење са топљивим моделима омогућава добијање сложених одливака уз знатно смањење трошкова производње у односу на до сада примењене технологије ливења [7].

Полазни материјал за ливење топљивим моделима је растопљени метал и то сви метали, укључујући и легуре племенитих метала.

Начин реализације: калуп се користи да обликује модел од воска у захтевани облик. Воштани модел се облаже керамичком масом. При ливењу восак се топи, а ливени метал попуњава шупљину керамичког калупа. Да би се извадио одливак, калуп се мора разбити.

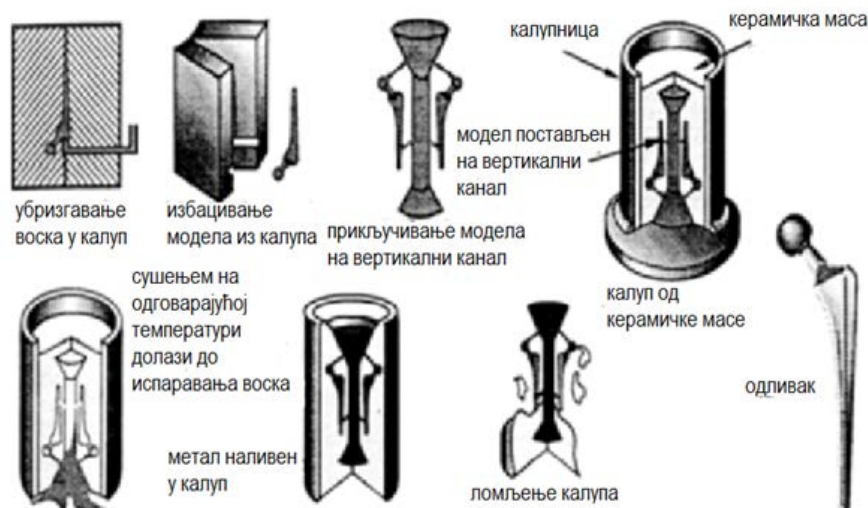
Примена при изливању: лопатица турбина, делови машина алатки, делови аутомобилских и авионских мотора, кућишта пумпи, фигурице, накит; погодно је тамо где је тешка и скупа машинска обрада.

Основне карактеристике процеса ливења топљивим моделима моделом су:

- продуктивност: преко 1000 ком/х;
- припрема процеса: неколико недеља;
- искоришћеност материјала висока, обично се користе моделни склопови („гроздови“) за много малих одливака;
- користи се и за малосеријску и за великосеријску производњу;
- трошкови алата: средњи, зависе од сложености алата;
- цена опреме: ниска до средња;
- трошкови радне снаге: високи;
- накнадна обрада: мала.

Конструкционе карактеристике добијеног предмета:

- веома сложени облици, могу се одлити и навој и сложене унутрашње површине;
- додаци за обраду: 0,3-2 mm;
- велика чврстоћа одливка;
- тежина одливака: од 0,5 g до 100 kg, најповољније до 5 kg;
- квалитет површине: добар до одличан;
- средња површинска храпавост: 0,4-6,3 μm ;
- остварене толеранције мера: од $\pm 0,1$ mm до $\pm 0,5$ mm, зависно од димензија одливка [13].



Слика 14 - Ливење топљивим моделима

4.4.3 Ливење под притиском

Полазни материјал за ливење под притиском је растопљени метал/лив, најчешће од лаких и обојених метала: легуре цинка, алуминијума, магнезијума, олова, калаја и бакра.

Растопљени метал се под притиском доводи у метални алат (калуп) за ливење, где очвршћава. После очвршћавања метала, алат се отвара и одливак се избацује.

Примена: ливење електро-делова (разводне кутије, утичнице), делова за играчке, делова за намештај, кућишта мењача, делова мотора, делова пумпи и тсл.

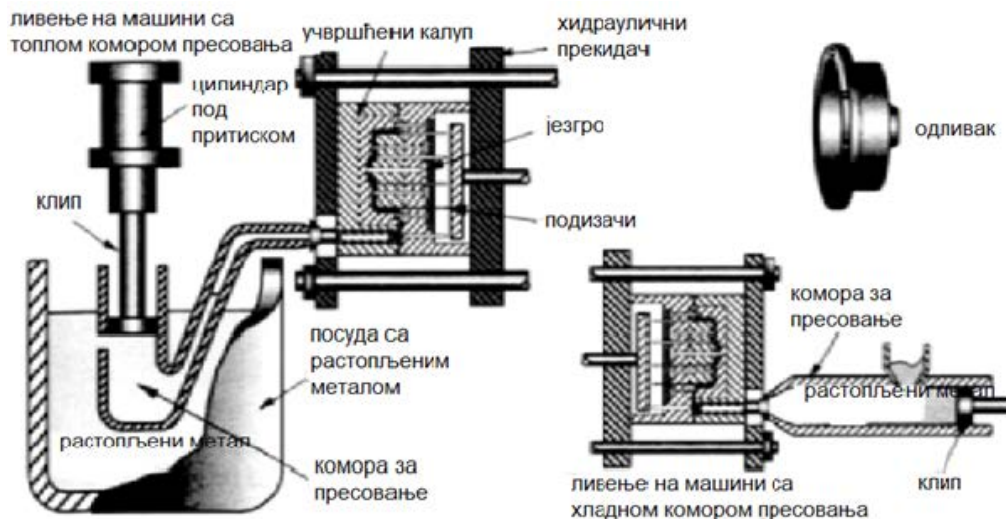
Карактеристике ливења под притиском су:

- продуктивност: до 200 ком/х;
- припрема процеса: неколико месеци;
- искоришћеност материјала висока;
- користи се за великосеријску производњу, најмање количине су 10.000 комада;
- процес је сложен;
- трошкови алата: високи;
- цена опреме: висока;
- трошкови радне снаге: ниски до средњи;
- накнадна обрада: мала.

Конструкционе карактеристике добијеног предмета:

- сложеност облика: велика, важно је правилно поставити подеону раван;
- механичке особине: добре;
- тежина одливака: од 10 g до 50 kg, обично до 5 kg;
- квалитет површина одличан;

- средња површинска храпавост: 0,4-3,2 μm ;
- остварене толеранције мера: од $\pm 0,05$ до 1 mm, зависно од димензија одливка и врсте материјала.



Слика 15 - Ливење под притиском

4.4.4 Ливење у шкољкастим калупима

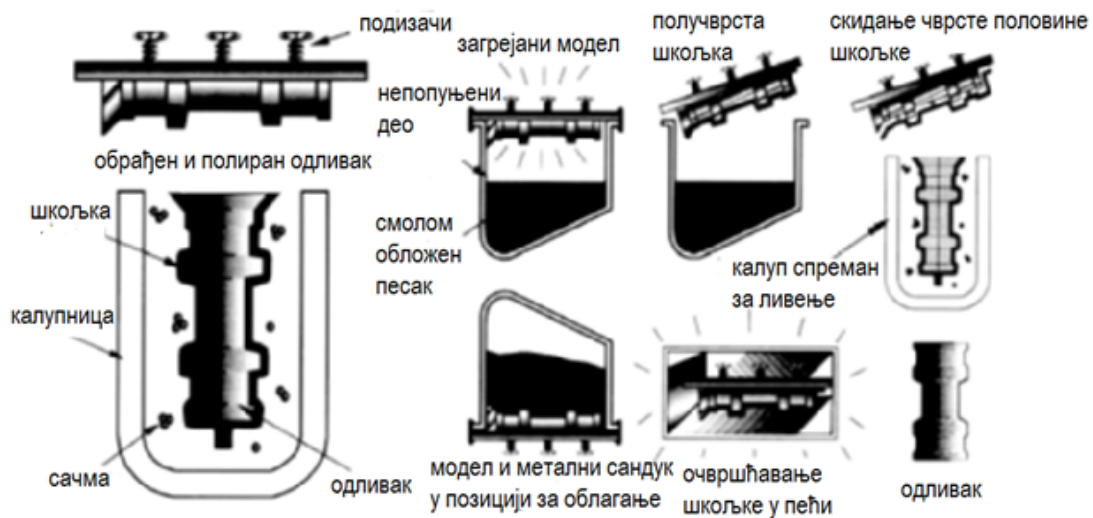
Ливење у шкољкастим калупима је поступак ливења у дводелним пешчаним калупима који се израђују око модела од термоактивних смола. Те смоле се приликом израде калупа топе и облажу зрнцаа песка, стварајући на тај начин чврсту кору-шкољку. Зидови калупа имају дебљину 5-15 mm, а две половине калупа спајају се лепљењем-добиајају се одливци од челика, гвожђа и обојених метала који су веома квалитетни.

Основне карактеристике процеса ливења у шкољкастим калупима су:

- продуктивност: од 1-60 ком/h, зависно од величине одливка;
- припрема процеса: неколико дана до неколико недеља;
- велики је губитак материјала (20-50%), али се отпадак може искористити;
- користи се и за појединачну и малосеријску (дрвени модели), средњесеријску и великосеријску производњу (метални модели);
- трошкови алата: ниски;
- цена опреме: ниска;
- трошкови радне снаге: умерени до високи, рад је напоран и отежан;
- накнадна обрада, по правилу иде чишћење одливка и машинска обрада.

Конструкционе карактеристике добијеног предмета:

- веома сложени предмети;
- важно је правилно обликовање уливног система и постављање подеоне равни;
- додаци за машинску обраду: 1,5-6 mm;
- тежина одливака: од 20 g до 400 t;
- квалитет површине: лош до средњи - површинска храпавост: 3,2-50 μm ;
- остварене толеранције мера: од $\pm 0,5$ mm до неколико mm, зависно од димензија одливка и врсте материјала.



Слика 16 - Ливење у калупима од шкољки

5. ЛИВАЧКЕ ГРЕШКЕ

При ливењу се често дешава да настану грешке које је могуће разврстати према спољашњем изгледу на следеће класе:

- металне израслине,
- шупљине,
- нецеловитост,
- површинске грешке,
- непотпун одливак,
- нетачност мере и геометрије одливка,
- укључци и неправилна структура и др.

За поједине класе одливака, технолошки услови дефинишу захтеве које морају да испуне да би били прихватљиви - допуштена одступања када је реч о димензијама, као и неотклоњиве грешке које одливке сврставају у повратни метални уложак за поновно претапање [5].

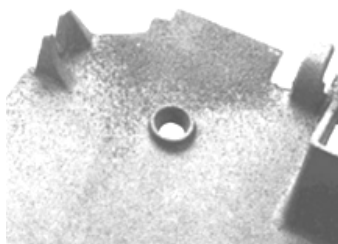
5.1. Врсте и изглед ливачких грешки

Даље у раду ће бити представљене само неке од карактеристичних грешака које је могуће уочити по завршетку ливења на одливцима односно опис и мере за њихово спречавање.

- **Нагорели песак**

Опис грешке: Танка кора песка која чврсто належе на одливак. Грешка се јавља нарочито код одливака дебелих зидова и при високим температурама одливака.

Спречавање грешке: Повећати садржај угљеника и кокса у песку за калуповање. На нижој тачки синтеровања песка и високом степену загревања повећати додатак новог песка.

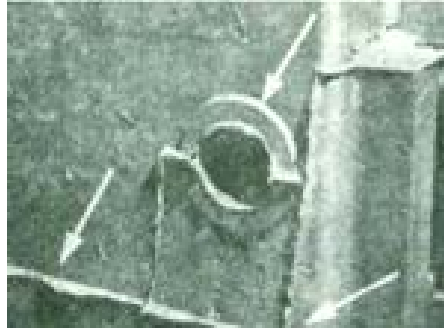


Слика 17 - Нагорели песак на површини одливка

- **Прелив**

Опис грешке: Танка метална израслина у подеоној равни калупа или на језгреним маркама.

Спречавање грешке: Израда модела тачних мера као и ослонаца језгра, правилна обрада подеоних површина и моделних плоча.



Слика 18 – Прелив

- **Грешка "зарези"**

Опис грешке: Уске пукотине настале вертикално у односу на површину. Стварање дендрита у простору пукотине.

Спречавање грешке: Грешка је условљена металуршки због високог садржаја азота у гвожђу. На њу се може донекле утицати помоћу калупарског песка. Треба смањити садржај азота у калупарском песку. Смањити учешће угљеника у калупарском песку [4].



Слика 19 - Грешка „зарези“

- **Микро лункери**

Опис грешке: Ова грешка се манифестује у виду сунђерасте структуре са порама на оним деловима одливка који очвршћавају на крају.

Спречавање грешке: Грешка настаје код легура са широким интервалом очвршћивања. Мали утицај песка за калуповање. Смањити учешће органских материјала у песку за калуповање да би се повећала топлотна проводљивост. Радити са повећаним садржајем воде у песку за калуповање.

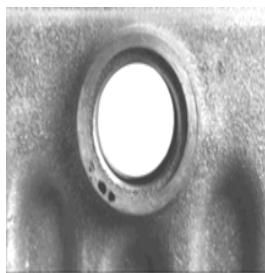


Слика 20 - Микро лункери у одливку

- **Гасни мехурови на површини**

Опис грешке: Удубљења појединачне или у групама углавном велике површина са глатким зидовима.

Спречавање грешке: Разлози леже често у ниским температурама ливења. Утицати путем повећања пропустљивости гаса у песку. Смањење учешћа финих честица или додавање новог песка веће гранулације. Мање учешће органских материја у песку.



Слика 21 - Гасни мехурови на површини одливка

- **Храпавост на горњој површини одливка**

Опис грешке: Храпавост на горњој површини одливка на врелим местима или недовољно сабијеној калупној мешавини.

Спречавање грешке: Користити финији песок, боље сабијати калупе, смањити особину сабијања песка за калуповање, повећати садржај угљеника.

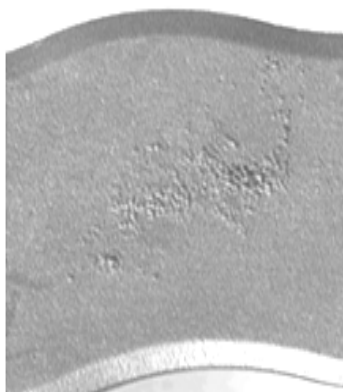


Слика 22 - Храпавост на горњој површини одливка

- **Поре**

Опис грешке: Скупљање малих пора у повезаним зонама. Поре су често у облику капљица или штапића. Грешка је често видљива тек при обради односно жарењу.

Спречавање грешке: Грешка је углавном условљена из металуршких разлога, али може настати и због утицаја материјала за калуповање. Код ове грешке потребно је смањити влажност, учешће органских материја и садржај азота.



Слика 23 – Поре у одливку

- **Храпавост на површини целог одливка**

Опис грешке: Стварање храпавости на површини одливка због распореда величина зрна песка.

Спречавање грешке: Применити финији песак, повећати учешће финих материјала у песку (кокс).



Слика 24 - Храпавост на површини целог одливка

- **Црне пеге**

Опис грешке: Услед високог садржаја металних оксида и сулфида у растопу долази до издвајања сулфида Mg, Mn као и елемената S и Al те остају у одливку за време очвршћавања.

Спречавање грешке: Побољшавање рафинације односно смањење садржаја $S < 0.01\%$ пре убацивања Mg, ограничавање садржаја алуминијума.



Слика 25 - Отисци песка у одливку

- **Одбељивање**

Опис грешке: Настаје при уобичајеним начинима ливења и то у танким зидовима одливка и на ивицама. Одбељивање доводи до отврдњавања једног дела одливка.

Спречавање грешке: Металуршки подесити одговарајући састав лива.

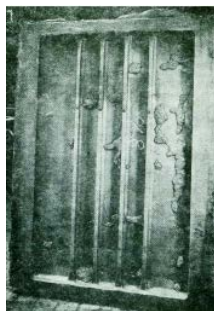


Слика 26 – Одбељивање

- **Крастаста површина**

Опис грешке: Неправилна метална израслина са оштрим ивицама, везана са одливком и паралелна са површином одливка.

Спречавање грешке: Користити висококвалитетну калупну мешавину уз повећан садржај везива и предузети мере за смањивање напона при ширењу и скупљању граничних површина.

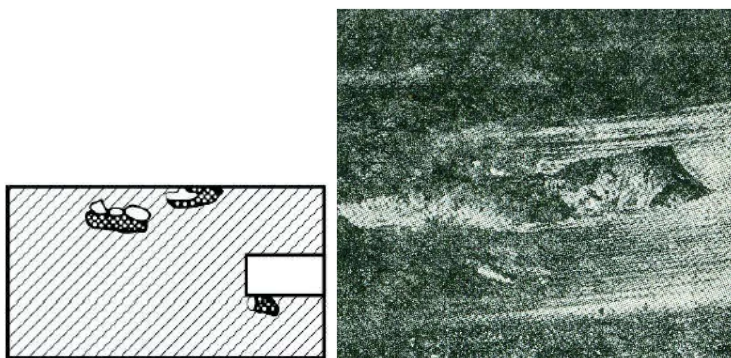


Слика 27 - Крастаста површина

- **Укључци троске**

Опис грешке: јављају се независно од метода ливења. Укључци троске представљају спољну или унутрашњу порозност на местима где су заробљени неметални укључци. То се дешава при брзој кристализацији, када згура исплива на врх ливачког лонца или се наталожи у уливном систему.

Спречавање грешке: грешка се може избећи ако се спречи да троска доспе у ливачки лонац при испуштању растопа из пећи; то се постиже скидањем троске са површине растопа у лонцу, додавањем сувог кварцног песка или креча, чиме се згушњава троска и одваја се од течног метала.

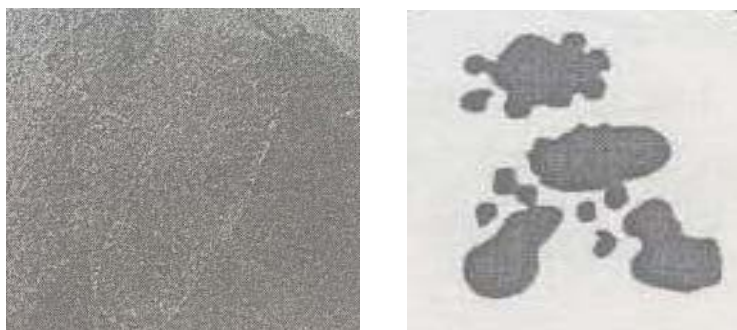


Слика 28 – Укључци троске

- **Образовање примарног графита**

Опис грешке: настаје при уобичајеним начинима ливења и то код црног и белог темпер лива. Грешка се јавља у виду сивих пега издвојеног примарног графита на прелому сивог ливеног гвожђа. Углавном су узроци превисок садржај угљеника и силицијума за дату дебљину зида одливка, као и висок садржај елемената који поспешују графитизацију.

Спречавање грешке: Избегавање великих разлика у дебљини зидова одливка, правилним пројектовањем уливног система и појила, убрзањем хлађења неких делова одливака уградњом челичних лимова у поједине зоне пешчаног калупа, контролисањем хемијског састава металног улошка и тел.

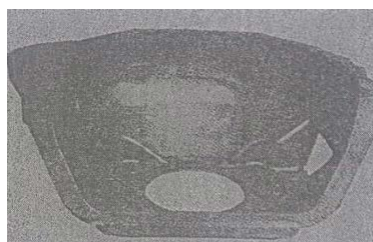


Слика 29 - Образовање примарног графита у одливку

- **Хладни спојеви**

Опис грешке: Ова врста грешке се манифестује видљивим прекидом масе и заобљеним ивицама на том прекиду. Хладни спојеви могу настати по целој дебљини зида одливка или само до одређене дубине у виду мање бразде са заобљеним ивицама. Обично се јавља на одливцима великих површина и малих дебљина, углавном на местима где се сусрећу два млаза охлађеног лива. Узрок ове врсте грешке је лоша ливкост легуре.

Спречавање грешке: Грешку је могуће спречити повећањем температуре ливења односно ливкости, као и побољшањем уливног система.



Слика 30 - Хладни спојеви

- **Површински мехурови и рупице**

Опис грешке: Грешка се јавља код сивог и темпер лива на одливцима са танким зидовима, а код челичног лива на одливцима дебљине зида 15-30 mm. Ова врста грешке је попут малих рупица на глатким површинама одливка. Јавља се код слабо дезоксидисаног челичног лива. Узроци су углавном повећан садржај кисеоника и водоника због превише унетих оксида преко металног улошка.

Спречавање грешке: Снижавањем садржаја кисеоника, додавањем ливу дезоксидатора и правилним пројектовањем уливног система.

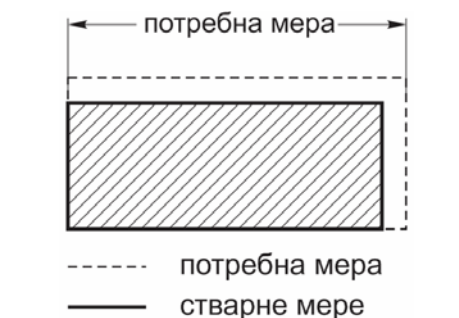


Слика 31 - Површински мехурови и рупице

- **Нетачне мере или облик**

Опис грешке: Грешка настаје када неке димензије одливка нису сагласне цртежу и моделу. Промена облика може да настане због померања горњег калупа у односу на доњи, као и језгра у односу на калуп. Узрок може бити недовољно повећање димензија модела, прилагођено скупљању ливачке легуре.

Спречавање грешке: Правилно пројектовање модела, језгра и калупа.



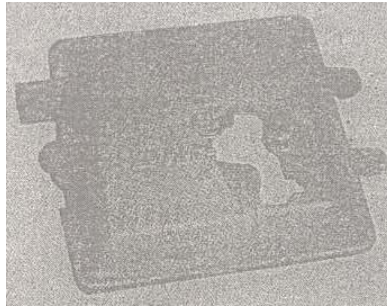
Слика 32 - Нетачне мере или облик

- **Недоливленост**

Опис грешке: Јавља се најчешће код танкозидних одливака велике површине. Грешка се манифестује недостатком једног дела одливка. Узроци су углавном

недовољно висока температура ливења, недовољна површина попречног пресека уливног система, код кокилног лива недовољно загрејана кокила и тсл.

Спречавање грешке: Грешку је могуће спречити извођењем правилне припреме лива, достизањем неопходне температуре лива и правилним пројектовањем уливног система.



Слика 33 - Недоливеност

- **Куглице**

Опис грешке: Грешка се јавља у виду металних куглица, глатких, малих димензија. Јављају се у унутрашњости као гасни мехурови у облику ситних округлих капи, тзв. фосфидних перли. Углавном настају на унутрашњим ивицама и на оштрим угловима, „цеповима“ и удубљењима. Фосфорни еутектикум се нагомилава на границама металних зрна на температури нижој од еутектичке те бива потиснут кроз поре ка површини.

Спречавање грешке: Грешка се може спречити уколико се смањи садржај нечистоћа, првенствено фосфора, као и растворених гасова, затим контролисањем температуре лива и омогућавањем обезваздушавања калупа.



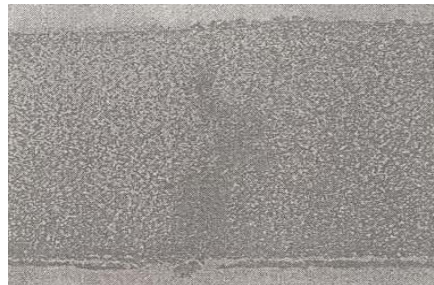
Слика 34 - Куглице

- **Топле прслине**

Опис грешке: Реч је о међукристалним прслинама неправилног облика. Јављају се у деловима одливка који последњи очвршћавају, као и на местима нагле промене пресека дебљине зидова. Узроци су ометено (неслободно) скупљање одливака при

очвршћавању, металуршки узроци који се односе на висок садржај сумпора у ливачкој легури.

Спречавање грешке: Грешка се може спречити избегавањем нагле промене пресека и омогућавањем слободног скупљања смањивањем садржаја сумпора у ливу.



Слика 35 - Топле прслине

5.2. Отклањање ливачких грешки и присуство дозвољених грешака

Као што је могуће закључити на основу горенаведеног наслова, постоје и дозвољене ливачке грешке које се могу толерисати уколико не утичу у великој мери на битније радне особине одливка. Такође, постоје и оне грешке које се морају отклонити. У претходном поглављу је укратко за сваку наведену грешку наведено како је то могуће учинити, али сада следи нешто детаљније објашњење. Уколико се анализирају последице које грешке могу да изазову, разликују се:

- неотклоњиве односно грешке чија је поправка техно-економски неоправдана,
- отклоњиве односно грешке које се могу елиминисати применом додатних мера иако оне нису биле предвиђене техничком документацијом,
- поправљиве грешке односно грешке које се у складу са техничким условима могу поправљати и то: заваривањем, импрегнацијом, исправљањем и тсл.

Када се говори о доради одливака од ливеног гвожђа ваља нагласити да може бити изведено применом следећих метода:

- наношења двокомпонентних металних китова, тзв. "гитовање",
- заваривањем,
- наваривањем високопродуктивним пуњеним жицама (металним прахом) и
- уградњом коничних завртњева.

5.2.1. Поправка гитовањем

Гитовањем се поправљају мање спољашње неравнине или поправке углавном естетске и то на неоптерећеним местима одливка. Користе се двокомпонентне смеше на металној основи са учвршћивачима од разних смола (епоксидне, акрилне, полиамидне). У зависности од врсте метала користи се гит одређеног састава. Гитовањем се поправљају мањи недостаци материјала на површини попут поправке контуре одливка, санирање малих пукотина реда 20 - 30 mm и тсл.

5.2.2. Поправка заваривањем

Када је реч о поправци заваривањем, могуће је издвојити тзв. ливачко и електролучно заваривање. Даље се наводи кратак опис ових метода заваривања.

Ливачко заваривање је један од најстаријих облика поправки одливака, а примењује се за поправку одливака великих димензија, као што су постоља алатних машина. За овај поступак потребно је обезбедити проток течног растопљеног метала ради загревања и уједначавања температуре на оштећеном месту.

Електролучно заваривање (репаратурно заваривање) служи за поправку мањих грешки. Мање грешке могу бити заварене на хладно (без предгревања) са електродама од чистог никла или уз мањи додатак додатног метала од сивог лива. Произвођачи електрода дају посебна упутства за заваривање. За добијање исте структуре, као и код основног материјала, примењује се заваривање са претходно предгрејаним одливком на 600°C (тзв. заваривање на топло) уз обавезно накнадно споро хлађење после заваривања (најефикасније је споро хлађење у пећи, а алтернативни начини су затрпавање репарираних одливка врелим песком или топлим циглама). За овакву врсту заваривања користе се посебне врсте електроде (сличног хемијског састава и механичких својстава као материјал дела одливног са грешком).

5.2.3. Поправка коничним навојним чеповима

Поправка коничним навојним чеповима је брза, ефикасна и јефтина метода, међутим овом методом је могуће поправити грешке само на равним површинама које су од ивице удаљене најмање за половину пречника чепа. Сам поступак састоји се у бушењу отвора, нарезивању навоја у материјал одливка, затим увртање чепова са коничним навојем који је претходно премазан са лепком за метал. Примењује се

првенствено за поправку великих, скупих одливака, кад су грешке ограничене на једну ужу зону, као што су: локална недоливеност, већи појединачни гасни мехурови, веће грешке које се открију на одливку приликом испитивања на херметичност и др.

5.2.4. Поправка интеграцијом

Поправка интеграцијом служи за поправљање визуелно невидљивих грешки (микро и макро) које се откривају приликом проба на непропустљивост (херметичност). За поправку се некад користило водено стакло, тако што је одливак био потопљен у њега, а у новије време постоје посебне смесе, тј. специјални раствори за интеграцију који се наносе на површину одливка уливањем у шупљину, четком или потапањем одливка у ту супстанцу и атмосфери вакуума [6].

6. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ ЛИВЕЊА

Као што је у претходном делу рада више пута споменуто, ливачке легуре су од великог значаја, а о томе нарочито сведочи њихова широка примена. Даље ће бити дат преглед примена неких најзначајнијих ливачких легура.

Табела 16 - Примена ливачких легура алуминијума

• танкозидни одливци, непропустљиви за течност (AlSi13Mn)
• опрема за животне намирнице (AlSi10Mn)
• ребрасте цилиндарске главе мотора SUS (AlMg5SiMn)
• компоненте у архитектури (AlMg5SiMn)
• за рад на високим температурама (AlSi12Ni2Cu)
• одливци отпорни на корозију у агресивној атмосфери и морској води (AlMg9MnBe)
• танкозидни одливци за авио и ауто-индустрију (AlSi10MgMn)
• високооптерећени сложени одливци (AlSi8Cu4Mn)
• клипови већих димензија (AlCu4Ni2Mg)
• кућишта и кошуљице наливених клизних лежајева (AlCu8FeSi)

Табела 17 - Примена ливачких легура магнезијума

• аутомобилске фелне
• ливени делови који раде на температурама испод 260°C
• делови за аутомобиле

Табела 18 - Примена ливачких легура месинга

• одливци ливени у песку, склопови и везни конструкциони елементи; делови за општу употребу у електротехници
• одливци ливени у кокили, арматуре метално-светлених површина, окови, делови у електротехници
• одливци ливени под притиском, арматуре, делови у електротехници

Табела 19 - Примена бронзи (легура на бази бакра)

• за делове машина
• опрему водовода и паровода
• за клизна лежишта
• за хемијску апаратуру
• за бродоградњу
• за авијацију
• за делове рударских машина код којих челични делови због варничења нису дозвољени
• за делове у прехрамбеној индустрији
• за израду разних арматура у хемијској индустрији
• за израду зупчаника
• кућишта пумпи итд.

Табела 20 - Примена ливачких легура олова

• меко олово- компонента код легура за клизна лежишта и нискотопљивих легура за штампарска слова
• легура са антимоном и арсеном - плоче акумулатора - арматуре у хемијској индустрији - кабине у електротехници
• легуре са арсеном - ливенице за пуњење патрона ловачког наоружања
• легуре са бизмутом - за затапање ситних узорака за металографска испитивања - лемови за спајање стакла и метала
• сигурносне чепове код парних котлова
• пуниоци за савијање на хладно цеви да се на колену не спљоште и др. [5]

Табела 21 - Примена челичног лива

• блокови и главе бродских дизел мотора
• за кочионе добоше
• за издувне гране моторних возила
• за кућишта пумпи високог притиска итд.
• за цеви и цевоводе
• за механичке конструкције
• за опрему под притиском и др. [8]

Табела 22 - Примена легираног (белог) ливеног гвожђа

- кућишта електромотора, делови вагона, делови бродова (нискоугљенични челични лив)
- ваљци, радни делови дробилица за камен, погонски зупчаници у цементарама, железарским ваљаоницама итд. (високоугљенични челични лив) и др.

Табела 23 - Примена ливачких легура никла

- за израду опреме за прехранбену и хемијску индустрију
- за различите делове у бродоградњи
- метални ковани новац и медаље
- посуде
- прекривање површина многих метала електролитичким никловањем
- катализаторе у хемијској индустрији [5].

Табела 24 - Примена легура титана

- конструкциони делови гасних мотора турбина
- опрема у прехранбеној индустрији
- опрема у хемијској индустрији изложена корозивним средствима
- опрема у петрохемијској индустрији и др.

7. ЗАКЉУЧАК

Под појмом ливења подразумева се операција којом се, у претходно припремљену калупну шупљину, улива истопљени метал (лив) који после очвршћивања (кристализације) поприма облик те шупљине у коју је уливен. Производи добијени на овај начин називају се одливцима и могу бити масе од неколико грама па до неколико стотина тона. Одливци могу бити веома простих али и врло сложених облика.

Истопљени метал - лив којим се попуњава калупна шупљина може бити чист метал, али и легура метала и метала, као и легура метала и неметала. Механичке и експлоатационе особине одливака зависе првенствено од врсте метала, односно легуре, затим од начина ливења, густине одливка, присуства неметалних укључака, гасних мехурова, пукотина и других грешака.

Да би било могуће добити одливак одређеног облика и захтеваних особина, потребно је изградити калупну шупљину истог облика као и захтевани одливак. Калупна шупљина је саставни део калупа који може бити израђен од различитих материјала.

У првом поглављу овог рада наводе се основне ливачке особине метала и легура и указује на комплексно својство ливкости. У другом поглављу описују се најважнији метали и легуре за ливење, као и њихова најважнија својства. У трећем поглављу даје се преглед најважнијих метода ливења. У петом поглављу наводе се неке од најопаснијих и најчешће заступљених ливачких грешака. Такође наводе се узроци њиховог настанка, као и мере за њихово отклањање. У шестом поглављу даје се приказ примене најчешће коришћених ливачких легура и области њихове примене.

Конечно, треба закључити да је реч о једној од најстаријих и најважнијих производних технологија. Сматра се да се данас једна трећина свих машинских делова добија наведеним методима ливења. Посебан разлог примене ове технологије, уз све наведене недостатке, јесте цена-квалитет. Дакле, пре свега техно-економски разлози.

8. ЛИТЕРАТУРА

1. М. Јовановић, В. Лазих: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
2. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазих, Н. Ратковић: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
3. Р. Ковач: *Технологија израде одливака*, ФТН Издаваштво, Нови Сад, 2006.
4. З. Гулишија: *Основи ливачке технологије*, Научна књига, Београд, 1992.
5. М. Јовановић, В. Лазих, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
6. С. Аксентијевић: *Пројектовање оптималне технологије ливења са полистиренским моделима путем моделовања процеса*, магистарска теза, ТМФ Београд, 2003.
7. С. Аксентијевић, З. Аћимовић, М. Ђуричић: *Истраживање могућности математичке оптимизације процеса ливења са испарљивим моделом*, Асоцијација за квалитет и стандардизацију Србије, 2005.
8. Р. Глигорић: *Машински елементи*, Пољопривредни факултет, Нови Сад, 2015.
9. М. Ђурђевић, З. Одановић: *Утицај главних легирајућих елемената на величину међудендритног растојања секундарних грана и дендритну конхерентну тачку у ливеним алуминијумским легурама*, Ливарство, Вол. 48, Но 1, Београд, 2009.
10. И. Керекеш: *Основи ливарства*, Виша техничка школа, Нови Сад, 1972.
11. А. Костић-Пулес: *Одабрана поглавља из хемије* - наставни материјал, школска 2016/17, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду.
12. Д. Митић, С. Јанковић: *Технички материјали*, Факултет заштите на раду, Универзитет Ниш, 2000.
13. Д. Регодић: *Технички системи*, Универзитет Сингидунум, Београд, 2011.