



Милка Атанасова

Технологии за изработване на заготовки

Част I: Получаване на отливки

гл. ас. д-р инж. МИЛКА ГРИГОРОВА АТАНАСОВА

ТЕХНОЛОГИИ ЗА ИЗРАБОТВАНЕ НА ЗАГОТОВКИ

Част I: Получаване на отливки



УНИВЕРСИТЕТСКО ИЗДАТЕЛСТВО
“ВАСИЛ АПРИЛОВ”
ГАБРОВО, 2026

© **Милка Григорова Атанасова** - автор, 2026 г.

© Университетско издателство „**ВАСИЛ АПРИЛОВ**“, Габрово, 2026

Рецензент: **доц. д-р Владимир Петров Тодоров**

ISBN: 978-954-683-745-5

СЪДЪРЖАНИЕ

ПРЕДГОВОР	7
ГЛАВА I	8
ЗАГОТОВКИ. ВИДОВЕ ЗАГОТОВКИ И МЕТОДИ ЗА ПОЛУЧАВАНЕТО ИМ.....	8
1.1. Същност и място на заготовката в производствения процес.....	8
1.1.1. Понятие за заготовка	8
1.1.2. Място на заготовката в производствения процес	10
1.2. Метод и начин за получаване на заготовки	10
1.2.1. Фактори при избор на метод за получаване на заготовки	12
1.2.2. Производствена програма и нейните показатели	12
1.2.3. Типове производство	12
1.2.4. Основни методи за получаване на заготовки	13
1.3. Класификация на заготовките	16
1.3.1. Според начина на получаване	16
1.3.2. Според геометрията	17
1.3.3. Според точността и степента на готовност	17
1.3.4. Според вида на материала.....	17
1.4. Технологичност на заготовката	17
1.4.1. Същност и фактори, определящи технологичността	17
1.4.2. Фактори, оказващи влияние за избор на метод за получаване на заготовки	18
1.4.3. Тип на производството	20
1.4.4. Технологични свойства на материалите.....	20
1.4.5. Размери, маса и конфигурация	21
1.4.6. Качество и точност	21
1.4.7. Налична материално-техническа база	22
1.5. Техничко-икономическа обосновка при избора на заготовка.....	22
1.5.1. Икономически показатели	22
1.5.2. Методика за сравнителен анализ.....	24
1.6. Пример за избор на заготовка	28
ГЛАВА II.....	31
ПОЛУЧАВАНЕ НА ЗАГОТОВКИ С ИЗПОЛЗВАНЕ МЕТОДИТЕ НА ЛЕЕНЕ.....	31
2.1. Същност на процеса леене	31

2.2 Класификация на методите на леење	32
2.3. Класификация на отливките.....	33
2.4. Технологични възможности и област на приложение на различните методи на леење.....	36
2.5. Основни етапи при получаване на отливки.....	37
2.5.1. Проектиране на отливката	39
2.5.2. Точност на отливките	49
2.5.3. Прибавки за механична обработка.....	50
2.5.4. Грапавост на повърхността.....	52
2.5.5. Отклонения от геометричната форма	53
2.5.6. Отклонения в масата.....	54
2.6. Разработване на чертеж на отливката	54
2.6.1. Положение на отливката във формата.....	54
2.6.2. Делителна повърхнина на формата, модела и кутиите за сърца.....	55
2.6.3 Определяне конфигурацията и размерите на модела и сърцевите кутии	57
2.6.4 Отчитане на леярското свиване при разработване на чертежа на отливката ..	57
2.6.5. Определяне на допустимите отклонения и прибавки съгласно БДС EN ISO 8062.....	58
2.6.5 Леярски радиуси на закръгление.....	59
2.6.6. Гранични отклонения на размерите	60
2.7. Леякова система	61
2.7.1. Същност и предназначение на леяковата система.....	61
2.7.2. Основни елементи на леяковата система	61
2.7.3. Допълнителни елементи на леяковата система	62
2.7.4. Видове леякови системи.....	63
2.8. Материали, предназначени за получаване на отливки	65
2.8.1. Общи изисквания към материалите	65
2.8.2. Леярски свойства на материалите	66
2.8.3 Кристализация на металите и сплавите	73
2.8.4. Основни леярски материали	79
2.9. Дефекти в отливките.....	83
2.9.1. Всмукнатини.....	83
2.9.2. Напрежения в отливките	84
2.9.3. Пукнатини в отливките	85
2.9.4. Неметални включвания и газове в отливките	86
2.10. Леярски форми	87
2.10.1. Предназначение и видове леярски форми	87
2.10.2. Основни елементи на леярските форми	89

2.10.3. Моделен комплект	91
2.10.4. Избор на метод за изработване на леярските форми.....	95
ГЛАВА III	97
ТЕХНОЛОГИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА НА МЕТОДИТЕ ЗА ЛЕЕНЕ	97
3.1. Конвенционални методи за леене	97
3.1.1. Леене в пясъчни (еднократни) форми.....	97
3.1.2. Формовъчни и сърцевни материали и смеси.....	100
3.1.3. Ръчно и машинно формоване	109
3.1.4. Следващи етапи от технологичния процес	118
3.1.5. Технологично развитие и усъвършенстване на процесите.....	121
3.2. Специални методи за леене.....	121
3.2.1. Леене в гипсови форми (Plaster Mold Casting).....	122
3.2.2. Леене по стопяеми и газифицируеми модели	124
3.2.3. Леене в черупкови форми	132
3.2.4. Вакуумно формоване (V-процес)	141
3.2.5. Леене в кокилни форми.....	144
3.2.6. Леене под налягане	150
3.2.7. Центробежно леене.....	160
3.2.8. Непрекъснато леене	163
ГЛАВА IV	167
СЪВРЕМЕННИ ТЕНДЕНЦИИ В ЛЕЯРСКОТО ПРОИЗВОДСТВО	167
4.1. Основни направления в развитието на модерното леярство	167
4.2. Технологично развитие на леярското производство	168
4.3. Автоматизация и роботизация на леярските процеси	168
4.4. Цифровизация и компютърно интегрирано производство.....	169
4.5. Адитивни технологии.....	170
4.6. Съвременни материали и консумативи.....	170
4.7. Усъвършенстване на методите и повишаване качеството	170
4.8. Контрол и осигуряване на качеството	171
4.9. Енергийна ефективност и екология.....	171
4.10. Перспективи и бъдещи направления	172
ЛИТЕРАТУРА.....	173

В съвременното машиностроене изборът на подходяща заготовка е едно от основните технологични решения, което оказва съществено влияние върху качеството, точността, себестойността и експлоатационните характеристики на готовите изделия. Нейното проектиране и изборът на технология за получаването ѝ са свързани както с конструктивните особености на детайла и производствената програма, така и с технологичните и икономическите изисквания на производството.

Разбирането на тези взаимовръзки изисква познаване както на общите принципи при избора на заготовки, така и на технологичните особености на отделните производствени процеси. В изданието са разгледани основните въпроси, свързани с получаването на заготовки, като акцентът е поставен върху методите на леене и тяхното приложение в машиностроителната практика. Последователно са представени същността и мястото на заготовката в производствения процес, факторите при избора на метод за нейното получаване, технологичността и технико-икономическата обосновка на взетите решения. Разгледани са теоретичните основи на леярското производство, проектирането на отливки, материалите и леярските форми, както и основните дефекти, възникващи в отливките. Значително внимание е отделено на технологичните особености и възможности на различните методи за леене, както и на съвременните тенденции в развитието на леярското производство.

Учебникът е предназначен за студенти от образователно-квалификационните степени „бакалавър“ и „магистър“ в професионалните направления 5.1 „Машинно инженерство“, 5.6 „Материали и материалознание“ и 5.13 „Общо инженерство“. Може да бъде полезен и за инженери и специалисти от практиката в областта на машиностроенето и производствените технологии.

Изданието е първа част от поредицата „Технологии за изработване на заготовки“. Следващите части са посветени на други широко прилагани методи за получаване на заготовки и техните технологични особености.

Май, 2026 г.
Габрово

гл. ас. д-р Милка Атанасова

ГЛАВА I

ЗАГОТОВКИ. ВИДОВЕ ЗАГОТОВКИ И МЕТОДИ ЗА ПОЛУЧАВАНЕТО ИМ

1.1. Същност и място на заготовката в производствения процес

1.1.1. Понятие за заготовка

Технологичният процес (фиг. 1.1) включва съвкупност от операции, методи, машини и инструменти, чрез които се получава крайното изделие - *детайл*.

В рамките на технологичния процес се разграничават два основни вида заготовки - *изходна* и *междинна*.

Изходната заготовка е първоначалният материал, от който започва изработването на детайла. В зависимост от избраната технология тя може да бъде под формата на течен метал (стопилка), метален блок, прътов или листов прокат, тръба и други полуфабрикати.



1. Изходна заготовка - стопилка



2. Леене на метална стопилка



3. Отливка (междинна заготовка)



4. Детайл

Фигура 1.1. Пример за технологичен процес за получаване на детайл

Междинната заготовка е полуфабрикат, получен след определена технологична операция, който подлежи на последваща обработка до достигане на окончателните размери, форма и качество на крайния детайл.

Основни разлики между заготовка и детайл:

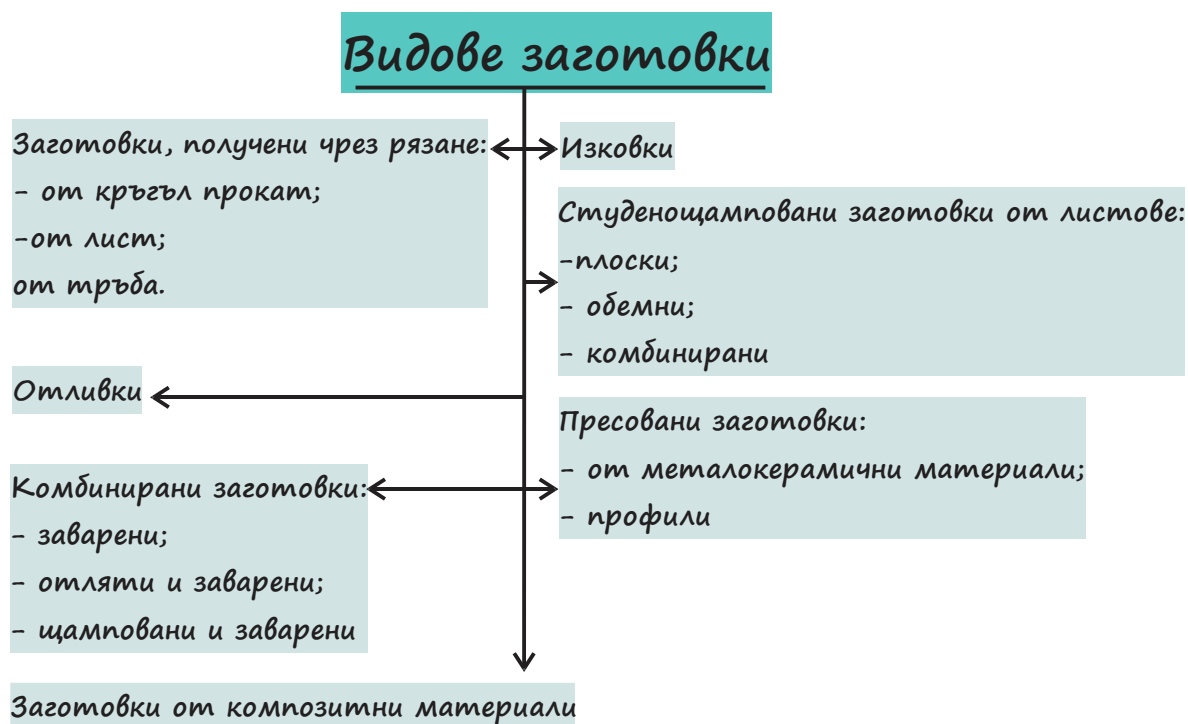
С изключение на случаите на прецизно производство (Net Shape), заготовката се различава от готовия детайл по:

- *Геометрични параметри:* По-голяма маса, размери и наличие на технологични надбавки (прибавки) за механична обработка.
- *Конфигурация:* Включва специфични елементи като леярски или щамповъчни наклони, радиуси на закръгление и технологични израстъци за захващане.
- *Качество на повърхнината:* Наличие на лята или ковашка кора (обгар), по-висока грапавост и специфични повърхностни характеристики (окиси, микрорупкнатини и др.).
- *Точност:* По-ниска точност на размерите, формата и взаимното разположение на повърхнините (обща допустими отклонения).

Заготовките, използвани в машиностроенето според формата и начина на доставка, условно могат да се разделят на четири основни вида (фиг. 1.2):

- Навити (непрекъснати) заготовки - тел, лента и кангал, доставяни на руло;
- Прокатни заготовки - пръти, листове, профили и тръби;
- Единични (обемни) заготовки - отливки, изковки, щамповани детайли и предварително отрязани заготовки от прътов материал;
- Прахообразни заготовки - метални, керамични и полимерни прахове (прес-прахове, гранули, таблетки), използвани при прахова металургия и технологии за формоване на пластмаси.

От заготовките, доставяни на руло (кангал), се произвежда голям брой детайли, особено при масово и серийно производство. Това се дължи на възможността за непрекъсната обработка и висока производителност.



Фиг. 1.2. Видове заготовки и тяхното наименование, използвани в машиностроенето

Най-малък брой детайли се получават от единични заготовки, тъй като те обикновено се изработват индивидуално и се използват при по-сложни или по-едрогабаритни изделия.

За детайли с малки размери и маса обикновено се използват пръстови или навити на руло заготовки, тъй като те осигуряват добра технологичност и икономично разкрояване на материала.

При детайли, при които се изисква висок коефициент на използване на материала, е целесъобразно да се прилагат единични заготовки (отливки, изковки), които по форма и размери са близки до тези на детайла. Това намалява обема на последващата механична обработка и материалните загуби.

Чрез прахова металургия се получават както единични заготовки, така и готови детайли, които в определени случаи не изискват допълнителна механична обработка (ТУ-София, КМТТ).

1.1.2. Място на заготовката в производствения процес

Производственият процес в машиностроенето е съвкупност от взаимосвързани технологични и спомагателни операции, чрез които изходният материал се преобразува в краен детайл или изделие с определени размери, форма и експлоатационни характеристики.

Заготовката заема междинно място между суровината и готовия детайл. Тя представлява материален обект, който вече притежава определена геометрична форма и размери, но подлежи на последваща дообработка с цел достигане на окончателните параметри.

Общата структура на производствения процес се състои от следните по-основни етапи:

- получаване на заготовка;
- механична обработка;
- термична и/или химико-термична обработка;
- довършителни операции;
- контрол и изпитване.

Качеството и точността на заготовката оказват съществено влияние върху:

- обема на последващата механична обработка;
- разхода на материал;
- производствените разходи;
- експлоатационните характеристики на детайла.

Ето защо изборът на подходяща заготовка е едно от основните технологични решения при проектирането на производствения процес.

1.2. Метод и начин за получаване на заготовки

След изясняване на понятието „заготовка“ възниква въпросът по какъв начин тя се получава в рамките на производствения процес. Това налага разграничаване на понятията „метод“ и „начин“ за получаване на заготовки.

Под понятието метод се разбира група от технологични процеси, в основата на които стои единен принцип на формообразуване на материала. Всеки метод включва различни начини, чрез които този принцип се реализира при конкретни производствени условия ([Машиностроителни технологии, 2024](#)).

Например, методът леене включва начини като леене в пясъчни форми, леене под налягане и центробежно леене. Методът пластично деформиране обхваща коване, щамповане и валцуване. Следователно изборът на начин е конкретизация на избрания метод.

Въпреки ясните тенденции, изборът на метод често е сложен, тъй като към заготовката се поставят противоречиви изисквания - висока точност, минимални разходи, добри механични свойства и ниска себестойност.

Освен техническите изисквания, решенията се вземат при наличието на ограничения, свързани с:

- производствените възможности;
- наличното оборудване;
- материалните и енергийните ресурси;
- икономическите условия;
- квалификацията на персонала;
- сроковете за подготовка на производството.

Поради това изборът е многовариантен и изисква системен анализ.

Основна тенденция в машиностроенето е намаляване на масата и себестойността на детайлите при едновременно повишаване на техните експлоатационни характеристики. Това се постига чрез:

- използване на нови специални материали;
- подобряване на конструкцията;
- намаляване на размерите и теглото;
- увеличаване коефициента на използване на материала;
- частично или пълно премахване на механичната обработка.

Материалите, използвани за получаване на заготовки, трябва да притежават определени технологични свойства, като:

- пластичност;
- деформируемост;
- тънколивкост;
- заваряемост;
- обработваемост и др.

Основните критерии за избор на метод се определят от производствената програма.

При големи обеми на производство:

- изисква се максимално приближаване на формата и размерите на заготовката до тези на детайла;
- стремеж към висок коефициент на използване на материала;
- оправдани са по-високи първоначални инвестиции.

При малки обеми:

- приоритет има минималната стойност на заготовката;

- допустима е по-голяма механична обработка;
- инвестициите в специализирана екипировка трябва да бъдат ограничени.

1.2.1. Фактори при избор на метод за получаване на заготовки

За да се направи обоснован избор е необходимо да се анализират основните фактори, влияещи върху получаването на заготовката:

- вид на обработваемия материал;
- форма, размери и маса на детайла;
- изисквана точност и качество на повърхността;
- условия на работа на детайла;
- икономическа ефективност на метода.

Сред тези фактори определящо значение има *производствената програма*.

1.2.2. Производствена програма и нейните показатели

Тя характеризира количествените и организационните параметри на производството и включва:

- *номенклатура* - списък на изделията, произвеждани за определен период;
- *обем* - количеството продукция за същия период;
- *повторяемост* - периодичността на производството.

Всички тези показатели се определят за един и същ времеви интервал и са взаимно свързани.

В зависимост от тези показатели производството се класифицира в основни типове.

1.2.3. Типове производство

В зависимост от номенклатурата, обема и повторяемостта производството се класифицира в три основни типа (фиг. 1.3) ([Амуджев и Атанасова, 2019](#)):

Единично производство

Характеризира се с широка номенклатура и малък обем. Производството на едноименни изделия е непериодично или случайно.

Серийно производство

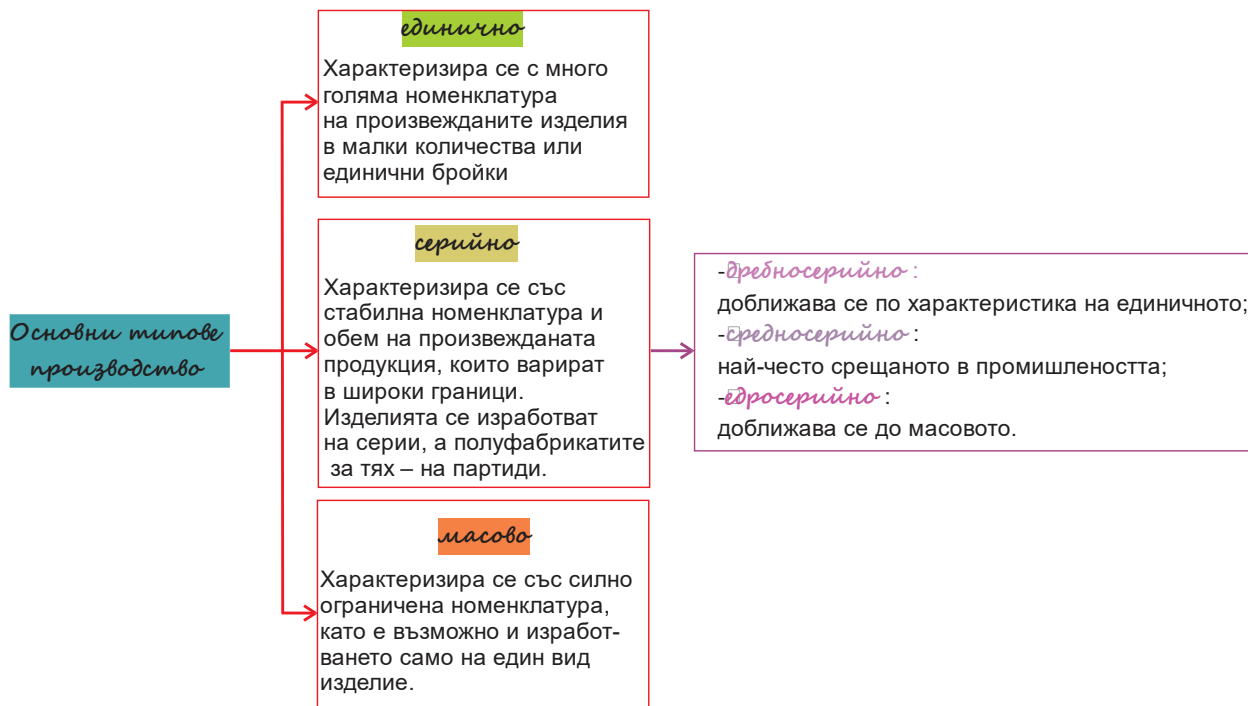
Отличава се със сравнително устойчива номенклатура и периодично повтарящи се серии. Разделя се на:

1. дребносерийно;
2. средносерийно;
3. едросерийно.

Масово производство

Характеризира се с ограничена номенклатура и голям обем на производство, често на един вид изделие.

Типът на производство оказва пряко влияние върху избора на метод за получаване на заготовката.



Фиг. 1.3. Основни типове производство

1.2.4. Основни методи за получаване на заготовки

В машиностроенето заготовките се получават чрез разнообразни методи, основани на различни принципи на формообразуване на материала. Най-широко приложение намират: леене, пластично деформиране, рязане на прокат, заваряване, прахова металургия и различни комбинирани методи (Класификация способов..., 2015).

Основната част от заготовките в практиката се изработват чрез леене или чрез обработване под налягане (пластична деформация), тъй като тези методи позволяват получаване на детайли с висока производителност и добри експлоатационни характеристики.

Леене - технологичен процес, при който течен метал или сплав с определен химичен състав запълва предварително изработена форма, чиято кухня представлява негативен отпечатък на бъдещата заготовка. След втвърдяване металът запазва формата си и се получава отливка (Клаев, 1987; Класификация способов..., 2015).

Методът позволява изработването на заготовки с практически всякакви размери и сложност на конфигурацията, от почти всички метали и сплави, както и от неметални материали.

Качеството на отливката зависи от условията на кристализация, скоростта на охлаждане и използвания начин на леене. Възможно е образуването на вътрешни дефекти като:

- всмукнатини;
- порьозност;
- пукнатини.

Тези дефекти често се установяват след последваща механична обработка.

Пластична деформация - методите се основават на способността на металите да променят формата си под действие на външни сили без разрушаване на структурата. Към тях спадат коване, щамповане, валцоване и други процеси ([Класификация способов..., 2015.](#)).

Заготовките, получени чрез пластична деформация, обикновено притежават по-добри механични свойства поради уплътняване на структурата и благоприятно ориентиране на влакнестостта.

Заваряване - технологичен процес за получаване на неразглобями съединения чрез създаване на атомно-молекулни връзки между съединяваните елементи.

При изработване на заготовки методът се използва основно за:

- едрогабаритни конструкции;
- комбинирани заготовки;
- сложни детайли, съставени от предварително оформени елементи.

Рязане на прокат - процес на изрязване или отрязване на заготовки от прътов, профилен или листов прокат, получен чрез пластична деформация.

Методът е подходящ при малки и средни размери на детайлите и при производство с по-малък обем.

Прахова металургия - производствен метод, при който детайли и заготовки се получават от метални или неметални прахове чрез пресоване и последващо синтероване.

Характерно за този метод е, че основните металургични процеси протичат в рамките на праховата частица. Той се отличава с:

- минимални материални загуби;
- висока икономическа ефективност;
- възможност за получаване на материали със специални свойства.

Заготовките, получени чрез прахова металургия, са близки по форма и размер до готовия детайл и често изискват само довършителна обработка ([Класификация способов..., 2015; Савов, н.д.](#)).

В таблица 1.1 е направена сравнителна характеристика на методите за получаване на заготовки, като са посочени основните им предимства, недостатъци и области на приложение.

Таблица 1.1. Сравнителна характеристика на основните методи за получаване на заготовки

Метод	Принцип на формообразуване	Предимства	Недостатъци	Област на приложение
Леене	Получаване на заготовка чрез запълване на леярска форма с течен метал и последващата му кристализация.	Подходящо за сложни конфигурации; възможност за големи размери; широка гама материали.	Възможни вътрешни дефекти; пониска точност; необходима последваща обработка.	Корпуси, блокове, едрогабаритни и сложни детайли.
Пластична	Формообразуване	Подобри	Не всички	Валове, оси,

деформация	чрез пластично деформиране на материала под действие на външни сили без нарушаване на неговата цялост.	механични свойства; висока производителност; добра структура.	материали са подходящи; високи усилия и енергийни разходи.	зъбни колела, силово натоварени детайли.
Рязане на прокат	Получаване на заготовки чрез отделяне на материал от пръти, профили, листове или тръби.	Простота; ниски начални разходи; гъвкавост.	Нисък коефициент на използване на материала; ограничени възможности за сложна форма.	Малки серии; прости заготовки.
Заваряване	Получаване на неразглобяеми съединения чрез металургично свързване на материалите посредством локално разтопяване, пластично деформиране или съчетание на двата процеса.	Подходящо за големи конструкции; възможност за изработване на комбинирани заготовки.	Остатъчни напрежения; деформации; необходим контрол на качеството.	Едрогабаритни конструкции, рамки, корпуси, съдове.
Прахова металургия	Получаване на заготовки чрез пресоване и последващо синтезиране на метални прахове.	Минимални отпадъци; висока точност; възможност за получаване на специални свойства.	Висока цена на оборудването; ограничения в размерите.	Малки и средни детайли със сложна форма; масово производство.

Методите на леење, пластична деформация и прахова металургия се определят като ресурсоспестяващи технологии, тъй като осигуряват висока степен на използване на материала ([Евдокимова и Скобелев, 2013](#)).

Въпреки това, процесите на рязане (механична обработка) гарантират най-висока точност на размерите и качество на повърхнините.

Следователно при избора на метод за получаване на заготовката основен принцип е тя да бъде максимално близка по форма и размер до крайния детайл, като същевременно се осигуряват необходимите технически и икономически показатели.

Всеки един от тези методи включва различни начини за реализиране на формообразуването, като изборът между тях се определя от комплексното действие на разгледаните фактори.

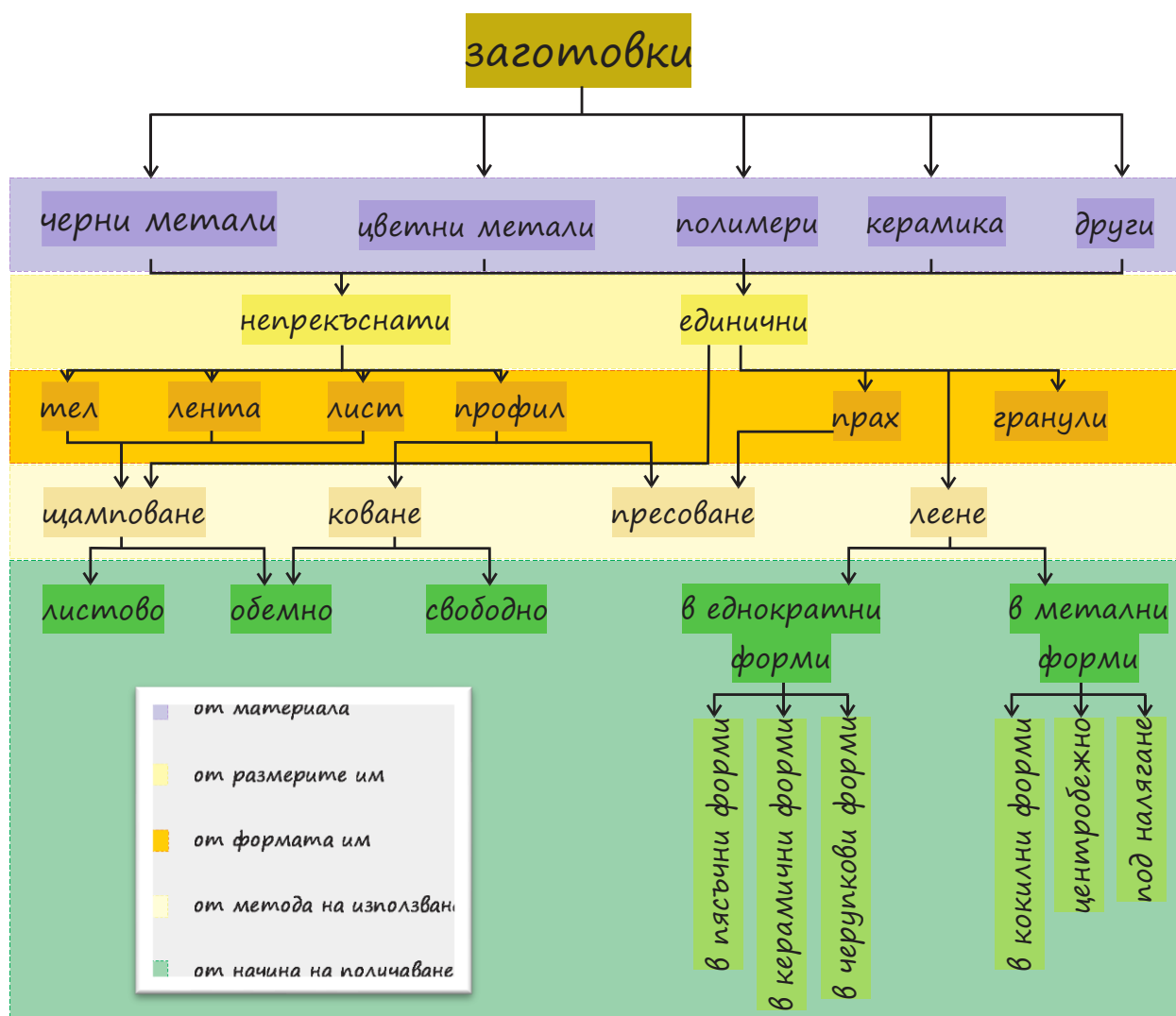
1.3. Класификация на заготовките

Класификацията на заготовките позволява систематизиране на тяхното разнообразие и улеснява избора на рационален метод за получаването им. В зависимост от използваните признаци заготовките могат да бъдат групирани по различни критерии, представени схематично на фиг. 1.4.

Основните класификационни критерии са:

- начин на получаване;
- геометрия;
- точност и степен на готовност;
- вид на материала.

Систематизирането на класификационните признаци създава методическа основа за последващ анализ на технологичността и избора на метод за получаване на заготовката.



Фиг. 1.4. Класификация на заготовките

1.3.1. Според начина на получаване

В зависимост от използвания технологичен метод заготовките се

разделят на:

- отливки (получени чрез методите на леење);
- ковани и щамповани заготовки (пластична деформация);
- заготовки от прокат (рязане на прътов, профилен или листов материал);
- заварени заготовки;
- прахово-металургични заготовки;
- комбинирани заготовки.

Тази класификация е пряко свързана с принципа на формообразуване и определя последващата технологична обработка.

1.3.2. Според геометрията

В зависимост от геометричната форма и пространствената конфигурация заготовките могат да бъдат:

- прости (цилиндрични, призматични);
- сложни (корпусни, ребрести, с вътрешни кухини);
- симетрични или асиметрични;
- плътни или кухи.

Геометрията оказва съществено влияние върху избора на метод за получаване и върху технологичността на детайла.

1.3.3. Според точността и степента на готовност

В зависимост от степента на приближеност към крайния детайл заготовките се делят на:

- груби (изискващи значителна механична обработка);
- полуготови;
- близки до крайния детайл.

Колкото по-висока е степента на готовност, толкова по-малък е обемът на последваща обработка и по-висок е коефициентът на използване на материала.

1.3.4. Според вида на материала

Според материала заготовките могат да бъдат:

- стоманени;
- чугунени;
- от цветни метали и сплави;
- от прахови материали;
- от неметални материали (полимери, керамика, композити).

Материалът определя технологичните свойства, методите на формообразуване и условията на експлоатация на готовия детайл.

1.4. Технологичност на заготовката

1.4.1. Същност и фактори, определящи технологичността

Технологичността на заготовката е съвкупност от свойства, които осигуряват възможност за икономично, рационално и качествено производство при минимални разходи на труд, материали, енергия и време.

В съвременната инженерна практика понятието се разглежда в рамките на концепцията Design for Manufacturability, която цели съгласуване на конструктивните решения с реалните производствени възможности ([Modus Advanced, 2026](#)).

Технологичността е относително понятие. Един и същ вид заготовка може да бъде технологична при масово производство и нетехнологична при единично, както и обратно. Тя зависи от особеностите на производството, наличната техника и организационните условия ([Евдокимова и Скобелев, 2013](#).)

Технологичността на заготовката се определя от комплекс от взаимосвързани фактори - конструктивни, материални и производствени.

Конструктивните фактори са свързани с формата и конфигурацията на заготовката, наличието на тънки стени, остри преходи, труднодостъпни повърхнини и степента на симетричност. Рационалното оразмеряване и избягването на конструктивни усложнения улесняват процесите на формообразуване и намаляват обема на последващата механична обработка. Колкото по-проста и балансирана е геометрията, толкова по-висока е технологичността при равни други условия.

Материалните фактори включват пластичност, леярски свойства, деформируемост, заваряемост, обработваемост и склонност към образуване на дефекти. Изборът на материал трябва да съчетава експлоатационните изисквания с технологичните възможности за неговата обработка. Материал с добри технологични свойства позволява по-ниска трудоемкост, по-малък процент брак и по-висока ефективност на производството.

Производствените фактори са свързани с типа производство, наличното оборудване, степента на механизация и автоматизация, производствените мощности и квалификацията на персонала. Дадена заготовка може да бъде технологична само ако съответства на конкретните производствени условия на предприятието.

За количествена оценка на технологичността се използват определени показатели. Най-често това са коефициентът на използване на материала, степента на близост до крайния детайл, трудоемкостта, енергоемкостта и себестойността на изработване. Колкото по-близка е заготовката до формата и размерите на готовия детайл и колкото по-ниски са разходите при запазване на изискваното качество, толкова по-висока е нейната технологичност ([Евдокимова и Скобелев, 2013](#)).

Въпреки възможността за оценка на технологичността, изборът на конкретен метод за получаване на заготовка остава сложна инженерна задача.

1.4.2. Фактори, оказващи влияние за избор на метод за получаване на заготовки

Правилният избор на заготовка е един от основополагащите критерии, определящ себестойността на детайла, неговото качество и срок за изпълнението му ([Круглов и др., 2015](#)).

Съвременната индустрия разполага с голямо разнообразие от методи за производство на заготовки. Това позволява подобряване на качеството и експлоатационните характеристики на детайлите и намаляване на разходите за материали и труд.

Множеството методи за производство на заготовки създава значителни трудности при рационалния избор. Разнообразието от изисквания към заготовките понякога са противоречиви и допълнително усложняват задачата по този избор.

Следователно оптималният избор на заготовки е належаща задача при проектиране и разработване на нови машини и други продукти с различно предназначение.

Изборът на метод за получаване на заготовка се осъществява въз основа на следните фактори:

- необходимими експлоатационни свойства на детайла;
- технологични характеристики и механични свойства на материала на детайла, т.е. неговите леярски свойства или способността му пластично да се деформира;
- форма и размери на заготовката;
- изискванията за точност и грапавост на повърхнината;
- брой заготовки;
- срок за изпълнение;
- изисквания към съществуващото оборудване;
- ниво на автоматизация;
- последваща механична обработка;
- разходи за производството на заготовката и детайла.

При проектирането на детайл, конструкторът избира материала, въз основа на съображения за надеждност, здравина и експлоатационен живот и по този начин до значителна степен предопределя метода или процеса за производство на заготовката. Първоначалната информация, която е под формата на чертеж на детайла, технически изисквания и вид на материала са важни параметри за избора на метод за производство на заготовката, т.е. фактор определящ избора на заготовката.

При конструирането на детайла за конкретни условия се вземат предвид неговият характер и наличното технологично оборудване. За новосъздадени продукти и нови производствени мощности, се вземат предвид съвременните методи и техники за производство на заготовки. По този начин производственият фактор също е важен.

При изборът на заготовки, в зависимост от материала, влияят наличното оборудване и производствените процеси за тяхното получаване, т.е. технологичният фактор. Той включва редица параметри като: характера на производството, технологичните свойства на материалите, размерите, масата и конфигурацията на детайла, както и възможностите на съществуващото оборудване.

1.4.3. Тип на производството

За дребносерийно и единично производство е препоръчително да се използват заготовки, произведени с универсални инструменти или минимални производствени разходи.

Препоръчват се заготовки от валцов прокат, ковани заготовки, отливки и заварени такива. Те имат големи по стойност прибавки за механична обработка и допустими отклонения в размерите. В този случай разходите за материал и тези за последващата механична обработка са по-ниски в сравнение със случаите на използване на специализирани инструменти. Въпреки това, дори за дребносерийно и единично производство е необходимо да се използва оптималния тип заготовка, за да се намалят прибавките за механична обработка.

При едросерийно и масово производство икономически целесъобразно е използването на заготовки, получени с помощта на специализирани инструменти, които точно да съответстват на формата и геометричните размери на детайла.

Разходите при използване на специални инструменти, като матрици при методите на пластично деформиране или специални метални форми – при специалните методи на леене са оправдани, поради намалените разходи за материал при последващата механична обработка.

Независимо от типа на производството, е необходимо да се направи технико-икономически анализ на избора на заготовка, базиран по критерий-цена. В него са включени и разходите за производство на инструмента, неговата дълготрайност и други параметри.

1.4.4. Технологични свойства на материалите

Основните тенденции в съвременното машиностроене са свързани с използване на материали, които осигуряват конструктивни и експлоатационни свойства (качество, якост, надеждност и други). При избора на заготовки не винаги се вземат под внимание техните технологични свойства, като например деформируемост, тънколивкост, заваряемост и обработваемост.

Колкото по ниска е пластичността на материала, толкова по трудно може да се произведе висококачествена заготовка с използване на методите на горещо и студено пластично деформиране. Например, при производството на заготовки от труднодеформируеми материали, е необходимо да се вземе предвид малката степен на деформация и тесният температурен диапазон, което води до допълнително нагряване по време на щамповане и следователно до повишени разходи. За заготовки, изработени от такива материали от решаващо значение е правилното избиране на техния производствен процес. В този случай изходната заготовка предварително трябва да бъде фасонирана и след това да бъде щампована.

Ако даден метал е предназначен за леене и притежава лоши леярски свойства, не се препоръчва той да бъде използван при кокилно леене или

при леене под налягане, поради ниската податливост на металната форма в отливките възникват напрежения, които довеждат до изкривяване на заготовките. Сплави, склонни към ликвация, не се използват при центробежно леене. Отливките, изработени от топлоустойчиви материали, които са склонни към окисляване е необходимо да бъдат произведени във вакуумни топлинни или леярски агрегати.

При детайли, работещи в условията на знакопроменливи натоварвания и специални среди (валове, дискове, лопатки на турбини, компоненти на зъбни колела и др.) се изисква използването на материали с високи механични и експлоатационни свойства. При такива детайли е препоръчително да се използват ковани или щамповани заготовки (изковки), притежаващи подобрени механични свойства. Важно е да се има предвид, че получаването на изковки с минимални прибавки за механична обработка от сложнолегираны сплави (например топлоустойчиви сплави на основата на никел и кобалт), е много трудно дори и невъзможно. В такива случаи е препоръчително да се използват отливки получени чрез методите на леене по стопяеми модели.

1.4.5. Размери, маса и конфигурация

В някои случаи размерите и масата на детайла са от решаваща роля при избора на заготовки. При специалните методи на леене (леене под налягане, кокилно леене, леене по стопяеми модели) размерите на заготовките са ограничени, поради техническите възможности на използваното оборудване и инструментите. Получаваните заготовки чрез методите на горещо обемно щамповане също се ограничават от тяхната маса и размери. Препоръчително е изработването на заготовки за едрогабаритни детайли, да се получават чрез коване или чрез леене в пясъчно-глинести форми.

Върху избор на заготовка също влияе и конфигурацията на детайла. Методите, като горещо обемно щамповане, кокилно леене и центробежно леене имат ограничения във формата. За тях обикновено се получават заготовки със сравнително проста форма. Ограничение във формата нямат останалите методи като леене в пясъчно-глинести смеси, леене по стопяеми модели, леене под налягане и заваряване.

1.4.6. Качество и точност

Чрез използване на точните методи за получаване на заготовките посредством тяхното пластично деформиране (калиброване, студено изтегляне) се получава чиста повърхност и не е необходима последваща механична обработка. Специалните методи на леене също гарантират получаването на прецизни заготовки без последваща механична обработка на неотговорни повърхнини.

1.4.7. Налична материално-техническа база

Този параметър е необходимо да бъде отчетен при методите: центробежно леене, леене под налягане, горещо обемно щамповане. От особено значение да бъде избран правилен метод за получаване на заготовки при съществуване на различно оборудване, позволяващо получаването на еднакви заготовки.

Например щампованата заготовка (изковка) може да се получи посредством паровъздушен чук, кривошипна горещоштамповаща преса или върху ексцентрикова преса. Експлоатационните разходи при паровъздушния чук са значително ниски от тези на пресата, но заготовката ще е със значително изкривяване поради разместването на горната и долна щампа и увеличените прибавки за механична обработка. Въпреки по-високите експлоатационните разходи, при кривошипната преса, получената изковка е с по-точни размери, отговарящи на малки прибавки за механична обработка.

Експлоатационните разходи при електрическата винтова преса са по-високи от тези на кривошипната, но не е необходимо да бъде предвидено калиброване на получената заготовка. В този случай е необходимо да бъде направен технико-икономически анализ за рационалния избор на заготовки. Той може да бъде направен въз основа на качествените параметри:

- ако заготовката се получава без изместване на горната спрямо долната щампи, то е целесъобразно да бъде използван паровъздушен чук;
- за заготовки с изискване за висока точност се използва електрическа винтова преса.

Предложените методи за избор на метод за получаване на заготовки са неточни, защото се основават основно върху качествената оценка. По-правилния подход е направа на технико-икономически анализ на съпоставими параметри, основани на количествени критерии.

1.5. Техничко-икономическа обосновка при избора на заготовка

1.5.1. Икономически показатели

Преди провеждането на технико-икономическия анализ е необходимо да се изберат целесъобразни варианти за производство на заготовките. Техничко-икономическият анализ се основава на едновременно определяне на разходите в заготовителното и механичното производство, както и на разходите за изработка на инструменти (екипировка), т.е. върху анализ на себестойността на детайла през целия технологичен цикъл на неговото производство.

При определяне на начина на производство на заготовки се извършва сравнителен анализ на вариантите по заложените разходни норми и показатели за себестойност.

Технико-икономическата обосновка се основава на сравнение на алтернативни варианти за производство на заготовката чрез анализ на тяхната себестойност и производствена ефективност.

Най-доброто решение при избора на начин за производство на заготовката е сравнението по производствена себестойност $C_{\text{пр}}$ и технологична себестойност $C_{\text{т}}$. *Производствената себестойност* обхваща всички разходи на предприятието за изработката на детайла, включително разходите за брак и разходите за усвояване на производството.

Производствената себестойност на детайла ($C_{\text{пр}}$) се определя като:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{ц}} + C_{\text{усв}} + C_{\text{бр}} + C_{\text{нз}}, \quad (1.1)$$

където: $C_{\text{пр}}$ – производствена себестойност; $C_{\text{ц}}$ – цехова себестойност; $C_{\text{усв}}$ – разходи за усвояване на производството; $C_{\text{бр}}$ – разходи от брак; $C_{\text{нз}}$ – общо заводски разходи.

В общ вид *цеховата себестойност* ($C_{\text{ц}}$) е сума от разходи за материал ($C_{\text{м}}$) и технологичната себестойност ($C_{\text{т}}$):

$$C_{\text{ц}} = C_{\text{м}} + C_{\text{т}}. \quad (1.2)$$

Често при избора на заготовки е достатъчно да се сравнява технологичната себестойност. За един детайл тя е сума от показателите:

$$C_{\text{т}} = M + Z + I + O, \quad (1.3)$$

където: M – разходи за материал; Z – разходи за труд (работна заплата); I – разходи за инструменти и екипировка; O – разходи за експлоатация и поддръжка на оборудването.

Всички показатели на технологичната себестойност са взаимосвързани. Промените в масата и конфигурацията на заготовката предизвикват промяна в разходите за изработка на инструментите. Изменението в обема на производството води до смяна на типа оборудване и т.н. От всички разгледани варианти предпочитание следва да се даде на този, чиято технологична себестойност е най-ниска.

Технологичността на детайла по отношение на оценката на разхода на материал се характеризира със следните показатели: $K_{\text{и.з.}}$ – коефициент на използване на заготовката; $K_{\text{в.г.}}$ – коефициент на извличане на годна продукция; $K_{\text{и.м.}}$ – коефициент на използване на материала. Те се изчисляват по формулите:

$$K_{\text{и.з.}} = M_{\text{д}}/M_{\text{з}}, \quad (1.4)$$

където: $M_{\text{д}}$ е масата на детайла, а $M_{\text{з}}$ е масата на заготовката, постъпваща за механична обработка.

$$K_{\text{в.г.}} = M_{\text{з}}/H_{\text{р}}, \quad (1.5)$$

където: $H_{\text{р}}$ е нормата на разход на материал за изработка на детайла, т.е. минималната нормативна маса материал, необходима за производството му.

$$K_{\text{и.м.}} = M_{\text{д}}/H_{\text{р}} \quad (1.6)$$

Показателите имат своето значение, като:

- *Коефициентът на извличане на годна продукция* характеризира разхода на материал в заготовителния цех, обема на брака, технологичните отпадъци и др.
- *Коефициентът на използване на заготовката* характеризира обема на механичната обработка на заготовката.
- *Коефициентът на използване на материала* отразява общия разход на метал за изработката на детайла.

Често за избора на рационална заготовка се използва *коефициентът на използване на заготовката*, тъй като той зависи от конструкцията на детайла, както и от конструкцията и масата на самата заготовка. Например, при изработката на валове, оси и болтове от прокат, $K_{и.з.} = 0,4 \div 0,6$, докато при изработката на детайли от същата заготовка тип пръстени или втулки, $K_{и.з.} = 0,15 \div 0,2$. В общия случай, колкото по-малко е отношението на дължината на детайла към неговия диаметър, толкова по-висок е $K_{и.з.}$.

Изборът на заготовка само въз основа на коефициентите на използване не винаги е обоснован. Например, отливка от титан е максимално близка по форма и размери до готовия детайл и има висок коефициент на използване на заготовката, но при друг, по-значим показател - коефициент на използване на материала, не достига повече от 0,1. Това състояние е следствие от фактическото вакуумно-дъгово леење. В резултат на това привидното намаляване на себестойността на детайла не води до положителни резултати и летите титанови заготовки трябва да се прилагат само в обосновани случаи, с отчитане на множество други фактори.

1.5.2. Методика за сравнителен анализ

Методиката за извършване на сравнителен анализ при избора на технология представлява систематизиран последователен процес, който съчетава техническа и икономическа оценка на алтернативните варианти. Тя има за цел да направи сравнение между различни варианти и да определи кой от тях осигурява най-добро съотношение между технически изисквания и икономическа ефективност. Процесът обикновено се осъществява на няколко етапа:

Анализ на изходните данни (технически изисквания)

Първата стъпка при извършване на сравнителния анализ е определянето на всички необходими параметри на бъдещата заготовка. Този етап е от съществено значение, тъй като именно изходните данни определят кои технологични методи са технически приложими и икономически обосновани.

На първо място се анализират материалните изисквания. Определя се видът на сплавта - например стомана, чугун, алуминий, мед, титан и други материали, както и изискваните механични свойства, като якост, твърдост и пластичност. От значение е и структурата на материала, включително степента на хомогенност и допустимото наличие на вътрешни дефекти като пори или неметални включвания.

Следва определяне на геометричните параметри на заготовката. Оценява се формата на детайла - дали е проста или сложна, с кухини, тънкостенни участъци или сложни преходи. Задават се основните размери (дължина, ширина, дебелина, маса), както и изискванията за точност, грапавост на повърхнините и допустими отклонения.

Отчитат се и производствените условия - годишната производствена програма (единично, дребносерийно или масово производство), наличното оборудване в предприятието, допустимите срокове за подготовка на производството и изискванията за последваща механична обработка.

В резултат от този анализ се съставя т.нар. „паспорт на заготовката“, който служи като основа за оценка и сравнение на различните технологични варианти.

Избор на възможни технологични методи

На база на определените изходни данни се подбират реалистични и технически приложими методи за производство на заготовката. Сред най-често използваните технологични решения са:

- механична обработка чрез рязане от прокат (пръти, профили, листове);
- леене - в пясъчни форми, в кокили или под налягане;
- коване - свободно или щамповане;
- валцоване;
- прахова металургия;
- адитивни технологии (3D принтиране с метални прахове), подходящи при сложни форми и малкосерийно производство.

За всеки от подбраните методи се разработва конкретен вариант за сравнение, който впоследствие подлежи на техническа и икономическа оценка.

Техническа оценка на вариантите

Тук се оценява доколко всеки метод може да произведе качествена заготовка според зададените изисквания.

- *Технологична приложимост*

Оценката на технологичната приложимост има за цел да установи дали избраният метод е способен да осигури изработването на заготовка с изискваната геометрия и конструктивни характеристики. Анализира се възможността чрез съответната технология да се получат необходимите форми, кухини, преходи и пространствена конфигурация на детайла.

Особено внимание се отделя на съответствието между конструкцията на детайла и технологичните особености на метода. Преценява се дали структурата и формата на изделияето позволяват прилагането на избраната технология без необходимост от съществени конструктивни изменения.

Отчитат се и технологичните ограничения, характерни за конкретния процес, като минимално допустима дебелина на стените, максимална маса на заготовката, допустими размери, радиуси на преходите и други

конструктивни ограничения. Неспазването на тези изисквания може да доведе до дефекти, повишен брак или икономическа нецелесъобразност.

- *Качество на получената заготовка*

Оценката на качеството на получената заготовка включва анализ на вътрешната структура, механичните свойства и състоянието на повърхнините. В зависимост от избраната технология могат да възникнат специфични дефекти - например газови пори при леење, шупли при прахова металургия или структурна нееднородност при неправилно проведена пластична деформация.

Особено значение имат механичните свойства на материала. Процесите на пластична деформация, като коване и щамповане, обикновено подобряват плътността и якостта на материала, докато при леењето съществува риск от вътрешни дефекти. Анализира се също така постигнатата точност на размерите и качеството на повърхнините, които определят обема на последващата механична обработка.

- *Технологичност и необходимост от окончателна механична обработка*

При оценката на технологичността се анализира доколко получената заготовка е близка по форма и размери до крайния детайл. Определят се необходимите прибавки за механична обработка и обемът на снемания материал. Колкото по-близка е заготовката до готовото изделие, толкова по-малка е трудоемкостта на последващите операции.

Оценява се също възможността за автоматизация на процеса, степента на използване на материала и потенциалът за минимизиране на отпадъците. Тези фактори оказват пряко влияние върху производствената ефективност и себестойността на детайла.

- *Производителност*

Производителността на технологичния метод се определя от цикловото време за изработка на една заготовка, броя произведени изделия за единица време и възможността за серийно или масово производство. Високата производителност е особено важна при големи производствени програми, където инвестиционните разходи се разпределят върху значителен обем продукция.

Отчита се и гъвкавостта на технологията при промяна на конструкцията на детайла или при преминаване към нови размери и модификации. Методи с висока гъвкавост са по-подходящи за малки и средни серии, докато специализираните технологии са икономически оправдани при масово производство.

Икономическа оценка

Икономическата оценка има за цел да определи разходната ефективност на всеки разглеждан технологичен метод и да осигури количествена основа за избор на оптимален вариант. Анализът обхваща както постоянните (инвестиционни), така и променливите производствени разходи.

Инвестиционни разходи (постоянни разходи)

Инвестиционните разходи включват средствата, необходими за подготовка и осигуряване на производствения процес. Към тях се отнасят стойността на технологичното оборудване (преси, пещи, леярски агрегати, машини), разходите за изработка на специална инструментална екипировка (щампи, матрици, кокили, моделни комплекти), както и разходите за монтаж, настройка и внедряване на производството.

Тези разходи имат постоянен характер и се разпределят върху общия брой произведени изделия. Поради това тяхното влияние върху себестойността намалява с увеличаване на производствената програма.

Експлоатационни разходи (променливи разходи)

Експлоатационните разходи са пряко свързани с производството на всяка отделна заготовка. Те включват:

- разход на материал, определен чрез коефициента на използване на материала - при рязане от прокат - около 0,6-0,9; при щамповане - 0,8-0,95; при леене - 0,85-0,98;
- разход на енергия (електроенергия, газ, топлинна енергия);
- разходи за труд, изчислени на база норма време и тарифна ставка;
- разходи за инструментална поддръжка и износване;
- разходи, свързани с брак и технологични отпадъци;
- разходи за последваща механична обработка и термични операции.

Особено значение има материалният разход, тъй като в редица случаи той формира значителен дял от общата себестойност на детайла.

Изчисляване на себестойност на една заготовка

Себестойността на една заготовка се определя като сума от разпределените постоянни и променливите разходи по формулата:

$$C = \frac{C_{\text{пост}}}{N} + C_{\text{мат}} + C_{\text{ен}} + C_{\text{труд}} + C_{\text{инстр}} + C_{\text{обр}} - C_{\text{др}}, \quad (1.7)$$

където: C - себестойност на една заготовка; $C_{\text{пост}}$ - годишни постоянни разходи; N - годишен обем на производство; $C_{\text{мат}}$ - материални разходи; $C_{\text{ен}}$ - разходи за енергия; $C_{\text{труд}}$ - разходи за труд; $C_{\text{инстр}}$ - разходи за инструментална екипировка; $C_{\text{обр}}$ - разходи за допълнителна обработка; $C_{\text{др}}$ - стойност на реализируемите отпадъци.

Получените стойности позволяват количествено сравнение между вариантите.

Обобщаване и сравнителен анализ

След извършване на техническата и икономическата оценка резултатите се обобщават в сравнителна таблица. Анализът може да се извърши чрез критерий за минимална себестойност, метод на тежестите или оценка на възвращаемостта на инвестицията.

При равни други условия приоритет следва да се даде на варианта с минимална технологична себестойност, който едновременно осигурява изискваното качество, надеждност и производствена устойчивост.

Избор на оптимален вариант

В заключителния етап на сравнителния анализ следва ясно и аргументирано да се определи избраният метод за получаване на заготовката. Необходимо е да се докаже неговата техническа приложимост, като се обоснове способността му да осигури изискваните геометрични параметри, точност, качество на повърхнините и механични свойства на материала.

Наред с техническата обосновка се извършва и икономическа оценка, доказваща, че избраният вариант е най-ефективен по отношение на технологичната себестойност, разхода на материал, трудоемкостта и необходимите инвестиционни разходи.

В анализа се посочват предимствата на избрания метод спрямо останалите разглеждани алтернативи, както и очакваното намаляване на производствените разходи, материалния отпадък и времето за изработка.

При равни други условия приоритет следва да се даде на варианта с минимална технологична себестойност, който едновременно гарантира изискваното качество и производствена надеждност.

1.6. Пример за избор на заготовка

Да се разгледа изборът на заготовка за изработване на вал със следните основни характеристики:

- материал: стомана С45,
- диаметър: 60 mm,
- дължина: 320 mm,
- средносерийно производство.

Разглеждат се три възможни варианта за получаване на заготовката:

Вариант 1 - заготовка от горещовалцован прокат;

Вариант 2 - кована заготовка;

Вариант 3 - щампована заготовка.

Таблица 1.2. Сравнителен анализ на вариантите за избор на заготовка с маса на готовия детайл $M_d=6,8 \text{ kg}$

Показател	Вариант 1 прокат	Вариант 2 кована заготовка	Вариант 3 щампована заготовка
Маса на заготовката, $M_3, \text{ kg}$	11,5	9,2	8,1
Коефициент на използване на заготовката, $K_{из} = \frac{M_d}{M_3}$	0,59	0,74	0,84
Обем на снемания материал	Голям	Среден	Малък
Трудоемкост на механичната обработка	Висока	Средна	Ниска

Разходи за инструментална екипировка	Минимални	Средни	Високи
Икономически изгоден при производство	До 1000 бр./год.	3000 до 10000 бр./год.	Над 15000 бр./год.
Технологични свойства	Без подобряване на структурата	Подобрена структура и якост	Висока точност и повторяемост

Анализ на резултатите

От представените данни се вижда, че шампованата заготовка има най-висок коефициент на използване на материала ($K_{из} = 0,84$) и най-малък обем на механична обработка. Въпреки това високите разходи за инструментална екипировка я правят икономически оправдана основно при едросерийно производство.

Заготовката от прокат има най-нисък коефициент на използване на материала ($K_{из} = 0,59$) и изисква значителен обем механична обработка, което води до повишена трудоемкост. Този вариант е подходящ предимно при малки производствени серии.

Кованата заготовка осигурява добър баланс между разход на материал, трудоемкост и разходи за екипировка. Освен това подобрява структурата и механичните свойства на материала. При средносерийно производство този вариант е икономически и технологично най-обоснован.

Извод

При зададените условия на средносерийно производство най-рационален е вариантът с кована заготовка. Той осигурява по-висок коефициент на използване на материала в сравнение с проката, по-ниска трудоемкост при механичната обработка и приемливи разходи за инструментална екипировка. Същевременно коването подобрява структурата и механичните свойства на материала, което повишава надеждността и експлоатационните характеристики на детайла.

Следователно изборът на кована заготовка е технически обоснован и икономически най-ефективен при разглежданата производствена програма.

В първа глава са разгледани теоретичните основи при избора на заготовка, критериите за оценка и методиката за сравнителен анализ между различните технологични варианти. Установено бе, че правилният избор на метод за получаване на заготовката има съществено значение за материалните разходи, трудоемкостта, качеството и общата технологична себестойност на изделието.

Сред основните технологични методи за получаване на заготовки особено широко приложение намират леярските процеси. Те позволяват изработването на детайли със сложна геометрия, вътрешни кухини и разнообразни конструктивни форми при сравнително добър коефициент на използване на материала.

Поради това във втора глава - „Получаване на заготовки чрез използване методите на леење“ - се разглеждат основните леярски технологии, техните технологични особености, предимства, ограничения и област на приложение в машиностроителната практика.

ПОЛУЧАВАНЕ НА ЗАГОТОВКИ С ИЗПОЛЗВАНЕ МЕТОДИТЕ НА ЛЕЕНЕ

2.1. Същност на процеса леене

Сред различните методи за получаване на заготовки особено широко приложение намират методите на леене. Те позволяват получаването на детайли със сложна форма, големи размери и относително ниска себестойност, поради което леярските технологии заемат важно място в съвременното машиностроене и металургия.

Леенето представлява технологичен процес, при който от течен метал (*стопилка*) се получават фасонни детайли или заготовки, наречени отливки. Процесът се осъществява чрез запълване на кухината на леярска форма, която представлява негативен отпечатък на външната конфигурация на детайла. Вътрешните кухини и отвори се оформят чрез леярски сърца. По време на кристализацията и последващото охлаждане се формират микроструктурата, плътността, както и механичните и експлоатационните свойства на отливката.

Методите на леене, притежават своите предимства и недостатъци.

Някои от **предимствата** на леярското производство са:

- възможност за получаване на отливки със сложна форма, висока степен на точност и конфигурация максимално близка до тази на детайлите;
- металните отпадъци, които са под формата на стружки при последваща механична обработка са 1,5-2 пъти по-ниски при отливките, отколкото тези, изработени от валцуван материал;
- за до 30% от общото количество отливки не е необходимо да бъде предвидена последваща механична обработка;
- масата на получаваните отливки е в изключително широки граници (от няколко грама до стотици тонове);
- при правилно разработен технологичен процес е възможно получаване на висококачествени отливки с висок комплекс от физико-механични характеристики и експлоатационни показатели, при понижени разходи на метал;
- получаването на детайли от отливки, съчетано с последваща механична обработка, е много по-евтино, отколкото изцяло използване на методите със стружкоотнемане;
- коефициентът на използвания метал, който се изразява в съотношението на масата на детайла към тази на заготовката, е средно 60% за летите заготовки, в сравнение с 30% за тези получени чрез горещо обемно щамповане. Невъзстановимите загуби при производството на детайли от отливки са 7-9%, а при използване на изковки - 13-14%.

Съвременните технологични процеси позволяват увеличаване на коефициента на използвания метал на отливките до 90-100 % и др.

Недостатъци:

- относително ниската якост на стоманените отливки, поради получената зърнеста структура в сравнение с влакнестата, получена след пластично деформиране;
- необходимост от последваща механична обработка;
- необходимост от извършване на сложни и скъпи операции за осигуряване на безопасност и опазване на околната среда.

2.2 Класификация на методите на леене

Съществуват различни методи за призовото на лети заготовки. Те могат да бъдат класифицирани по различни признаци например в зависимост от:

- *типа на производството*: единично, серийно и масово;
- *начин на формоване, уплътнение и изваждане на отливката*: ръчно, полуавтоматизирано и автоматизирано;
- *използвана формовъчна смес*: леене в пясъчно-глинести смеси, леене в черупкови форми, леене в керамични форми, леене със стопяеми и газифицируеми модели и др.;
- *метод на запълване на формата*: гравитационно леене, под налягане и противоналягане, центробежно леене, вакуумно леене;
- *използваната леярска форма*: в еднократна и постоянна форма;
- *клас на точност на отливката*: от първи до пети клас;
- *други методи на леене*: непрекъснато леене, течно леене и др.

В литературата методите за леене често се разделят на традиционни (конвенционални) и специални. Няма ясни критерии, по които даден метод може да бъде класифициран като специален или стандартен. Специалните методи на леене трябва да включват: леене в специални форми; използване на нетрадиционни методи; различни методи за въздействие върху кристализиращата стопилка. Такива са:

- леене в постоянни (метални) форми;
- леене в специални тънкостенни, еднократни керамични или черупкови форми, произведени с помощта на топими, горими и разтворими модели;
- методи за производство на отливки, използващи външни въздействия върху течни и кристализиращи стопилки (леене под налягане, с противоналягане, течно щамповане, центробежно леене, леене под налягане, електрошлаково леене, леене с електромагнитни, ултразвукови и вибрационни въздействия);
- непрекъснато и полунепрекъснато леене;
- методи за производство на композитни и армирани отливки.

Останалите методи се считат за традиционни (конвенционални). Те се основават на методи за леење в еднократни и полупостоянни форми, използващи гравитационно изливаше на стопилката. В момента тези методи представляват по-голямата част от производството на отливките (до 75%).

На фиг. 2.1 е направена класификация на методите на леење.



Фиг. 2.1. Класификация на методите на леење

2.3. Класификация на отливките

Отливките се класифицират по различни признаци, които определят тяхната конструктивна сложност, технологичност, експлоатационни характеристики и икономическа ефективност. Това е необходимо при проектиране на детайли, избор на метод на леење, определяне на прибавки за механична обработка и допустими отклонения, както и при оценка на качеството.

Макар в европейската стандартизация класификацията да се базира предимно на класове на точност (БДС EN ISO 8062, 2008), в инженерната практика за технологично проектиране отливките се разделят според конструктивната си сложност на следните групи: прости, несложни, сложни и особено сложни (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Класификация на отливките според степента на сложност

Група	Описание	Пример
Прости	Отливки с обикновена геометрия, без вътрешни кухини или сложни детайли. Лесни за формоване и обработка.	Плоски плочи, прости блокове, шайби без издътци

Несложни	Имат ограничен брой кухини или издатъци, леко усложнена форма.	Корпуси с малък брой отвори, фланци
Сложни	Отливки с множество кухини, отвори, ребра, сложни контури или променлива дебелина на стените. Изискват внимателно проектиране и точен избор на метод.	Кормилни кутии, корпуси на помпи, сложни машинни рамки
Особено сложни	Много сложни геометрични форми, голям брой издатъци, кухини, тънки стени, променлива дебелина. Най-често се изработват с прецизни или инвестиционни методи.	Турбинни колела, лопатки, сложни авио- и автомобилни компоненти

Степента на сложност се определя не само от формата, но и от *технологичната трудност*, възможността за отливане без дефекти и необходимостта от допълнителна обработка. При „особено сложните“ отливки често се налага използването на специални леякови системи (екзотермични леяци, филтри и др.) за осигуряване на плътност.

В таблица 2.2 е направена класификация на отливките според функционалното си предназначение.

Таблица 2.2. Класификация на отливките според функционалното си предназначение

Вид	Описание	Пример
Конструкционни	Служат за базиране на механизми и осигуряване на обща коравина. Основното изискване е стабилност на размерите	Фундаменти, капаци, защитни кожуси, подпори
Експлоатационни	Изложени са на значителни механични напрежения, триене, високи температури или корозия	Колянови валове, спирачни дискове, бутала, лагерни тела
Отговорни (Универсални)	Комбинират сложна геометрия с високи изисквания за херметичност и работа под налягане или агресивна среда	Корпуси на високо напорни помпи, блокове на ДВГ, корпуси на хидравлични разпределители

Този вид класификация на отливките е важна при избор на материал, метода на леене и необходимите допустими отклонения и прибавки за механична обработка.

Формата на отливката определя технологичната сложност, метода на леене и необходимите прибавки за механична обработка (табл.2.3).

Таблица 2.3. Класификация на отливките според тяхната форма

Форма	Описание	Пример
Цилиндрични	Отливки с основен цилиндричен контур, включително тръби, втулки, бутала	Цилиндрични втулки, лагерни чашки
Плоски	Отливки с доминиращо плоско сечение и малка дебелина, без сложни вътрешни кухини	Плоски плочи, капаци, шайби
Сложни контури	Отливки с нестандартни, многоизмерни или променливи контури; включват ребра, кухини и издътци	Кормилни кутии, турбинни колела, корпуси на помпи и компресори

Оценката на качеството на отливките се осъществява чрез система от показатели, които обхващат конструктивни, технологични, експлоатационни и икономически характеристики, регламентирани в различни стандарти.

Конструктивните характеристики определят формата, размерите и геометричната сложност на отливката и нейната съвместимост с конфигурацията на детайла. Те са свързани с геометрична форма, габаритни размери, дебелина на стените, преходи, наличие на ребра, отвори, кухини, конструктивна сложност (изразена чрез брой сърца и др.) и размерна точност (клас на точност). Конструктивните характеристики оказват пряко влияние върху избора на лееарски процес и върху технологичността на отливката.

Технологичните характеристики показват пригодността на отливката за производство чрез определен лееарски метод и последваща обработка. Към тях спадат: тънколивкост, склонност към образуване на дефекти (порестост, всмукнатини, шупли), начин на формоване (в пясъчни, метални или керамични форми), прибавки за механична обработка и допустими отклонения в размерите, качество на получената повърхнина на отливката и технологичност на лееарската форма (изразява се с възможността за използване на стандартна екипировка). Колкото по-добра е технологичността, толкова по-ниски са производствените разходи.

Експлоатационните характеристики определят поведението на отливката при реални условия на работа и нейната надеждност. Това са механичните свойства, износоустойчивост, умора на материала, корозионна устойчивост, топлоустойчивост и термоустойчивост и др. Експлоатационните характеристики са пряко свързани с предназначението на отливката.

Икономическите характеристики отразяват разходите и ефективността при изработването и използването на отливката. Основни икономически характеристики са: себестойност на отливката, разход на материал, коефициент на използване на материала, производителност, разходи за последваща механична обработка, процент брак и др. Икономичността е резултат от оптимално съчетание на конструктивни, технологични и експлоатационни решения.

Класификационните признаци на отливките имат пряко влияние върху избора на метод на леене и върху организацията на производствения процес. Поради това е необходимо да се разгледат основните етапи, чрез които се реализира технологичният процес за получаване на отливки.

2.4. Технологични възможности и област на приложение на различните методи на леене

Технологичните възможности на методите на леене са определени чрез класа на точност на отливката, качеството на повърхностния слой на отливката и др.

Получаването на отливки с определен клас на точност не зависи само от последващата механична обработка, но и от избрания метод на леене, вида на формовъчната смес, конструктивната сложност на детайла и типа на производството (единично, серийно или масово) ([Евдокимова и Скобелев, 2013](#)).

В таблица 2.4 е дадена областта на приложение на различните методи за производство на отливки.

Таблица 2.4. Област на приложение на методите за производство на отливки

Основни методи на леене	Област на приложение
В пясъчни форми: -ръчно формоване	Единично и малкосерийно производство на отливки от всички сплави, с различни габаритни размери, маса и конфигурация
-машинно формоване	Масово, малкосерийно и серийно производство на различни по маса и габаритни размери отливки от всички сплави
Леене с постоянни метални форми (кокили)	Масово и серийно производство на отливки от всички сплави, с проста до средна сложност и малки и средни маса и габаритни размери
Центробежно леене	Единично, серийно и масово производство на ротационни отливки от всички сплави с малки и средни маса и габаритни размери

Леене по стопяеми модели и леене в черупкови форми	Серийно и масово производство на малки и средни по размер отливки, изискващи при обичайното производство сложна механична обработка, така също и детайли получени от сплави, които трудно се поддават на механична обработка
Леене под налягане	Масово производство на отливки от цветни метали и сплави, с различна форма, но с малки и средни габаритни размери
Непрекъснато леене	Масово производство на отливки от цветни метали и сплави, които са с постоянно и несложно сечение по цялата дължина (прът, втулка, овал) също и производството на покривни ламарини от чугун
Леене с армиране с друг метал	Всички видове производство на отливки от всички материали, габаритни размери, маса и конфигурация (предимно при серийно и малкосерийно производство)
Вакуумно леене	Масово производство на отливки от цветни метали и сплави под формата на втулки с диаметър до 150 mm
Леене в автоклав (кристализация под налягане)	Производство на отговорни отливки от леки сплави
Леене в полупостоянни форми	Масово производство на отливки от чугун и цветни сплави с проста форма

2.5. Основни етапи при получаване на отливки

Технологичният процес за получаване на отливки представлява сложна последователност от взаимосвързани операции. Видът и броят на тези операции зависят от изборния метод на леене, вида на използваната сплав, конструктивната сложност на детайла и типа на производството. Качеството на получената отливка, както и икономическата ефективност на производството, зависят в значителна степен от правилното изпълнение на отделните технологични операции.

Съвременните леярски технологии се характеризират с висока степен на механизация и автоматизация, използване на компютърно проектиране (CAD/CAE), числено моделиране на процесите на запълване и кристализация, както и прилагане на съвременни инструментални системи и усъвършенствани метални сплави.

Независимо от различията между отделните методи на леене, технологичният процес за получаване на отливки обикновено включва следните основни етапи:

- проектиране на отливката и разработване на леярската технология;

- подготовка на моделна екипировка и формообразуващи елементи;
- получаване и подготовка на металната стопилка;
- запълване на леярската форма със стопилка;
- охлаждане и кристализация на метала;
- избиване на отливката от формата;
- почистване, довършителна обработка и контрол на качеството.

Следващите раздели разглеждат тези етапи подробно.

Оценка на технологичността на отливката (Григорьев, 2004)

Технологичността на отливката представлява съвкупност от конструктивни и технологични характеристики, които определят пригодността на детайла за изработване чрез леење при минимални производствени разходи и с необходимото качество.

Оценката на технологичността се извършва съобразно общите изисквания към конструкцията на отливките. При анализа е необходимо да се определи конструктивният тип на детайла (до коя основна геометрична форма се доближава), дебелината на стените и тяхната равномерност, наличието на плавни преходи между отделните елементи, закръгленията и технологичните наклони.

Особено важно изискване е осигуряването на равномерна дебелина на стените, тъй като значителните разлики в дебелината могат да доведат до неравномерно охлаждане, вътрешни напрежения и образуване на дефекти.

В таблица 2.5 са посочени препоръчителните минимални дебелини на стените за отливки от основните леярски сплави. При проектирането на отливката дебелината на стената трябва да бъде по-голяма от минимално препоръчителната стойност.

Таблица 2.5. Минимални дебелини на стените на отливки от различни сплави

Материал	Дребни, mm	Средни, mm	Едри, mm
Сив чугун	3-5	5-8	10-15
Стомана	8-10	12-15	16-25
Ковък чугун	3-5	6-8	—
Медни сплави с калай (бронз)	3-5	5-7	—
Медни сплави без калай	5-7	7-12	—
Алуминиеви сплави	3-5	6-8	—

Забележка: Тези стойности са препоръчителни за осигуряване на добра запълняемост на формата. При конкретен проект трябва да се съобразите и с класа на точност на отливката съгласно [БДС ISO 8062](#).

Следва да се има предвид, че препоръките за изменение на конструкцията се нанасят в чертежа на детайла, докато технологичните изменения представляват временни технологични елементи, които се отстраняват от отливката след нейното изработване.

При изработването на отливки в еднократни форми е необходимо да се анализира влиянието на конфигурацията на детайла върху леярската

технология. При оценката на технологичността следва да се предложат конструктивни изменения или въвеждане на технологични елементи (усилващи ребра и др.), които да осигурят формоване с минимални трудови разходи. Целта е използването на опростена моделна екипировка - по възможност без отделяеми части, с минимален брой сърца и оптимизиран брой делителни повърхнини.

Когато се предвижда детайлът да се изработва чрез специални методи на леене, освен общите изисквания към отливката следва допълнително да се анализира нейната конструкция от гледна точка на особеностите на съответния метод на леене.

2.5.1. Проектиране на отливката

Проектирането на отливката и разработването на леярската технология представляват един от най-важните етапи от технологичния процес. На този етап се определят основните параметри на производството, които влияят върху качеството, точността и икономичността на получената отливка.

Проектирането включва следните основни задачи:

- избор на метод за изработване на леярската форма;
- определяне на положението на отливката във формата;
- определяне на мястото на разделителната повърхност;
- определяне на конфигурацията и размерите на модела и сърцевата кутия;
- определяне на положението и оразмеряването на леяковата система;
- разработване на леярски чертеж и съставяне на технологична документация.

При проектиране на отливката и леярската форма отделните елементи на технологията са взаимосвързани. Например при определяне на положението на отливката във формата следва да се съобразят разделителната повърхност, разположението на сърцата и начинът на подаване на металната стопилка. Поради това често се налага итеративен подход, при който отделни решения могат да бъдат коригирани дори след първоначалното разработване на технологичния процес.

Проектирането на отливката е един от най-важните етапи в леярската технология, тъй като чрез правилно конструктивно решение се определят качеството, якостта, технологичността и себестойността на детайла. На този етап се формира конструкцията на бъдещата отливка, като се отчитат особеностите на леярския процес, свойствата на използваната сплав и условията за последваща механична обработка.

Проектирането включва система от принципи и изисквания, които осигуряват:

- лесно формоване;
- равномерно запълване на леярската форма;
- правилно охлаждане и кристализация на метала;

- получаване на отливка без вътрешни и повърхностни дефекти.

При проектирането на отливката е необходимо да се спазват следните основни изисквания:

- отливката трябва да има възможно най-проста външна форма с минимален брой ребра, издатъци и вътрешни кухни;
- конструкцията трябва да осигурява необходимите експлоатационни характеристики (якост, твърдост и др.) при зададена маса и клас на точност;
- да се отчита взаимодействието между отливката и леярската форма с цел осигуряване на необходимата структура, плътност, механични свойства, размерна точност и качество на повърхността;
- конструкцията трябва да бъде технологична, т.е. съобразена с избрания метод на леене;
- да се предвиди последващата механична обработка и необходимите прибавки;
- материалът на отливката трябва да бъде технологично подходящ и икономически обоснован за съответния процес;
- да се стреми към минимален разход на материал и висока степен на използване на метала;
- отливката трябва да бъде конструктивно компактна; при едрогабаритни изделия може да се предвиди изработка от няколко части.

Двата основни аспекта при проектирането на отливката са *технологичността и точността*. Те представляват основни качествени показатели, които определят ефективността на леярското производство. Степента им зависи от конструктивното решение, избрания технологичен процес и използваната сплав и се регламентира от съвременните стандарти, включително **БДС EN ISO 8062**.

Под понятието *технологичност на отливката* се разбира степента на пригодност на конструкцията за изработване чрез определен леярски процес при минимални разходи на труд, материали и производствени средства. Технологичността не се отнася до конкретен метод на леене, а до възможността изделието да бъде произведено ефективно чрез избраната технология.

Масата на отливката се определя като към масата на готовия детайл се прибавят необходимите прибавки за механична обработка и технологичните допустими отклонения. На практика една и съща отливка може да бъде изработена от различни материали, като при това могат да се изменят някои конструктивни параметри. Всяка промяна на материала обаче трябва да бъде технически и икономически обоснована и да води до подобряване на конструкцията, включително до намаляване на масата при запазване на необходимите експлоатационни свойства.

Промяната на материала оказва съществено влияние върху технологичността на детайла.

Разходите за труд при единично производство на отливки се разпределят приблизително както следва:

- формоване - 30-40 %;
- изработване на сърца - 15-30 %;
- почистване - 25-30 %;
- други операции - 10-25 %.

Най-голям дял от трудоемкостта се пада на формоването и изработването на сърцата. Поради това конструкцията на отливката трябва да осигурява:

- лесно изваждане на модела от формата;
- минимален брой делителни повърхности;
- ограничен брой отделими части и сърца;
- съобразяване с характера на втвърдяване в отделните зони;
- насочена кристализация с цел предотвратяване на свиваеми кухини, порестост и пукнатини.

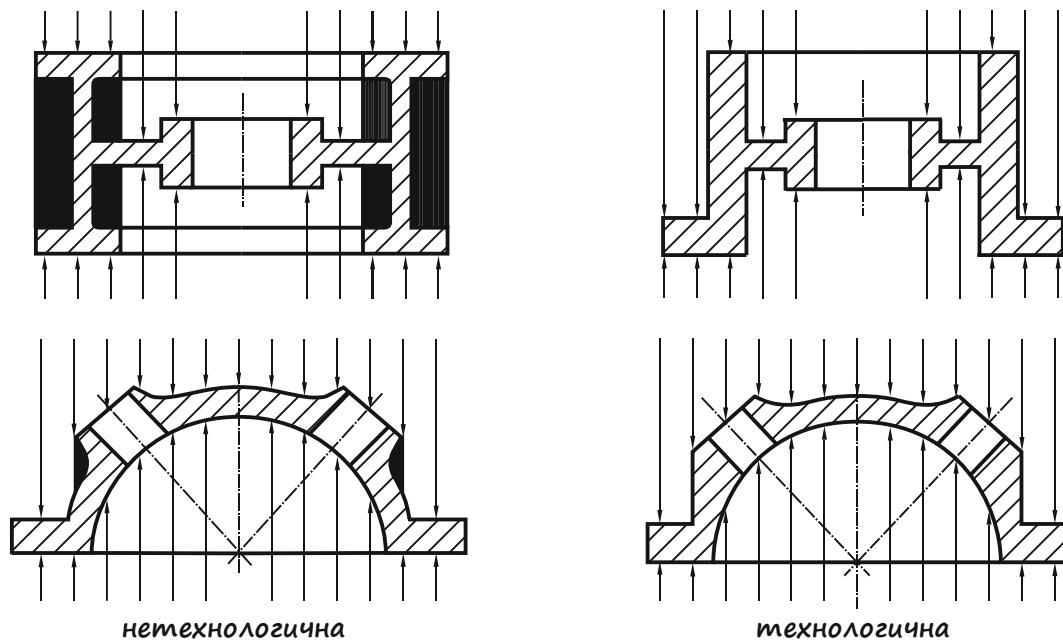
В определени случаи технологичните затруднения могат да бъдат преодолені чрез конструиране на съставни отливки, изработени от няколко части. Това решение се прилага при особено сложни и едрогабаритни изделия.

Изискванията към технологичността зависят от използвания метод на леење. В настоящия раздел се разглеждат основно изискванията при леење в пясъчни форми, като част от тях са приложими и при други леярски процеси.

2.5.1.1 Технологичност на отливките при изработване на леярската форма

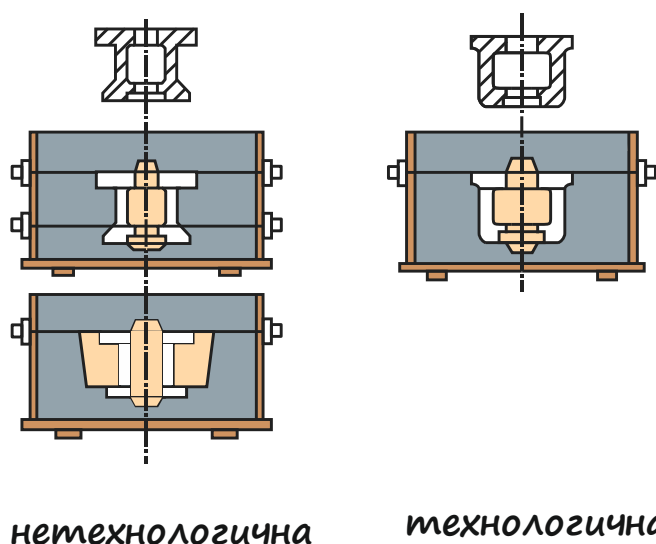
Външната форма на отливката трябва да представлява съчетание от плавно преливащи се контури, което улеснява изваждането на модела от формата и намалява възникването на вътрешни напрежения. Основният стремеж при конструирането е към минимизиране на габаритните размери (особено височината), ограничаване на изпъкналите и вдлъбнатите елементи и използване на възможно най-прости и малобройни делителни повърхности.

Значителни затруднения при формоването възникват, когато конструкцията изисква сложен, многосъставен модел. Те могат да бъдат избегнати чрез прилагане на принципа на паралелните лъчи (фиг. 2.2). При този метод през отливката мислено се прокарва сноп от лъчи, перпендикулярни на делителната повърхност. При неправилно конструирани детайли се появяват „засенчени“ участъци, които възпрепятстват изваждането на модела и налагат използването на сърца или отделими части. Чрез промяна на външната форма и елиминиране на засенчените зони се постига по-добра технологичност, без да се нарушава функционалното предназначение на детайла. Когато изменението на геометрията не е възможно, се допуска използване на отделими части от модела.



Фиг. 2.2. Приложение на принципа на паралелните лъчи и сенките
(Ковачев, 2009)

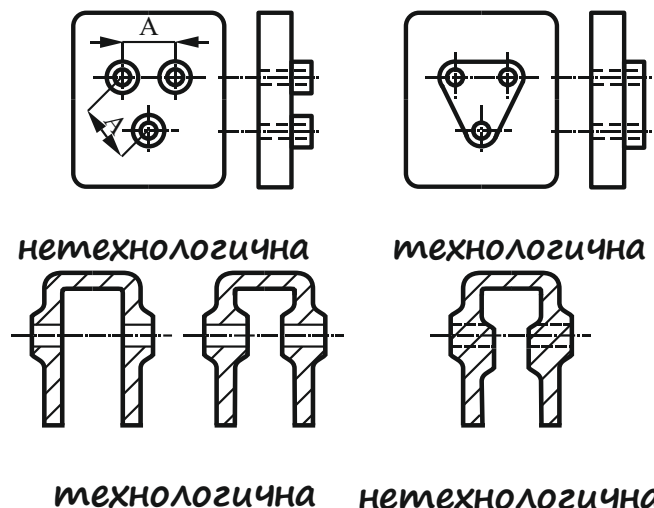
От гледна точка на формоването и повишаване на точността броят на сърцата трябва да бъде минимален. При тяхното проектиране следва да се избягва използването на отделими части от сърцевите кутии. Това повишава точността, производителността и намалява разходите за почистване и механична обработка. Закрепването на сърцата трябва да бъде просто и надеждно. Препоръчва се избягване на подпори, а сърцевите марки да бъдат достатъчно големи за осигуряване на стабилност и отвеждане на газовете (фиг.2.3).



Фиг. 2.3. Подобряване на конструкциите чрез изменение формата на сърцата

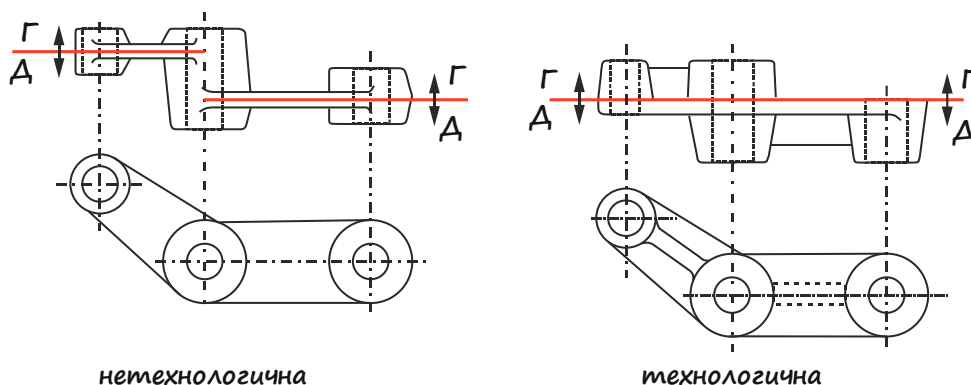
Особено внимание трябва да се обръща на така наречените „пъпки“ и локални удебелявания по стените на отливките. Те усложняват

формоването, изискват отделими части и могат да способстват за образуване на дефекти като шупли и всмукнатини. Не се препоръчва разполагането на пъпки едновременно върху вътрешната и външната повърхност. При използване на сърца е целесъобразно удебеляванията да се разполагат от вътрешната страна и при възможност да се обединяват в общо конструктивно удебеление, разположено в делителната линия (фиг. 2.4).



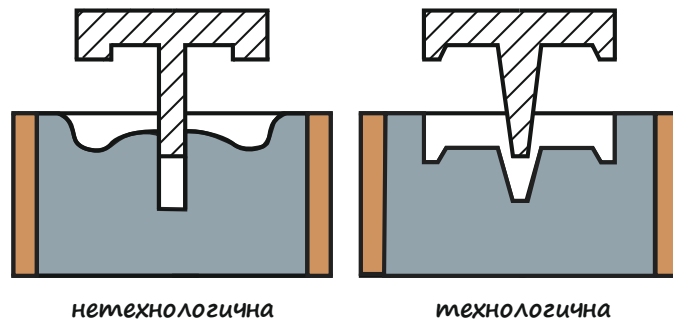
Фиг. 2.4. Разположение на пъпки и удебелявания на стените

Броят на делителните повърхности трябва да бъде минимален и по възможност те да бъдат плоски (фиг. 2.5). Всяка допълнителна делителна повърхност усложнява формата, изисква допълнителна екипировка и повишава производствените разходи. Желателно е основният контур на отливката да се оформя в едната полуформа, а малките изпъкнали елементи – в другата, или при възможност контурът да бъде разположен само от едната страна на делителната линия.



Фиг. 2.5. Опростяване на делителната линия

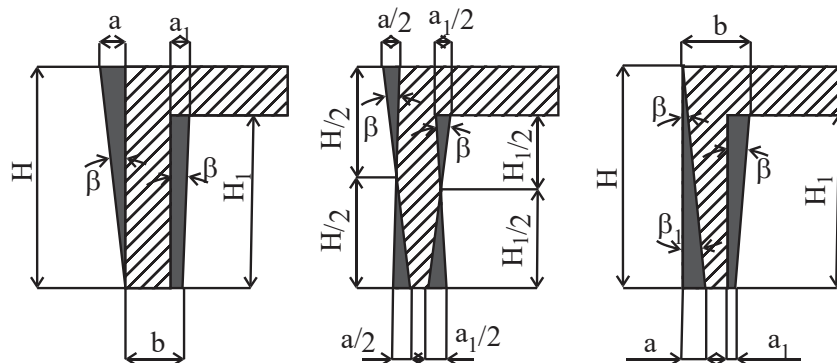
Отливките трябва да бъдат проектирани с формовъчни наклони върху повърхностите, перпендикулярни на делителната равнина. Те улесняват изваждането на модела и сърцата и в определени случаи подпомагат насочената кристализация. Формовъчните наклони се прилагат, когато не са предвидени конструктивни наклони. При ръчно и машинно формоване те се изпълняват както върху външните, така и върху вътрешните повърхности (фиг. 2.6) (Ковачев, 2009).



Фиг. 2.6. Леярски наклони

В зависимост от функционалното предназначение на повърхностите се различават три основни типа изпълнение (фиг. 2.7):

- Тип I - за обработваеми повърхности; наклонът се реализира в рамките на прибавките за механична обработка;
- Тип II - за необработваеми повърхности без контакт с други детайли;
- Тип III - за необработваеми повърхности в контакт с други елементи.



Фиг. 2.7. Основни типа леярски наклони (Ковачев, 2009)

В практиката формовъчните наклони могат да доведат до изменения в геометрията на детайла, поради което е препоръчително те да бъдат предвидени още на етап конструиране.

Ъгълът на наклона β зависи от височината на съответната повърхност h , а при вдлъбнати участъци - от тяхната дълбочина h_δ и отношението $\frac{d}{h_\delta}$. (където d е диаметърът или най-малката ширина). Стойността на ъгъла обикновено се изменя в границите от $0^\circ 15'$ до 3° в зависимост от условията на формоване.

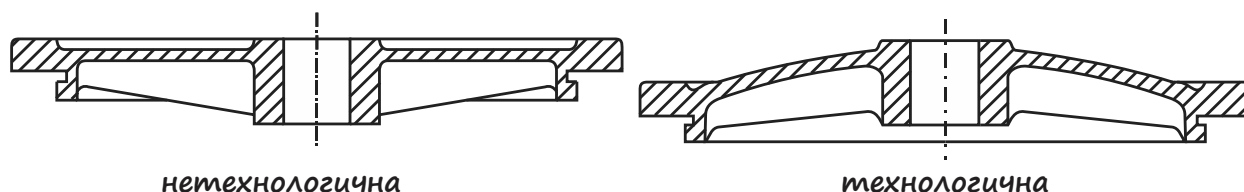
2.5.1.2 Технологичност на отливките при запълване на формата

Бездефектни отливки се получават, когато конструкцията им е съобразена с изискванията за правилно и равномерно запълване на леярската форма. Формата трябва да се запълва така, че да се осигури плавно движение на металната стопилка, ефективно отвеждане на въздуха и газовете и минимизиране на риска от образуване на дефекти.

Нежелателно е наличието на големи плоски повърхности, разположени хоризонтално по време на запълване, тъй като те затрудняват

излизането на въздуха от формата. В тези случаи стопилката повишава нивото си бавно, въздушните и газовите включения могат да останат задържани и да доведат до образуване на газови шупли. Допълнително се увеличава вероятността от шлакови включения, недоливане, несливане на металните фронтове и повърхностни дефекти.

За подобряване на запълването се препоръчва, когато е възможно, плоските повърхности да се заменят с конусни или сферични форми (фиг. 2.8), които улесняват потока на стопилката и подпомагат отвеждането на газовете.



Фиг. 2.8. Технологичност на отливката, съобразена с правилното запълване на формата с метал

Желателно е в конструкцията да се избягват резки изменения в сечението и внезапни промени в посоката на стените, тъй като те нарушават равномерното движение на металната стопилка. Особено неблагоприятни са вдлъбнатините и локалните изпъкналости, при които може да се образуват въздушни джобове и незапълнени зони.

Когато подобни елементи не могат да бъдат избегнати по конструктивни причини, следва да се предвиди ефективно отвеждане на газовете и шлаката чрез подходяща лежкова система. Същевременно е необходимо металостатичното налягане, създадено от запълнения леяк и захранващите елементи, да бъде достатъчно за компенсиране на свиването и осигуряване на плътност.

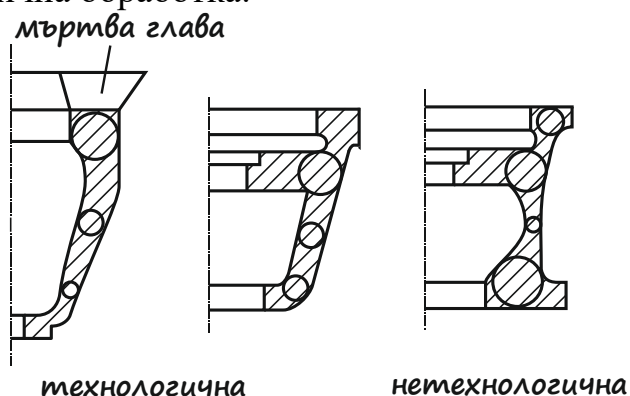
При проектиране на отливката е препоръчително отговорните и обработваеми повърхности да се разполагат в долната част на формата. В тази зона вероятността от образуване на газови шупли, шлакови включения и други леярски дефекти е по-малка, а получената структура е по-плътна и по-равномерна.

2.5.1.3 Технологичност на отливките според условията на кристализация

При проектирането на отливки съществено значение имат условията на кристализация на метала, тъй като те определят вероятността от възникване на дефекти като всмукнатини, вътрешни напрежения и пукнатини. Основните принципи, които следва да се спазват, са насочена и едновременна кристализация ([Ангелов, 1988](#)).

Насочената кристализация се осигурява чрез подходящо конструктивно оформяне на отливката, при което втвърдяването протича последователно - от по-тънките към по-дебелите сечения, насочено към зоните на подхранване (мъртви глави). Това може да се постигне чрез постепенно изменение на дебелината на стените (фиг. 2.9). Следва да се има

предвид, че подобно решение може да доведе до увеличаване на масата на отливката, поради което често се реализира чрез рационално използване на прибавките за механична обработка.



Фиг. 2.9. Отливка с насочена кристализация (Ковачев, 2009)

Когато конструкцията на детайла не позволява осигуряване на насочена кристализация чрез геометрията, се прилагат допълнителни технологични средства – охладители, топлоизолиращи вложки и други. В отделни случаи е целесъобразно отливката да бъде проектирана като съставна конструкция с последващо съединяване.

Дебелината на стените трябва да бъде съобразена както с експлоатационните изисквания (якост, херметичност), така и с леярските свойства на сплавта, особено нейната тънколивкост. За различните материали съществуват минимално допустими дебелини на стените, които гарантират надеждно запълване на формата (табл. 2.6).

Таблица 2.6. Най-малка дебелина на стената на отливката

Вид сплав	Най-малка дебелина на стената, mm		
	За малки отливки с маса до 2 kg	За средни отливки с маса от 6-8 kg	За големи отливки с маса над 50 kg
Сив чугун	3-4	8-10	12-15
Ковък чугун	3-4	6-8	-
Стомана	5-7	10-12	5-20
Бронз - калаен	3-5	5-8	-
Алуминиеви сплави	3-5	5-8	-
Магнезиеви сплави	3-5	5-7	-

При отливки от сив чугун и стомана минималната дебелина може да се оценява чрез приведен габаритен размер N , който отчита геометричните размери на отливката и се изчислява по формулата (Ангелов, 1988):

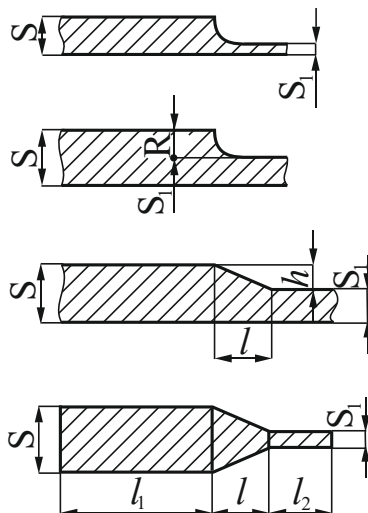
$$N = \frac{2l+b+h}{3}, m, \quad (2.1)$$

а за кутиеобразни отливки:

$$N = \frac{2l+b+h}{4}, m \quad (2.2)$$

където: l , b и h са съответно дължината, широчината и височината на отливките.

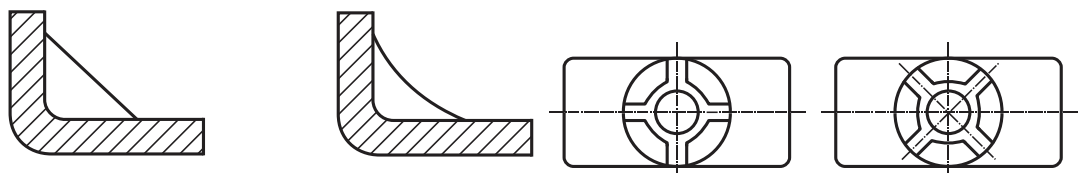
Едно от основните изисквания при конструиране на отливки е осигуряването на плавни преходи между сечения с различна дебелина (фиг. 2.10). Резките преходи водят до неравномерно охлаждане и създават предпоставки за възникване на вътрешни напрежения и дефекти. Поради това преходите се изпълняват със закръгления или клиновидни участъци, като съотношението между дебелините на стените не трябва да бъде прекалено голямо.



Фиг. 2.10. Преходи от тънки към плътни стени (Ковачев, 2009)

Съотношението между дебелините $s:s_1$ не трябва да надхвърля 4:1. Когато $s/s_1 < 2$, преходът се реализира с радиус на закръгление $R=(0.3\div 0.4)s$. При наличие на външни натоварвания преходът се изпълнява като клиновиден, като дължината l удовлетворява условието: $\frac{s-s_1}{l} = \frac{1}{4} \div \frac{1}{5}$. При големи разлики в дебелините се препоръчва двустранен клиновиден преход.

За повишаване на якостта и технологичността отливките често се усилват с ребра (фиг. 2.11). Тяхната дебелина обикновено е по-малка от дебелината на основната стена, което осигурява равномерно охлаждане и намалява вероятността от образуване на дефекти. Съединяването на ребрата с основните стени трябва да се извършва чрез плавни закръгления, без локално натрупване на материал.

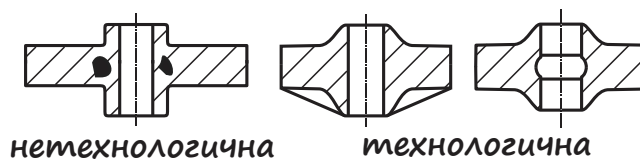


нетехнологична технологична технологична нетехнологична

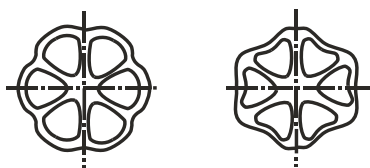
2.11. Усилващи ребра

В конструкцията на отливките могат да присъстват и други елементи като спици, фланци, отвори, удебелявания за резбови съединения и шпилки. Тяхната форма и разположение също оказват съществено влияние върху възможността за възникване на леярски дефекти и трябва да бъдат

проектирани съобразно технологичните изисквания. Например при конструиране втулки с фланци (фиг. 2.12), ако не се вземе под внимание свиването на метала, в местата на съединяване се образуват термични възли и се появяват всмукнатини. В случай, че не се вземат под внимание вътрешните напрежения при кристализация на металната стопилка се получават напрежения на натиск или опън, които водят до изкривяване или пукнатини в отливките (фиг. 2.13).



Фиг. 2.12. Втулки с фланци



Фиг. 2.13. Шайби

2.5.1.4 Технологичност при почистване на отливките

Почистването на отливките поглъща от 10 до 35% от целия вложен труд за тяхното изработване. Условието на труд при този етап са едни от най-тежките в лелярското производство. Поради това още при конструирането на отливката трябва да се предвидят възможности за лесно избиване на сърцата, почистване на повърхността от пригар и премахване на леяковата система, отливъците, израстъците и други технологични остатъци.

Външните и вътрешните повърхности трябва да бъдат удобни и достъпни за зачистване и изсичане на израстъци. Кухините трябва да имат отвори за избиване на сърцата, изваждане на арматурата и за промиване в хидрокамерите. Тези отвори трябва да бъдат достатъчно големи, за да може с прости инструменти да се достигне до местата за почистване.

Дребните отливки, почиствани в барабанни дробометни машини, трябва да бъдат с проста форма и без тънки изпъкнали части, които могат да се повредят или отчупят от ударите при почистване.

При конструирането и разполагането на леяковата система и мъртвите глави трябва да се предвиди възможност за лесното им отстраняване, както и за последващо зачистване на местата им върху отливката. Затова обикновено те се разполагат върху обработваеми и леснодостъпни места, а формата на напречното им сечение трябва да е трапецовидна или овална.

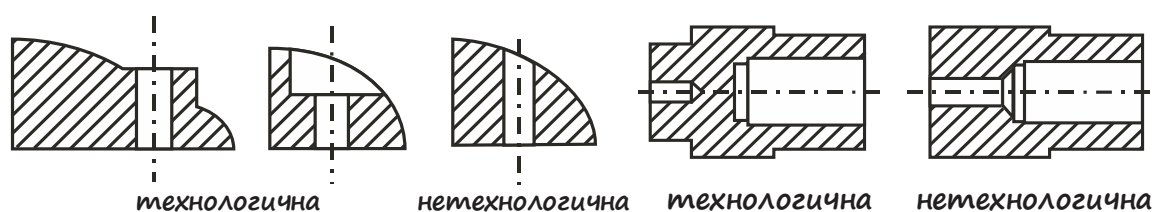
2.5.1.5 Технологичност при механична обработка

В стремежа да бъдат спазени всички изисквания за технологичност на отливките, трябва да се вземе под внимание и изискванията за проста, лесна

и икономична механична обработка (Ангелов, 1988).

Конструкторът трябва да се стреми към минимизиране на броя и общата площ на обработваемите повърхности. За избягване на механичната обработка върху големи равнини, конфигурацията на отливката следва да се оптимизира, като се предвидят само отделни удебелявания или челни ръбове. При едрогабаритни цилиндрични детайли е целесъобразно да се обработват само на центриращите пръстени на двата края на детайла.

При конструирането на отливки с отвори от съществено значение е осигуряване на точно водене на режещия инструмент по време на механичната обработка. За тази цел е необходимо повърхнината, в която се пробива отворът, да бъде перпендикулярна на оста на свредлото. Това предотвратява неговото изкривяване или счупване и гарантира необходимата точност на размерите и геометричната форма. На фиг. 2.14 са илюстрирани примери за рационални и нерационални конструктивни решения.



Фиг. 2.14. Технологичност на отливката при механична обработка
(Ковачев, 2009)

2.5.2. Точност на отливките

Точността на отливката е количествена характеристика и представлява степента, до която действителните размери, форма и взаимно разположение на елементите на отливката съответстват на зададените в чертежа стойности, без или с минимална механична обработка.

В съдържанието на понятието точност на отливките влизат точността в размерите, гладкостта на повърхността, точността в геометричната форма, прибавките за механична обработка и отклонения в масата. Богатото съдържание на това понятие определя и неговата зависимост от много фактори, по-важни от които са:

- точност на моделите и кутиите за сърца;
- точност на сърцата и тяхното изменение в процеса на изработване и леене;
- точност на формата е нейното изменение при изработване, сушене и заливане;
- точност при залагането на формите;
- изменения на метала при кристализация - свиване;
- изменения на метала след изработване на отливката - при термична обработка и стареене;

- начин на леење - в пясъчна форма, в кокили, под налягане, в черупкови форми и др.

Размерната точност се характеризира чрез:

- номинален размер;
- допустимо отклонение;
- действителен размер.

В съвременната практика точността на отливките се определя съгласно [БДС EN ISO 8062](#), който въвежда система от класове на размерна точност (СТ - Casting Tolerance).

Основните стъпки при определяне на точността са:

- определяне на номиналния размер на отливката, зададен по чертеж;
- избор на метод за леење - чрез него се определя постижимата точност на отливката. Най-ниска точност се постига при леење в пясъчно-глинести форми, а най-висока - при леење под налягане.
- избор на клас на размерна точност (СТ) в зависимост от метода на леење - тези класове регламентират допустимите размерни отклонения и са в пряка връзка с необходимите прибавки за механична обработка при отливки от сив чугун и стомана. Изборът на по-висок клас на точност води до по-малки допустими отклонения и по-малки прибавки за механична обработка, но изисква по-висока технологична дисциплина и по-сложна леярска технология;
- определяне на допустимите отклонения ($\pm\Delta$) съгласно таблиците в [БДС EN ISO 8062](#), за даден номинален размер и избран СТ и по зависимостта:

$$\text{Допустим размер} = D_{\text{ном}} \pm \Delta, \quad (2.3)$$

където: $D_{\text{ном}}$ – номинален размер; Δ – допустимо отклонение по СТ клас.

- Отчитане на свиването на материала - при проектиране на модела се отчита свиването на сплавта, което не влиза в допустимите отклонения, а се компенсира чрез прибавка за свиване;
- Проверка на получения действителен размер (D_d) на отливката с изчисления. Ако е изпълнено условието: $D_{\text{ном}} - \Delta \leq D_d \leq D_{\text{ном}} + \Delta$ се счита, че отливката отговаря на изискванията за точност на размерите.

2.5.3. Прибавки за механична обработка

След получаването на отливката в повечето случаи се налага последваща механична обработка, при която се сменя слой метал, наречен *прибавка за механична обработка*. Отнетият във вид на стружки метал обикновено представлява 15-35%, а в някои случаи може да достигне и до 60-80% от масата на отливката. Дебелината на слоя прибавка за механична обработка е от няколко десети от милиметър при точните методи за леење до 15-20 mm, а понякога и повече при производството на големи отливки ([Ангелов, 1988](#)).

Прибавката за механична обработка обикновено се разпределя, както следва: 45% за груба обработка, 30% за полукристала и 25% за окончателна обработка.

Общата прибавка за механична обработка P е сборът от прибавките за груба обработка P_r , която зависи от леевската технология, и прибавката за окончателна (чиста) обработка P_c , която зависи от механичната технология:

$$P = P_r + P_c = P_p + P_n + P_d + P_y + P_i, \quad (2.4)$$

където: P_p е прибавката за компенсиране на разсейването на размерите, равна на полуразликата на прибавката на отливката и на детайла след груба обработка; P_n - прибавката за изравняване на повърхностната микронеравност, която в зависимост от технологичния процес е 25-900 μm ; P_d - прибавка за дълбочина на дефектния слой, който за пясъчни форми е 150 - 250 μm , а за метални 250-300 μm и за отливки, подлежащи на термична обработка 500-600 μm ; P_y - прибавка за компенсиране на грешките от установяването при обработката, зависещи от качеството на повърхността - за обикновени форми 300-600 μm , за метални 200-500 μm и за черупкови 100-250 μm ; P_i - прибавката, компенсираща изкривяването, което е до 3 mm на 1m дължина на отливката.

Тя се определя съгласно [БДС EN ISO 8062](#), който въвежда класове на прибавки (МА - Machining Allowance), като се отчитат:

- Клас на размерна точност (СТ);
- Метод на лееене;
- Материал на отливката;
- Габаритни размери;
- Качество на повърхността;
- Вид и обем на механичната обработка.

Според съществуващия стандарт МА класовете, които задават минималната прибавка за механична обработка са посочени в таблица 2.7.

Таблица 2.7. Класове на прибавки за механична обработка съгласно [БДС EN ISO 8062](#)

МА клас	Вид прибавка	Метод на лееене	Приложение
МА 1	Минимална	Лееене под налягане, лееене по стопяеми модели, кокилно лееене	При отливки с малка и средна сложност
МА 2	Малка	Кокилно лееене, лееене по стопяеми модели, лееене в черупкови форми	При корпусни детайли със средна сложност
МА 3	Средна	Полуавтоматично или ръчно формоване в пясъчно-глинести форми	При универсални отливки
МА 4	Голяма	Ръчно формоване в пясъчно-глинести форми	Масивни детайли; отливки без високи изисквания към точността
МА 5	Много голяма	Ръчно формоване на едрогабаритни отливки	

Последователността за определяне на прибавката за механична обработка е:

- определяне на обработваемите повърхности (тези, които подлежат на последваща механична обработка);
- избира се клас на размерна точност на отливката (СТ);
- в зависимост СТ и от метода на леење се избира класа на прибавката (МА);
- с помощта на [БДС EN ISO 8062](#) се определя минималната прибавка Z . Тя включва:

$$Z = \Delta_{\text{отливка}} + h_{\text{повърхност}} + \Delta_{\text{дефекти}}, \quad (2.4)$$

където: $\Delta_{\text{отливка}}$ - допуск на отливката. $h_{\text{повърхност}}$ - неравности и грапавост, $\Delta_{\text{дефекти}}$ - възможни дефекти и деформации.

- прави се проверка за технологичност, с която се осигурява: достатъчна стабилност, възможност за настройка на инструмента, възможност за отстраняване на дефекти.

2.5.4. Грапавост на повърхността

Повърхността на отливките не е гладка и чиста. Грапавостта на отливките се характеризира с някои особености. Преди всичко гладкостта на летите повърхности се определя от съвкупността на грапавини с различни стъпки, понякога доста големи. Тези грапавини не са ориентирани в пространството, върховете и впадините им са хаотично разположени, а формата и размерите им са различни. На някои места се срещат изпъкналости и вдлъбнатини, които рязко се отличават от съседните участъци.

При всички технологични процеси на изработване на отливки качеството на повърхността им зависи от качеството на повърхността на леярската форма, от способността на стопилката да възпроизвежда повърхността на формата и от процеса на взаимодействие между метала и формата.

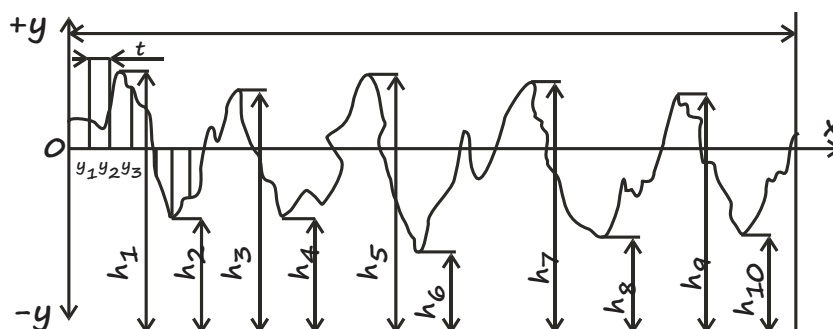
Главният фактор за качеството на повърхността на отливките е взаимодействието между метала и формата. Неговото влияние може да се изменя по различни начини - чрез обмазки, бои, пудри, употреба на специални материали за формите и др. За подобряване на качеството на лятата повърхност при пясъчни форми се върви по два пътя - чрез изменения на газовия режим на формата и чрез изменения на физико-химичните свойства на метала и формата, които определят проникването на стопилката в порите на формовъчната смес.

Грапавостта и повърхността на отливките без пригар или след неговото почистване се оценява по височината R_z на изпъкналостите и впадините на профила, измерени от линия, успоредна на средната линия, и се изразява с линейни единици (фиг.2.15) ([Ангелов, 1988](#)):

$$R_z = \frac{(h_1 + h_3 + \dots + h_9) - (h_2 + h_4 + \dots + h_{10})}{5} \quad (2.5)$$

или със средно аритметично отклонение на профила R_a на l точки от средната линия:

$$Ra = \frac{\frac{1}{l} \sum y_i}{l} \quad (2.6)$$



Фиг. 2.15. Увеличен профил на повърхността на отливки

Колкото повече измервания се извършат, толкова по точно се определя R_a . За означаване на грапавините на повърхността на отливките се използва стандартът за грапавост на повърхностите, обработени механично, в който грапавостта се определя по височина на микронеравностите. Грапавостта на повърхностите при различните начини на формоване се изменя в определени граници в зависимост от габаритния размер на отливките и вида на метала.

2.5.5. Отклонения от геометричната форма

Отклоненията от геометричната форма на отливките възникват вследствие на деформации на модела, леярската форма и самата отливка, както и в резултат от неточното събиране на формите. Практически се деформират само топимите и дървените модели. При тях е нужен симетричен контрол, складиране при условия на подходяща влажност на въздуха, покриване с водонепроницаеми слоеве, замяна на дървените модели или части от тях са с метални и др.

Деформацията на формата и сърцата настъпва при изваждане на модела или на сърцето от кутията, при транспорт и сушене. Механизирането на процеса на изваждане на модела и използването на приспособления при транспорт и сушене спомагат за значителното намаляване на деформациите. Често това може да се постигне и чрез използване на материали с малък коефициент на термично разширение или допълнително уякчаване на модела и формата (Ангелов, 1988).

Отстраняването на неточностите във формата на отливките, което се дължи на операциите при събиране на формите, се постига чрез използване на приспособления за залагане на сърцата и събиране на формата, замяна на сурови сърца със сухи и др.

Голямо значение за геометричната форма на отливките имат характера на втвърдяване на метала, условията за свободно или затруднено свиване, скоростта на охлаждане, насочената кристализация и др.

Съгласно действащите стандарти [БДС EN ISO 1101](#), отклоненията от геометричната форма на цилиндричните повърхнини на отливките се подразделят на отклонения от правилната форма - кръглост (овалност), конусност и праволинейност, както и отклонения от правилното разположение - съостност, радиално биене и паралелност.

2.5.6. Отклонения в масата

Отклоненията в размерите на отливките води и до отклонения в тяхната маса. За определяне на отклонението в масата се вземат номиналната маса на отливката (изчислена по чертеж), масата на еталон или средната маса на една партия. В номиналната маса са включени и прибавките за механична обработка.

Граничните отклонения на масата на отливките се определят съгласно действащите европейски и международни стандарти за лелярско производство, като [БДС EN 1559](#) и [БДС EN ISO 8062](#), в зависимост от класа на размерна точност (СТ) и номиналната маса на отливката. Долните отклонения на масата произтичат от допустимите отклонения на размерите или не се регламентират изрично.

2.6. Разработване на чертеж на отливката

Чертежът на отливката представлява чертеж на детайла, върху който са нанесени всички необходими лелярски технологични указания. Чрез него се определят основните решения, свързани с избора на вид лелярска форма, метод на формоване и моделна екипировка.

Този чертеж служи като основа за конструиране на моделите, сърцевите кутии, контролните приспособления, както и за разработване на технологичните процеси на леење и последваща механична обработка.

Разработването на чертежа на отливката включва определянето на редица основни параметри, като ([Ковачев, 2009](#)):

- положението на отливката във формата;
- делителна повърхнина;
- прибавки за механична обработка;
- лелярско свиване;
- лелярски радиуси на закръгление;
- гранични отклонения на размерите;
- технически изисквания.

2.6.1. Положение на отливката във формата

Определянето на положението на отливката във формата при заливане е един от най-важните етапи при разработването на лелярската технология, тъй като оказва съществено влияние върху качеството на получената отливка, условията на формоване и вероятността от възникване на дефекти.

Предвид многообразието на отливките по конфигурация, размери и сложност, изборът на тяхното положение във формата се основава на редица технологични изисквания и практически правила.

Преди всичко положението на отливката трябва да осигурява възможност за насочено втвърдяване на метала. Това означава масивните части на отливката да бъдат разположени така, че да могат ефективно да се подхранват с течен метал чрез мъртви глави, което предотвратява образуването на шупли и всмукнатини.

Съществено изискване е отговорните повърхнини на отливката, особено тези, които подлежат на механична обработка или към които се предявяват високи изисквания за плътност и херметичност, да се разполагат в долната част на формата. Това се налага поради факта, че в горните зони на отливката се концентрират дефекти като газови шупли, неметални включвания и дефекти в следствие от свиване.

При отливки от типа на втулки, тръби и подобни кухи детайли се препоръчва вертикално разположение при заливане. По този начин се осигурява равномерно запълване на формата, по-добро отвеждане на газовете и възможност за концентриране на дефектите в зони, които могат да бъдат отстранени при последваща обработка. В случаите, когато това противоречи на изискванията за опростяване на формоването, може да се прилага компромисно решение чрез завъртане на формата преди заливане.

Тънкостенните участъци на отливката следва да се разполагат в долната част на формата или в наклонено положение, което улеснява запълването им и намалява риска от недоливане. Големи хоризонтални повърхнини в горната част на формата е препоръчително да се избягват, тъй като могат да доведат до разрушаване на формата и образуване на пясъчни включвания.

Положението на отливката трябва също така да осигурява спокойно и равномерно запълване на формата, без разрушаване на нейните стени и сърцата от струята на метала. В тази връзка е необходимо да се осигури възможно най-кратък път на метала от леяковата система до кухината на формата.

Особено внимание се отделя на правилното разполагане и закрепване на сърцата. Те трябва да бъдат устойчиво фиксирани, така че да не се деформират или изместват под въздействието на собственото си тегло или подемната сила на течния метал. Желателно е усилията да се поемат по направление на сърцевите марки.

Необходимо е също така да се осигури ефективно отвеждане на газовете, като отливката се разполага по начин, който позволява тяхното излизане предимно в горната част на формата.

В практиката често възникват противоречия между отделните изисквания при избора на положение на отливката. В такива случаи се прави компромисно решение, като приоритет се дава на условията, които осигуряват получаването на качествена отливка, дори това да води до известно усложняване на технологичния процес.

2.6.2. Делителна повърхнина на формата, модела и кутиите за сърца

Определянето на делителната повърхнина на формата, модела и

сърцевите кутии е съществен етап при разработването на чертежа на отливката. Тя осигурява възможност за изваждане на модела от формата, за правилно сглобяване на полуформите и за точно оформяне на отливката и сърцата.

Делителната повърхнина най-често се избира като равнина, която може да бъде хоризонтална, вертикална или сложна, в зависимост от конфигурацията на отливката. В чертежа тя се представя като делителна линия. Правилният избор на тази повърхнина е от особено значение, тъй като влияе върху сложността на формоването, точността на отливката и възможността за възникване на дефекти.

При определянето на делителната повърхнина трябва да се спазват следните основни изисквания:

- да осигурява лесно изваждане на модела от формата и на сърцата от сърцевите кутии, без разрушаване на формовъчната смес;
- да бъде плоска и с възможно най-проста геометрична форма, което улеснява изработването, довършването и контрола на моделната екипировка;
- броят на делителните повърхнини трябва да бъде минимален, тъй като увеличаването им води до усложняване на формоването, намаляване на точността и увеличаване на вероятността от дефекти;
- да осигурява минимален брой отделяеми части на модела. При възможност те се избягват, особено при машинно формоване, като се заменят със сърца;
- броят на сърцата да бъде минимален. При възможност няколко сърца се обединяват в едно, с което се опростява процеса и се повишава надеждността;
- да бъде избрана така, че основната част на отливката да се разполага в долната полуформа. Това осигурява по-добро уплътняване, по-голяма устойчивост и намалява риска от разместване;
- желателно е отговорните и базовите повърхнини на отливката да се разполагат в една и съща полуформа, за да се гарантира тяхната взаимна точност и да се избегнат размествания;
- делителната повърхнина не трябва да пресича базови и функционално важни повърхнини, тъй като това би довело до поява на леярски шевове и затруднения при последваща обработка;
- трябва да осигурява добро уплътнение на формата и да предотвратява изтичане на метал, както и образуването на леярски шевове, мустаци и размествания;
- да позволява удобно разполагане, закрепване и контрол на сърцата, като по възможност те се монтират в долната полуформа;
- да осигурява възможност за ефективно отвеждане на газовете от формата и сърцата;

- при възможност делителните повърхнини на формата и сърцата трябва да съвпадат, а леярските наклони да бъдат еднакви, което повишава точността на отливката.

В практиката изборът на делителната повърхнина често е свързан с компромис между различни изисквания. В тези случаи се търси решение, което осигурява необходимото качество на отливката при минимална сложност на технологичния процес.

2.6.3 Определяне конфигурацията и размерите на модела и сърцевите кутии

При разработването на чертежа на отливката особено важно значение има определянето на конфигурацията и размерите на модела и сърцевите кутии. Моделът представлява елемент от моделната екипировка, който служи за оформяне на кухината на леярската форма и възпроизвежда външната форма на бъдещата отливка.

Размерите на модела се различават от размерите на готовата отливка, тъй като при проектирането трябва да се вземат предвид технологични фактори като леярското свиване на метала, прибавките за механична обработка и формовъчните наклони. По този начин се осигурява получаването на отливка с необходимите геометрични размери след охлаждане и последваща обработка.

Конструкцията на модела трябва да бъде съобразена с начина на формоване, конфигурацията на отливката и избраната делителна повърхнина на формата. В зависимост от сложността на детайла моделите могат да бъдат едноделни или многоделни, като при по-сложни конструкции се използват отделни части, които улесняват изваждането на модела от формата.

Сърцевите кутии служат за изработване на леярските сърца, чрез които се оформят вътрешните кухини и отвори на отливката. Конструкцията на сърцевите кутии трябва да осигурява точни размери и стабилност на сърцата, както и лесното им изваждане след оформянето им. Освен това те трябва да позволяват удобно сглобяване на сърцата във формата и надеждното им фиксиране по време на заливането.

Правилното съответствие между модела, сърцевите кутии и чертежа на отливката е от съществено значение за получаването на качествени отливки. Това съответствие осигурява точност на формата, правилно разположение на вътрешните кухини и минимизиране на дефектите при лееенето.

2.6.4 Отчитане на леярското свиване при разработване на чертежа на отливката

Както беше разгледано в предходния раздел, при охлаждането и кристализацията на металната стопилка настъпва намаляване на обема и линейните размери, известно като леярско свиване. Това явление оказва съществено влияние върху крайните размери на получената отливка и

трябва да бъде отчетено при разработването на чертежа на отливката и при конструирането на моделната екипировка.

За компенсирание на свиването размерите на модела се увеличават с определена стойност, наречена прибавка за свиване. Тази прибавка се определя в зависимост от вида на използваната сплав, размерите и конфигурацията на отливката, както и от условията на охлаждане.

В практиката за отчитане на леярското свиване се използват специални леярски метри, при които деленията са увеличени спрямо стандартните измервателни мащаби. Чрез тях се осигурява получаването на отливки с необходимите размери след охлаждането на метала.

Правилното отчитане на леярското свиване при разработването на чертежа на отливката е важна предпоставка за постигане на необходимата точност и за предотвратяване на дефекти, свързани с обемни изменения на метала по време на кристализацията.

2.6.5. Определяне на допустимите отклонения и прибавки съгласно БДС EN ISO 8062

След определяне на геометричните и конструктивните параметри на отливката се задават изискванията за точност, допустими отклонения и прибавки за механична обработка. Тези изисквания се определят съгласно стандарта **БДС EN ISO 8062**, който регламентира допустимите отклонения и геометричните допуски за леярски отливки.

За по-ясно разбиране на процеса, определянето на допустимите отклонения и прибавки може да се представи както текстово, така и схематично, чрез следния алгоритъм:

Алгоритъм за проектиране на допустими отклонения и прибавки за механична обработка (БДС EN ISO 8062-3)

Фаза I: Дефиниране на точността

1. *Определяне на клас на размерна точност (DCTG)* - Избира се от таблици в зависимост от метода на леење (пясъчно, в кокила, под налягане) и материала. Означава се като DCTG 1 (най-точно) до DCTG 16.
2. *Назначаване на допустими отклонения на линейни размери* - В зависимост от избрания DCTG и номиналния размер се определят границите на отклонение ($\pm$ mm).
3. *Определяне на клас на геометричен допуск (GCTG)* - В новия стандарт допуските за форма (равнинност, праволинейност) и разположение (паралелност, перпендикулярност) са обединени. Означават се от GCTG 2 до GCTG 8.
4. *Назначаване на допуски за форма и разположение* - Определят се чрез съответните геометрични символи върху чертежа спрямо избрания GCTG.

Фаза II: Технологично оформяне

5. *Определяне на изисквана прибавка за механична обработка (RMA)* - Вместо старите „редове прибавки“, тук се използва терминът RMA

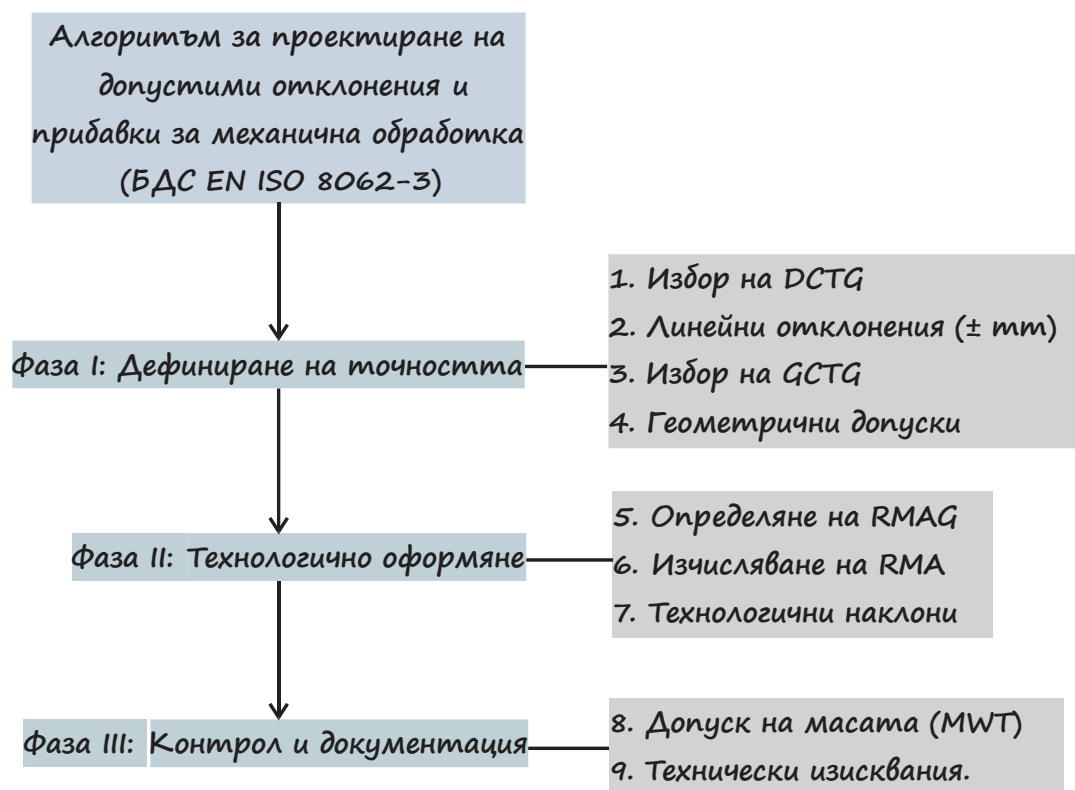
(Required Machining Allowance). Определя се от клас на прибавката (RMAG) - от А до К.

6. *Назначаване на обща прибавка за обработка (RMA)* - Стойността се нанася върху номиналния размер на отливката. Важно: тя трябва да покрива както минималния слой за рязане, така и сумарното отклонение от допуска (DCTG).
7. *Определяне на допуск на масата (MWT)* - Използва се таблица за допустимото процентно отклонение на реалното тегло спрямо теоретично изчисленото.

Фаза III: Контрол и документация

8. *Определяне на технологичните наклони* - Съгласно ISO 10135, наклоните се добавят към повърхнините, успоредни на посоката на изваждане на модела.
9. *Оформяне на техническите изисквания върху чертежа* - Съгласно стандарт БДС EN ISO 8062-3, означението се записва като: „Допуски на отливката - DCTG... - GCTG...”

На Фиг. 2.16 е представен алгоритъмът в три фази, онагледяващ последователността на отделните стъпки при дефиниране на точността, технологично оформяне и контрол на документацията.



Фиг. 2.16. Принципно схемата на алгоритъма за определяне на допустимите отклонения и прибавки съгласно БДС EN ISO 8062

2.6.5 Леярски радиуси на закръгление

При разработването на чертежа на отливката преходите между отделните сечения трябва да се изпълняват плавно, като външните и вътрешните ъгли се закръгляват с подходящи радиуси.

Радиусите на закръгление обикновено се приемат равни на 1/6 до 1/3 от средноаритметичната стойност на дебелините на съединяваните сечения. В практиката се препоръчва използването на стандартизирани стойности на радиусите, например: 1, 2, 3, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30 и 40 mm. Желателно е в рамките на една отливка закръгленията да се изпълняват с един и същ радиус, когато това е конструктивно възможно.

При необходимост технологът може да предвиди закръгления без предварително съгласуване с конструктора в случаите, когато те се отстраняват при последваща механична обработка.

2.6.6. Гранични отклонения на размерите

Качеството на повърхността на отливките, както и граничните отклонения на номиналните размери, зависят от избрания метод за леење и от размерите на самата отливка – колкото отливката е по-голяма, толкова по-големи са допустимите отклонения.

Граничните отклонения се определят според класа на точност на отливките по [БДС EN ISO 8062](#). Те се дават за всеки размер, като се вземат предвид два основни параметъра: най-големият габаритен размер на отливката и номиналният размер, включително прибавката за механична обработка и леярския наклон.

За практическо проектиране се използват ориентировъчни стойности на граничните отклонения, съответстващи на различните класове точност и размери на отливките. Такива стойности позволяват конструкторът и технологът да планират производството и проверката на отливката, без да се налага да се изчисляват поотделно за всеки елемент.

Примерни стойности за гранични отклонения на сиви чугуни от 3 клас на точност са дадени в таблица 2.8.

Таблица 2.8. Гранични отклонения за сиви чугуни, 3 клас на точност

Номинален размер, mm	Допустимо отклонение, mm
0 - 50	±0,5
50 - 100	±0,7
100 - 200	±1,0
200 - 300	±1,5
>300	±2,0

Забележка: Таблицата показва ориентировъчни стойности за гранични отклонения; конкретните стойности се уточняват по стандарта или изискванията на проекта.

Граничните отклонения са важни за взаимозаменяемост на детайлите и точност при сглобяване, като гарантират, че отливките ще паснат правилно без допълнителни корекции.

2.7. Леякова система (Ангелов, 1988; Шаркова, 1994)

2.7.1. Същност и предназначение на леяковата система

Леяковата система представлява съвкупност от канали и елементи в леярската форма, предназначени за поемане, насочване и равномерно подаване на течния метал към леярската кухина. Чрез нея се осигурява правилното запълване на формата, като се създават условия за спокойно движение на металната стопилка и се предотвратява образуването на дефекти в отливката.

Правилното ѝ проектиране има съществено значение за качеството на получаваните отливки, тъй като предотвратява засмукването на въздух, завихрянето на металната струя и разрушаването на леярската форма. Освен това добре проектираната леякова система осигурява равномерно и контролирано запълване на формата, създава благоприятни условия за насочена кристализация и спомага за получаването на отливки с високо качество и минимален брой дефекти.

Движението на стопилката в леяковата система се осъществява под действие на гравитационния напор, като системата функционира по принципа на скачените съдове. Високите изисквания към леяковата система и разнообразието на отливки и форми е наложило използването в практиката на различни видове леякови системи, понякога много различни една от друга. Всяка от тях притежава определени предимства и недостатъци и области на приложение. Изучаването им значително се улеснява, ако се знаят елементите на една обикновена система, тяхното предназначение и разположението им във формата.

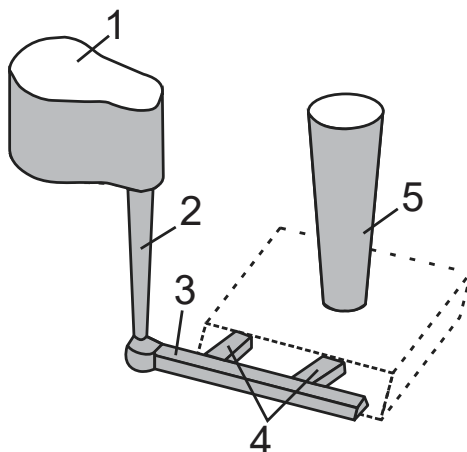
2.7.2. Основни елементи на леяковата система

В най-общия случай леяковата система се състои от леякова чаша (1), леяково стебло (леяк) (2), шлакоуловител (3), захранващи (питателни) канали (4) и отливък (5) (фиг. 2.17). Функционалното предназначение на отделните елементи е разгледано по-долу.

Леяковата чаша служи да поеме течния метал от леярската пота и да го подведе към леяковото стебло. Чрез нея се намалява скоростта на падащата струя и се поддържа постоянно ниво на метала. Освен това тя спомага до известна степен за задържане на шлаката. Обемът на леяковата чаша трябва да бъде достатъчен за осигуряване на непрекъснато и равномерно подаване на стопилката към леяка.

Леякът поема разтопения метал от чашата и го въвежда към шлакоуловителя. Той се изработва с кръгло напречно сечение и е с не голяма коничност по височина. При леене на цветни метали и сплави леякът е със змиеобразна форма. В основата си завършва с чаша, наречена пета, която поема удара на струята и по този начин предотвратява разрушаването на формата.

Основната функция на *шлакоуловителя* е да задържи попадналата в него шлака. Поради тази причина той се разполага по делителната равнина на формата и обикновено се изработва в горната полуформа.



Фиг. 2.17. Основни елементи на леяковата система

Питатели - представляват канали, чрез които течният метал се подава към леярската кухня. Те са разположени под шлакоуловителя, а броят им зависи от конструкцията и размерите на отливката и може да бъде значителен. Сечението им обикновено се стеснява непосредствено преди леярската кухня на разстояние 1–5 mm с цел улесняване отделянето на леяковата система от отливката.

Разположението на питателите е от съществено значение за качеството на отливките. Подаването на метала към тънкостенните участъци спомага за изравняване на скоростта на охлаждане с тази на по-дебелите части. Този подход се прилага при производството на отливки от сив чугун. При леене на метали и сплави с по-голямо свиване (ковък чугун, стомана и др.) металът се подава в дебилите части на отливката с цел предотвратяване образуването на всмукнатини. Разположението на питателите трябва да бъде съобразено и с възможностите за намаляване на деформациите и предотвратяване появата на други дефекти в отливките.

2.7.3. Допълнителни елементи на леяковата система

Освен изброените елементи към леяковата система се отнасят и успокоителите, отливъците, охладителите и мъртвите глави.

Успокоителите намаляват скоростта на движение на метала чрез промяна на посоката на движение в хоризонтално или вертикално направление.

Отливъците са вертикални канали, които са с форма на пресечен конус и се разполагат на най-високата част на отливката. През тях преминава част от въздуха, който се намира в леярската кухня и са индикатор за окончателното ѝ запълване със стопилка. В някои случаи изпълняват функциите на естествени мъртви глави.

Чрез охладителите се увеличава скоростта на охлаждане на определени участъци на отливката и се подпомага насочената кристализация.

Мъртвите глави компенсират обемното свиване чрез подаване на течен метал по време на кристализацията.

2.7.4. Видове леякови системи

В зависимост от разположението на елементите на леяковата система във формата, както и от начина и посоката на подаване на металната стопилка към леярската кухня, в практиката се използват различни видове леякови системи.

Изборът на начин за въвеждане на метала във формата се определя от масата, конфигурацията и размерите на отливката, както и от вида на кристализацията, която трябва да бъде осигурена. При насочена кристализация подаването на металната стопилка се извършва през по-дебелите сечения на отливката, което създава условия за постепенно втвърдяване в определена посока и ефективно захранване на кристализиращия метал. При обемна кристализация подаването се разпределя чрез повече на брой питатели, разположени в различни участъци на леярската кухня.

Въвеждането на металната стопилка във формата може да се осъществи чрез свободно падане, горно, долно, средно или комбинирано подвеждане.

Според разположението на питателите спрямо отливката подаването може да бъде външно или вътрешно, както и радиално или тангенциално. Най-често се използват външното радиално и тангенциалното подвеждане, тъй като осигуряват добро запълване на формата и сравнително лесно отделяне на леяковата система след втвърдяване на метала. Вътрешното подвеждане осигурява по-компактна форма на системата и по-равномерно топлинно поле, но затруднява отделянето на леяковите елементи от отливката.

При свободно и горно подаване на метала съществува опасност от разрушаване на формовъчния материал вследствие на динамичното въздействие на металната струя. За ограничаване на този недостатък се използва дъждообразно заливане, при което стопилката постъпва във формата през множество отвори, образуващи тънки струи. По този начин се намалява скоростта на движение на метала и се осигурява по-равномерно температурно поле в отливката.

Независимо от вида на леяковата система, запълването на леярската кухня трябва да протича спокойно и равномерно, без силно завихряне на металната струя и без срещане на противоположни потоци в кухнята. Пътят на движение на стопилката трябва да бъде възможно най-кратък, а разположението на питателите да позволява лесното им отделяне и да не затруднява последващата механична обработка на отливката.

При проектиране на леяковата система трябва да се избягва насочването на металната струя директно към срещуположни стени на формата, тъй като това може да предизвика ерозия на формовъчния материал и образуване на дефекти. При леене на тънки и дълги детайли подаването на металната стопилка се извършва по дължината на отливката с цел подобряване на условията за запълване и кристализация. Броят на питателите трябва да бъде минимален, като те не трябва да се разполагат в

най-тънките сечения на отливката или върху повърхности, при които отделянето им би затруднило последващата обработка.

В зависимост от начина на подаване на стопилката към леярската кухня и разположението на питателите се различават основни видове леякови системи: горна, долна, странична, сифонна и комбинирана. Сравнителната характеристика на тези системи е представена в таблица 2.9.

Таблица 2.9. Сравнителна характеристика на основните видове леякови системи

Вид леякова система	Начин на запълване на формата	Предимства	Недостатъци	Област на приложение
Горна	Металът постъпва в кухината отгоре	Проста конструкция, бързо запълване	Завихряне на метала, възможни шлакови включения	Масивни и прости отливки
Долна	Запълване отдолу нагоре	Спокойно движение на метала, по-малко газови и шлакови дефекти	По-сложна система, по-голям разход на метал	Отливки със сложна форма и високи изисквания за качество
Странична	Подаване на метала от страни	Равномерно разпределение на стопилката	Не винаги осигурява оптимална насочена кристализация	Средно големи отливки
Сифонна	Металът постъпва отдолу чрез канал под кухината	Много спокойно запълване, минимално завихряне	Сложна конструкция, по-голям разход на метал	Отговорни отливки с високи изисквания към качеството
Комбинирана	Комбинация от няколко начина на подаване	Добро разпределение на метала при сложни форми	По-сложно проектиране	Сложни отливки

Изборът на подходящ тип леякова система зависи от формата и размерите на отливката, използваната сплав и изискванията към качеството на готовия детайл. Правилното проектиране на системата осигурява равномерно запълване на формата и намалява вероятността от възникване на дефекти.

Правилното проектиране на леяковата система е от съществено значение за получаването на качествени отливки. Чрез нея се осигурява равномерно и спокойно запълване на формата, създават се условия за насочена кристализация и се намалява вероятността от възникване на дефекти. Ефективността на леяковата система обаче е тясно свързана със свойствата на използвания метал или сплав, тъй като различните материали притежават различна течливост, свиваемост и склонност към образуване на дефекти при кристализация.

Поради тази причина при проектирането на технологичния процес на леење е необходимо да се вземат предвид характеристиките на материалите, предназначени за получаване на отливки.

2.8. Материали, предназначени за получаване на отливки

2.8.1. Общи изисквания към материалите

При избора на материали за получаване на отливки е необходимо да се вземат предвид условията на работа на детайла, характерът на натоварването (статично, динамично или знакопроменливо), размерите и формата на сеченията, както и технологичните особености на последващата механична обработка. Тези фактори оказват съществено влияние върху експлоатационните характеристики и дълготрайността на отливките.

Изборът на леярска сплав при проектиране на отливки, предназначени за работа в определени условия, се определя от съвкупност от експлоатационни (механични, физични, химични и др.) и технологични свойства, свързани с процеса на леење. Съществено значение имат също икономическите показатели на материала, включително неговата цена и наличност.

Леярските сплави представляват химични съединения на два или повече елемента, единият от които може да бъде неметал. В сравнение с чистите метали те притежават редица предимства, като по-висока якост, по-добра твърдост, по-добра обработваемост и по-добра способност да възпроизвеждат очертанията на леярската форма. В леярското производство широко приложение намират сплави със специфични физични свойства, например висока електропроводимост или магнитна проницаемост.

В зависимост от химичния си състав сплавите се различават по температура на топене, химична активност, вискозитет в течно състояние, якост, пластичност и други свойства. За получаване на фасонни отливки се използват различни групи материали, като чугуни, стомани и цветни сплави.

При проектирането на отливките трябва да се има предвид, че механичните свойства на метала могат да бъдат различни в отделните части на отливката. Това се дължи на различната скорост на охлаждане в различните сечения на детайла. Например при чугунените отливки структурата и свойствата на материала зависят в значителна степен от условията на охлаждане във формата.

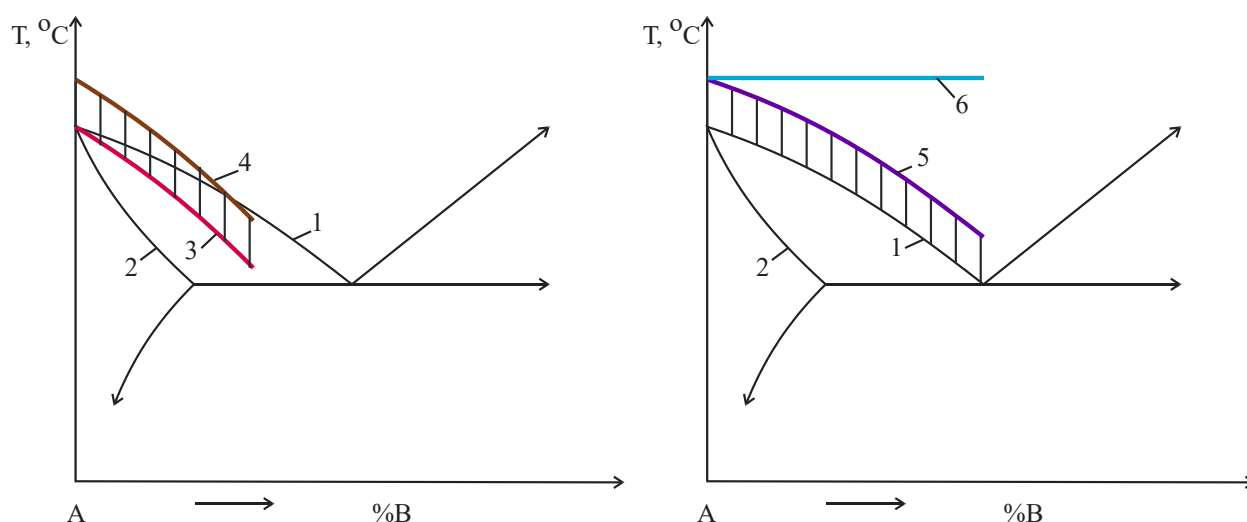
2.8.2. Леярски свойства на материалите

Не всички метали и сплави са еднакво пригодни за изработване на отливки. Възможността за получаване на висококачествени отливки се определя от група технологични свойства, наречени *леярски свойства*. Те са съвкупност от определени физични, химични и физико-химични свойства, които се проявяват в една или друга степен при производството. Леярските свойства оказват съществено влияние върху процесите на запълване на формата, образуването на структурата на метала и появата на различни дефекти в отливките. Към основните леярски свойства се отнасят тънколивкостта, свиването, склонността към поглъщане и отделяне на газове и склонността към ликвация (Ангелов, 1988).

2.8.2.1 Тънколивкост

Тънколивкостта е способността на металите и сплавите в разтопено състояние да запълват кухината на леярската форма и точно да възпроизвеждат очертанията на отливката. Това свойство е от съществено значение при получаването на отливки със сложна конфигурация и тънки стени (Ангелов, 1988; Шаркова, 1994).

Запълването на формата с метал може да се извършва само, ако металът притежава определена вискозност и се намира под известно налягане, което да осигури движението му във формата. Докато намаляването на вискозността под определена граница, характерна за течното състояние (което може да се постигне например чрез прегряване на стопилката), практически не оказва съществено влияние върху тънколивкостта на метала, то увеличаването на вискозността влияе в значителна степен върху запалването. При охлаждането на дадена стопилка, намираща се под действието на собственото си тегло и в интервала между ликвидус - 1 и солидус - 2 линиите (фиг. 2.18), вследствие появяването на твърда фаза вискозността ѝ се увеличава и се достига състояние, при което металът престава да тече. Това състояние, при което действа само металостатичното налягане, се нарича *нулева тънколивкост* - 3.



Фиг. 2.18. Видове тънколивкост

Следователно тънколивкостта не изчезва с достигане на ликвидус линията, но и не продължава да съществува и до солидус линията. Нулевата тънколивкост при определени условия на заливане се определя от количеството и вида (формата) на твърдата фаза и за различните сплави тя е различна. Така например според Ю. А. Нехендзи нулевата тънколивкост при чугуна настъпва при 30 %, а на стоманата при 20 % твърда фаза.

За да се правят сравнения относно тънколивкостта на различните метали, Нехендзи препоръчва въвеждането на понятията *действителна* - 4 и *практическа тънколивкост* - 6.

Действителна тънколивкост е тази, която се определя при еднакво прегряване на метала над температурата на нулева тънколивкост, а *практическата* тънколивкост е тази, която се определя при постоянна (еднаква) температура на заливане.

Тъй като определянето на нулевата тънколивкост става доста трудно, за приблизително определяне на тънколивкостта може да се употребява вместо еднакво прегряване над нулевата тънколивкост, еднакво прегряване над ликвидус линията и в такъв случай се получава *условно-действителна тънколивкост* - 5.

Върху тънколивкостта оказват влияние физико-химичните свойства, както на метала, така и на леярската форма.

Вискозитетът (кинематичен и динамичен), повърхностното напрежение, температурата на заливане и интервала на втвърдяване на метала, химичният състав и др., са характерни за металната стопилка.

Вискозитетът се изразява със съпротивлението, което изпитват частиците на стопилката при движение една спрямо друга, затова често го наричат вътрешно триене. Той е динамичен и кинематичен. Първият е силата на триене, която възниква между частичките на течността при нейното движение, а кинематичният се изразява с отношението на коефициента на динамичен вискозитет и плътността на метала. От двата вида вискозитет по-съществено пряко влияние върху тънколивкостта оказва динамичния. Колкото той е по-голям, толкова по-малка е тънколивкостта и обратно. За намаляване на вискозитета и увеличаване на тънколивкостта най-често се прибегва до прегряване на стопилката преди заливане. Това също води и до отделяне на неметалните включения, както и за увеличаване на количеството на разтворените в метала газове.

Тъй като двата вида вискозитет са свързани, то намаляването на единия води до понижаване на другия, както и намаляване на критичната скорост. Вследствие на това движението на течния метал става турбулентно (по-ниски скорости), което увеличава количеството метал, преминаващо през дадено сечение, и повишава тънколивкостта. Протичат и неблагоприятни процеси като: засмукване на въздух, повишено съдържание на шлага и разрушаване на стените на формата. Поради това постигането на тънколивкост чрез прегряване и намаляване на вискозитета не винаги е целесъобразно.

Повърхностното напрежение на границата метал-форма и умокрянето на последната определят получаването на точен отпечатък и пълномерни отливки, така че те влияят силно и върху тънколивкостта. Колкото по-малки са повърхностното напрежение и ъгълът на умокряне, толкова по-голяма е тънколивкостта. Тяхното влияние е най-силно при запълване на много тънки канали и стени във формата. При сплавите не е установена точна зависимост между тънколивкостта и повърхностното напрежение, тъй като при определянето ѝ се намесват влиянието на състава, модифицирането и легирането на сплавите върху повърхностното напрежение и ъгълът на умокряне.

Запълването на леярската форма с метал е съпроводено с топлинен обмен. Навлизащата във формата стопилка постепенно губи своята топлина, като я отдава на формата. Топлинните загуби до края на заливането не трябва да превишават топлината на прегряване Q , придадена на метала за нагриване до температурата на заливане T_3 над температурата на нулева тънколивкост T_0 . Наред с топлофизичните свойства на метала върху топлообмена оказват влияние и топлофизичните свойства на леярската форма. Тяхното смесено влияние върху тънколивкостта на металите най-добре може да се предаде, като се разгледат условията за запълване с течен метал на тесен канал с периметър на сечението P , обем V и дължина l , в който движението на метала е преустановено след запълването му вследствие достигане на състояние на нулева тънколивкост. Отделеното количество топлина се отдава изцяло на формата, т.е.:

$$V\gamma c(T_3 - T_0) + V\gamma L = \alpha P(T_m - T_\phi)\tau, \quad (2.7)$$

където: V , γ и c са съответно обемът, плътността и специфичната топлина на течният метал; L -скрита топлина на кристализация, определена от единица обем при охлаждане до T_0 ; α -среден коефициент на топлоотдаване от метала към формата; T_m и T_ϕ съответно средната температура на метала и формата; τ -времето от началото на леене до охлаждане на метала до T_0 .

От равенството (2.7) може да се определи дължината l на запълнения канал, която служи като критерий за тънколивкостта:

$$l = \frac{c(T_3 - T_0)}{T_m - T_\phi} \cdot \frac{V\gamma}{\alpha P\tau} + \frac{L}{T_m - T_\phi} \cdot \frac{V\gamma}{\alpha P\tau}.$$

Тъй като $\frac{V}{\tau} = v_{\text{ср}}$ е средната обемна скорост на запълване на канала с метал, формулата може да се напише във вида:

$$l = \frac{v_{\text{ср}}\gamma}{\alpha P(T_m - T_\phi)} [c(T_3 - T_0) + L]. \quad (2.8)$$

Вижда се, че тънколивкостта на метала е толкова по-висока, колкото по-големи са относителното тегло g , специфичната топлина c и скритата топлина на кристализация L на метала. По-леките метали и сплави трябва да се прегряват повече. Затова магнезиевите сплави се лят при по-високи температури от алуминиевите.

Многобройните данни от изследванията показват, че решаващо влияние върху тънколивкостта има *характерът на кристализацията*,

който се определя от вида на диаграмата на състоянието, от положението на сплавта в тази диаграма, интервала на втвърдяване и състава на сплавта. Това влияние се обяснява с факта, че запълването на формата става на два етапа когато металът е напълно течен и когато се намира в процес на кристализация между ликвидус-линията и температурата на нулева тънколивкост. Характерът на кристализацията влияе върху вторият етап. Обикновено тънколивкостта рязко намалява при увеличаване на температурния интервал на кристализация в следствие на преобладаващата дендритна кристализация. Решаващо влияние върху нея имат температурата на метала и формата.

Влиянието на *състава на сплавите* трябва да се разглежда отделно за всеки вид сплав, тъй като е трудно да се обясни с общи принципи. При железните сплави влиянието на отделните примеси е следното: до 0,8 % въглеродът в стоманите влияе слабо, след което увеличава тънколивкостта им, така че при чугуните тя става два пъти по-голяма. Силицийт увеличава тънколивкостта на стоманите, тъй като има дезоксидиращо действие. Увеличаването е много рязко при съдържание от 0,25 - 0,45 % силиций. Манганът до около 2 % и над 12 % също значимо повишава тънколивкостта на стоманите. Медта до 4 % увеличава тънколивкостта на въглеродните стомани. Елементи, склонни към окисляване, като алуминий, хром и титан, и тези, които образуват нитриди, карбиди, и други твърди примеси, влошават тънколивкостта. Затова легираните с такива елементи стомани се леят при по-високи температури и с по-голяма скорост. За обикновените стомани добавки до 0,2% алуминий оказват положително влияние. Фосфорът увеличава тънколивкостта на стоманата и чугуна, тъй като образува леснотопими фосфидни евтектикуми, а сярата я намалява вследствие образуването на сложни сулфиди с голям вискозитет.

Разтворените в металите *газове* обикновено увеличават тяхната тънколивкост, тъй като при понижаване на температурата те се отделят и предизвикват разбъркване на стопилката, изравняване на температурата и увеличаване на неметалните включвания. При голямо количество газове завихрянето на метала става много интензивно и формата се запълва по-лошо. Тънколивкостта на металите и сплавите може значително да се увеличи чрез въздействие с ултразвук и вибрации върху стопилката по време на заливане на пробите вследствие изменение на физико-химичните и свойства.

Физико-химичните свойства на леярската форма също оказват голямо влияние върху тънколивкостта на металите и сплавите. Най-силно е топлинното въздействие на формата върху тънколивкостта. Колкото по-големи са коефициентът на топлопроводност, специфичният топлинен капацитет и коефициентът на топлинна акумулация на формата, толкова по-интензивно е охлаждането на метала и по-малка неговата тънколивкост. Тези величини при металните форми са много по-големи, отколкото при пясъчните, затова тънколивкостта на металите в такива форми е по-малка.

Освен въздействието на топлината при движението на метала във формата възниква триене между тях, което влияе неблагоприятно върху тънколивкостта. Това триене е толкова по-голямо, колкото по-високи са скоростта на потока метал, налягането върху повърхността на формата и коефициентът на триене. При подобряване гладкостта на формата коефициентът на триене намалява. Това е най-значително, когато между метала и формата се образува тънка газова прослойка от нанесената боя или пудра или прибавки към смесите. Общото съпротивление от триенето зависи много от кухината на формата и каналите на леяковата система. Когато тя е силно развита и не е възможно да се намали коефициентът на триене, за получаване на голяма тънколивкост се прибегва до увеличаване на напора или намаляване на топлинните загуби чрез предварително подгряване на формата.

2.8.2.2. Свиване на металите и сплавите

Всички метали и сплави при нагриване се разширяват, а при охлаждане намаляват своя обем. Свиването е едно от най-важните леярски свойства. То е причина за образуване на всмукнатини, изменения на размерите и възникване на напрежения в отливките, които от своя страна могат да предизвикат деформация или поява на горещи и студени пукнатини и др.

Свиването на металите зависи от налягането, упражнено върху тях при охлаждане. В повечето случаи (с изключение на леене под налягане) то е еднакво и равно на атмосферното и неговото влияние се изключва.

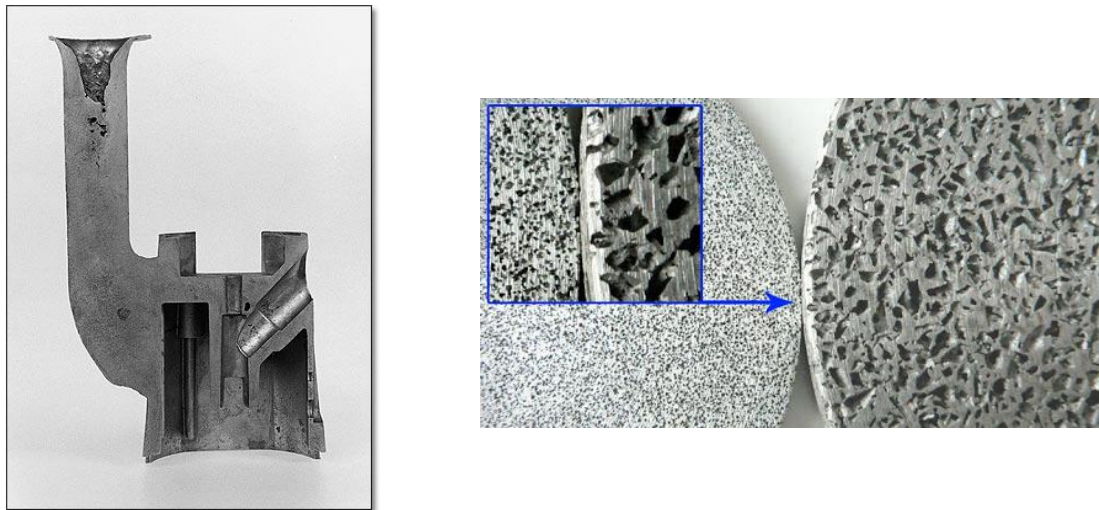
Различават се линейно и обемно свиване, които се измерват в проценти. Големината му се определя в зависимост от химичния състав, температурата на заливане, формата и размерите на отливката и от други фактори. В практиката се използва понятието леярско свиване, което представлява разлика в обемите или линейните размери на формата и отливката, изразена в проценти. Използват се осреднени коефициенти на свиване, като при чугунените отливки то е най-малко около 1 %, при стоманите - около 2 %, а при цветните метали - от 1 - 3 % ([Шаркова, 1994](#)).

Свободно свиване се наблюдава в случаите, когато напречното сечение на отливката е просто, стените ѝ са с еднаква дебелина и обемът ѝ се свива равномерно и не среща съпротивление от страна на материала на леярската форма или леярското сърце. По-малко е свиването при получаване на отливки със сложна конфигурация, които са ограничени от формата и сърцето.

При наличие на такова механично съпротивление и неравномерно напречно сечение на отливката възниква и термично задържане (термично съпротивление), породено от неравномерното втвърдяване на отделните зони. Механичното и термичното противодействие на свиването водят до появата на *вътрешни (леярски) напрежения*, които остават в готовата отливка.

Леярските напрежения, които са възникнали в следствие на свиване се наричат още механични напрежения, тези, които са в следствие на неравномерно охлаждане-термични, а тези в следствие на структурни превръщания - фазови (Димитрович, 1989).

Свиването, особено в процеса на кристализация е нежелателно, тъй като е причина за образуване на всмукнатини в плътните части на отливката, които се втвърдяват последни. В зависимост от мястото на получаване в отливката, се образува концентрирана всмукнатина или разсеяна порестост (фиг. 2.19). Положението ѝ на възникване може да се определи качествено с помощта на нанасяне на изотерм-изосолидус.



Фиг. 2.19. Всмукнатини и порестост в отливките

2.8.2.3. Поглъщане и отделяне на газове

Всички метали и сплави притежават способността да поглъщат газове при стопяване и прегряване на стопилката, а при охлаждане и втвърдяване - да ги отделят. Това е едно от най-важните свойства на леярското производство. С него е свързана появата на много дефекти в отливките (газови шупли), които често могат да бъдат причина за тяхното бракуване.

При стопяването и леенето на металите и сплавите те се намират в контакт и активно си взаимодействат с атмосферата и облицовката на пещта, въздуха и леярската форма, които са източници на газове. Газове могат да бъдат поглънати и от влажните и окислени шихтови материали и протичащите физико-химични процеси при стопяването. Всички източници на газове могат условно да се разделят на две групи - металургични и технологични. Към първата група спадат източници, вътрешни по отношение на метала (разтворените в него газове и тези в резултат на химични реакции), а към втората - тези, външни по отношение на метала (околната атмосфера, леярската форма, засмукването на газове в леяковата система и др.).

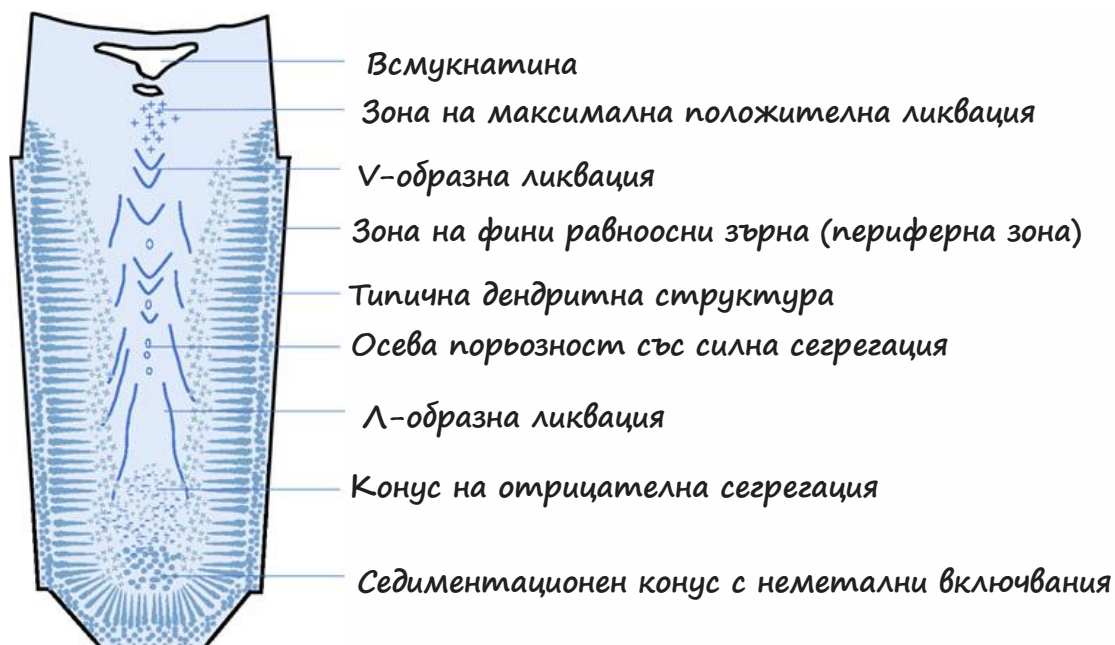
В металите и сплавите газовете могат да се съдържат в различно състояние - разтворени, свързани във вид на химични съединения, във вид на газови мехурчета или адсорбирани на повърхността във вид на тънък слой. Разтворени са газовете, чийто атоми имат малък радиус и могат да се разполагат между атомите на метала.

2.8.2.4. Ликвация при отливките (Макро- и микросегрегация)

Ликвацията (*сегрегацията*) представлява химическа нееднородност в състава на сплавите, възникваща в процеса на тяхната кристализация. Това явление е пряко следствие от избиращелното втвърдяване на компонентите и ограниченото протичане на дифузионните процеси. Тъй като първоначално образуваните твърди фази се отличават по концентрация от остатъчната стопилка, се формират зони с различен химичен състав, което води до осезаема нееднородност на механичните свойства в обема на готовата отливка.

В зависимост от мащаба на проявление, ликвацията се класифицира като микроликвация (дендритна) и макроликвация (зонална). Дендритната ликвация се проявява в рамките на отделните кристални зърна и често може да бъде коригирана чрез последващо дифузионно отгряване (хомогенизация). За разлика от нея, зоналната ликвация обхваща големи части от отливката и не подлежи на отстраняване чрез термична обработка. Тя се влияе основно от скоростта на охлаждане и хидродинамичните процеси в стопилката по време на втвърдяването.

В надлъжното сечение на масивни отливки се наблюдават няколко характерни зони на макросегрегация (фиг. 2.20). В най-горната част на блока се формира всмукватина, под която се разполага зоната с максимална положителна ликвация. В долната част се образува седиментационен конус, съставен от първични кристали, които са по-бедни на примеси и по-тежки от околната течност (отрицателна ликвация). В централната част на отливката се обособява осова или V-образна ликвация.



Фиг 2.20. Схема на зоните на макросегрегация (зонална ликвация) в надлъжно сечение на стоманен блок (Li et al., 2022)

Тя се дължи на спускането на нивата на стопилката поради обемното свиване, което концентрира по-леките и леснотопими елементи в термичния център. На известно разстояние от оста се проявява извънсовата или

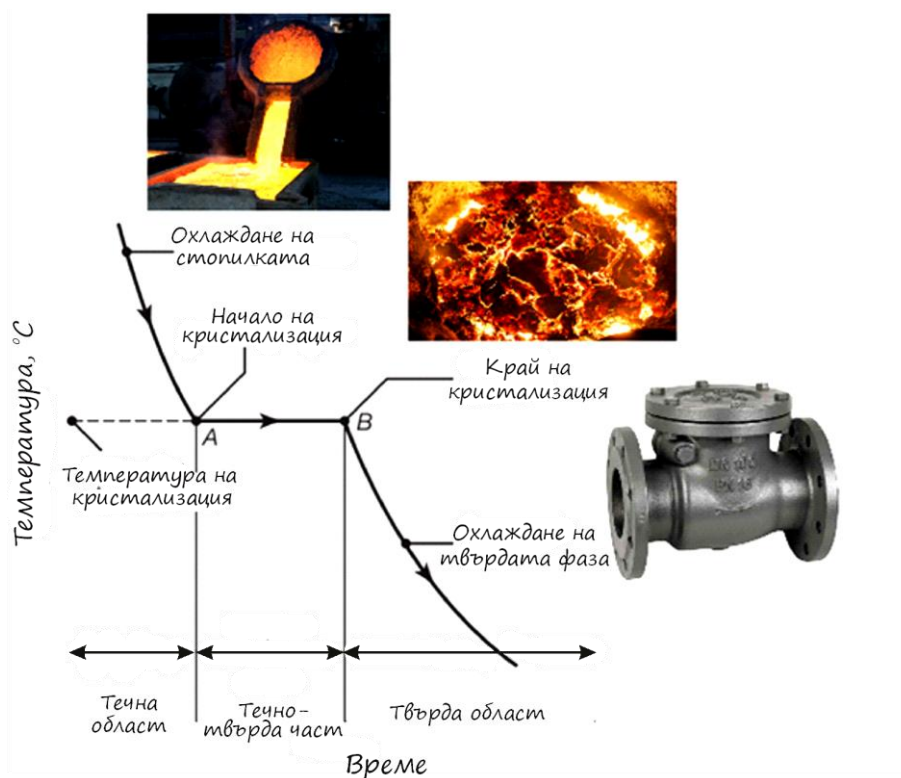
Л-образна ликвация, представляваща ивици, богати на примеси, които следват фронта на кристализация. Периферията на отливката обикновено е изградена от зона с фини равноосни зърна и типична стълбовидна (дендритна) структура.

За ограничаване на тези отрицателни ефекти се прилагат технологични мерки като увеличаване на скоростта на охлаждане, интензивно разбъркване на стопилката и прецизен контрол върху температурата на заливане. Тези методи целят постигане на по-висока степен на хомогенност и подобряване на структурната цялост на метала.

След разглеждане на основните леярски свойства на металите и сплавите, следва да се подчертае тяхното съществено влияние върху качеството на отливките. Неправилният избор на технологични параметри или неблагоприятното съчетание между свойствата на метала и условията на леене неизменно водят до възникване на дефекти. Познаването на тези явления, причините за тяхното проявление и методите за предотвратяването им е от критично значение за осигуряване на експлоатационната надеждност на леярските изделия.

2.8.3 Кристализация на металите и сплавите

Процесът на преход на метала от течно в твърдо състояние се нарича кристализация. Тя се характеризира с отделяне на скрита топлина на втвърдяване, което променя хода на охлаждане на метала. Този процес се визуализира чрез т.нар. крива на охлаждане (фиг. 2.21), която представя зависимостта между температурата и времето.



Фиг. 2.21. Крива на охлаждане на метала и етапи на получаване на отливка: от заливане на стопилката до готовото изделие (Bernal, 2023)

На микроскопично ниво кристализацията започва в точка А (начало на втвърдяването) и завършва в точка В (край на втвърдяването). Хоризонталният участък АВ съответства на постоянната температура на кристализация, при която течната и твърдата фаза съществуват едновременно. След пълното втвърдяване на метала в точка В, започва охлаждането на вече твърдата отливка до стайна температура.

Процесът на кристализация при получаването на отливки може да бъде разгледан на три основни структурни нива:

- На *атомно ниво*: При понижаване на температурата се наблюдава скокообразно увеличаване на силите на взаимодействие между атомите. При достигане на критична температура те се подреждат в закономерна атомно-кристална решетка с далечен порядък.
- На *микроскопично ниво*: В множество микрообеми на стопилката възникват центрове на кристализация (зародиши), от които започва растежът на отделни кристали. Резултатът на този процес е формирането на специфичната микроструктурата на метала или сплавта.
- На *макроскопично ниво*: Кристализацията на отливката протича последователно, като се определя от кинетиката на отвеждане на топлината към стените на леярската форма. Топлинният режим директно задава посоката на растеж на кристалите и крайната макроструктура на изделието.

В зависимост от температурното поле и градиента на охлаждане се различават два основни типа кристализация ([Шаркова, 1994](#)):

- *обемна кристализация*: Характеризира се с малък температурен градиент, при който центровете на кристализация възникват едновременно в целия обем на стопилката. Получената структура е относително хомогенна, без изразена насоченост на кристалите.
- *насочена кристализация*: Протича при наличие на силно изразен температурен градиент. Кристалите нарастват преобладаващо в една посока - обикновено от стените на формата към термичния център на отливката.

2.8.3.1 Образуване на кристализационни центрове

Процесът на кристализация инициира с формирането на устойчиви кристализационни центрове (зародиши), около които впоследствие нарастват кристалните структури. Когато този процес протича директно в течната стопилка, той се дефинира като *първична кристализация*, в резултат на която се формира първичната макро- и микроструктура на метала или сплавта. В определени случаи, при по-нататъшно охлаждане на вече втвърдения метал, могат да протекат допълнителни структурни изменения в твърдо състояние, известни като *вторична кристализация* (прекристализация).

В реални производствени условия решаваща роля играе т.нар. *хетерогенна нуклеация* (зародишообразуване върху чужди повърхности), а не

спонтанното формиране на зародиши. Това означава, че първичната кристализация най-често започва принудено върху субмикроскопични частици от труднотопими и неразтворими в стопилката съединения - оксиди, нитриди, карбиди и други неметални включвания. Тези частици служат като подложка, върху която се групират атомите от стопилката, което значително облекчава енергетично процеса на зародишообразуване.

В леярската практика се прилага целенасочено управление на този процес чрез технологичния метод *модифициране*. Чрез въвеждане на малки количества специфични елементи или съединения (*модификатори*) в стопилката се създават допълнителни центрове на кристализация. Това позволява ефективен контрол върху големината и формата на кристалите, осигурявайки по-фина и равномерна структура на отливките (Максимов и др., 2024).

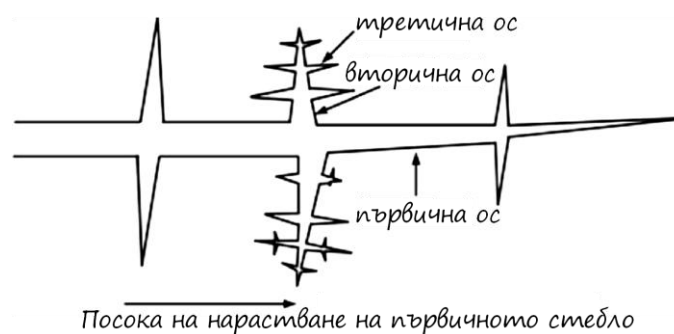
2.8.3.2 Дендритна структура

За получаването на качествени отливки е необходимо детайлно познаване на условията, влияещи върху формирането на кристалния строеж на метала. В процеса на леене се оформят структури, които се отличават както по своята морфология, така и по размерите на отделните кристали. Тези леярски структури са съставени от два основни вида елементи:

- *Равноосни (глобуларни) кристали*: Имат приблизително еднакви размери във всички посоки и обикновено се формират при обемна кристализация.
- *Неравноосни (дендритни) кристали*: Удължени са в определена посока и притежават характерна разклонена форма.

Дендритната форма е фундаментална за първичната кристализация на металите и сплавите. Характерно за нея е, че кристалният зародиш не нараства с еднаква скорост във всички посоки. Този анизотропен растеж е пряко обусловен от условията на топлоотвеждане и възможността за приток на атоми от течната фаза. В резултат се формира сложна триизмерна йерархия (фиг. 2.22), в която ясно се разграничават следните елементи:

- *Първична ос (първичен клон)*: Главната ос на дендрита, която се развива най-бързо в посока, обратна на топлинния поток (където отвеждането на топлината е най-интензивно).

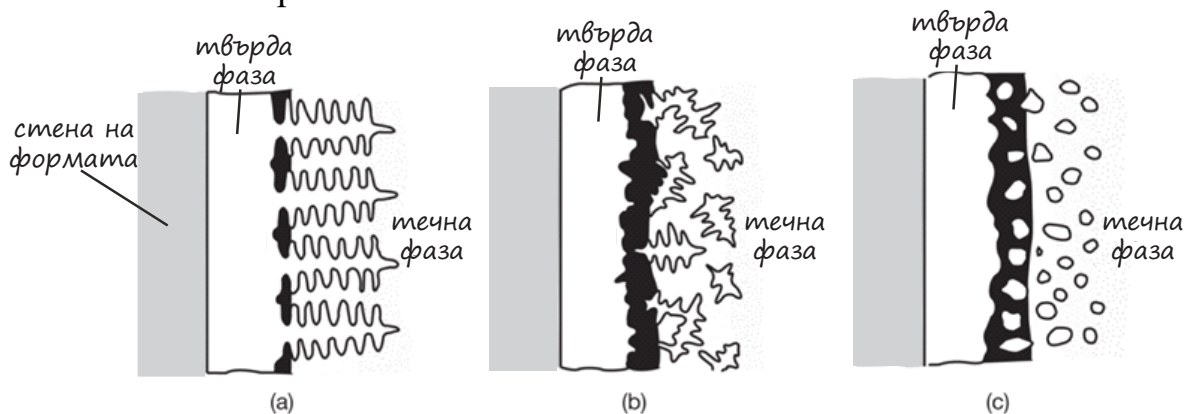


Фиг. 2.22. Схема на дендритен растеж и формиране на кристални оси от различен ред (Mohanty and Sarangi, 2020)

- *Вторични оси:* Разклонения, израстващи под определен ъгъл спрямо първичната ос вследствие на локални температурни флуктуации.
- *Третични оси:* Допълнителни разклонения от по-висок ред, които постепенно запълват междусното пространство.

В зависимост от условията на охлаждане, се различават три основни типа структури при отливките (фиг. 2.23):

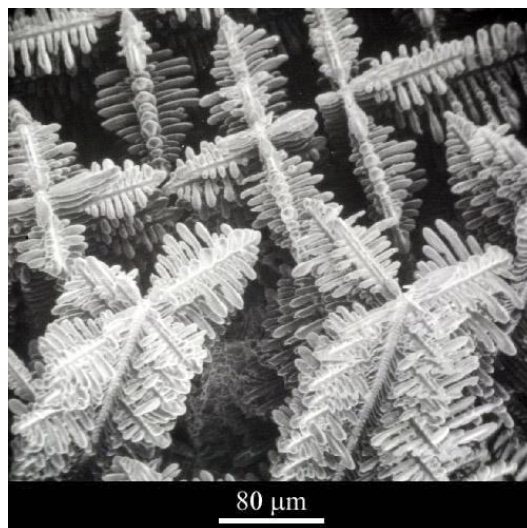
1. *Колоновидни дендритни структури:* Представяват удължени кристали, растящи перпендикулярно на стените на формата (в посока, обратна на топлинния поток). Формират се при голям температурен градиент.
2. *Равноосни дендритни структури:* Състоят се от кристали с дървовидна форма, ориентирани хаотично и с приблизително еднакви размери. Обикновено се образуват в централната част на отливката.
3. *Равноосни недендритни (глобуларни) структури:* Характеризират се с липса на изразени разклонения. Получават се чрез специални въздействия (механично разбъркване, вибрации или модифициране), които разрушават дендритните рамена и водят до образуване на заоблени зърна.



Фиг. 2.23. Типове кристални структури в зависимост от условията на втвърдяване: а) колоновидна дендритна; б) равноосна дендритна; в) равноосна недендритна (глобуларна) (Bernal, 2023)

В процеса на втвърдяване се наблюдава тенденция за запълване на кухините между разклоненията, но тъй като междусното пространство се запълва последно, често се появява микроскопична химическа нееднородност, известна като *дендритна ликвация*. В много случаи дендритният характер се запазва и в напълно втвърдения метал, като определя неговите окончателни механични свойства. Реалният вид на тези структури, наблюдаван под електронен микроскоп (фиг. 2.24), демонстрира изключително сложна триизмерна йерархия.

Формираната при кристализацията структура оказва съществено влияние върху механичните и експлоатационните свойства на изделията. Поради това управлението на тези процеси е една от основните задачи при разработването на съвременните технологии за леење.



Фиг. 2.27. 3D изображение на дендритна структура (SEM микрофотография, мащаб 80 μm) (DoITPoMS, 2026)

2.8.3.3 Зони на кристализация в отливката

При втвърдяването на металната стопилка в леярската форма кристализацията не протича едновременно в целия обем на метала. Поради различната скорост на охлаждане в отделните части на отливката се формира характерна зонална структура, състояща се от няколко области с различен строеж.

Обикновено в структурата на отливките се разграничават три основни зони:

- *Охладена (корова) зона* - разположена непосредствено до стените на леярската форма. Тук охлаждането е най-интензивно, поради което се образуват множество центрове на кристализация и се формират дребни равноосни кристали. Получената структура е дребнозърнеста.
- *Колоновидна зона* - намира се под охладената зона. В тази област кристалите нарастват в посока, обратна на топлоотвеждането (към центъра). Формират се удължени колоновидни дендритни кристали.
- *Централна равноосна зона* - разположена в централната част на отливката. Тук температурният градиент е минимален и кристалите нарастват в различни посоки, образувайки равноосна структура.

Разпределението на тези структури в обема на отливката зависи от температурния градиент и скоростта на охлаждане (фиг. 2.25):

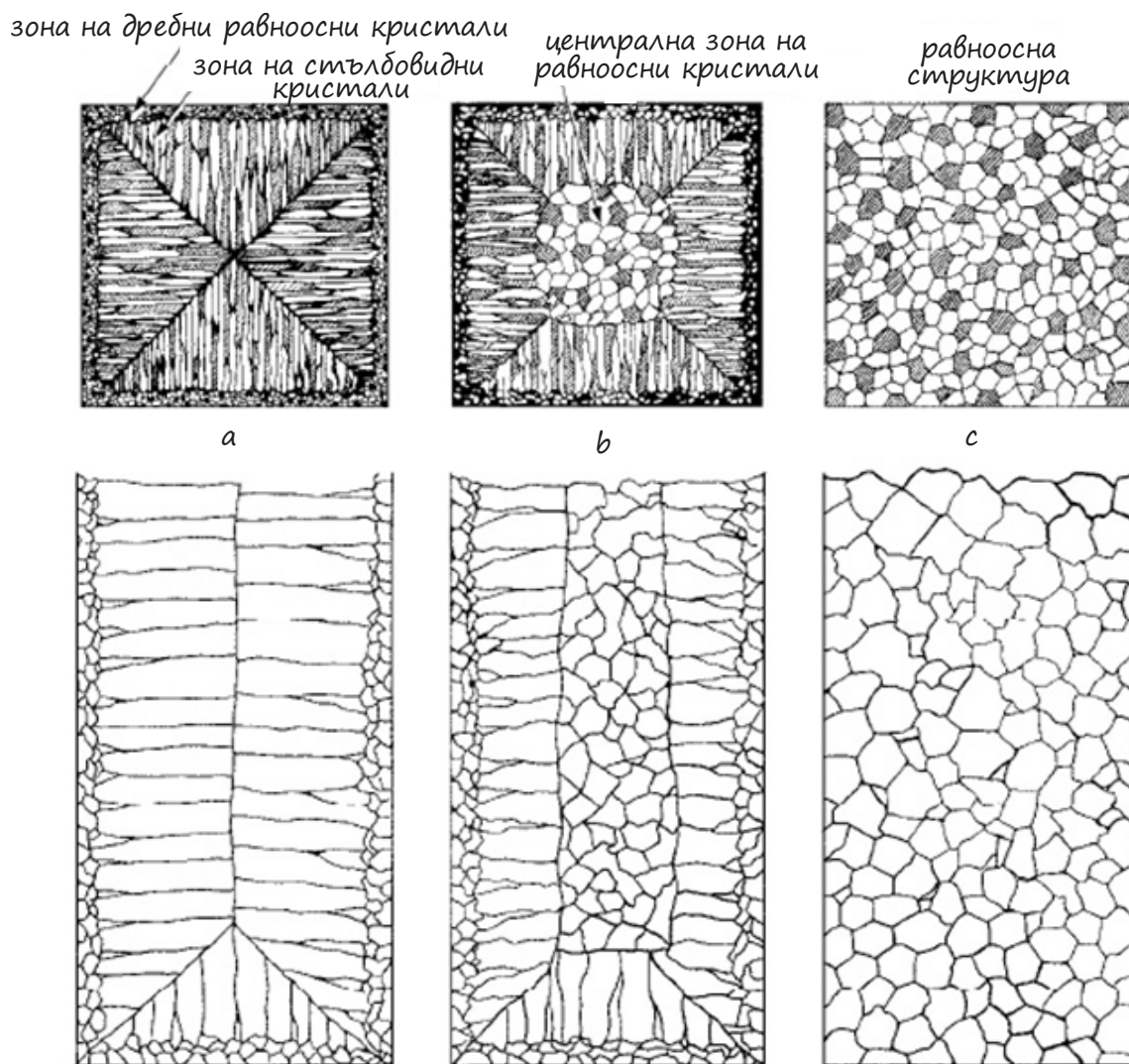
- Колоновидна структура (а): Състои се от периферна зона от дребни кристали и силно развита колоновидна зона, заемаща целия обем.
- Смесена структура (б): Наличие на колоновидна зона и централна равноосна зона.
- Равноосна структура (в): Изцяло равноосен строеж, получен при малък температурен градиент или модифициране.

Реалното проявление на тези зони може да се наблюдава чрез макрографски анализ на метални разреди (фиг. 2.26).

Формирането на тези зони се определя от условията на топлообмен между стопилката и леярската форма, както и от скоростта на охлаждане на

метала. Съотношението между отделните зони оказва съществено влияние върху механичните свойства и качеството на детайлите. Например, силно развитата колоновидна зона може да доведе до анизотропия на свойствата и поява на пукнатини по границите между кристалите.

Условията на охлаждане, скоростта на кристализация и характерът на растеж на кристалите определят както структурата, така и възможността за възникване на различни структурни и обемни несъвършенства.



Фиг. 2.25. Основни типове макроструктури и зони на кристализация в отливки (Loy and Chiranth, н.д.):

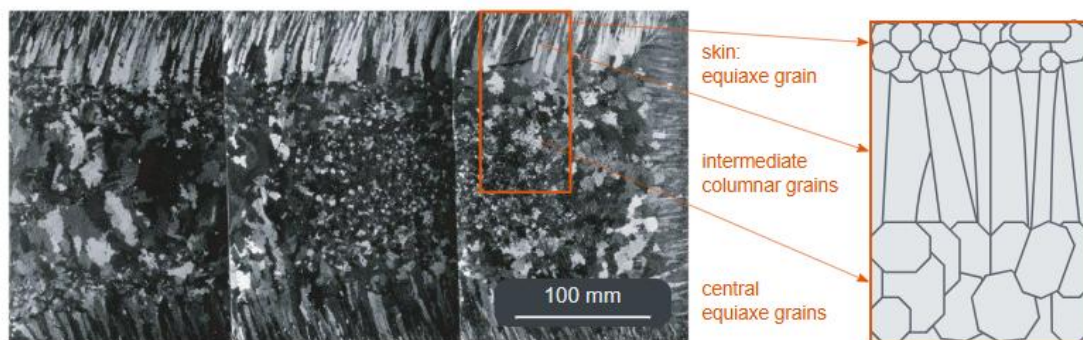
а) колоновидна структура; б) смесена структура; в) равноосна структура

При неблагоприятни условия могат да се образуват дефекти като:

- свивателни кухини и порестост;
- ликвация (химична нехомогенност);
- газови включения и пукнатини.

Правилното управление на процесите на охлаждане и втвърдяване е от решаващо значение за получаването на качествени отливки. В

следващите глави са разгледани основните дефекти, причините за тяхното възникване и начините за тяхното предотвратяване.

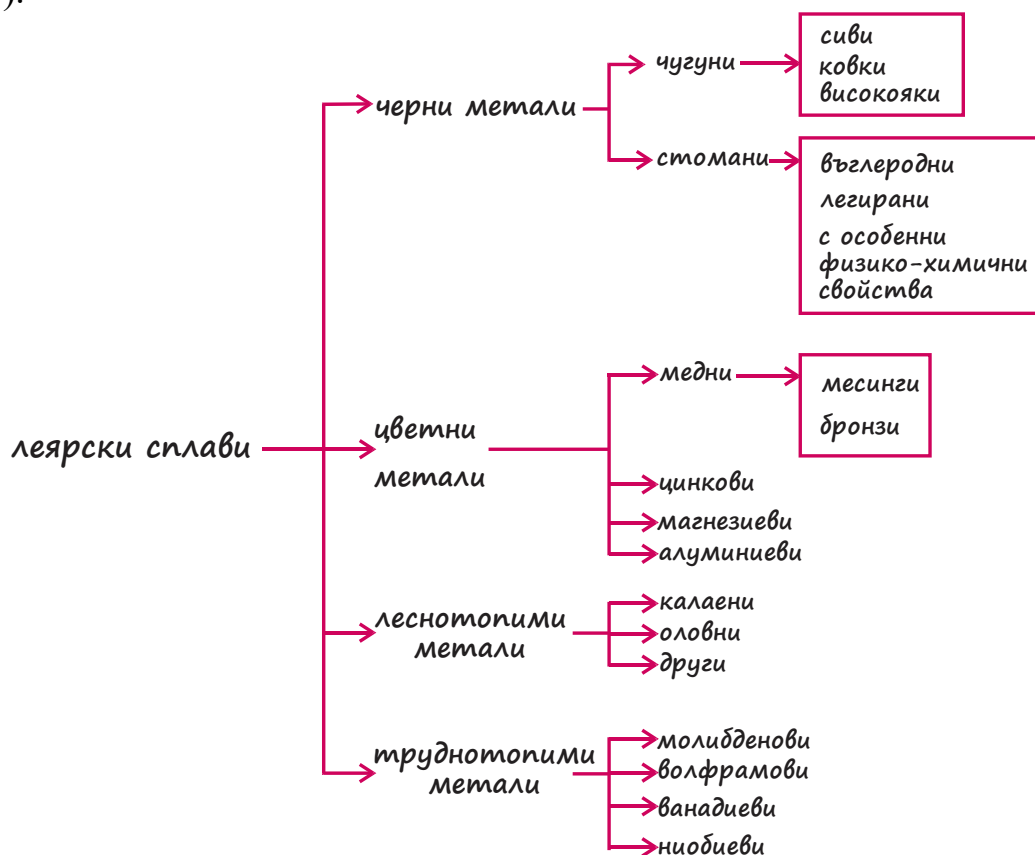


Фиг. 2.26. Макроструктура на стоманена отливка (ляво) и теоретичен модел на зоните (дясно) (Solidification at the scale... [Mines Albi], 2014)

1 - охладена зона; 2 - колоновидна зона; 3 - равноосна зона.

2.8.4. Основни леярски материали

Основните материали, използвани в леярското производство, се класифицират в няколко големи групи в зависимост от техния химичен състав и физико-механични свойства. Общата структура на леярските сплави е представена на фиг. 2.27, като те се делят основно на желязни (стомани и чугуни) и сплави на цветни метали (Евдокимова и Скобелев, 2013).



Фиг. 2.27. Класификация на леярските сплави за получаване на метални отливки

Чугунът е основната леярска сплав в машиностроенето благодарение на съчетанието от отлични технологични свойства и икономическа ефективност. В съвременното производство 94% от общата маса на чугунените отливки се изработват от сив чугун съгласно БДС EN 1561 (марки EN-GJL-100, EN-GJL-150, EN-GJL-200).

Основната характеристика на тези чугуни е присъствието на пластинчат (ламеларен) графит. Тази специфична форма на графита определя ключови инженерни предимства: ниска чувствителност към концентратори на напрежения (резки, вдлъбнатини) и изключителна способност за разсейване на вибрационни колебания. Поради тази причина станините на машините се изработват от чугун, а не от стомана. Въпреки че е най-евтината леярска сплав, сивият чугун е крехък и не е подходящ за ударни натоварвания.

За по-отговорни приложения се използват чугуни с модифицирана форма на графита и легиращи елементи, систематизирани в табл. 2.10.

Таблица 2.10. Класификация и означения на чугунените отливки

Вид чугун	Форма на графита	Леярски свойства	Термична обработка	Приложения
Сив (GJL)	Пластинчат (ламеларен)	Отлична тънколивкост, малко свиване	Незадължителна	Станини на машини, блокове на ДВГ, корпуси, капаци
Ковък (GJMB)	Люспест (гнездовиден)	Влошени: ниска тънколивкост, голямо свиване	Задължително отгряване на бял чугун	Детайли със знакопроменливи товари, шасита, лостове
Високоякостен (GJS)	Сферичен (сферографитен)	Ниска тънколивкост	По избор (за подобряване на свойствата)	Части на ДВГ, колянови валове, отговорни детайли
Легиран (GJL-X)	Променлива	Специфични според легиращите елементи	Специфична според марката	Детайли за работа при 500-700 С

Докато сивият чугун се лее лесно, ковкият и сферографитният чугун изискват по-прецизен технологичен контрол заради склонността им към образуване на пукнатини и кухини в отливките. При всички видове трябва да се следи за дефекта „избелване“ (образуване на цементит при бързо охлаждане), който прави повърхността прекалено твърда за механична обработка.

От *стомана* се произвеждат около 21% от всички отливки. По химичен състав тя се дели на въглеродна и легирана, а според съдържанието на легиращи елементи бива: нисколегирана (до 2,5%), среднолегирана (от 2,5 до 10%) и високолегирана (над 10%).

Типичните леярски стомани съгласно [БДС EN 10213](#) и [БДС EN 10283](#) (като GE200, GE240, GE300, GX5CrNi19-10 и GX120Mn13) притежават ниска тънколивност и голям процент свиване. Поради това разходът на материал при тях е средно 1,6 пъти по-висок в сравнение с отливките от чугун.

Класификацията на стоманените отливки според тяхното предназначение, методи на производство и необходима термична обработка е представена в таблица 2.11.

Термичната обработка при стоманените отливки е задължителна за групи II и III, тъй като лятата структура е грубозърнеста и крехка. Чрез нея се постигат изискваните от стандарта механични показатели.

Таблица 2.11. Класификация на методи за производство и термична обработка при отливките от стомана

Група	Предназначение	Примери за детайли	Методи на леене	Термична обработка
I група	Общо (базово ниво)	Капаци, декоративни елементи, ръкохватки	Леене в пясъчни форми	Незадължителна (при нужда отгряване)
II група	Отговорно (якост)	Зъбни колела, валове, корпуси на помпи	Пясъчни форми, кокилно леене	Нормализация или отгряване
III група	Особено отговорно	Турбинни лопатки, съдове под налягане	Стопяеми модели, центробежно леене	Закаляване и отвъръщане (подобряване)

Забележка: При производството на стоманени отливки рядко се използва леене под налягане, тъй като високата температура на топене (над 1500°C) води до бързо разрушаване на металните пресформи.

Цветните леярски сплави заемат важно място в леярското производство поради специфични свойства като ниска плътност, висока корозионна устойчивост и отлични антифрикционни характеристики. Към тази група принадлежат сплавите на основата на алуминий, магнезий, цинк и мед, както и сплавите на труднотопимите и нискотопимите метали (табл.2.12).

Алуминиеви и магнезиеви сплави: Алуминиевите сплави съчетават висока якост с ниска плътност, което ги прави незаменими в авиацията. Сплави като АМg10 се отличават с висока корозоустойчивост благодарение на съдържанието на магнезий. Магнезият повишава якостта, но в течно състояние магнезиевите сплави са взривоопасни, имат ниска тънколивкост и голямо свиване, което затруднява леенето им.

Цинкови и медни сплави: Цинковите сплави са яки, корозионно устойчиви и се използват като антифрикционни материали. Най-разпространените медни сплави са бронз и месинг. Бронзите биват калаени и безкалаени, притежават отлични механични свойства, но имат голямо свиване. Месингът има по-добри леярски свойства от бронза, което улеснява получаването на плътни отливки.

Труднотопими и нискотопими сплави: Труднотопимите метали (титан, волфрам, молибден) работят при екстремни температури (до 3500°C). Титановите сплави са основни конструкционни материали с тесен диапазон на кристализация. Благодарение на евтектичния си състав някои нискотопими сплави на основата на бисмут, калай и олово имат температура на топене едва 70 - 90° С.

Таблица 2.12. Характеристика на основните цветни леярски сплави

Група сплави	Основни компоненти	Свойства	Приложения
Алуминиеви	Al-Si, Al-Mg (AMg10)	Ниска плътност, корозоустойчивост	Авиация, автомобилостроене
Магнезиеви	Mg-Al, Mg-Zn	Най-леки, висока якост/тегло	Космическа техника, корпуси
Цинкови	Zn-Al, Zn-Cu	Антифрикционни, леснолеяеми	Тънкостенни детайли, протектори
Бронзи	Cu-Sn, Cu-Al, Cu-Pb	Корозионна и износоустойчивост	Лагери, арматура, винтове
Месинги	Cu-Zn	Отлична тънколивкост, плътност	Санитарна арматура, детайли
Труднотопими	Ti, W, Mo, Nb, V	Изключителна якост при високи температури	Ракетостроене, енергетика
Нискотопими	Bi, Sn, Pb, Cd	Точка на топене 70-90°C	Лепила, предпазители, макети

Разнообразието от леярски сплави и техните специфични температури на кристализация са предпоставка за възникването на характерни дефекти при лееенето, които ще бъдат разгледани по-долу.

2.9. Дефекти в отливките

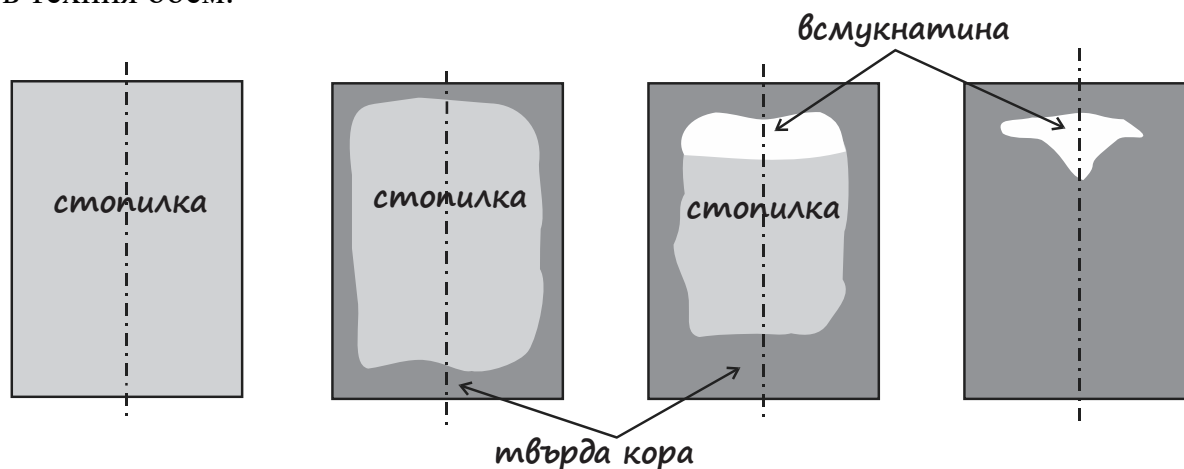
2.9.1. Всмукнатини

Всмукнатините са празни пространства в отливките, които се образуват по време на втвърдяването в резултат на фазовите превръщания и свиването на метала при охлаждане. В зависимост от тяхната форма и разположение, всмукнатините биват концентрирани или разсеяни (микропорестост).

Процесът на формиране преминава през три основни етапа:

- **Първи етап:** Обхваща периода от заливането на течния метал до образуването на начална твърда кора по стените на леярската форма. В края на този етап стопилката е изпълнила кухината и температурата ѝ е достигнала ликвидус-линията (фиг. 2.28).
- **Втори етап:** През този етап охлаждането продължава с интензивно обемно свиване на течния метал в сърцевината, докато повърхностната кора нараства. Тъй като свиването на стопилката е по-значително от това на твърдата обвивка, в отливката се зараждат дефицити на маса, които водят до формирането на всмукнатини.
- **Трети етап:** Обхваща пълното втвърдяване на метала и последващото му охлаждане в твърдо състояние до стайна температура.

За получаване на плътни и здрави отливки, в зависимост от конфигурацията и масата им, се създават подходящи условия за кристализация – обемна и насочена. При необходимост от извеждане на всмукнатината извън отливката се предвиждат мъртви глави. Те компенсират обемния дефицит чрез подаване на допълнителна стопилка към зоната на кристализация, като по този начин всмукнатината се формира в техния обем.



Фиг. 2.28. Механизъм на възникване на всмукнатини

2.9.2. Напрежения в отливките

При охлаждане и кристализация на отливките протича свиване, съпроводено с деформации. Когато тези деформации се възпрепятстват от формата или от различни части на самата отливка, възникват напрежения. Ако стойността на напреженията превиши границата на якост на метала, могат да се образуват пукнатини.

Напреженията, породени от температурната разлика между отделните части на отливката в процеса на охлаждане, се наричат термични напрежения. Тези от тях, които предизвикват само еластични деформации, изчезват след изравняване на температурите. Когато обаче термичните напрежения предизвикат пластична деформация, след окончателното охлаждане те водят до формиране на остатъчни напрежения. В леярските сплави, в зависимост от режима на охлаждане, могат да се формират остатъчни напрежения с различна величина. За определянето им се използват различни технологични проби.

Според причините за възникване напреженията в отливките могат да бъдат:

- термични;
- механични;
- фазови;
- структурни;
- ликвационни.

Според обема, в който се уравновесяват, напреженията се разделят на напрежения от *първи*, *втори* и *трети* род. Напреженията от първи род се уравновесяват в обема на цялата отливка. Напреженията от втори род се уравновесяват в рамките на отделните кристални зърна. Напреженията от трети род се проявяват в кристалната решетка.

Термични напрежения

Термичните напрежения възникват поради различните скорости на охлаждане на тънките и дебелите части на отливката. В тънките стени се развиват опънови напрежения, а в дебелите - натискови.

Непосредствено след заливане на формата температурата в тънките и дебелите части на отливката е практически еднаква. Тънките части обаче се охлаждат значително по-бързо от дебелите. Разликата в температурите първоначално е нулева, след това достига максимум, а при охлаждане на отливката до стайна температура отново намалява до нула.

Механични напрежения

Механичните напрежения възникват в резултат на съпротивлението, което леярската форма и сърцата оказват на свиването на отливката. При сплавите на желязна основа до температура около 650 °C напреженията се компенсират чрез протичаща пластична деформация. Под тази температура те се натрупват и достигат максимум приблизително при 200 °C.

След освобождаване на отливката от формата напреженията обикновено намаляват или изчезват, но могат да доведат до деформации.

Особено големи механични напрежения възникват при леене в постоянни (метални) форми.

Фазови напрежения

Фазовите напрежения възникват при образуването или изчезването на различни фази и структурни съставлящи по време на охлаждането на отливките. Тези фази имат различен относителен обем спрямо основната матрица. Поради различните температури в отделните части на отливката фазовите превръщания протичат в различно време, което води до появата на фазови напрежения.

Структурни напрежения

Структурните напрежения се предизвикват от различните коефициенти на свиване на отделните структурни съставлящи, образувани едновременно в отливката.

Ликвационни напрежения

Ликвационните напрежения се дължат на нееднородността на химичния състав както в отделните кристали, така и в различни участъци от сечението на отливката. Различният химичен състав води до различни коефициенти на свиване и вследствие на това възникват напрежения от първи и втори род.

Намаляване на напреженията в отливките

Намаляването на напреженията може да се постигне чрез:

- използване на сплави с по-малко свиване и по-голяма плътност;
- намаляване съпротивлението на леярската форма чрез използване на по-податливи формовъчни смеси и подходяща конструкция на формата;
- изравняване на скоростите на охлаждане чрез правилно подвеждане на метала;
- използване на охладители и мъртви глави.

2.9.3. Пукнатини в отливките

Пукнатините в отливките са резултат от възникнали опънови напрежения, които превишават якостта на метала в определени сечения. В зависимост от температурния интервал, в който се появяват, те се класифицират като *горещи* и *студени*.

Горещи пукнатини

Те се характеризират с груб, тъмен лом, в който често се наблюдават неметални включвания. Разрушаването на отливката става в близост до температурата на кристализация (малко под теоретичната солидус-линия), когато между зърната все още има микрослоеви течна фаза. Тъмният цвят на лома се дължи на интензивното окисление, протичащо при високите температури на образуване на пукнатината.

Студени пукнатини

Студените пукнатини имат блестяща повърхност или са съвсем слабо оцветени. Те възникват при по-ниски температури (за стомани и чугуни под

~650 °C), когато металът е напълно втвърден и преминава от пластично в еластично състояние. Обикновено се формират около температурата на рекристализация, където пластичността е ниска. Те могат да се появят дори при стайна температура, често провокирани от слаб външен удар или допълнително натоварване.

Основната причина за появата на студени пукнатини са натрупаните *вътрешни напрежения*, които биват два вида:

- *Термични напрежения*: Възникват поради неравномерното охлаждане на отделните сечения на отливката. Тънките стени се охлаждат и свиват по-бързо от масивните, което създава сили на опън.
- *Фазови (структурни) напрежения*: Появяват се при структурни превръщания в твърдо състояние (например преход от аустенит към мартензит). Те са съпроводени с изменение на специфичния обем на метала, което генерира допълнително вътрешно натоварване.

Фактори и мерки за предотвратяване

Върху склонността към образуване на пукнатини оказват влияние множество *фактори*:

- Линейното свиване на сплавите в твърдо състояние;
- Механичните свойства на материала при високи температури;
- Особеностите на процеса на втвърдяване и конструкцията на отливката;
- Податливостта (деформируемостта) на леярската форма и сърцата.

Борбата с тези дефекти е комплексна и включва: подобряване на технологичността на конструкцията (избягване на остри преходи), увеличаване податливостта на формовъчните и сърцевите смеси, оптимизиране на температурата и скоростта на заливане, контролирано охлаждане, както и ограничаване на примесите в сплавта, които повишават нейната крехкост.

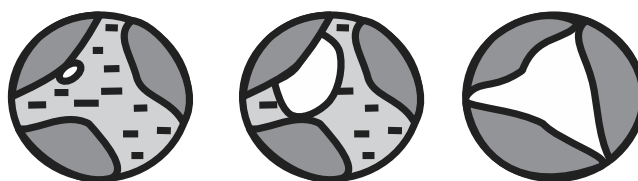
2.9.4. Неметални включвания и газове в отливките

Неметални включвания в отливките са твърди частици - неметални съединения на компонентите изграждащи сплавта със съпътстващите я примеси, с размери от няколко микрометра до десетки микрометра. По състав са окиси и сулфиди с различна оформление. Една част от тях са разтворими в сплавта и се формират като самостоятелни фази, само в процеса на кристализация, а другите могат да съществуват като неметални частици в стопения метал.

Газовете в отливките могат да бъдат включени под формата на: газови шупли - газове в свободно състояние, адсорбирани по повърхността на зърната, разтворени в основния метал или образуващи химични съединения с няколко от компонентите на сплавта. Те се характеризират с гладка и блестяща повърхност. Наличието на газове в отливките е свързано с намаляване на тяхната якост и пластичност. Газовите шупли с продълговата форма служат и като концентратори на напрежения. От енергетична гледна

точка, газовете е по-изгодно да се разположат във формиращите се всмукнатини (порестост).

Ако в процеса на кристализация не се отделят газове, разсеяната порестост се формира в условията на вакуум. При условие, че металът съдържа достатъчно количество разтворени газове, техните атоми проникват във вече образуваните пори и повишават в тях налягането. Счита се, че газовете могат да изтласкат метала от зоната на порите (фиг. 2.29). В действителност в отливките се получава комбинирана порестост - от наличните газове и протичащото свиване, тъй като газоотделянето съвпада с периода на формиране на пористостта.



Фиг. 2.29. Схема на отделяне на газовете в порите

Газовете под формата на разтвор или химично съединение намаляват пластичността на отливките. В качеството на съединение те са източник на неметални включения, които оказват влияние при формиране структурата на отливките.

Газовата порестост се наблюдава във дебелостенните отливки, при ниски температури на заливане и в тънкостенните - при високи температури на заливане. Вероятно в процеса на кристализация на сплавите не се създават предпоставки за пълното отделяне на газовете, в следствие увеличения вискозитет на стопилките.

Основните *фактори* за появата на газова порестост в отливките са: химичният състав на метала, материалът на леярската форма, конструкцията на лежковата система и температурата на заливане.

2.10. Леярски форми

2.10.1. Предназначение и видове леярски форми

В леярското производство фасонните детайли и заготовки се получават чрез изливане на течен метал в специално изработено съоръжение, наречено *леярска форма*. Нейната вътрешна кухня съответства на външните очертания на бъдещата отливка, а вътрешните кухни и отвори се оформят чрез допълнителни вложки, наречени *леярски сърца*. Броят и видът на съставните елементи на формата зависят от сложността на отливката, използваната моделна екипировка и приложената технология на леење (Калев, 1987).

В зависимост от материала и възможността за повторна употреба, формите се разделят на три основни вида:

- *Еднократни форми*: Изработват се от формовъчни смеси (пясък,

глина и добавки) и служат за получаването на само една отливка, след което се разрушават. Това е най-разпространеният метод в съвременното лелярство.

- *Полупостоянни (керамични) форми:* Изработват се от високоогнеупорни материали - шамот, графит и др. Могат да се използват многократно - обикновено издържат от 40 до 80 заливания.
- *Постоянни (метални) форми:* Изработват се от чугун, стомана или други метални сплави. Притежават висока трайност и издържат до няколко хиляди заливания, което ги прави икономически ефективни при масовото производство.

При използване на еднократни пясъчни форми - се различават три състояния на формата към момента на заливане:

- *Мокри (влажни) форми:* Използват се директно след формоване без предварително изсушаване. Подходящи са за малки до средни отливки.
- *Сухи форми:* Подлагат се на цялостно термично изсушаване преди заливане с метал. Използват се за едрогабаритни и тежки отливки с цел повишаване на здравината на формата и намаляване на газоотделянето.
- *Повърхностно изсушени форми:* При тях се изсушава само работният (лицев) слой на кухината, което осигурява добър баланс между здравина и производителност.

Изборът на конкретен вид лелярска форма се определя от сложността на отливката, изискванията за точност и серийността на производството. В таблица 2.13 са систематизирани сравнителните характеристики, предимствата и областите на приложение на различните форми.

Таблица 2.13. Сравнителен анализ на видовете лелярски форми

Вид форма	Предимства	Недостатъци	Приложими методи на лееене
Еднократни (пясъчни)	Ниска цена, възможност за получаване на огромни детайли	Ниска точност, голяма грапавост, бавен процес	Ръчно и машинно лееене в пясъчни форми
Полупостоянни (керамични)	Висока огнеупорност, добра чистота на повърхнината	Висока цена на сместа, сложен процес на изпичане	Лееене по стопяеми модели, прецизно лееене
Постоянни (метални)	Изключителна точност, висока производителност	Висока инвестиция, ограничение в габаритите	Кокилно лееене, лееене под налягане, центробежно

2.10.2. Основни елементи на леярските форми

Леярската форма обикновено е съставена от две полуформи, разделени от делителна плоскост. Тя е съвкупност от елементи, чието функционално предназначение се групира по следния начин:

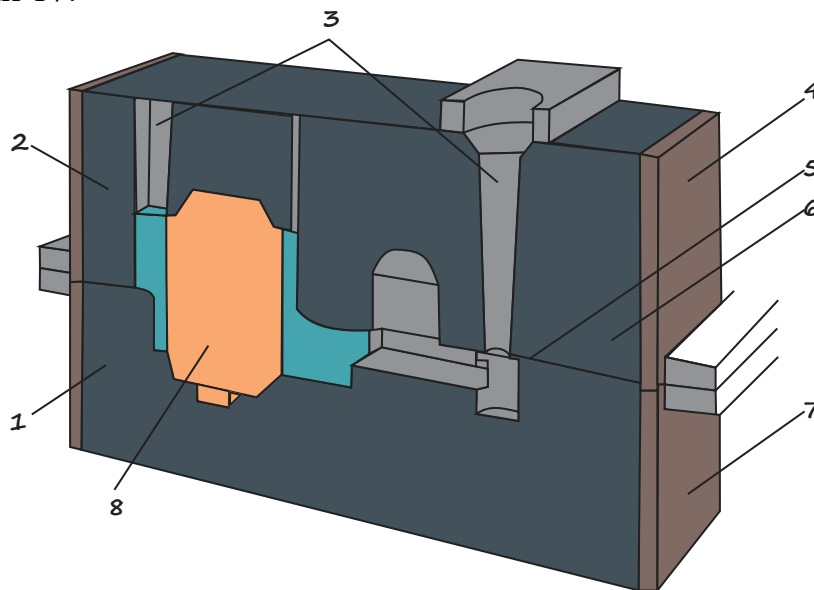
- *Моделно-касова екипировка (моделен комплект)*: Това са инструментите, необходими за изработване на формата. Към тях спадат: леярски модели (за оформяне на външната конфигурация на работната кухня); сърцеви кутии (за изработване на леярските сърца); моделни плочи (върху които се закрепват моделите при машинно формоване); леярски каси.
- *Оформящи елементи* - към тях спадат работната кухня, получена или от формовъчната смес при еднократните форми или от предварително получените чрез механична обработка половини на металната форма и леярските сърца. Те са в директен контакт с метала и определят външната и вътрешната конфигурация (геометрията) на бъдещата отливка.
- *Леякова система* - използва се за плавно и непрекъснато постъпване на стопилката в кухнята, като същевременно се осъществява задържане на шлаката и примесите.
- *Елементи за захранване и газов режим* - мъртви глави, охладители и отливъци.
- *Укрепващи и центроващи елементи* - това са леярските каси и центроващите щифтове, които гарантират точното съвпадане на горната и долната полуформа по делителната плоскост.

На фигури 2.30 и 2.31 са представени два вида леярски форми - еднократна (пясъчно-глинеста) и постоянна (пресформа). Въпреки разликата в тяхната трайност, те функционират на общи принципи, като задължително включват работна кухня, леякова система и сърца. Същевременно начинът, по който се оформят тези елементи чрез съответната моделна екипировка и се изважда готовата отливка, варира значително. Тези специфични разлики са систематизирани в таблица 2.14.

За разлика от еднократните пясъчни форми, постоянните метални форми се характеризират със сложна конструкция, която позволява многократна употреба и висока прецизност. Основните им компоненти са организирани в следните системи:

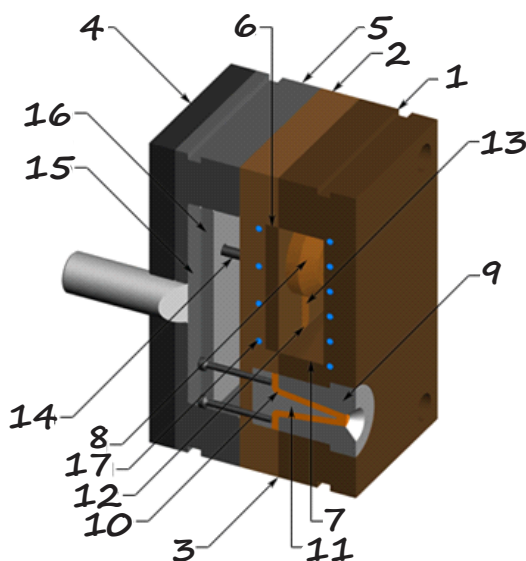
1. *Корпусна и носеща система (Пакет)*: неподвижна 1 и подвижна 2 половина на пресформата; делителна равнина 3; опорна плоча 4; дистанционна кутия 5.
2. *Формообразуващи елементи*: матрица 7; поансон 6.
3. *Леякова система*: леякова чаша 9; леяк 10; питателен канал 12; шлакоуловител 11.
4. *Система за изхвърляне и охлаждане*: избутвачи 14; пакет на избутвачите, съставен от основна плоча 15 и фиксираща (контра)

плоча 16, които задвижват щифтовете синхронно; вентилационни канали 17.



Фиг. 2.30. Еднократна леярска форма (DEI, н.д.)

1 - горна полуформа; 2 - долна полуформа; 3 - леякова система; 4 - горна каса; 5 - делителна плоскост; 6 - формовъчна смес; 7 - долна каса; 8 - леярско сърце



Фиг. 2.31. Постоянна леярска форма - пресформа, използвана при леене под налягане (Tops Precision, 2026)

Таблица 2.14. Сравнение на конструктивните елементи на леярската форма и използваната екипировка за изработването ѝ

Характеристика	Еднократна леярска форма	Постоянна леярска форма
Изработване на кухината	Чрез леярски модел	Чрез стоманени вложки, получени върху фрезова машина

Екипировка	Леярски каси, запълнени с формовъчна смес	Подвижна и неподвижна част на метални плочи
Оформяне на вътрешни отвори	Пясъчни сърца	Метални щифтове, задвижвани механично
Леякова система	Чрез модели	Втулки и канали, вградени в метала
Отвеждане на газове	През формовъчната смес и вентилационни канали	През вентилационни канали по делителната плоскост на пресформата
Изваждане на отливката	Чрез разрушаване на формата	Чрез система от избутвачи

Правилното конструиране на леярската форма и изборът на подходяща моделна екипировка са решаващи за осигуряване на качествено формообразуване, равномерно запълване на кухнята с течен метал и получаване на отливки с необходимата точност и структура.

2.10.3. Моделен комплект

За изработването на леярските форми се използва специализирана моделна екипировка, чийто основен компонент е моделният комплект. Той представлява съвкупност от приспособления, необходими за оформяне на кухините във формовъчната смес.

В състава на моделния комплект влизат:

- *Леярски модели* - служат за получаване на външната конфигурация на отливката в пясъчната форма.
- *Кутии за сърца* - приспособления, в които се изработват леярските сърца.
- *Леярски сърца* - изработват се от специални смеси и се поставят във формата, за да оформят вътрешните кухни, проходни отвори или сложни външни елементи на детайла.
- *Спомагателни елементи* - моделни и подмоделни плочи, както и модели на леяковата система.

Използването на пълен моделен комплект е характерно за еднократните форми (пясъчно-глинести). При металните форми (кокили и пресформи) външната конфигурация на отливката се определя директно от механично изработената кухня в самото тяло на металната форма, което елиминира нуждата от отделен външен модел.

2.10.3.1. Леярски модели

Леярските модели са основни елементи от моделната екипировка, чрез които се оформя работната кухня на леярската форма. Те определят външната конфигурация на бъдещата отливка.

Размерите на модела са по-големи от тези на готовия детайл, тъй като в тях се предвиждат технологични надбавки за:

- Линейно свиване на метала при охлаждане;
- Механична обработка на повърхностите на отливката;

- Леярски наклони, които осигуряват лесно изваждане на модела от формата без повреждане на нейните стени.

Класификация на леярските модели

1. Според конструкцията:

- Цели модели - изработени от един детайл; използват се за отливки с проста форма, при които моделът може да бъде изваден директно от формата.
- Делими модели - състоят се от две или повече части, съединени чрез центроваци щифтове. Прилагат се при по-сложни конфигурации, при които разделянето на модела улеснява формоването.

2. Според начина на използване:

- Модели за ръчно формоване - използват се при единично и дребносерийно производство. Най-често се изработват от дърво или пластмаси.
- Модели за машинно формоване - монтират се върху моделни плочи и се използват при серийно производство. Изработват се от метални сплави или устойчиви пластмаси и се отличават с висока точност и изнosoустойчивост.

3. Според метода на леене:

- Модели за пясъчни форми - най-разпространеният тип модели, използвани при леене в пясъчни форми.
- Стопяеми модели - изработват се от термопластични материали (парафин, восък). При тях моделът се отстранява чрез стопяване, което позволява получаването на отливки с висока точност и сложна геометрия.
- Газифицируеми модели - изработват се от пенополистирол (стиропор). При заливане с течен метал моделът се изпарява (газифицира) и се замества от стопилката.
- Метални постоянни форми - използват се при кокилно леене и леене под налягане, при които самата метална форма изпълнява ролята на модел.

2.10.3.2. Леярски сърца

Леярските сърца са формообразуващи елементи, чрез които се оформят вътрешните кухини, канали и отвори в отливките, а в някои случаи и сложни външни повърхнини. Те се изработват отделно от формата и се поставят в работната кухня непосредствено преди заливането на течния метал.

Сърцата се изработват от специални *сърцевидни смеси*, които обикновено съдържат:

- *Основни вещества* - кварцов пясък;
- *Свързващи вещества* - глина, водно стъкло или синтетични смоли;
- *Прибавки* - дървесно брашно, нишесте или въглищен прах, подобряващи технологичните свойства на сместа.

Основни изисквания към леярските сърца

За да се осигури качествена отливка, сърцата трябва да притежават следните свойства:

- *Механична якост* - способност на сърцето да запазва целостта си при транспортиране, монтаж във формата и под действието на налягането на течния метал.
- *Огнеупорност* - устойчивост на високи температури, без разтопяване или взаимодействие със стопилката.
- *Газопроницаемост* - способност на сърцевата смес да пропуска газовете, отделящи се при контакта с горещия метал.
- *Податливост (свиваемост)* - способност на сърцето да компенсира свиването на метала при охлаждане, без да предизвиква напрежения и пукнатини в отливката.
- *Избиваемост* - способност на сърцето лесно да се разрушава и отстранява след охлаждане на отливката.

За осигуряване на точното положение на сърцето във формата и предотвратяване на неговото изместване при заливане се използват *марки*, чрез които сърцето се фиксира към формата.

Класификация на леярските сърца

Леярските сърца могат да се класифицират по различни признаци в зависимост от технологията на изработване, конструктивните особености и предназначението им.

1. Според начина на изработване и вида на производството:

- *Ръчно изработвани* - за единично и дребносерийно производство; подходящи за много сложни или изключително едри сърца.
- *Машинно изработвани* - изработват се със специализирани машини (сърцедувни, сърцестрелни); осигуряват висока точност и производителност при серийно и масово производство.

2. Според конструкцията и структурата:

- *Плътни (монолитни)* - изработени изцяло от сърцева смес; използват се при масивни отливки и сравнително прости форми.
- *Черупкови* - представляват тънка втвърдена обвивка; леки, икономични и с добра газопроницаемост.
- *Съставни* - сглобяват се от две или повече части, изработени отделно; прилагат се при изключително сложни вътрешни кухини.

3. Според предназначението (оформяната повърхнина):

- *За вътрешни кухини* - за получаване на канали, отвори и празнини в тялото на отливката.
- *За външни повърхнини* - оформяне на елементи от външния контур, които не могат да се извлекат директно от модела при формоването.

4. Според положението във формата и начина на закрепване:

- *Хоризонтални, вертикални, висящи и конзолни* (закрепени само в единия край).

5. Според технологията на втвърдяване на сместа:

- *Сушени* - класическо втвърдяване чрез нагряване в пещи;
- *Hot-box процеси*;

- *Cold-box процеси*;
- *CO₂ процеси* - втвърдяване на водностъклена смес чрез обдухване с въглероден диоксид.

6. Според използвания материал:

- *Пясъчни* - най-разпространените (кварцов пясък със свързващи вещества);
- *Керамични* - от огнеупорни материали за прецизни отливки и високи температури;
- *Метални* - метални вложки (поансони) за многократна употреба, предимно при леење в кокили;
- *Разтворими (стопаеми)* - изработват се от соли или специални състави, които се разтварят след втвърдяване на метала; за труднодостъпни кухини.

Изборът на вид сърце зависи от сложността на отливката, размера на кухините, използваната сърцева смес и характера на производство.

2.10.3.3. Сърцеве кутии

Получаването на леярските сърца се извършва в *сърцеве кутии*, които представляват специални приспособления за формоване на сърцевата смес.

Подобно на леярските форми, сърцевите кутии най-често се състоят от две части, които образуват кухина с конфигурацията на съответното сърце. Размерите на кухината се определят така, че да се осигурят необходимите технологични прибавки и да се отчете свиването на метала.

Основни конструкции на сърцеве кутии

- *Цели (монолитни)*: Отворени отгоре, подходящи за прости и плитки сърца.
- *Двуделни (разглобяеми)*: Състоят се от две части, съединени с щифтове; използват се за по-сложни форми, за да се улесни изваждането на сърцето.
- *С подвижни части*: Използват се за сърца с технологични препяждствия (обратни наклони, изпъкналости, вдлъбнатини и др.), които не позволяват тяхното директно изваждане.

Материали за изработване на сърцеве кутии

Изборът на материал за изработката на сърцевата кутия зависи от серийността на производството и изискванията за точност. Най-често използваните са:

- *Дървесина* (бук, бор, липа): Най-често се използва при единично и дребносерийно производство, защото е евтина и лесна за обработка.
- *Метали* (чугун, алуминий, стомана): За серийно и масово производство. Металните кутии са износоустойчиви, не се влияят от влагата и осигуряват висока точност.

- *Пластмаси и смоли* (епоксидни, полиуретанови): Използват се за сложни форми и средни серии. По-леки са от металните и устойчиви на химическите катализатори при *Cold-box* процеси.

Основни етапи при изработването на сърцеви кутии

Изработването на сърцевите кутии представлява последователен технологичен процес, който включва проектиране, изработка на работната кухня и окончателно сглобяване на елементите на кутията.

1. *Проектиране на конструкцията* - На основата на чертежа на отливката и конструкцията на съответното леярско сърце се разработва конструкцията на сърцевата кутия. Определят се формата и размерите на работната кухня, като се отчитат необходимите технологични добавки, леярски наклони и условията за изваждане на сърцето. На този етап се избира и конструкцията на кутията (цяла, двуделна или с подвижни части), както и материалът, от който тя ще бъде изработена.

2. *Механична обработка на работната кухня* - След проектирането се пристъпва към изработване на работната кухня на сърцевата кутия. При металните кутии това се извършва чрез механична обработка - фрезование, струговане и пробиване на металорежещи машини или CNC оборудване. При дървените кутии обработката може да бъде ръчна или машинна, като отделните елементи се оформят и сглобяват така, че да възпроизведат точно геометрията на сърцето.

3. *Изработка чрез леене или формоване* - При някои видове сърцеви кутии, особено тези от пластмаси и синтетични смоли, работната кухня се получава чрез леене или формоване върху предварително изработен модел. При металните кутии понякога се използва леене на заготовката, която впоследствие се обработва механично до необходимата точност.

4. *Финишна обработка* - След оформянето на работната кухня се извършва финална обработка на повърхностите. Тя включва шлайфане, полиране и отстраняване на грапавини, с цел получаване на гладка работна повърхност. Това намалява съпротивлението при изваждане на сърцето и предотвратява полепването на сърцевата смес.

5. *Монтаж на конструктивни елементи* - В заключителния етап се монтират центровашите щифтове, заключващите механизми и други конструктивни елементи, които осигуряват точното съединяване на частите на сърцевата кутия. Освен това се предвиждат вентилационни отвори, които позволяват отвеждането на въздуха и газовете при запълване на кухнята със сърцева смес, особено при машинно формоване.

2.10.4. Избор на метод за изработване на леярските форми

Изборът на подходящ метод за изработване на леярските форми е важен етап при проектирането на леярския технологичен процес. Правилният избор оказва съществено влияние върху качеството на отливките, производителността и икономическата ефективност на технологията.

Методът за формование се определя от редица фактори, свързани както с конструкцията на отливката, така и с условията на производство. В практиката се вземат предвид следните основни фактори:

- конструкцията и сложността на отливката;
- размерите и масата на детайла;
- материалът на отливката;
- изискванията за точност и качество на повърхнината;
- серийността на производството;
- икономическата ефективност на избраната технология.

В зависимост от тези фактори се определя най-подходящият метод на леене, който осигурява необходимото качество на отливките при минимални производствени разходи. Основните фактори, които влияят върху избора на метод за изработване на леярските форми, са обобщени в таблица 2.15.

Таблица 2.15. Основни фактори при избор на метод за изработване на леярските форми

Фактор	Влияние върху избора на метод
Конструкция и сложност на отливката	Сложните форми с вътрешни кухини и тънки стени изискват методи, позволяващи получаване на висока точност и добра запълняемост на формата (например леене по стопяем модел или леене под налягане).
Размери и маса на отливката	Големи и масивни отливки обикновено се произвеждат в пясъчни форми, докато малки и средни детайли могат да се получават чрез кокилно леене или леене под налягане.
Материал на отливката	Температурата на топене и свойствата на сплавта определят вида на формата. Например чугунът и стоманата най-често се леят в пясъчни форми, докато алуминиевите и магнезиевите сплави често се леят в метални форми.
Изисквания за точност и грапавост на повърхнината	При високи изисквания за размерна точност и гладкост на повърхнината се използват методи като леене по стопяеми модели или леене под налягане.
Серийност на производството	При единично и дребносерийно производство се предпочитат пясъчни форми, докато при серийно и масово производство се използват метални форми и автоматизирани технологии.
Икономическа ефективност	Изборът на технология трябва да осигурява минимални производствени разходи при запазване на необходимото качество на отливката.

Анализът на тези фактори позволява да се избере най-подходящият технологичен процес за получаване на отливката.

3.1. Конвенционални методи за леене

3.1.1. Леене в пясъчни (еднократни) форми

Леенето в пясъчни (еднократни) форми представлява един от най-разпространените и универсални методи за получаване на метални отливки. Неговото широко приложение се дължи на възможността да се изработват детайли с различна маса, сложност и предназначение - от малогабаритни елементи до масивни корпусни изделия ([EngineeringTechnology.org](https://www.EngineeringTechnology.org), 2026).

Същността на метода се състои в това, че течният метал се излива в кухина, оформена в пясъчна форма, изработена с помощта на модел. След втвърдяване и охлаждане на метала формата се разрушава, което определя нейния еднократен характер.

3.1.1.1. Характер на производството и приложение

Благодарение на своята универсалност методът за леенето в пясъчно-глинести форми е приложим както при единичното, така и при серийното и масовото производство. Изборът на технология за изработване на формите зависи от обема на производството и необходимата производителност. Основните начини за формоване са ръчно и машинно.

Ръчното формоване се прилага предимно в единичното и дребносерийното производство. То се характеризира с висока технологична гъвкавост и възможност за изработване на сложни и едрогабаритни отливки. Основен недостатък е по-ниската производителност и зависимостта от квалификацията на работниците.

Машинното формоване се използва в серийното и масовото производство. При него процесът е механизирен или автоматизиран, което осигурява висока производителност, по-добра повтораемост и по-високо качество на отливките. Често се използват моделни плочи (match-plate), които позволяват бързо и точно оформяне на формите.

3.1.1.2. Предимства и недостатъци на леенето в пясъчни форми

Леенето в пясъчни форми се характеризира с редица съществени предимства, които обуславят неговото широко приложение в леейската практика. Методът позволява получаване на отливки със сложна геометрия, включително детайли с вътрешни кухини, при относително висока технологична гъвкавост. Освен това той е приложим за широк диапазон от размери и маси на отливките.

Съществено предимство представляват сравнително ниските разходи за технологична екипировка, особено при единично и дребносерийно производство. Методът осигурява също възможност за използване на

разнообразни метални сплави, което допълнително разширява неговата приложимост.

Наред с посочените предимства, леенето в пясъчни форми има и определени недостатъци. Характерни са по-ниската точност на размерите и по-грубата повърхност в сравнение със специалните леярски методи, което налага последваща механична обработка на отливките. Допълнително, използването на еднократни форми води до повишен разход на формовъчни материали.

Процесът се отличава и с по-висока трудоемкост, както и с ограничени възможности за пълна автоматизация при ръчно формоване. Съществува и риск от възникване на леярски дефекти при недостатъчен контрол върху отделните технологични етапи.

3.1.1.3. Технологичен маршрут за изработване на отливки

Производството на отливки в пясъчни форми е сложен процес, чийто технологичен маршрут е представен на фиг. 3.1. Той включва следните основни етапи:

Първи етап: Проектиране и подготовка на екипировката

Започва с разработване на леярски чертеж въз основа на конструктивния чертеж на детайла. Тук технолозите отчитат критични фактори като прибавките за последваща механична обработка, допустимите отклонения, леярските наклони и радиусите на закръгление. Този етап е свързан с проектиране на моделният комплект и е разгледан подробно в глава 2 от учебника.

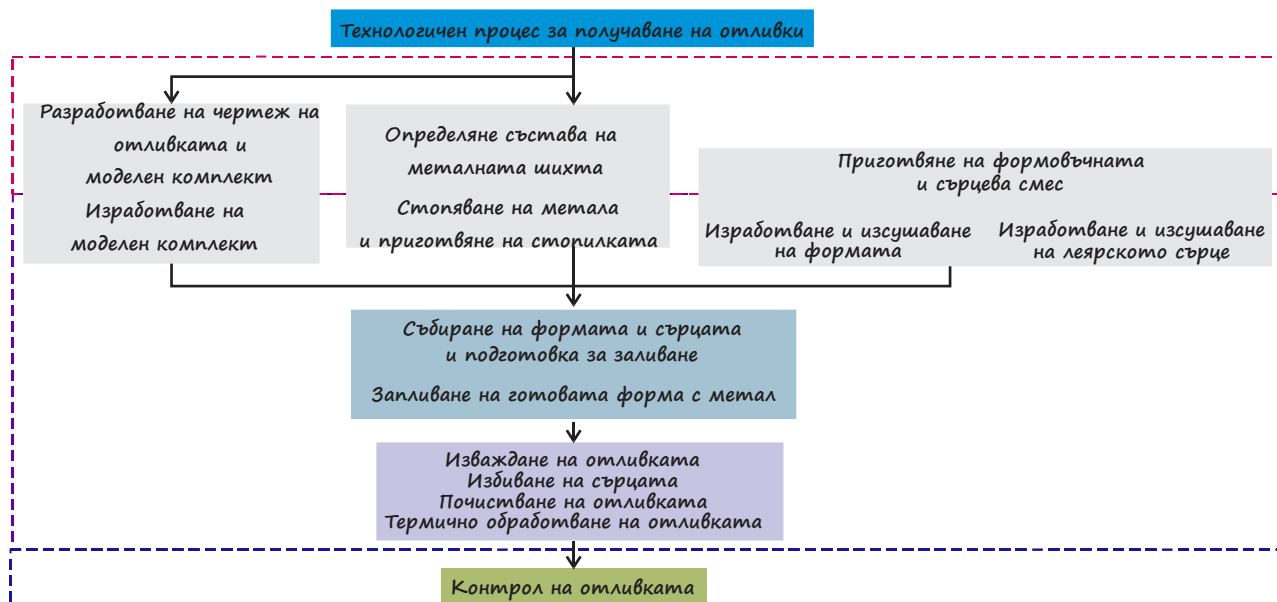
Втори етап: Подготвителни операции

Включва се подготовка на формовъчните и сърцевите смеси, както и изработване на моделния комплект и сърцата. Едновременно с това се извършва стопяване и модифициране на метала с цел осигуряване на изискуемия химичен състав и достигане на зададен температурен интервал за леене.

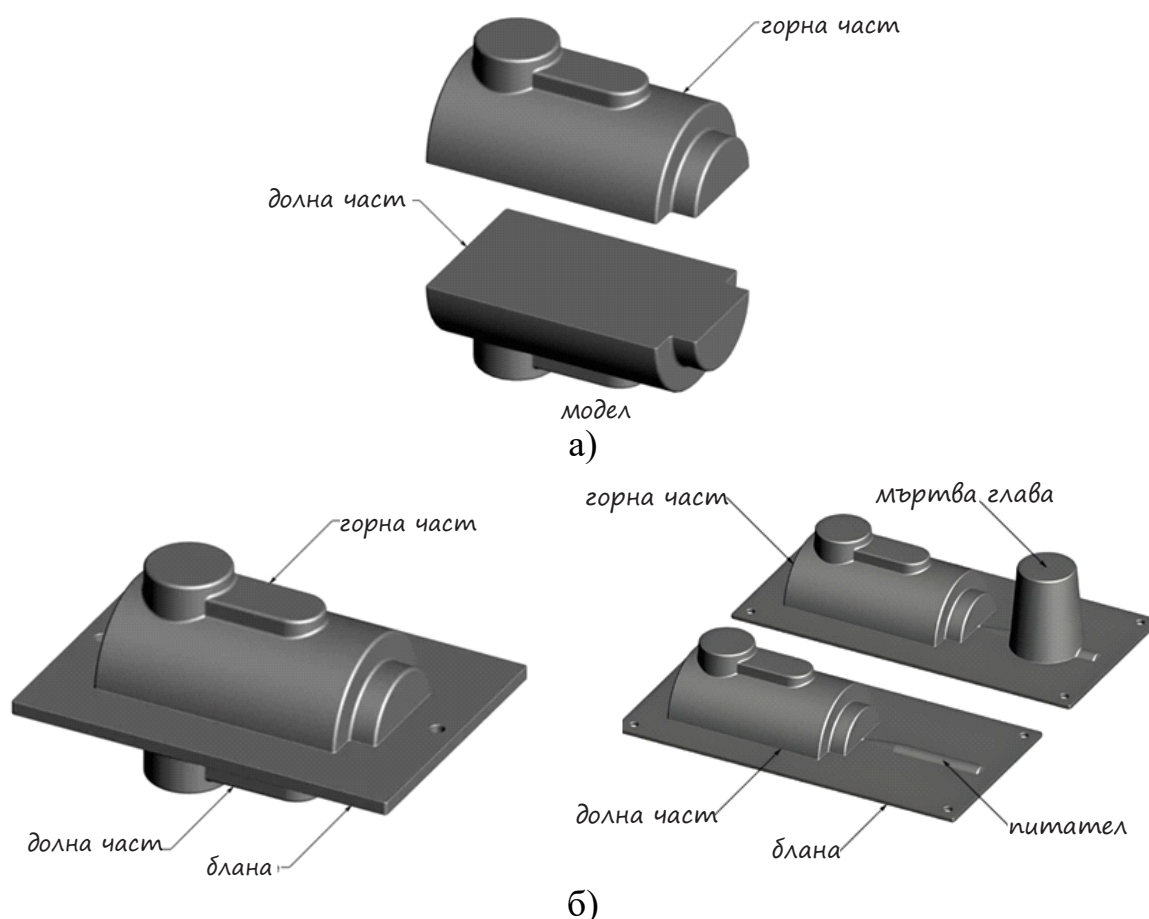
При ръчно формоване се използва цял или делим модел, а при машинно - метална плоча или блана (фиг. 3.2). Тя е специализиран инструмент за леене, при който двете половини на модела (горна и долна част) са трайно монтирани на срещуположните страни на една обща плоча. Често леяковата система е вградена директно в плочата, което елиминира нуждата от ръчното ѝ изрязване. Този дизайн позволява едновременното оформяне на двете части на пясъчната форма, което гарантира перфектно съвпадение и драстично ускорява процеса на леене (EngineeringTechnology.org, 2026).

Трети етап: Събиране и заливане на формата

В кушината на формата се поставят леярските сърца. След това двете полуформи се сглобяват, формата се осигурява с тежести срещу действието на хидростатичното налягане на течния метал и се залива. Разположението на леяковата система и мъртвите глави е от съществено значение за пълното запълване и ефективното хранване при кристализацията.



Фиг. 3.1. Принципна схема на лярски технологичен процес за изработване на отливки в пясъчни форми



Фиг. 3.2. Модел при ръчно формоване (а) и моделна плоча (б) за машинно формоване (IndiaMART, n.d.)

Четвърти етап: Окончателна обработка и контрол

След пълното втвърдяване и охлаждане на метала, отливката се изважда чрез разрушаване на формата. Сърцата се избиват, а повърхнините

се почистват основно от остатъци от смеси. Процесът завършва със строг технически контрол, който проверява точността на размерите и следи за евентуални вътрешни или външни дефекти (шупли, всмукнатини и др.).

3.1.2. Формовъчни и сърцевни материали и смеси

3.1.2.1. Основни и спомагателни материали

За да се получи качествена отливка, материалите за леярските форми трябва да отговарят на специфични изисквания. Свойствата на смесите трябва да съответстват на тези изисквания, произтичащи от вида на метала, размерите и сложността на детайла. Тъй като тези смеси не съществуват готови в природата, те се приготвят чрез комбиниране на различни компоненти, разделени в две основни групи:

- *Основни материали* - съставят по-голямата част от обема на сместа (кварцов пясък, глина, формовъчна пръст).
- *Спомагателни материали* - добавят се в малки количества за подобряване на специфични характеристики (свързващи вещества, пластификатори и специални прибавки).

В леярската практика основно приложение намира *кварцовият пясък*. Той е неорганичен материал, състоящ се предимно от частици на минерала кварц (SiO_2). Благодарение на своята висока химическа устойчивост, значителна твърдост и висока точка на топене (около 1700°C), той е един от най-разпространените индустриални минерали.

Качеството на пясъците се определя от минералният им състав. В зависимост от съдържанието на силициев диоксид (SiO_2) и глина, те се класифицират в три основни групи:

- Кварцови (1ПК, 2ПК, 3ПК) - с високо съдържание на SiO_2 (над 90 %) и минимални примеси на глина (до 2 %).
- Смесени (ПС) - със съдържание на SiO_2 около 86 % и повишено количество глина.
- Глинести (ПГ) - с ниско съдържание на SiO_2 (около 60 %) и високо съдържание на глина (до 30%).

Данните за тези класове са систематизирани в таблица 3.1.

Таблица 3.1. Разпределение на кварцовите пясъци по класове

Означение	SiO_2 , %	Глина, %
1ПК	98	1,8
2ПК	94	2
3ПК	90	2
ПС	86	3
ПГ	60	30

ПК - пясък кварцов; *ПС* - пясък смесен; *ПГ* - пясък глинест.

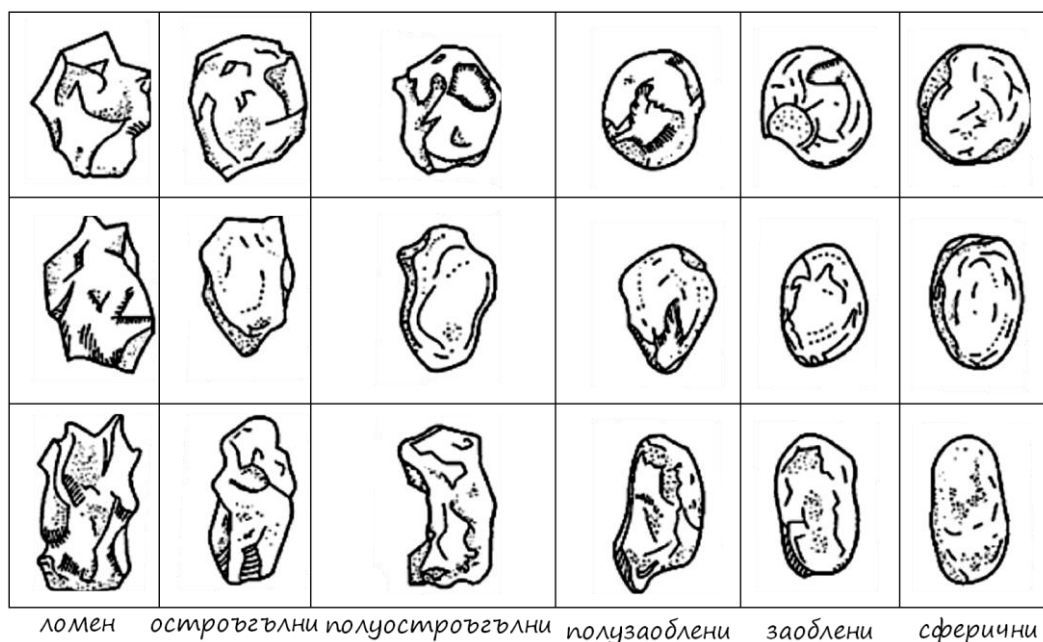
Забележка: Разликата до 100% в химическия състав се запълва от оксиди на алкални и алкалоземни елементи, които влияят върху технологичните свойства на сместа

Размерите на частиците определят структурата и газопропускливостта на сместа (БДС 423-85):

- Кварцов пясък: зърна с размери между 0,063 и 4 mm.
- Прах: частици между 0,005 и 0,063 mm.
- Глинеста съставка: фини частици с размер под 0,005 mm.

Геометричната форма на пясъчните зърна съществено влияе върху технологичните свойства на сместа (якост, газопропускливост и разход на свързващо вещество). Според своята конфигурация зърната се делят на четири основни категории (фиг. 3.3):

- *Кръгли*: Имат най-малка специфична повърхност и изискват минимално количество свързващо вещество. Осигуряват отлична течливост и лесно уплътняване на сместа, но имат по-ниско механично зацепване помежду си.
- *Полукръгли*: Представяват оптимален компромис между здравина и икономичност. Те са най-често използваните в леярската практика, тъй като осигуряват добра газопропускливост и стабилност на формата.
- *Ръбести*: Притежават голяма специфична повърхност и изискват повече свързващо вещество. Благодарение на острите си ръбове те се заклиняват добре едно в друго, което придава висока здравина на формата, но намалява нейната газопропускливост.
- *Сложни*: Състоят се от няколко по-малки зърна, здраво свързани помежду си. Този тип зърна са нежелателни в леярските смеси, тъй като лесно се разрушават при термично натоварване или механична обработка, което води до промяна в зърнометричния състав и влошаване на качеството на отливката.



Фиг. 3.3. Класификация на пясъка по неговата форма (Foseco, 2000)

Пясъците от класовете ПС и ПГ представляват естествени формовъчни смеси. Най-чистите кварцови пясъци (група ПК) съдържат минимално количество глина или се рафинират чрез промиване.

Поради ограничената си огнеупорност и склонността да реагира химически с разтопения метал и неговите оксиди, кварцовият пясък не винаги е подходящ за тежки условия на работа. При отливането на дебелостенни стоманени детайли или елементи от труднотопими сплави (например аустенитни манганови стомани) се използват *специални пясъци*. Те притежават по-висока термична и химическа устойчивост. Към тази група спадат:

- циркониеви;
- магнезитови;
- магнезито-хромитови.

Формовъчни глин

Глината е естествен финодисперсен минерал (с размер на частиците под 0,005 mm), съставен основно от хидратирани алуминиеви силикати. В нейния химичен състав преобладават диалуминиевият триоксид (Al_2O_3) и силициевият диоксид (SiO_2), като основните минерали са от групата на каолинита.

Благодарение на своята хигроскопичност, при смесване с вода глината образува пластична маса, която лесно се обработва и запазва формата си. Обикновените глин са полиминерални смеси от каолин, пясък, железни оксиди и други примеси. Те могат да бъдат класифицирани по различни признаци, например според:

1. Съдържанието на пясък:

- Мазна - съдържа под 5 % пясък. Отличава се с най-високо съдържание на каолин, голяма пластичност и висока огнеупорност.
- Средномазна - съдържа от 5 % до 15 % пясък.
- Постна - съдържа между 15 % и 30 % пясък.

Поради наличието на повече примеси, тя е по-малко пластична и по-леснотопима.

2. Термоустойчивост:

Температурата на топене зависи пряко от съдържанието на каолин (чистият каолин се топи над 1750 °C). Глините биват:

- леснотопими - с температура на топене до 1380 °C.
- труднотопими - между 1380 °C и 1550 °C.
- огнеупорни - над 1550 °C.

Формовъчната пръст е естествена природна смес от пясък, глина и други примеси. Тя се използва като икономичен материал за приготвяне на формовъчни смеси, като нейните свойства се определят от съотношението между пясъка и глинестите вещества в състава ѝ.

Свързващите вещества са ключови спомагателни материали, които осигуряват здравината на формовъчните и сърцеви смеси чрез създаване на

устойчиви връзки между кварцовите зърна. За да изпълняват ефективно тази роля, те трябва да отговарят на серия от качествени показатели:

- **Технологични свойства:** Да умократ пясъчните зърна бързо и равномерно, като същевременно гарантират висока якост на смесите както в сурово, така и в изсушено състояние.
- **Икономическа и екологична ефективност:** Да позволяват бързо втвърдяване при ниски температури за пестене на енергия, да имат постоянен състав и да не са дефицитни или скъпи материали.

Тези разнообразни изисквания налагат прецизна класификация на свързващите вещества според техния произход и свойства:

- **По произход:** Биват органични и неорганични.
- **Спрямо водата:** Разделят се на хидрофилни (разтворими във вода) и хидрофобни (неразтворими).
- **По механизъм на втвърдяване:** Биват химични (необратими), физични (обратими) или със смесено действие.

Въз основа на тази класификация се определя и конкретното им приложение в производството. Най-широко те се използват при приготвянето на сърцеви смеси, за да им придадат отлични механични характеристики. В практиката се прилагат различни масла, смоли и странични продукти от хартиената и нефтопреработвателната промишленост, като най-разпространени са лененото масло, декстринът, меласата и сулфидната луга.

За постигане на оптимални показатели при приготвянето на формовъчни и сърцеви смеси често се налага използването на допълнителни материали под формата на *прибавки*. Тяхната основна роля е да подобрят специфични характеристики на сместа или да придадат точно определени свойства на готовата форма, като най-съществено влияние оказват върху следните параметри:

- **Податливост и избиваемост:** За подобряване на тези свойства към смесите се добавят вещества, които изгарят или се разлагат при нагриване по време на заливането (например дървени стърготини или пенополистирол). Това предотвратява появата на напрежения в отливката и улеснява нейното изваждане от формата.
- **Устойчивост на пригар:** За получаване на чиста и гладка повърхност в състава се влагат каменовъглен прах, графит или мазут. Тези прибавки служат за ефективна защита срещу образуването на нагар по повърхността на отливките.
- **Специфични механични свойства:** Чрез добавки като водното стъкло се постига по-висока якост и точно определени физико-механични показатели на формите.

Наред с прибавките, които се влагат директно в сместа, за финалната чистота на отливките критична роля играят и *противопригарните покрития*. Те се нанасят повърхностно, като при работа с чугунени и стоманени отливки най-подходящи дезоксидатори в състава им са феросилицият (FeSi) и карборундът (SiC) във вид на прах.

В зависимост от предназначението си *формовъчните смеси* се делят на облицовъчни, пълнежни и единни.

Облицовъчните смеси се посипват непосредствено върху модела и трябва да притежават висока огнеупорност, висока якост и добра газопропускливост. Поради тази причина те се изработват от нови формовъчни материали кварцов пясък и глина, или чрез прибавяне на значителни количества нови материали към старата използвана вече смес, с което се възстановяват първоначалните им качества.

Пълнежната смес запълва останалата част от леярската форма. За нея се използва предимно стара (отработена) смес, която след изваждане на отливката се пресява, подлага се на магнитно сепариране, за да се отделят металните части от нея и се навлажнява до необходимата степен.

Единната смес намира приложение в механизираното машинно формоване, където поради механизацията на насипването не е възможно да се използват два вида смеси (облицовъчна и пълнежна). В този случай качествата на използваната смес трябва да бъдат по-добри от тези на пълнежната смес.

В зависимост от състоянието, в което ще се залива формата със метал, формовъчните смеси се делят на смеси за *сухо леене* и смеси за *мокро леене*. Въпросът за леенето в сухи или в мокри форми има голямо икономическо значение за леярското производство. Чрез изсушаване на формата преди заливането ѝ с метал се повишава нейната якост, улеснява се отделянето на газовете от метала и се намалява опасността от получаване на шупли в отливката. Заедно с това сушенето на формата увеличава стойността ѝ и забавя производствения процес, което е особено важно при масовото и особено при конвейерното производство. Поради това в много случаи се лее в неизсушена (мокра) форма, като се използват смеси с подходящ състав, осигуряващи ѝ достатъчна якост, газопропускливост и др.

В зависимост от вида на метала, който ще се отлива във формата, формовъчните смеси се делят на смеси за чугунени, стоманени и цветни отливки. Това разделяне на формовъчните смеси се налага от свойствата на различните метали, които се отливат във формите. Така например чугунът има по-ниска точка на топене и по-малък коефициент на линейно, съответно обемно, свиване от стоманата. Цветните метали се топят при значително по-ниска температура от чугуна. Поради това и качествата на формовъчните смеси, от които се изработват формите за леене на чугун, стомана и цветни метали, не трябва да бъдат еднакви.

Смесите за чугунени отливки се изработват обикновено от 50 - 90% стара формовъчна смес, в която се прибавят 50 - 10% нови материали - пясък и глина, и 2 - 8% смлени каменни въглища. Количеството на старата смес, новите материали и прибавките се определят от теглото и размерите на отливката. Колкото по-голяма и по-тежка е отливката и колкото по-дебели са стените ѝ, толкова по-голямо е количеството на новите материали. В практиката се използват както смеси за сухо, така и смеси за мокро леене на чугун.

Формовъчните смеси за леење на стомана трябва да притежават по-високи качества от смесите за леење на чугун: по-висока огнеупорност, по-голема податливост и т. н. Те се изработват най-често от нови материали, като за леење в сухи форми се състоят от 85 - 88% кварцов пясък и 12 - 15% огнеупорни глини, а за леење в мокри форми - от 80 - 90% кварцов пясък и 10 до 12% глина.

Смесите за леење на цветни метали се изработват от дребнозърнест пясък, за да се получи по-гладка повърхност на отливката, и огнеупорна глина, количеството на която може да бъде повече, отколкото в останалите смеси поради по-ниската температура на топене на метала.

В зависимост от произхода си в формовъчните смеси се делят на *естествени* и *синтетични*. Естествени смеси с подходящи качества в природата се срещат много рядко. Поради това в практиката се използват главно синтетични, специално приготвени от формовъчни материали и смеси.

Сърцевите смеси служат за изработване на леярските сърца. В сравнение със стените на формата сърцата се намират в много по-неблагоприятно положение, тъй като са обиколени от всички страни с течен метал, през тях трябва да се отведат относително по-големи количества газове, те са подложени на по-неблагоприятни механични натоварвания при запълване на формата с метал и т. н. Поради това сърцевите смеси трябва да притежават по-високи стойности на огнеупорност, якост, газопропускливост и др. в сравнение с формовъчните смеси. Те се изработват от нови материали - кварцов пясък, глина и специални свързващи вещества.

Поради голямото разнообразие от отливки и специфичните изисквания към тях, е трудно да се опишат изчерпателно всички състави и свойства на материалите, намерили приложение в практиката. Постоянното развитие на леярските технологии води до непрекъсната еволюция в състава на формовъчните смеси и използваните прибавки.

В съвременната леярска практика са се утвърдили три основни групи смеси: обикновени, химически втвърдявани и смеси за физични методи. Независимо от техния състав и начин на втвърдяване обаче, всяка смес трябва да притежава определен набор от качествени показатели.

За да се гарантира точността и здравината на отливките, е необходимо подробно да се разгледат специфичните свойства на формовъчните материали и смеси, които определят тяхното технологично поведение.

3.1.2.2. Свойства на формовъчните материали и смеси

За да бъдат годни за употреба в леярството, формовъчните материали и смеси трябва да притежават определени свойства, които се разделят на *първични* и *вторични* (технологични). Към първичните се отнасят характеристиките на външните признаци, химичният и минералният състав и строежът на материалите, които не зависят от външно въздействие. За разлика от тях вторичните свойства зависят както от първичните, така и от

състава и факторите на външно въздействие – налягане, температура, влага и др.

За по-лесно изучаване свойствата се групират на технологични, механични, хидравлични и топлофизични. Групирането е условно, тъй като някои свойства могат да се отнесат към повече от една група. В таблица 3.2 са представени основните групи свойства и техните представители.

Технологичните свойства характеризират работните качества на смесите и включват показатели като подвижност, хигроскопичност и избиваемост. Механичните свойства са свързани със съпротивлението на смесите срещу външни натоварвания и се изразяват чрез якост, пластичност и податливост. Хидравличните свойства определят условията за газообмен във формите, като основни показатели са газопропускливостта и газообразуващата способност. Теплофизичните свойства влияят върху топлинните процеси при леенето - скоростта на кристализация и охлаждането на метала.

Таблица 3.2. Свойства на формовъчните материали и смеси

Групи свойства	Представители
Технологични свойства	Подвижност, хигроскопичност, избиваемост, термохимична устойчивост, дълготрайност и др.
Механични свойства	Якост, повърхностна якост и ронливост, пластичност, податливост и др.
Хидравлични свойства	Газопропускливост, газообразуваща способност и др.
Теплофизични свойства	Специфичен топлинен капацитет, коефициент на температуропроводност, коефициент на топлоакмулираща способност

За да изпълняват предназначението си при изработването на пясъчни еднократни форми, формовъчните и сърцевите смеси трябва да притежават определени свойства. Част от тях са представени в таблица 3.2 и се отнасят към различните групи свойства на формовъчните материали.

Огнеупорност е свойството на смесите да не се размекват или изпичат при въздействие на високи температури. При недостатъчна огнеупорност формата губи точността на отпечатъка си или по повърхността на отливката се образува нагар. Огнеупорността се определя от химичния състав на сместа – съдържанието и вида на глината, както и наличието на оксиди на алкални и алкалоземни метали (Na_2O , K_2O , MgO , CaO). С намаляване на тяхното съдържание, т.е. при по-чист кварцов пясък, огнеупорността се повишава. Във формовъчните смеси за леене на стомана съдържанието на тези оксиди не трябва да надвишава 1,5-2%, за чугун - до 5%, а за цветни метали - до 7%. Съдържанието на глина също трябва да бъде по-ниско при по-висока температура на топене на метала.

Пластичност е свойството на формовъчните и сърцевите смеси да се деформират под действие на външни сили и да запазват придобитата форма след прекратяване на действието им. Това свойство осигурява получаването на точен и устойчив отпечатък на модела. Пластичността зависи от съдържанието на влага и глина, както и от формата и големината на пясъчните зърна. До определена граница увеличаването на влагата и глината води до повишаване на пластичността. Пясъчните зърна с ръбеста форма осигуряват по-висока пластичност в сравнение със закръглените.

Податливост е свойството на смесите да намаляват обема си под действие на притискащи сили, възникващи при свиването на отливката по време на охлаждането ѝ. За да се предотврати образуването на пукнатини в отливката, формата трябва да притежава достатъчна податливост. За нейното повишаване във формовъчните смеси се въвеждат добавки (напр. дървени стърготини), които при изгаряне освобождават допълнителен обем.

Газопропускливост е свойството на смесите да пропускат газовете, отделящи се от метала при втвърдяването му и от съставките на сместа. Тя се определя в условни единици чрез количеството газ, преминаващо за единица време през определен обем смес при стандартни условия. Газопропускливостта зависи от еднородността на кварцовите зърна, както и от съдържанието на влага и глина. По-еднородните по размер зърна повишават газопропускливостта. Закръглените зърна я увеличават, а ръбестите я намаляват. Влагата в количество 4-6 % способства за увеличаването ѝ, докато при по-високо съдържание ефектът е обратен. Увеличаването на съдържанието на глина също води до намаляване на газопропускливостта.

Якост е свойството на формата или сърцето да се съпротивлява на действието на външни сили - налягането на течния метал, налягането на газовете, силите, възникващи при свиването на метала, както и механични въздействия при сглобяване и транспортиране. Якостта зависи от съдържанието на глина и влага и от формата на пясъчните зърна. При увеличаване на влагата до 6-8 % якостта нараства, но при по-нататъшно увеличаване намалява. Повишаването на съдържанието на глина също води до увеличаване на якостта. Пясъчните зърна с ръбеста форма придават по-висока якост в сравнение със закръглените.

3.1.2.3. Приготвяне на формовъчните и сърцеви смеси

Приготвянето на формовъчните и сърцевите смеси е важен етап в лярското производство с голямо техническо и икономическо значение. От качеството на приготвените смеси зависят свойствата на формите и сърцата, а оттам - качеството и точността на получените отливки.

За намаляване на разходите за формовъчни материали при изработването на формите наред с новите материали се използва и отработена формовъчна смес, получена след разрушаването на формите и изваждането на отливките. Под въздействието на високата температура на

стопилката тази смес частично губи своите технологични свойства - влагата се изпарява, глинестото свързващо вещество променя свойствата си, а в нея попадат метални частици и други примеси. Поради това преди повторното ѝ използване тя трябва да бъде обработена и регенерирана чрез отстраняване на примесите и добавяне на необходимото количество нови формовъчни материали.

Приготвянето на формовъчната смес включва следните основни операции:

- подготовка на първичните формовъчни материали;
- подготовка на отработената формовъчна смес;
- подготовка на добавките;
- дозиране, смесване, овлажняване и престояване на сместа.

Подготовката на първичните формовъчни материали включва сушене, раздробяване и пресяване. Сушенето се извършва при температура 100-110 °C с цел отстраняване на излишната влага, тъй като в повечето случаи пясъкът и глината съдържат повече вода от необходимото. Обикновено се сушат пясъци със съдържание на влага над 6 %. За тази цел се използват загрети плочи или специализирани хоризонтални и вертикални сушилни. След изсушаването материалите се раздробяват в колерганги, топкови или чукови мелници и се пресяват до получаване на необходимия гранулометричен състав.

Подготовката на отработената формовъчна смес включва охлаждане, раздробяване, магнитно сепариране и пресяване. След разрушаването на формите и изваждането на отливките сместа се събира и се охлажда до около 35 °C. След това се раздробява, най-често чрез назъбени валци, подлага се на магнитно сепариране за отделяне на металните включвания и се пресява. Така обработената смес може да бъде използвана повторно при приготвянето на формовъчната смес.

Подготовката на добавките включва тяхното раздробяване и пресяване. След това те се дозират в необходимите количества и се прибавят към останалите компоненти на формовъчната смес.

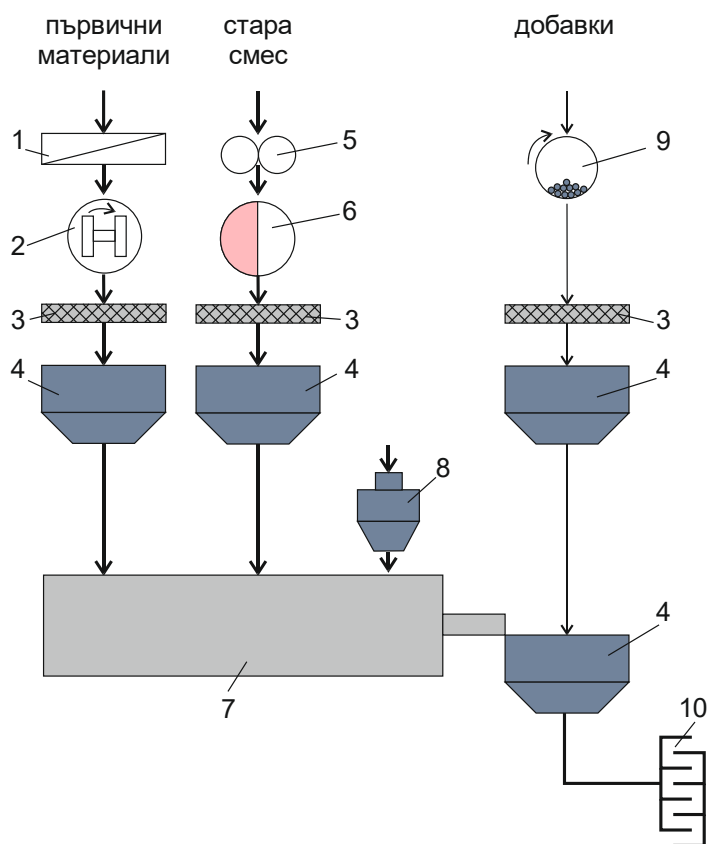
Подготвените първични материали, регенерираната формовъчна смес и добавките се дозират в определени количества и се подават за смесване. По време на смесването се добавя необходимото количество вода, след което сместа престоява няколко часа. През този период влагата прониква между отделните частици и се разпределя равномерно в целия обем, като се осигуряват необходимите технологични свойства на сместа.

Преди подаването на формовъчната смес към формовъчните машини тя се разрохква и разбива в специални машини, най-често дезинтегратори или ройери. Тази операция има за цел да възстанови рохкавостта и еднородността на сместа след престояването ѝ.

Преди подаването на формовъчната смес за формоване тя се разбива и разрохква с помощта на специални машини, най-често дезинтегратори или ройери. Чрез тази операция се възстановяват рохкавостта и еднородността на сместа след нейното престояване.

Поради по-високите изисквания към качеството на сърцата за тяхното изработване обикновено се използват само нови формовъчни материали. Смесването на отделните компоненти трябва да бъде достатъчно ефективно, за да се осигури равномерно разпределение на свързващите вещества, влагата и останалите добавки между пясъчните зърна. За тази цел се използват различни конструкции смесители.

Общата схема на операциите за приготвяне на формовъчната смес е показана на фиг. 3.4. На нея е представена последователността на основните технологични операции - подготовка на първичните материали, обработване на отработената смес, подготовка на добавките, дозиране, смесване, овлажняване и окончателно разрохкване на сместа преди формоване.



Фиг. 3.4. Схема на приготвяне на формовъчна смес

1 - сушилня; 2 - колерганг; 3 - сито; 4 - бункер; 5 - валцов агрегат; 6 - магнитен сепаратор; 7 - смесител; 8 - овлажнител; 9 - топкова мелница; 10 - дезинтегратор

3.1.3. Ръчно и машинно формоване

Процесът на формоване представлява съвкупност от технологични операции за изработване на леярски форми и сърца чрез използването на формовъчни материали. Този етап е дефиниращ за геометричната точност и повърхностното качество на бъдещите отливки. Изработването на леярската форма преминава през следната последователност от основни операции:

- *Уплътняване на формовъчната смес:* Чрез тази операция се осигурява необходимата механична якост и термомеханична устойчивост на леярската форма. Тя се осъществява чрез специфично механично въздействие, за да се гарантира прецизно възпроизвеждане на конфигурацията на модела и устойчивост срещу хидростатичното налягане на стопилката. По идентичен начин се оформят и леярските сърца, предназначени за оформяне на вътрешните кухини в отливката.
- *Оформяне на вентилационни канали:* За осигуряване на необходимата газопропускливост на формата и сърцата се изграждат *газоотводни канали*. Те служат за своевременно отвеждане на газовете и парите, отделяни в резултат на термичното взаимодействие между стопилката и формовъчните материали. Този процес е от съществено значение за предотвратяване на дефекти като газови шупли.
- *Изваждане на модела:* След уплътняване на сместа, моделът се отстранява от полуформата. Операцията изисква висока прецизност, за да се предотврати нарушаване целостта на работните повърхнини и да се запази геометричната точност на получения отпечатък.
- *Сглобяване на формата:* Това е заключителната операция, при която отделните елементи (горна и долна полуформа) се центроват и съединяват. Преди окончателното затваряне на леярската форма, в работната ѝ кухина се позиционират и фиксират готовите леярски сърца.

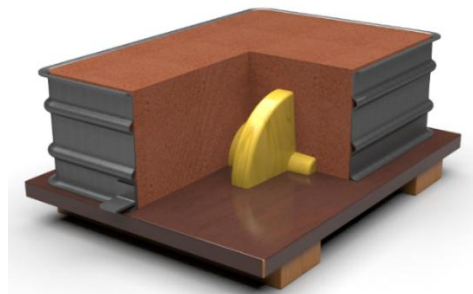
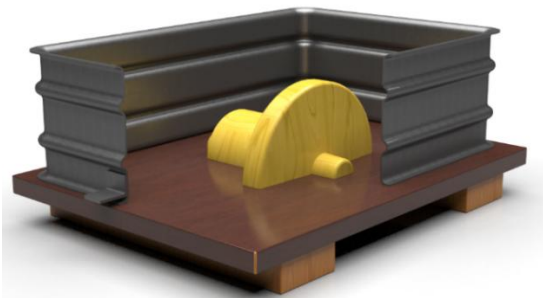
В леярската практика се прилагат два основни метода на формоване: *ръчно* и *машинно*. Изборът между тях зависи от необходимостта за изработване на единични бройки или на големи серии от детайли.

3.1.3.1. Технологична последователност при ръчно формоване

При ръчното формоване могат да се използват цели или делими модели. Последователността от операции за изработването на леярски форми в пясъчно-глинести смеси е показана на фиг. 3.5.

Етапи на процеса:

1. *Изработване на долната полуформа:* Формоването *винаги започва от долната полуформа*. Процесът стартира върху нивелирана подмоделна дъска, върху която се позиционират моделът (или долната му част) и леярската каса. Пространството се запълва с формовъчна смес, която се уплътнява чрез трамбоване. Изработват се вентилационни канали за подобряване на газопропускливостта в долната част.



Изработване на долната полуформа

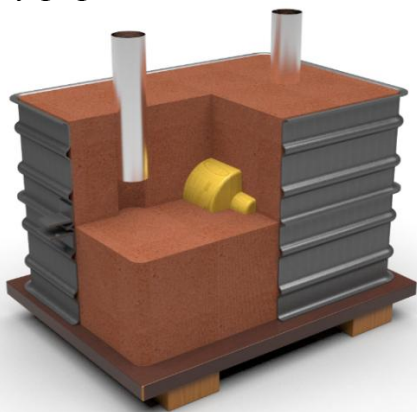


Подготовка за горната полуформа

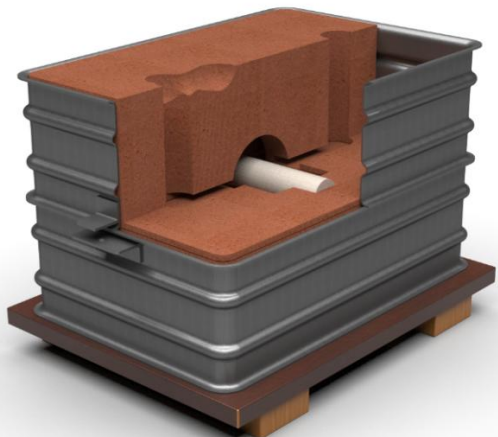
за

горната

Формоване на горната полуформа



Разглобяване и изваждане на моделите



Поставяне на сърца и сглобяване

Лейрска форма с получена отливка



Отливка



*Моделен комплект, отливка и
детайл*

Фиг. 3.5. Технологична последователност при ръчно формоване

2. *Подготовка на делителната повърхнина:* След уплътняването, долната полуформа се завърта на 180°. Повърхността се посипва с делителна смес, за да се предотврати слепването между двете части.
3. *Формоване на горната полуформа:* Към долната полуформа се фиксира горната леярска каса, втората част на модела и елементите на леяковата система. След запълване и уплътняване на сместа се изработват вентилационни канали и в горната част за отвеждане на газовете по време на заливането.
4. *Разглобяване и изваждане на моделите:* Двете полуформи се разтварят внимателно. Моделите се изваждат, а получената формовъчна кухня се инспектира и при нужда се дооформя за постигане на необходимата точност и чистота на повърхнините.
5. *Поставяне на сърца и сглобяване:* При наличие на вътрешни кухни в детайла, в съответните сърцеви легла се поставят предварително изработени леярски сърца.
6. *Окончателно затваряне:* Двете полуформи се фиксират отново една към друга, като се гарантира тяхната съосност. При едрогабаритни отливки върху горната каса се поставят противотежести, за да се предотврати повдигането ѝ от хидростатичното налягане на течния метал.

Така подготвената форма е технологично годна за заливане.

3.1.3.2. Технологична последователност при машинно формоване

Машинното формоване позволява механизирани на най-тежките и трудоемки операции: напълването на касите с формовъчна смес, нейното уплътняване и изваждането на моделите от полуформите. Високата точност на отливките се дължи на прецизността на моделната екипировка, равномерната плътност на формата и автоматизираното изваждане на модела. При масово производство това свежда отклоненията в размерите до минимум, което позволява директна механична обработка.

Технологичният процес включва две групи операции:

- *Основни операции:* Уплътняване на формовъчната смес и изваждане на модела. Тези операции определят качеството на получаваната отливка.
- *Спомагателни и транспортни операции:* Поставяне на касата върху

машината, почистване и нанасяне на делителна смес върху модела, посипване на сместа и транспортиране на готовата полуформа.

Според степента на механизация процесът се определя като *механизиран* (част от операциите са ръчни) или *автоматизиран* (целият цикъл протича без намеса на оператор).

Технологични методи за запълване на касите и изваждане на моделите

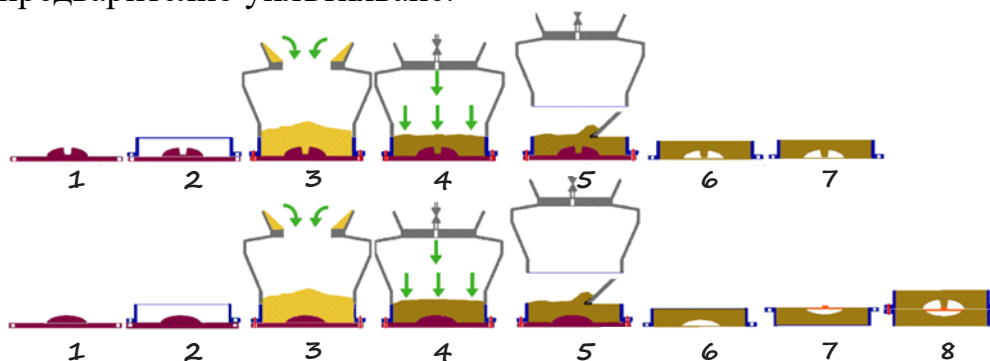
Тези операции са критични за производителността на формовъчната линия и за повърхностната цялост на леярската форма.

В рамките на технологичния процес тези операции се реализират чрез специфични методи, различаващи се по начина на подаване и разпределение на формовъчната смес, както и по начина на отделяне на модела от формата.

Методи за запълване на леярските каси

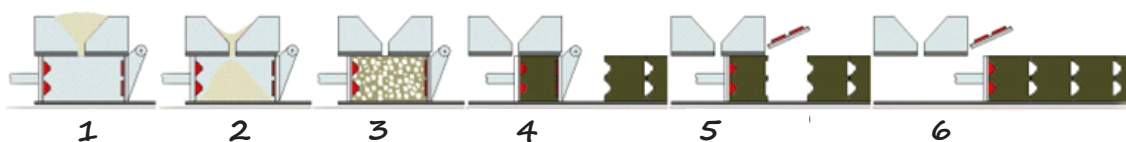
Запълването определя първоначалното разпределение на сместа около модела, което е предпоставка за качествено уплътняване. В зависимост от подаването на сместа и използвания физичен принцип, основните методи за запълване са:

- *Гравитационно дозиране*: Сместа се подава от бункер под действие на собственото си тегло. Този метод изисква допълнителни механизми за подравняване на формата.
- *Пясъкострелно нагнетяване* (Sand shooting): Използва се при автоматизирани системи (фиг. 3.6 - 3.8). Сместа се транспортира чрез енергията на сгъстен въздух, който я изстрелва с висока скорост в затворено пространство. Това гарантира равномерно запълване на тесните сечения и сложните релефи на модела.
- *Центробежно нахвърляне* (чрез пясъкомет): Използва се за едрогабаритни форми, където сместа се изстрелва на порции (пакети) с голяма кинетична енергия, съчетавайки запълването с мощно предварително уплътняване.



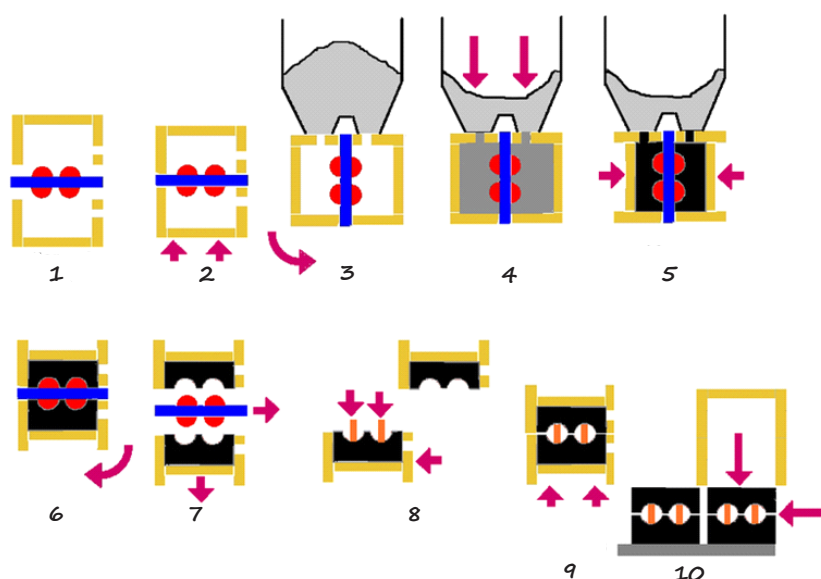
Фиг. 3.6. Класическо машинно формование в хоризонтални каси
(InTradeFairs, 2026)

1 - Поставяне на моделна плоча; 2 - Поставяне на каса; 3 - Пясъкострелно запълване; 4 – Уплътняване; 5 - Почистване; 6 - Готова полуформа; 7 - Обръщане и поставяне на сърца; 8 - Сглобяване на формата



Фиг. 3.7. Вертикално безкасово формоване (метод DISA) (InTradeFairs, 2026)

1 - Затваряне на двете каси; 2 - Запълване с формовъчна смес; 3 - Пресоване и уплътняване; 4 - Избутване; 5 - Затваряне на формата и сглобяване; 6 - Позициониране на следващата форма



Фиг. 3.8. Напълване и пресоване на двете полуформи около обща моделна плоча (DISA MATCH) (InTradeFairs, 2026)

1 - Позициониране на моделната плоча между двете каси; 2 - Затваряне на касите; 3 - Завъртане във вертикално положение на двете каси за подготовка за запълване; 4 - Запълване с формовъчна смес; 5 - Пресоване и уплътняване на формовъчната смес; 6 - Завъртане формата в изходна позиция; 7 - Изваждане на моделната плоча; 8 - Поставяне на сърца в долната полуформа; 9 - Сглобяване (затваряне) на формите; 10 - Избутване на готовата форма върху конвейера

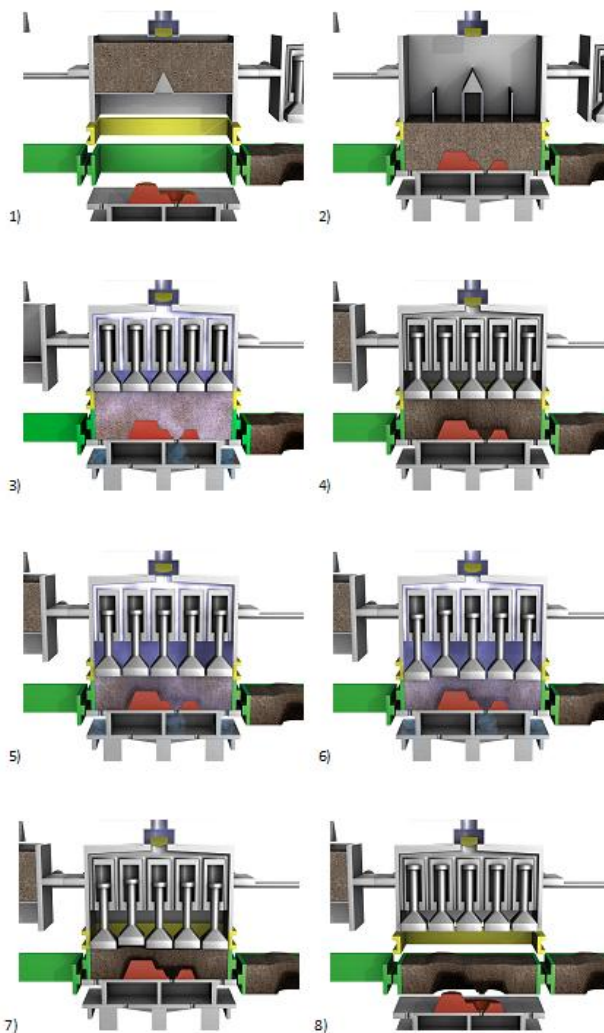
Класификация на методите за уплътняване на формовъчната смес

Уплътняването придава на формата необходимата здравина и газопроницаемост. Методите се класифицират според физическия принцип на действие:

- **Пресови методи (статични):** Налягането се прилага чрез плоска плоча или многоплунжерна глава (фиг. 3.9). При многоплунжерното пресоване се постига равномерна плътност чрез автоматично напасване на плунжерите по релефа на модела. Към тази група се отнася и пресоването с еластична глава, която може да бъде

диафрагма, хидропластмаса, плътна техническа гума и др., при което налягането се предава чрез гъвкав разделител, осигуряващ идеално следване на сложните контури на модела.

- *Динамични методи:* Включват стръскване (уплътняване чрез инерционни сили), импулсно уплътняване и пясъкострелно формование. При импулсното уплътняване се използва енергията на сгъстен въздух или горивна газова смес, действаща върху повърхността на сместа за части от секундата. Това създава ударна вълна, която уплътнява материала изключително бързо и равномерно, елиминирайки зоните с ниска плътност дори при сложни конфигурации.



Фиг. 3.9. Многоплунжерно пресоване под високо налягане
 1 - Позициониране на касата над моделната плоча; 2 - Затваряне (притискане) на касата към моделната плоча; 3 - Запълване с формовъчна смес; 4 - Начало на пресоването чрез спускане на многоплунжерната глава; 5 - Диференцирано уплътняване - всяко бутало притиска пясъка според релефа на модела; 6 - Край на пресоването и окончателно оформяне на полуформата; 7 - Повдигане на касите и отстраняване на модела; 8 - Отвеждане на готовата полуформа и почистване на моделната плоча

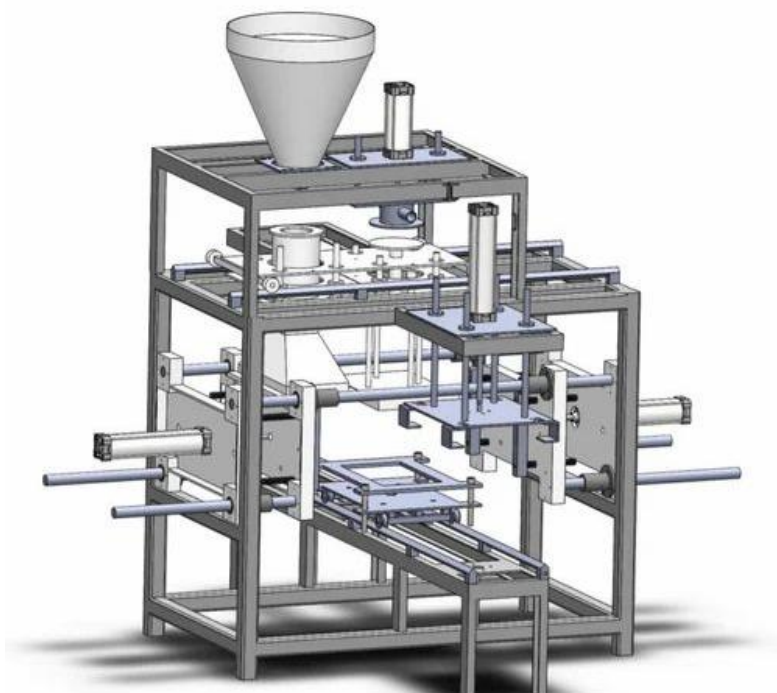
- **Комбинирани методи:** Най-често се прилага пясъкострелно запълване с последващо пресово уплътняване, което осигурява максимална здравина и точност.

Леярските сърца оформят вътрешните кухни на отливката и работят при екстремни топлинни условия. Техният качествен показател и геометрична точност зависят пряко от избрания метод за уплътняване на сърцевата смес в металните кутии.

Методи за уплътняване на сърцеви смеси:

- **Пясъкодупно уплътняване (Core blowing):** Сместа се вкарва в сърцевата кутия чрез въздушен поток под налягане (0.5-0.6MPa). Въздухът пренася пясъчните зърна и ги натъпква в кухината, след което се отвежда през специални вентили. Методът е подходящ за малки и средни сърца.
- **Пясъкострелно уплътняване (Core shooting):** Използва се при автоматизирани сърцеви автомати. При него в кутията се изстрелва компактна порция смес с висока кинетична енергия. Това осигурява максимална плътност и е най-разпространеният метод за прецизни сърца.

На фиг. 3.10 е показана машина, основаваща се на технологията Cold-box - Вох за масово производство на прецизни леярски сърца. Основна особеност на процеса е „пясъкострелното“ впръскване на сърцевата смес под високо налягане.



Фиг. 3.10. Машина за формование на сърца по Cold-box метод (M/S Shivasai Engineers, 2026)

- **Шнеково уплътняване:** Използва се за получаване на сърца с постоянно сечение (цилиндрични, призматични). Сместа се изтласква чрез шнек през калибриран отвор.

- **Виброуплътняване:** Прилага се основно при изработка на едрогабаритни сърца от самовтвърдяващи се смеси, където вибрациите подреждат зърната в плътна структура.

Технологии за окончателно втвърдяване:

След уплътняването, сърцето трябва да придобие висока якост чрез един от следните процеси:

- **Hot-box процес:** Втвърдяване в нагрят до 220-250 °C метална кутия.
- **Cold-box процес:** Продухване на уплътнената смес с газов катализатор (амин или CO₂) при стайна температура. Това позволява изваждане на готовото сърце веднага след уплътняването.

Технологични схеми на автоматизирани формовъчни процеси

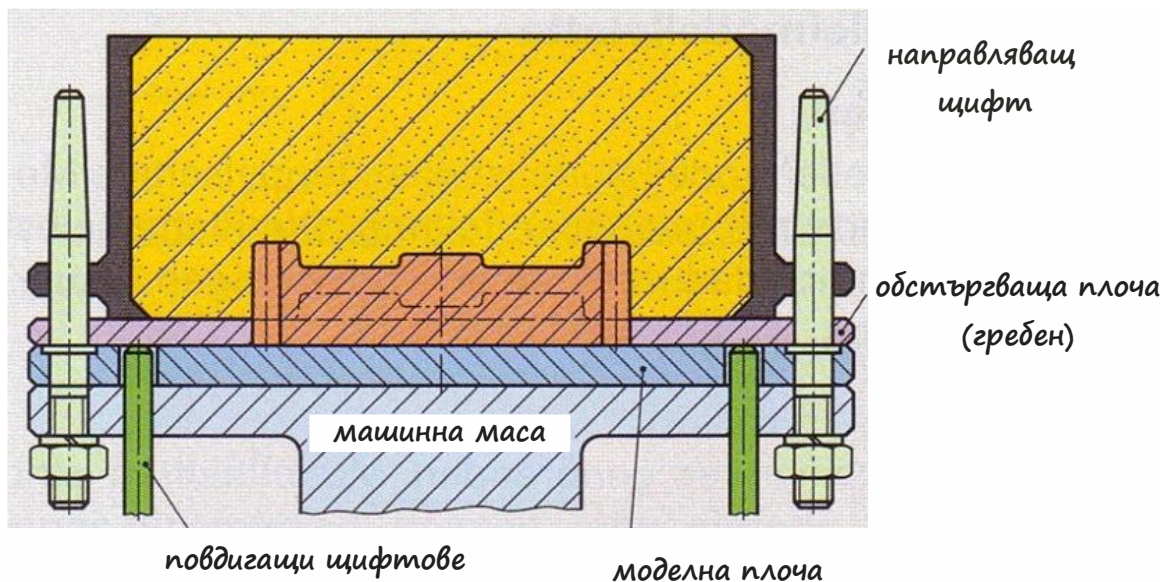
- **Класическо хоризонтално формование (фиг. 3.6):** Показва паралелна изработка на горна и долна полуформа в каси. Включва пясъкострелно запълване, пресово уплътняване и обръщане на долната полуформа за изваждане на модела и поставяне на сърца.
- **Многоплунжерно пресоване под високо налягане (фиг. 3.9):** Илюстрира работата на съвременна хидравлична глава. Ключов е етапът на диференцирано спускане на плунжерите, което гарантира липса на „меки“ зони в дълбоките джобове на формата.
- **Вертикално безкасово формование - DISA (фиг. 3.7):** Най-бързият метод за масово производство. Формите се изработват вертикално и се подреждат в непрекъсната верига без използване на метални каси.
- **Формоване с двустранна моделна плоча - DISA MATCH (фиг. 3.8):** Съчетава прецизността на хоризонталното деление с предимствата на безкасовата технология, позволявайки едновременно пресоване на двете полуформи към една двустранна плоча.

Методи за изваждане на моделите от формата:

- **Вертикално изваждане чрез повдигащи щифтове:** Касата се повдига перпендикулярно на моделната плоча. Методът е прост и ефективен за масово производство.

На фиг. 3.11 е показан малко по-сложен и прецизен вариант на вертикалното изваждане - този с *обстъргваща плоча*. При обикновеното вертикално изваждане на формата щифтовете повдигат само касата. Тук те повдигат едновременно касата и обстъргващата плоча, което гарантира, че пясъкът няма да се отчупи при излизането на модела.

- **Изваждане чрез теглеща плоча (Stripping plate):** Най-прецизният метод. Плочата фиксира сместа по контура на модела, докато той се изтегля надолу, предотвратявайки разрушаването на ръбовете на формата.
- **Изваждане чрез обръщане (Rollover stripping):** Цялата моделна екипировка се завърта на 180°, след което плочата се повдига нагоре. Този метод улеснява процеса под действие на собственото тегло на модела и подобрява стабилността на формата (фиг. 3.6).



Фиг. 3.11. Процес на машинно формоване с използване на обстързваща плоча (Giesserei Lexikon, n.d.)

3.1.4. Следващи етапи от технологичния процес

След приключване на формоването и запълването на леярската кухня със стопилка, технологичният процес продължава с охлаждане, избиване и окончателна обработка на отливките до получаването на крайния продукт - детайл.

3.1.4.1. Охлаждане на отливките

Охлаждането на отливката в леярската форма продължава до достигане на технологична температура, която осигуряваща необходимата механична якост на материала срещу деформации по време на следващите операции. Продължителността на престоя се определя от конфигурацията, дебелината на стените и общата маса на детайла - от няколко минути за малоразмерни отливки до няколко денонощия за масивни дебелостенни обекти с маса над 50-60 t. За съкращаване на производствения цикъл при едрогабаритни отливки се прилага интензифицирано охлаждане (чрез въздушна, водна или въздушно-водна среда), при строго съблюдаване на температурните градиенти, за да се предотврати появата на вътрешни напрежения или пукнатини.

3.1.4.2. Разрушаване на формата и изваждане на отливките

Процесът се осъществява чрез механизирани решетки (пневматични, ексцентрикови или вибрационни). При сложна конфигурация на детайлите се използват и допълнителни съоръжения като пневматични чукове, вибрационни скоби или кобилицы, които гарантират ефективното отстраняване на формовъчния материал, без да се допускат механични повреди по повърхнините.

3.1.4.3. Отстраняване на леяковата система, зачистване и повърхностно почистване

Тази комплексна операция обхваща финалната обработка на отливката до постигане на зададените геометрични параметри и технологични изисквания. Процесът се реализира чрез три последователни операции:

1. *Грубо почистване* (отстраняване на леяковата система): Включва отделянето на мъртвите глави, елементите на леяковата система и заусенците, образувани по делителната равнина на полуформите.

Технологичният метод за отделяне се определя от вида на сплавта и габаритите на детайла:

- При стоманени отливки се използва предимно газово или плазмено рязане.
 - При чугунени отливки леяците се отстраняват чрез ударно въздействие непосредствено след изваждането на детайлите от формата, преди премахването на сърцата.
 - При цветни сплави (алуминиеви, магнезиеви и медни) се използват лентови и дискови отрезни машини или абразивни дискове.
2. *Окончателно зачистване*: Извършва се за премахване на остатъчните заусенци и следите от леяковите канали. Тази фина обработка се осъществява със стационарни или махални шлифовални машини, пневматични секачи или чрез пламъчно зачистване, за да се постигне необходимата гладкост на повърхнините.
 3. *Повърхностно почистване*: Осъществява се пълно отстраняване на металокерамичния пригар и остатъците от сърцата. Изборът на съоръжение зависи от сложността и размерите на детайлите:
 - Галтовъчни барабани - прилагат се за малоразмерни и средни отливки с по-проста конфигурация.
 - Дробометни и хидропясъкоструйни камери - използват се за едрогабаритни и сложнопрофилни детайли, осигурявайки висока производителност и достъп до вътрешни кухини.
 - Химични или електрохимични методи - прилагат се при специфични изисквания за прецизност и пълна повърхностна чистота.

3.1.4.4. Термична обработка на отливките

След приключване на почистването и зачистването, голяма част от отливките подлежат на термична обработка. Нейната основна цел е да отстрани възникналите при охлаждането вътрешни напрежения, да хомогенизира микроструктурата на метала и да осигури необходимите експлоатационни характеристики (якост, пластичност, твърдост). В зависимост от вида на сплавта и предназначението на детайла се прилагат следните основни методи:

- *Отгряване*: Най-често прилаганият метод за стоманени и чугунени отливки. Използва се за намаляване на твърдостта (за по-лесна последваща механична обработка), премахване на напреженията и подобряване на обработваемостта.
- *Нормализация*: Прилага се предимно при стоманени отливки за постигане на по-фина и еднородна зърнеста структура, което повишава тяхната ударна жилавост.
- *Закаляване и висок отпуск* (подобряване): Използва се при детайли, работещи при високи механични натоварвания, за постигане на оптимално съчетание между висока якост и жилавост.
- *Стареене*: прилага се основно при отливки от алуминиеви и магнезиеви сплави за стабилизиране на размерите и повишаване на механичните показатели.

Изборът на режим на термична обработка (температура на нагряване, време на престой и скорост на охлаждане) се определя строго от химичния състав на сплавта и предписаните технологични изисквания за крайния детайл.

3.1.4.5. *Контрол на качеството на отливките*

След приключване на довършителните операции (отстраняване на лежковата система и почистване), отливките подлежат на задължителен технически контрол. Целта е да се установи съответствието на детайла с конструктивната документация и да се гарантира отсъствието на дефекти, които биха влошили експлоатационната му надеждност. Контролът се осъществява чрез следните основни методи:

1. *Визуален контрол*: Това е първичен метод за контрол, при който се оценява външният вид на отливката и се установяват видими повърхностни дефекти като недозапълване на формата, пукнатини, газови шупли и остатъчен металокерамичен пригар.
2. *Дименсионален* (размерен) контрол: Извършва се чрез измервателни инструменти и шаблони, за да се верифицира точността на размерите и спазването на зададените допуски. Проверят се също геометричните отклонения и правилната конфигурация на вътрешните кухини.
3. *Дефектоскопия* (Безразрушителен контрол): При отговорни детайли се прилагат специализирани методи за откриване на скрити вътрешни дефекти:
 - Ултразвукова дефектоскопия - за локализиране на вътрешни шупли и празнини.
 - Магнитно-прахова или капилярна дефектоскопия - за откриване на фини повърхностни и подповърхностни пукнатини.
 - Рентгенографски контрол - за детайлна визуализация на вътрешната макроструктура на отливката.

4. *Механични изпитвания и металографски анализ*: Включват проверка на твърдостта, якостта на опън и микроструктурата на материала, за да се потвърди, че втвърдяването и охлаждането са протекли правилно и металът притежава необходимите физико-механични свойства.

3.1.5. Технологично развитие и усъвършенстване на процесите

Съвременното развитие на производството на отливки в еднократни форми е насочено към пълна автоматизация на подготовката и регенерацията на материалите, внедряване на роботизирани системи за почистване и използване на компютърно моделиране (CAE) за оптимизация на леяковите системи. Интегрирането на адитивни методи за директно 3D принтиране на сложни пясъчни форми и сърца позволява елиминирането на моделната екипировка при прототипиране. Тези иновативни решения значително повишават прецизността, съкращават производствения цикъл и подобряват икономическата ефективност на леярското производство (Klimenkov 2004).

3.2. Специални методи за леене

Развитието на модерното индустриално производство е свързано с постоянно нарастващи изисквания към точността на летите заготовки и качеството на готовите изделия. Повишаването на прецизността на отливките е от критично значение, тъй като те съставляват между 70% и 80% от компонентите в редица машиностроителни сектори.

В традиционната леярска практика технологичните прибавки за механична обработка често достигат значителни стойности, което води до излишен разход на ресурси и енергия. Оптимизирането на точността чрез специални методи позволява последващата обработка да бъде сведена до минимум или напълно преустановена. Това гарантира сериозни икономии на материал и инструменти, като същевременно ускорява производствения цикъл и намалява себестойността на продукцията.

Специалните методи за леене се характеризират с висока прецизност, добри металургични свойства и високо качество на повърхността. Те се реализират чрез съвременни технологии и автоматизация, които ограничават човешкия фактор и производствените отклонения. Основните методи са:

- *Леене под високо и ниско налягане;*
- *Кокилно леене;*
- *Центробежно леене;*
- *Леене по стопяеми модели;*
- *Непрекъснато леене и др.*

Прилагането на тези методи позволява преминаване към производство на отливки с крайни или близки до крайните размери (*near-net shape*), което минимизира необходимостта от довършителни операции.

3.2.1. Леене в гипсови форми (Plaster Mold Casting)

Леенето в гипсови форми представлява високотехнологична разновидност на получаването на отливки в еднократни форми, при който традиционната формовъчна смес се заменя със състави на основата на калциев сулфат (гипс) и специфични термоустойчиви добавки като талк или азбест за контролиране на разширението. Съгласно международната система за геометрични спецификации на продуктите (БДС EN ISO 8062), този метод позволява постигането на най-високи класове на точност на размерите (DCTG 4 - DCTG 6) и изключително ниска грапавост на повърхнините.

От инженерна гледна точка, леенето в гипсови форми осигурява висококачествен производствен процес, особено когато качеството на повърхността и сложните характеристики са от първостепенно значение.

Основните предимства на метода са:

- Добро качество на повърхността: Финият размер на частиците на гипсовата суспензия осигурява ниска грапавост в границите на Ra 0,8-3,2 μm .
- Отлична точност на размерите: обикновено допустимите отклонения за малки размери са $\pm 0,25\text{ mm}$, което прави метода на леене идеален за компоненти, изискващи прецизни свързващи повърхности.
- Възможност за сложна геометрия: Високата течливост на гипсовата суспензия позволява възпроизвеждането на тънки стени (до 1,5 mm) и сложни вътрешни елементи, което е от решаващо значение за хидравличните компоненти.
- Намалени разходи за обработка: Поради високата точност и постигнатото качество, последващата механична обработка след леене често се свежда до минимум или се елиминира, което води до значителни икономии на разходи.
- По-ниски разходи за инструменти (в сравнение с постоянните форми): независимо, че формите са консумативи, разходите за инструменти за създаване на моделите са по-ниски, отколкото за постоянни (метални) форми, което ги прави икономични за партии със среден обем.

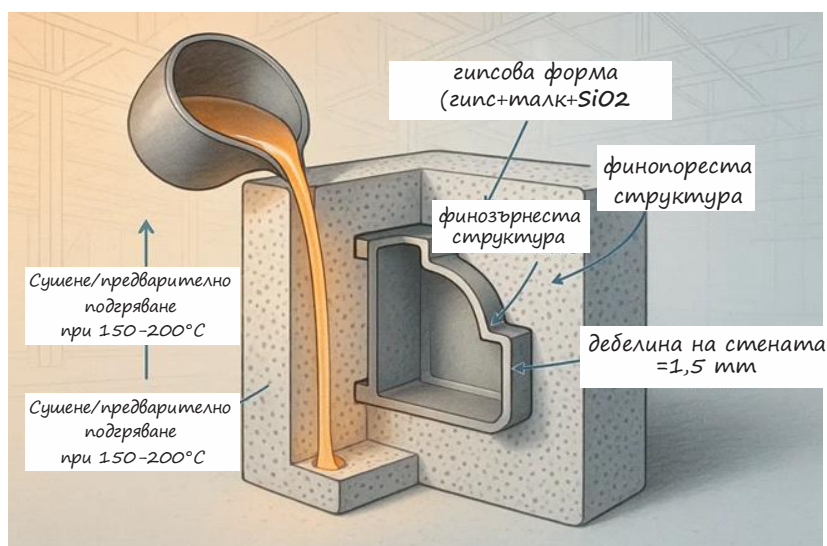
Леенето в гипсови форми представя няколко ключови ограничения, които трябва да се вземат предвид при избора на процес.

Най-съществените недостатъци са:

- Ограничение на материалите: Предназначени са за получаване на отливки от цветни метали (алуминий, месинг, бронз и др.), тъй като гипсовата форма бързо се разрушава термично над 1200 °C, което я прави неподходяща за стомана или чугун.
- Бавен производствен цикъл: Задължителният, удължен период на печене и сушене, необходим за отстраняване на влагата от материала на формата, отнема много време (често над 12 часа), което значително намалява производителността в сравнение с автоматизираните методи за пясъчно леене или леене в постоянни метални форми.

- Еднократност на формата: Подобно на леенето в пясъчни форми и леенето по стопяеми модели, гипсовата форма се разрушава при изваждането на отливката. Това води до по-висок разход на формовъчни материали и по-голяма трудоемкост на процеса.
- Ограничения по размер и маса: Процесът се прилага за малки и средни отливки с маса до около 20 kg. Изработването на по-големи и тежки отливки е ограничено поради по-ниската якост на гипсовите форми и затрудненията при тяхната обработка.
- Ниска газопропускливост: Въпреки че изпичането на формите подобрява тяхната газопропускливост чрез отстраняване на влагата, финозърнестата структура на гипсовия материал обуславя по-ниска газопропускливост в сравнение с пясъчните форми. Поради това процесът обикновено изисква използването на вакуумни технологии или други технически решения за осигуряване на надеждно запълване на формата.

За преодоляване на този недостатък гипсовата суспензия се смесва във вакуумни смесители, при което се отстраняват въздушните мехури и се осигурява еднородна структура на формовъчния материал. След изработването гипсовите форми се подлагат на изпичане за пълно отстраняване на физически и химически свързаната влага, което е необходимо условие за нормалното протичане на процеса на лееие. Запълването на леярската кухня се извършва чрез вакуумни леярски машини или вакуумни системи с противоналягане, които осигуряват равномерното ѝ запълване, включително в тънкостенните участъци на отливката.



Фиг. 3.12. Технологичен процес на лееие в гипсови форми (MinHe Foundry, 2025)

1 - Изработване на модел (метален или пластмасов); 2 - Приготвяне на гипсова суспензия (гипс + талк + SiO_2); 3 – Многоетапно сушене и прокаляване на формата (150 - 200 °C); 4 - Заливане с течен метал; 5 - Контролирано охлаждане; 6 - Разрушаване на формата и почистване на отливката

Описаните технологични особености са обобщени в последователна технологична схема, представена на фиг. 3.12, която илюстрира основните етапи на процеса - от подготовката на формата до заливането и получаването на готовата отливка.

В съвременното производство този потенциал се разширява чрез интеграцията на адитивните технологии, при които използването на 3D принтирани модели (от фотополимерни смоли или специални изгарящи полимери) позволява директен преход от дигитален CAD проект към лярска форма. По този начин се елиминира нуждата от сложна и скъпа механична обработка на моделната екипировка, като същевременно се постига изключително висока степен на детайлизиране, невъзможна за конвенционалното формование.

За постигане на още по-висока точност и възможност за реализиране на изключително сложни геометрии, в практиката се прилагат технологии за леене по стопяеми и газифицируеми модели, при които моделът не се изважда механично, а се елиминира в процеса на формообразуване.

3.2.2. Леене по стопяеми и газифицируеми модели

Съвременното машиностроене използва различни технологии за производство на сложни детайли и компоненти. Един от най-старите и все още широко прилагани методи е леенето по стопяеми модели.

Получените отливки са с висока точност и ниска грапавост, което се обезпечава от: използването на неразглобяема форма, при което сърцата се изготвят заедно с формата; използват се огнеупорни материали с минимално топлинно разширение и др.

Високата точност - от 0,1 до 0,5 mm на 100mm, при размерен допуск от $\pm 0,075$ до $\pm 0,2$ mm и ниската грапавост на отливката - под 2,5 μm , позволяват да се намали величината на прибавката за механична обработка до 0,2 - 0,7 mm.

Методът е трудоемък и скъп и се прилага за получаване на отливки без последваща механична обработка; при детайли със сложна конфигурация и трудоемка механична обработка; при леене на труднообработваеми сплави и т.н. Методът се прилага предимно в масовото производство за отливки с маса 0,02 - 100 kg, с дебелина на стената до 0,5 mm и отвори с диаметър до 2 mm.

При проектиране на отливките трябва да се:

- обезпечи насочена кристализация на метала, от тънките части към мъртвите глави;
- намали масата на детайла за сметка на масивните части;
- плавен преход на тънките с дебели части.

Особености на процеса

За разлика от предходните методи, леенето по стопяеми модели притежава следните особености:

- Вид на леяковата система: тя се изработва от същия материал като моделите и служи за тяхното окрупняване в общ блок (моделен грозд) (фиг. 3.13.).
- Материал и вид на модела: използва се специална моделна смес за изработване на еднократни топими модели.
- Начин за изработване на топимия модел: извършва се в прецизни метални пресформи, осигуряващи идентичност на детайлите.
- Материали и получаване на черупковата форма: изгражда се послойно чрез огнеупорен шлам и зърнеста обсипка, последвано от изпичане.
- Почистване на отливките: поради здравината на керамиката се прилагат специфични механични и химически методи.



Фиг. 3.13. Моделен блок (EPS Industries, 2014)

Материал и състав на моделните смеси

В качеството на компоненти на моделната смес до неотдавна са се използвали парафин и стеарин в съотношение 1:1 или 70/30. Основните недостатъци на тази смес са ниската ѝ термична устойчивост, малката якост и дефицитността на стеарина (Impro Precision, 2020).

Понастоящем се използват различни видове моделни смеси, като изборът им зависи от изискванията към размерната точност, качеството на повърхнината, течливостта, както и възможността за регенериране и повторно използване. Основните видове моделни смеси са представени в таблица 3.3.

Табл. 3.3. Сравнителна характеристика на моделните смеси

Вид моделна смес	Състав	Приложение	Температура на впръскване (°C)	Предимства	Недостатъци
С пълнител	Восьци с пълнители (полимерни и неорганични добавки)	Прецизни отливки със средна и голяма сложност	55–70 (пастообразно състояние)	Висока размерна точност; намалено свиване	Усложнена регенерация; по-висока себестойност
Без пълнител (парафино-стеаринови)	Парафин, стеарин, смоли	Малки и средни отливки; художествени изделия; бижутерия	60–80 (течно състояние)	Добра повърхностна гладкост; лесна регенерация	Повишено свиване; склонност към деформации
За леякови системи	Твърди парафини и полимерни смеси	Изграждане на леякови системи и блокове	75–95	Висока якост; добра течливост при стопяване	Ограничена приложимост за фини детайли
Водоразтворима	Полиетиленгликол (PEG) с добавки	Изработване на сложни вътрешни кухини и канали	55–65	Позволява сложни геометрии, недостъпни за механично изваждане	Хигроскопичност; по-висока цена
Свързваща	Меки восьци, смоли, адхезиви	Сглобяване на модели и закрепване към леякова система	90–110 (разтопено състояние)	Висока адхезионна якост; кратко време на втвърдяване	Риск от термична деформация

Забележки:

- *Пастообразно впръскване:* Използва се при смеси с пълнител при по-ниски температури, когато материалът е в полутвърдо състояние. Намалява обемното свиване.
- *Течно впръскване:* Прилага се при парафино-стеаринови смеси без пълнител с цел осигуряване на пълно запълване на формата.
- *Температурен контрол:* При водоразтворими смеси е необходим строг контрол на температурата, като превишаване над 80–85 °C води до термична деструкция на компонентите.

Изграждане и втвърдяване (изпичане) на формата: Етап на формиране и последващо стабилизиране на керамичната обвивка с цел осигуряване на механична якост и огнеупорност преди леене.

Керамичната черупкова форма се изгражда чрез последователно нанасяне на суспензия и огнеупорен посипващ материал. В практиката се използват както класически смеси на основата на натриев силикат (водно стъкло) и шамот, така и съвременни свързващи вещества на базата на етилсиликат или силиказол.

Термична обработка:

След отстраняване на модела чрез стопяване, формата се подлага на високотемпературно изпичане (синтероване) при 850 - 1050 °C. Този процес е критичен за:

- Формиране на крайната структура: постигане на необходимата механична здравина и термоустойчивост на керамичната черупка;
- Обезгазяване: пълно изгаряне на остатъците от моделния състав за предотвратяване на газови шупли в отливката;
- Повишаване на запълняемостта: осигуряване на висока газопропускливост и възможност за заливане в горещо състояние, което подобрява тънколивкостта на металната стопилка и позволява получаването на сложни детайли с тънки стени.

Технологични етапи и последователност при леене по стопяеми модели:

1. *Проектиране и изработка на пресформа* (инструментална екипировка): Създаване на прецизна метална форма (обикновено от алуминиеви или стоманени сплави) за шприцоване на восъчните модели.
2. *Изработване на моделни звена и сглобяване в блок:* Шприцоване на восъчните модели под налягане и последващото им монтиране към обща леякова система (централен леяк) за формиране на т.нар. моделен блок (фиг. 3.13).
3. *Формообразуване* : Черупковата форма се изгражда чрез последователно нанасяне на няколко слоя, като всеки цикъл включва потапяне в суспензия и последващо нанасяне на огнеупорен зърнест пълнител. Процесът се структурира по следния начин:
 - Лицев слой: За постигане на висока гладкост и химическа инертност спрямо стопилката се използва суспензия на базата на циркониев прах и посипване с фина фракция циркониев пясък (0,10 - 0,15 mm).
 - Междинен слой (втори): Моделният блок се потапя в суспензия и се нанася електрокорунд или дистен-силиманит с фракция 0,20 - 0,25 mm.
 - Опорни слоеве (от трети нагоре): Използва се по-груб електрокорунд или шамот с фракция 0,5 - 1,0 mm. Тези слоеве

осигуряват необходимата механична здравина на формата и висока газопропускливост.

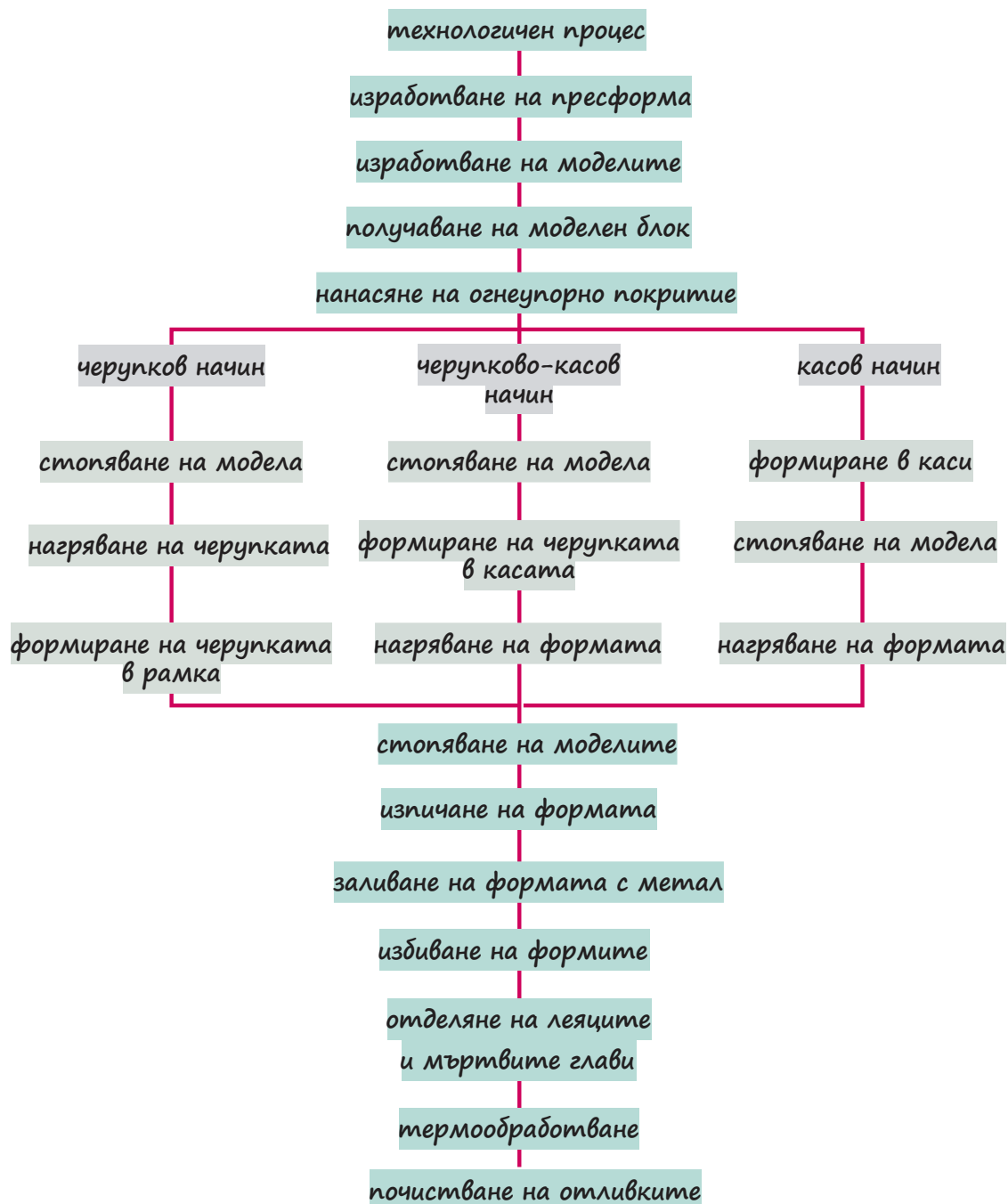
- Покривен (запечатващ) слой: Нанася се само суспензия без последващ зърнест пълнител. Това предотвратява роненето на огнеупорния материал по време на изпичането и заливането на формата.
4. *Отстраняване на модела:* Стопяване на моделната смес от черупковата форма, най-често в автоклав под действието на наситена пара, което предотвратява напукването на формата.
 5. *Високотемпературно изпичане (Синтероване):* Нагриване на празната керамична черупка (850 - 1050°C) за постигане на окончателна здравина, премахване на остатъчната влага и изгаряне на следите от восък.
 6. *Заливане:* Гравитационно запълване на нагрятата керамична черупка с разтопена метална сплав. Използването на гореща форма (веднага след изпичането) е ключово за осигуряване на висока запълняемост на тесните сечения и получаване на детайли с висока сложност и тънки стени.
 7. *Охлаждане и разрушаване:* След втвърдяване на метала керамичната форма се разрушава механично (чрез вибрации или удар).
 8. *Почистване и довършителни операции:* Отделяне на отливките от леяковата система, механично почистване (пясъкоструене) и химическо пречистване в горещи алкални разтвори за отстраняване на остатъчната керамика от труднодостъпни кухини.

Целият технологичен процес е посочен на фиг. 3.15.

Технологични особености и ограничения на метода

Приложението на леенето по стопяеми модели се определя не само от неговите предимства, но и от редица технологични, икономически и производствени фактори, които трябва да бъдат отчитани при избора на този метод.

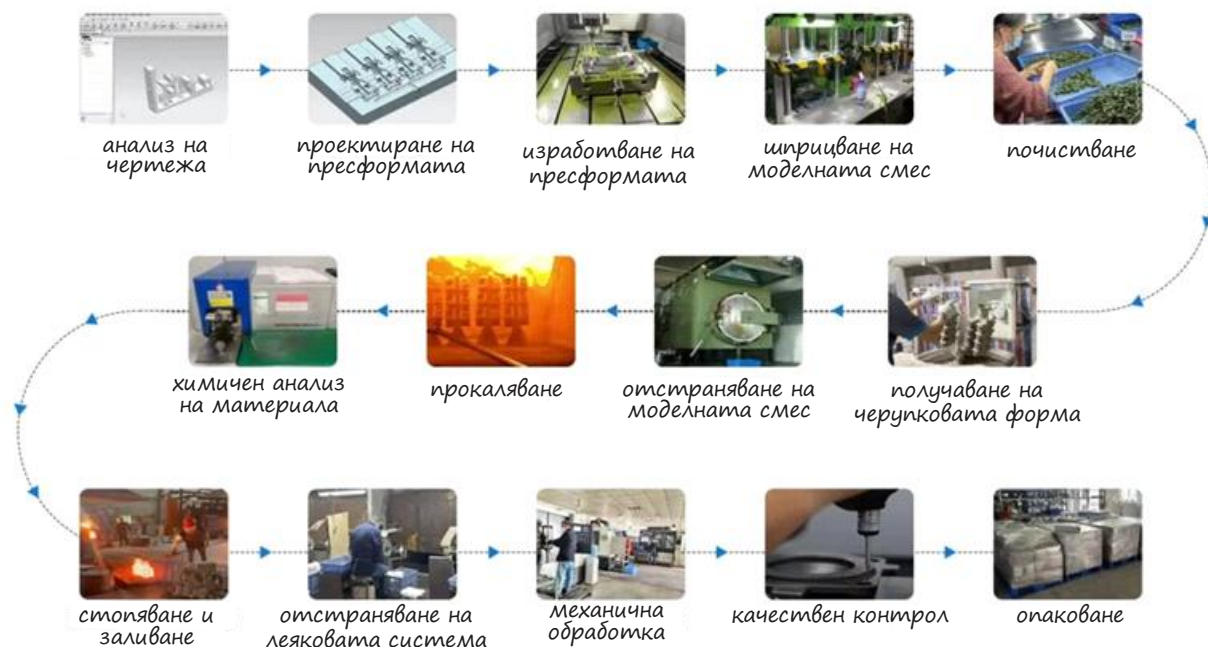
1. Висока себестойност на производството. Тя се дължи на големия брой технологични операции, използването на специализирани моделни материали, етилсиликатни свързващи материали и висококачествени огнеупорни материали, както и на необходимостта от стопяване на моделите и високотемпературно изпичане на керамичните форми.
2. Продължителен производствен цикъл. Изработването на керамичната обвивка се извършва чрез многократно нанасяне на огнеупорно покритие, като след всеки нанесен слой е необходимо време за неговото сушене и втвърдяване, което удължава производствения цикъл в сравнение с леенето в пясъчни или метални форми.
3. Високи изисквания към технологичното оборудване. Изработването на металните пресформи за моделите изисква висока точност и значителни капиталови разходи. Поради това методът е икономически целесъобразен предимно при средносериенно и масово производство.



Фиг. 3.14. Варианти на технологичните схеми за получаване на форми при леене по стопяеми модели

4. Ограничения в размерите на отливките. Методът е най-подходящ за малки и средноголеми отливки. При производството на едрогабаритни изделия се увеличава вероятността от деформация или разрушаване на черупковата форма по време на транспортиране, манипулиране и заливане.
5. Ограничени възможности за регенериране на материалите. Леярската форма е еднократна и след избиването на отливката не може да бъде използвана повторно. Регенерирането на моделните смеси, особено на тези с пълнители, изисква специализирано оборудване и допълнителни технологични операции.

6. Вероятност от възникване на технологични дефекти. Недостатъчното изпичане на керамичната обвивка, непълното отстраняване на моделната смес или недостатъчната газопроницаемост на формата могат да доведат до отделяне на газове при заливането и до образуване на газови шупли в отливките.



Фиг. 3.15. Технологичен процес за получаване на отливки чрез леене по стопяеми модели (KEWEI, 2025)

Леенето с горими модели е съвременна модификация на прецизното леене, при която класическите стопяеми (восъчни) състави се заменят с полимерни материали. Тази технология променя фундаментално изграждането на леярската форма и процеса на нейното запълване.

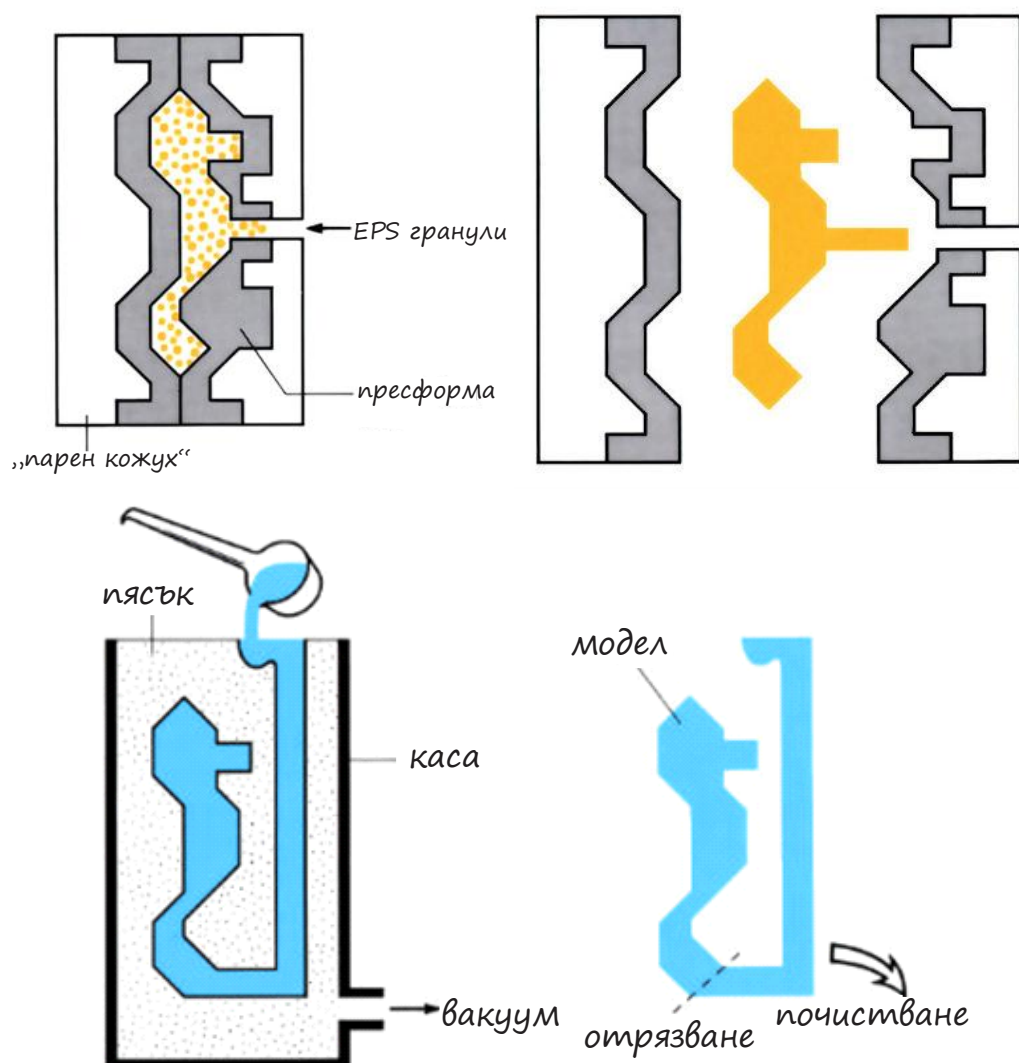
Основният материал за моделите е експандиран полистирол (EPS). Той се състои от термопластичен полимер на стирена (C_8H_8) и разпенващ агент. В крайното си състояние моделът съдържа около 98% въздух, което е критично за неговата сублимация (мигновено преминаване от твърдо в газообразно състояние) при контакт с метала.

Основните етапи при изработката на модела (фиг. 3.16) са:

- Шприцоване: Полистиролните гранули се впръскват в алуминиева пресформа.
- Експанзия: Под въздействието на гореща пара гранулите увеличават обема си и се спичат, копирайки прецизно геометрията на кухината.
- Монтаж: Готовите звена се монтират към леяковата система чрез термично припояване, формирайки моделен блок.

За постигане на оптимално качество на повърхнината и предотвратяване на физико-химичното взаимодействие между стопилката и пясъка, върху готовия полистиролен модел се нанася антипригарно огнеупорно покритие. Тази боя, съдържаща фино смлени материали като

циркон или графит, формира тънка микропореста мембрана след изсъхване. Тя изпълнява критичната роля да изолира метала от несвързания пясък, като същевременно регулира скоростта на отвеждане на газовете чрез своята контролирана порьозност, осигурявайки ламинарно запълване на кухината.



Фиг. 3.16. Етапи на получаване на горимия модел (The Open University, n.d.)

За разлика от традиционното леење в керамични черупки, тук формообразуването се извършва в леярска каса, запълнена с несвързан сух кварцов пясък. Моделният блок се позиционира в касата и се подлага на интензивно вибрационно уплътняване, което гарантира, че пясъкът запълва всички части и кухини, осигурявайки стабилност на формата без необходимост от химически свързващи вещества. Тази модификация елиминира изцяло етапите на автоклавно извличане на модела и предварителното високотемпературно изпичане на формата.

При заливането разтопеният метал е в директен контакт с полистирола, предизвиквайки мигновена термична деструкция и пиролиза. Моделът сублимира, преминавайки директно в газообразно състояние, и освобождава място за стопилката, докато газообразните продукти от

разпадането се отвеждат през порите на пясъка благодарение на приложен вакуум. Вакуумът допълнително уплътнява пясъчното легло и подобрява запълняемостта на формата, което е от критично значение за качеството на отливката.

Този метод предлага значителна геометрична свобода и възможност за леене на детайли със сложна конфигурация без нужда от леярски наклони или пясъчни сърца. Липсата на делителна равнина на формата елиминира леярските шевове и отклоненията, произтичащи от деленето на касите, което води до висока точност на готовите изделия. Въпреки риска от газови дефекти при нарушена дегазация или опасността от дифузия на въглерод в повърхностния слой на стоманите, технологията остава изключително екологична поради пълното рециклиране на несвързания пясък.

Изборът на газифицируеми модели е икономически обоснован предимно при едросерийно производство в автомобилостроенето и машиностроенето за изработка на двигателни блокове, цилиндрични глави и сложни корпуси на помпи. Методът е особено ефективен, когато няколко отделни части могат да бъдат обединени в една монолитна отливка, което спестява последващи операции по заваряване и механична обработка.

3.2.3. Леене в черупкови форми

Леенето в черупкови форми представлява високоефективен метод за производство на прецизни отливки чрез използването на тънкостенни полуформи (черупки) с дебелина от 5 до 10 mm. Процесът, разработен от Кронинг, се класифицира като разновидност на формоването с еднократни форми, при което се прилагат специализирани плакирани формовъчни смеси. Характерно за метода е отсъствието на традиционни леярски каси по време на формирането на черупката.

Физико-химични процеси на формообразуване

Формата се генерира чрез термично индуцирана полимеризация на пясъчно-смолна смес върху работната повърхност на нагрят метална моделна плоча. В резултат на термичния контакт се постига необратимо омрежване на термореактивното свързващо вещество (най-често фенолформалдехидна смола). Този процес създава твърда пространствена структура между пясъчните зърна, формирайки здрава и газопропусклива черупка, която възпроизвежда точно геометрията на модела.

Етапи на получаване на формата

Технологията се явява разновидност на методите за получаване на сърца. Процесът включва нагряване на металните модели, разположени върху моделната плоча, и последващо засипване с формовъчна смес. Акумулираната топлина предизвиква стопяване на смолата и свързване на пясъчните зърна в еднородна структура. Тъй като първоначално формираната черупка не е напълно втвърдена, тя се подлага на доизпичане за постигане на проектната якост. След окончателното втвърдяване и

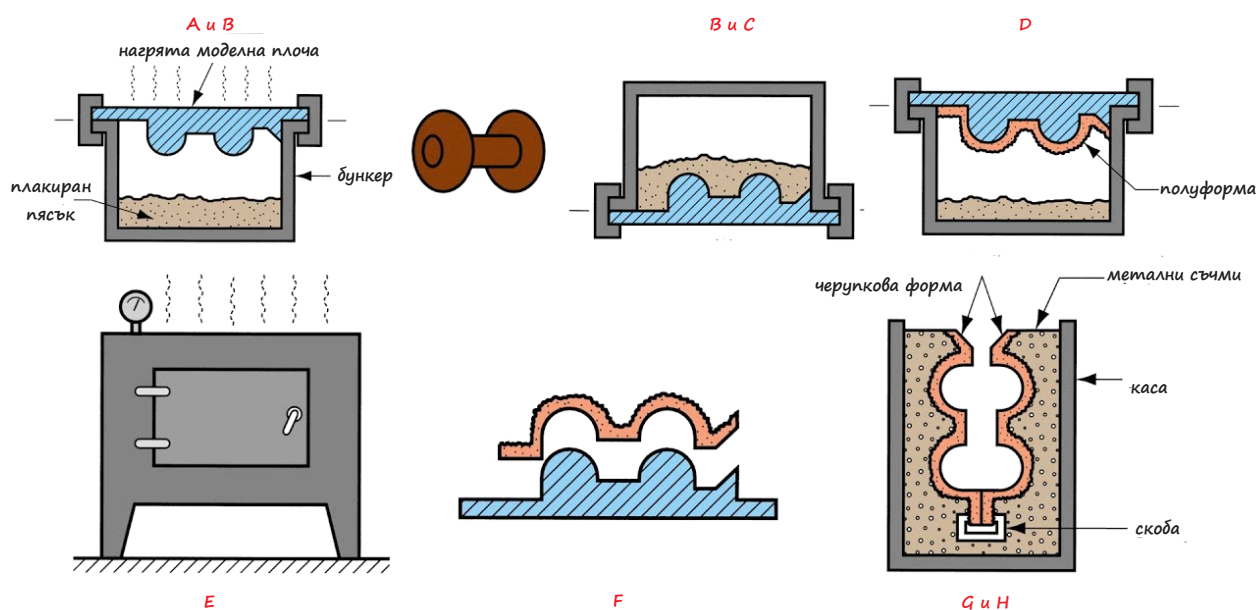
сдвояване на съответните полуформи, лярската форма е подготвена за заливане.

3.2.3.1. Същност и технологична схема на процеса

Технологичният процес на леење в черупкови форми протича в следната последователност (фиг. 3.17):

- А. Нагриване на металната моделна плоча до температура 250-350°C;
- В. Нанасяне (обсипване) на плакирана пясъчно-смолна смес върху модела;
- С. Образуване на първична (полутвърда) черупка под действието на топлината;
- Д. Отстраняване на излишната смес;
- Е. Термично доизпичане на черупката в пещ при 300-450°C;
- Ф. Отделяне на готовата черупкова полуформа от модела;
- Г. Изработване на втората полуформа по аналогичен начин;
- Н. Сглобяване на двете полуформи;
- И. Заливане със стопен метал;
- Ј. Охлаждане, разрушаване на формата и извличане на отливката.

Процесът може да бъде напълно механизирован и автоматизиран, което го прави особено подходящ за серийно и масово производство.



фиг. 3.17. Технологична схема на леење в черупкови форми (метод на Кронинг)

3.2.3.2. Технология на производството

Подготовка и разделителни обмазки

Поради високата адхезия на термореактивната бакелитова свръзка към металната повърхност, от критично значение е предварителното третиране на моделната плоча с разделителна обмазка. Съвременните силиконови съединения (силициево-органични течности) осигуряват

ефективно отделяне при 5 до 10 цикъла на формоване. В производствената практика се използват и алтернативни състави:

- Разтвор на мазут в петрол (съотношение от 1:3 до 1:2);
- Планински восък (в твърдо състояние или разтворен в нафта);
- Сапунена емулсия (3-5% настърган сапун във воден разтвор);
- Графитни емулсии и пасти на олифна основа.

Формообразуване и обсипване

Процесът започва с нагряване на обмазаната метална плоча до 300-350°C, след което тя се фиксира херметично към бункера чрез шарнирен затвор. При ротация на бункера на 180°, плакираната смес обсипва модела под действие на гравитацията. Времето за контакт варира между 20 и 30 секунди, в зависимост от необходимата дебелина на черупката и геометричната сложност на модела. За предотвратяване на прегряването на стените на бункера и последващо разкъсване на черупката, между него и плочата се поставя изолационна рамка от дърво или азбест.

Режими на спичане и втвърдяване

Получаването на готовата черупка протича в два стадия: първично формиране на полутвърда структура под действие на топлината от плочата и окончателно втвърдяване в пещ.

Сдвояване и укрепване на формите

Асемблирането на лицевата и обратната полуформа се осъществява чрез два основни метода: механично сдвояване или залепване.

Заливане

При хоризонтално заливане на форми с дебелина на черупката над 8 mm не се изисква допълнително укрепване. При вертикално заливане черупките се позиционират в каси и се уплътняват със сух пясък или чугунени дробинки (2-4 mm). Металните дробинки осигуряват най-висока механична стабилност срещу хидростатичното налягане, въпреки затрудненията при тяхното транспортиране и склонността им към нагряване. След охлаждане на метала формата се разрушава и се извлича готовата отливка.

Технологични особености на метода

3.2.3.3. Формовъчни материали и плакирани смеси

Основни компоненти и изисквания

Фундаментален компонент на сместа е кварцовият пясък, чиито свойства - огнеупорност, течливост и зърнов състав - определят качеството на черупката. Високата течливост е задължително условие за прецизното копиране на модела без допълнително уплътняване. Оптимална чистота на повърхността и структурна здравина се постигат чрез използване на смесени фракции: пясък 50/100 (30-50 %) и пясък 100/200 (50-70 %). За разлика от класическото леене, газопропускливостта тук е гарантирана от малката дебелина на самата черупка.

Свързващи вещества (Смоли)

В метода на Кронинг се прилагат термореактивни смоли, които преминават в необратимо твърдо състояние при нагряване:

- *Фенолформалдехидни смоли (новолачни)*: Най-устойчиви на високи температури. Смесени с ускорител на втвърдяването (уротропин) и смлени до едрина, близка до тази на пясъка, те се дефинират като пулвербакелит.
- *Карбамидни смоли*: По-нискобюджетна алтернатива с по-малка якост, приложима предимно за нискотемпературни цветни сплави.

В таблица 3.4 са систематизирани основните видове моделни смеси и техните технологични характеристики, което позволява да се направи сравнителна оценка на различните състави и тяхната приложимост в лепарската практика.

Таблица 3.4. Основни видове моделни смеси и техните технологични характеристики

Компонент / Тип смес	Индустриална (пулвербакелитова)	Високопрецизна (цирконова)	Екологична (Low-Emission)
Огнеупорен пълнител	Кварцов пясък	Цирконов пясък	Високочист кварцов пясък
Свързващо вещество	Фенолформалдехидна (бакелитова) смола	Модифицирана фенолформалдехидна смола	Неорганични силикатни свързващи вещества
Съдържание на свързващо вещество	3,0–7,0 %	4,0–6,0 %	2,5–4,0 %
Омокрящ агент / добавки	Стеаринова киселина и органични добавки	Силанови модификатори	Биоразградими органични добавки

Забележка: Необходимото технологично количество на свързващото вещество зависи от специфичната повърхнина на огнеупорния пълнител. При използване на по-фини фракции на пясъка общата повърхност на зърната се увеличава, което изисква по-голямо количество смола за осигуряване на равномерно плакиране (обвиване) на всяко зърно и получаване на необходимите якостни свойства на черупковата форма.

Технология на приготвяне (Смесване и плакиране)

Процесът се реализира в смесители тип колерганг при строга последователност за предотвратяване на разслояването на компонентите и осигуряване на якост на опън до 1,6 МПа:

1. *Хомогенизиране на сухата фаза*: Разчетеното количество пясък се бърка в продължение на 2 минути. Пясъкът трябва да бъде абсолютно сух; наличието на влага води до отделяне на пара при контакт с нагрятата плоча, което нарушава точността на отпечатъка.
2. *Въвеждане на омокрящ агент*: Добавят се овлажнители (керосин, машинно масло 0,25-0,5% или за по-висока якост-течен бакелит до 1% / фурфурол до 0,7%). Следва 5-минутно бъркане, при което повърхността на пясъчните зърна се активира за адхезия.
3. *Плакиране*: Към овлажнения пясък се добавя прахообразната смола. Омокрящият агент позволява на зрънцата на смолата да прилепнат

равномерно към всяко пясъчно зърно, формирайки т.нар. плакирана смес.

Иновативни тенденции

Актуалните разработки в областта на черупковото леење са фокусирани върху оптимизиране на икономическата ефективност и екологичните показатели чрез внедряване на следните технологии:

- *Горещо плакиране (Hot-Coating):* За разлика от традиционното смесване, при този метод пясъкът се нагрява предварително до 130-150 °C. При добавяне на смолата тя се стопява мигновено и обгръща всяко зърно в много тънък и равномерен филм. Този метод позволява редуциране на разхода на смола с 20-30%, като същевременно повишава механичната якост на черупката и значително подобрява нейната газопропускливост, тъй като междузърнестите пространства остават по-чисти.
- *Синтетични сферични пълнители (Cerabeads):* Използването на изкуствен керамичен пясък със строго сферична форма на зърната осигурява максимална течливост на сместа. Благодарение на идеалната геометрия, контактната повърхност между зърната е оптимизирана, което позволява постигане на висока якост при много ниско съдържание на свързващо вещество. Тези материали имат почти нулево термично разширение, което елиминира риска от деформации и пукнатини в черупката при заливане с високотемпературни сплави.
- *Екологична безопасност и хигиена на труда:* Съвременните иновации включват преминаване към неорганични свързващи системи (на базата на алкални силикати). Тези „зелени“ технологии практически не отделят вредни емисии (феноли и формалдехиди) в леярния цех, което подобрява работната среда и намалява разходите за мощни аспирационни системи.
- *Химическа модификация на смолите:* Внедряването на азотосъдържащи добавки и нови втвърдители позволява скъсяване на времето за доизпичане в печта, което повишава общата производителност на автоматизираните леярски линии.

3.2.3.4. Моделна екипировка и технологични особености на формообразуването

Конструкция на моделните плочи

Моделите се закрепват върху едностранни лети чугунени плочи с дебелина 15-20 mm. За гарантиране на геометричната им стабилност срещу термично измятане, те се подлагат на отвръщане за снемане на напреженията и последващо прецизно шлайфане. Работната повърхност трябва да бъде обработена без вдлъбнатини или изпъкналости, които биха възпрепятствали плътното сдвояване на полуформите. По периферията на плочата се изработва защитен кант (борд), който предпазва сместа от

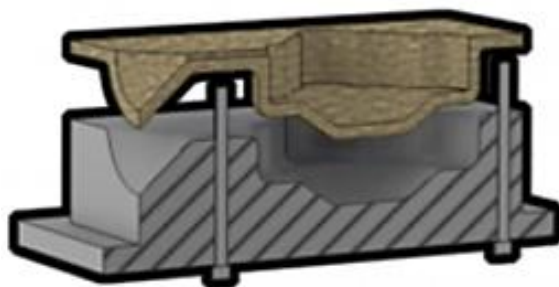
разсипване при ротация на бункера и служи за прецизно центроване на двете черупки.

Точност и параметри на грапавост

Моделите се изработват с два класа по-висока точност от тази на крайните отливки, като обикновено се прилагат IT4 или IT5 съгласно системата на допуски и сглобки. Технологичен допуск от $\pm 0,1\text{mm}$ се счита за практически достатъчен. Работните повърхности се обработват до средно аритметично отклонение на профила $Ra = 0,4\text{--}0,8\text{ }\mu\text{m}$. Тъй като черупковата форма копира прецизно микрорелефа на модела, електролитното хромиране е силно препоръчително за намаляване на адхезията и улесняване на деформирането.

Специализирани механизми за извличане и фиксиране

- Изтласкващи устройства: Поради плътното прилепване на черупката към модела, технологичните конуси често са недостатъчни за нейното освобождаване. Използват се избутвачи (единични или на обща плоча), разположени така, че да упражняват равномерен натиск по цялата площ, предотвратявайки механични повреди (фиг. 3.18).
- Фиксатори: За прецизното вдвояване на двете полуформи върху плочата се изработват съответстващи си изпъкнали и вдлъбнати части. Те се позиционират точно спрямо основните линии на модела, за да се избегне геометрично разместване.



фиг. 3.18. Принципна схема на изтласкващо устройство за отделяне на черупковата полуформа ([Manufacturing Guide](#), n.d.)

Проектиране и термична компенсация

Дебелината на черупката зависи от топлинната инерция на модела, поради което стените му се проектират с дебелина 12-15 mm. При изчисляване на размерите термичното разширение на металния модел не се взема под внимание, тъй като то се компенсира от линейното свиване на черупката при изстиване. Приема се, че геометрията на черупковата форма в работно състояние е идентична с тази на модела.

3.2.3.5. Термични процеси при образуване на черупката

Формирането на черупката протича в два основни стадия:

- образуване на полутвърда структура върху нагретия модел;
- окончателно втвърдяване (спичане) в пещ.

Температурният режим е критичен и се подбира експериментално, като обикновено:

- температурата на моделната плоча е около 300 °С;
- доизпичането се извършва при 300-450 °С за кратко време.

Правилният режим гарантира оптимална дебелина (4-6 mm) и максимална якост на черупката.

3.2.3.6. Сглобяване на черупковите форми

След приключване на термичния цикъл, двете полуформи се сглобяват в обща лярска система. Изборът на метод за съединяване зависи от габаритите на отливката и мащаба на производството:

- *Химическо съединяване (Залепване)*: Най-ефективният индустриален метод. Използват се лепила на базата на фенолни или фуранови смоли, които се нанасят върху контактните повърхности. Слепването гарантира херметичност и висока якост на шева.
- *Механично фиксиране*: Прилага се чрез периферни скоби или специализирани рамки. Методът е подходящ за по-малки форми или при хоризонтално заливане, където хидростатичното налягане на метала е по-ниско.
- *Комбиниран метод*: Използва се при производството на едрогабаритни отливки, където е необходимо едновременно залепване и механично подсилване за предотвратяване на деформации при заливане.

За точното позициониране на полуформите се разчита на системата от фиксатори (щифтове и гнезда), заложиени в конструкцията на моделната плоча, които елиминират риска от геометрично разместване.

3.2.3.7. Технологично позициониране и укрепване при заливане

В зависимост от конструктивните параметри на отливката и дебелината на стената, черупковите форми се подготвят за заливане по два основни метода:

- *Самостоятелно заливане*: Приложимо при малки отливки и черупки с повишена дебелина (над 8 mm). В този случай сдвоената форма притежава достатъчна собствена коравина, за да издържи на хидростатичното налягане на стопения метал без външна опора.
- *Заливане в опорни каси*: Използва се при производството на едрогабаритни или тънкостенни детайли. Формата се позиционира в метална каса и се обгражда с инертни насипни материали (кварцов пясък, чакъл или метални дробинки). Това технологично решение осигурява:
- Механична стабилизация на формата в пространството;
- Ефективно абсорбиране на металостатичното налягане;
- Предотвратяване на пластични деформации или разрушаване на черупката по време на кристализацията.

3.2.3.8. Технологични системи за механизация и автоматизация

Методът на Кронинг се отличава с висока технологична пригодност за пълна автоматизация, което гарантира стабилност на качеството и висока производителност. В съвременното производство се експлоатират:

Полуавтоматични машини: При тях част от подготвителните операции се извършват ръчно, но термичният цикъл е строго контролиран.

Автоматизирани ротационни агрегати: Многопозиционни системи, които позволяват паралелно протичане на процесите по обсипване, изпичане и извличане на черупките.

Интегрирани автоматични линии: Обхващат целия цикъл - от подготовката на плакираната смес до сглобяването на формите.

Към типичната машина са включени следните основни подсистеми: автоматизирана нагриваща система за моделната плоча, ротационен бункер за формовъчната смес, пещ за термична стабилизация (изпичане) и прецизен механизъм за изтласкване на готовата черупка.

3.2.3.9. Избиване, почистване и зачистване на отливките

Разрушаване на формата и извличане на отливките

След приключване на кристализацията и охлаждането на метала, черупковата форма се подлага на избиване. Процесът е значително улеснен поради термичното разлагане на термореактивната смола - под въздействието на топлината от отливката свързващото вещество изгаря, в резултат на което черупката губи своята якост и придобива крехка, лесно разрушима структура.

Технологични операции по почистване и зачистване

След извличането им от формата, отливките преминават през следните етапи:

- *Механично почистване:* Отстраняване на остатъците от разрушената черупка чрез вибрационни съоръжения или пневматични устройства;
- *Абразивно почистване:* Прилагане на дробеструйна или пясъкоструйна обработка за окончателно отстраняване на припек и повърхностни окиси;
- *Отстраняване на леяковата система;*
- *Зачистване:* Шлифование на остатъците от леяците, образувани в равнината на сдвояване на полуформите.

Благодарение на високата прецизност на метода и ниската грапавост на получените повърхнини, обемът на операциите по почистване и зачистване е минимален. Това води до съществена икономия на метал и редуциране на разходите за последваща механична обработка.

3.2.3.10. Техничко-икономически показатели: Предимства и недостатъци

Предимства на метода

Методът на Кронинг притежава съществени технологични предимства пред класическото пясъчно лееие, които го дефинират като високоефективен процес за прецизно производство:

- Висока геометрична точност и повърхностна гладкост: Отклоненията в размерите, разположени в една полуформа, не надвишават 0,5 mm на всеки 100 mm дължина. При размери, пресичащи равнината на сдвояване, допустимото отклонение е до 1 mm на 100 mm поради спецификата на сглобяване. Повърхностната грапавост достига стойности $Ra = 1,6-3,2 \mu m$, което позволява редуциране на прибавките за механична обработка до минимум. Това ускорява производството и значително намалява загубите на метал.
- Оптимални физико-механични свойства на формата: Черупковата форма се отличава с отлична газопропускливост, хигроскопичност (не поглъща влага) и висока якост, позволяваща продължително съхранение и транспорт. Тя не се рони и не възпрепятства линейното свиване на метала, което силно редуцира риска от пукнатини, пори и газови шупли.
- Металургични предимства: Ниската топлопроводност на черупката позволява изработването на тънкостенни стоманени отливки (6-7 mm), дори при сплави с ограничена тънколивкост. При сивия чугун се избягва ефектът на повърхностно „избелване“, дори при намалено съдържание на силиций и въглерод.
- Облекчено избиване и почистване: Поради термичното изгаряне на смолата, черупката се разрушава лесно при леко механично въздействие. Липсата на повърхностен пригар елиминира необходимостта от интензивна почистваща обработка, което съкращава разходите за дробеструйни и пясъкоструйни апарати.
- Икономия на материали и технологичност: Разходът на формовъчен пясък е приблизително 20 пъти по-нисък спрямо обикновеното лееие. Процесът позволява пълна автоматизация, не изисква висока квалификация на персонала и гарантира нисък процент брак.

Недостатъци и технологични ограничения

Въпреки високата си ефективност, методът е свързан със следните *критични фактори*:

- Висока себестойност на материалите: Високата цена на фенолните смоли прави метода рентабилен основно при едросерийно и масово производство. Понастоящем се внедряват по-икономични алтернативни крепители.
- Скъпа инструментална екипировка: Необходимостта от прецизно изработени метални модели и моделни плочи повишава първоначалните инвестиции.
- Работна среда и екология: Процесът протича при високи температури и изисква мощна вентилация поради отделянето на вредни газове при термодеструкцията на смолата.
- Масови ограничения: Методът не е подходящ за едрогабаритни детайли, като максималното тегло на отливките е ограничено до 100 kg.

3.2.3.11. Специализирани технологични приложения

- Черупкови сърца: Основната им характеристика е, че са кухи. Чрез обратно изсипване на неутвърдената смес се получават изключително леки елементи с висока газопропускливост, които се избиват лесно от отливката. При тях запълването на кутията се извършва единствено през марките.
- Неделими черупкови форми: Използват се за детайли с винтови повърхнини. Специфичното тук е формирането на монолитна (цяла) черупка, подсилена с външен кожух и едрозърнест пълнеж. Това позволява извличане на модела чрез механизизирано развиване, осигурявайки висока точност без делителна равнина.
- Зъбни колела: Особеното при тях е използването на високодисперсни (фини) пясъци. Това гарантира прецизен еволвентен профил на зъбите, който често не изисква допълнителна обработка, запазвайки повърхностната твърдост на метала и др.

Методът на Кронинг намира широко приложение в съвременното машиностроене за производство на прецизни отливки, при които се изисква съчетание от сложна геометрия и висока плътност на метала.

3.2.4. Вакуумно формоване (V-процес)

Вакуумното формоване, известно още като V-процес, представлява една от най-съвременните и прецизни технологии в групата на методите за леење в еднократни форми. В технологичната йерархия този процес заема специфично междинно място - той съчетава използването на кварцов пясък като основен формовъчен материал с тънката работна повърхност, характерна за леењето в черупкови форми (Алипиев, n.d.).

V-процесът е сред методите с гравитационно запълване на формата. Основната му иновация се състои в използването на физичните свойства на вакуума (подналягането) единствено като средство за укрепване на формата. Това изцяло изключва нуждата от химически свързващи вещества, смоли или влага, като същевременно запазва класическия принцип, при който разтопеният метал запълва кухнята под действие на собственото си тегло.

За процеса се използва сух кварцов пясък без примеси. Тъй като в него не се съдържат свързващи компоненти, материалът не изисква сложна регенерация, а рискът от поява на газови дефекти е минимален. Работната повърхност на формата се дефинира от термопластична мембрана (фолио от полиетилен, ЕВА или PVC) с дебелина между 0,05 и 0,10 mm. Тези фолиа притежават изключителна еластичност, позволяваща им да копират идеално повърхнината на модела, а при контакт с горещия метал се изпаряват без остатък.

Липсата на абразивно триене позволява моделната екипировка да бъде изработена от по-меки материали. В съвременната практика моделите често се изработват чрез 3D принтиране, което позволява бързо

прототипиране и лесно вграждане на вентилационни канали за вакуума. Когато конструкцията на детайла изисква вътрешни кухини или отвори, във формата се поставят стандартни леярски сърца, които се позиционират в гнездата след приключване на вакуумирането.

Технологична последователност при получаване на отливките

Процесът на формоване преминава през няколко последователни етапа, при които взаимодействието между вакуума и атмосферното налягане осигурява здравината на формата (фиг. 3.19.).

Първи етап: Подготовка и вакуумно оформяне на фолио (фиг. 3.19,1)

В началната позиция полиетиленовото фолио, което е изпънато на рамка, се нагрива от нагревател до достигане на състояние на висока пластичност. Под фолиото се намира леярският модел, разположен върху специална вакуумна камера. Работната повърхнина на модела е свързана с камерата чрез система от малки отвори. Когато рамката с нагрятото фолио се притисне към камерата, то плътно обвива модела. Това се дължи на възникналата разлика в наляганията - над фолиото действа атмосферното налягане, докато под него, от страната на модела, се поддържа вакуум. След прецизното копиране на профила, върху фолиото се нанася противопопригарна обмазка, която се изсушава, за да се гарантира високото качество на повърхнината на бъдещата отливка.

Втори етап: Формоване и уплътняване на пясъка (фиг. 3.19,2)

Върху камерата се поставя специална леярска каса. Тя е проектирана с двойни стени и хоризонтално разположени тръби, свързващи стените, което позволява ефективно вакуумиране на пространството около модела. В касата се насипва сух кварцов пясък, който се подлага на вибрация. Този процес е критичен за постигане на необходимата плътност на зърната преди тяхното окончателно фиксиране.

Трети етап: Херметизация и изваждане на модела (фиг. 3.19, 3 и 4)

След вибрирането повърхността на пясъка се изравнява и се покрива с второ фолио. В този момент леярската каса се свързва към вакуумиращата система, а вакуумът към камерата под модела се изключва. По този начин пясъкът се оказва херметично затворен между двете фолия. Поради разликата между атмосферното налягане от външната страна и вакуума във вътрешността на касата, пясъкът моментално загубва своята подвижност и формата придобива необходимата висока якост. Едва след това се преминава към отделяне на готовата вакуумирана форма от модела и камерата, при което във формата остава кухина с точния профил на изделието.

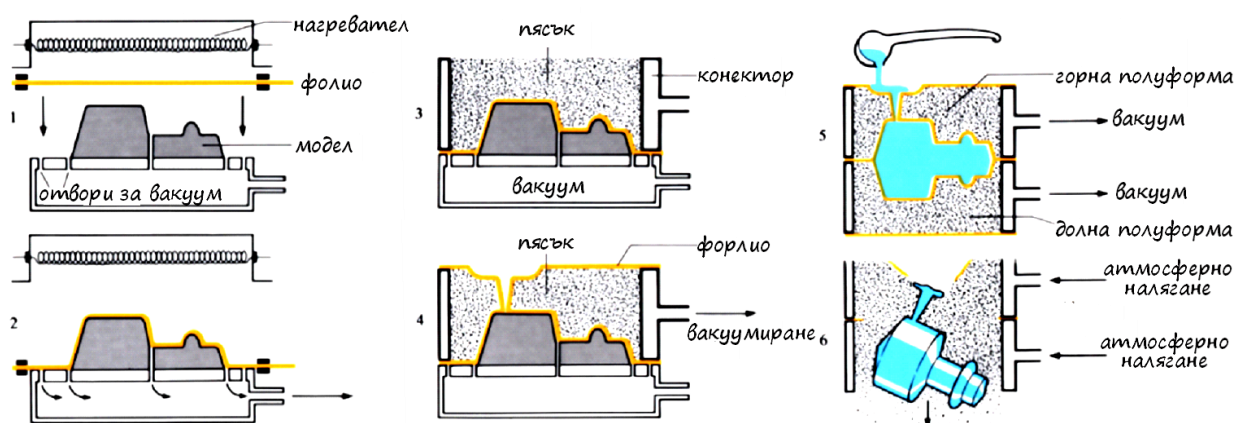
Четвърти етап: Сглобяване, заливане и освобождаване на отливките (фиг. 3.19,5 и 6)

Във финалната позиция се извършва сглобяване с горната полуформа, изработена по същата технология. Заливането на стопилката се осъществява гравитационно при непрекъсната работа на вакуум-помпите, които поддържат стабилността на касите. След приключване на

кристализацията вакуумът се изключва, при което пясъкът възвръща първоначалното си насипно състояние и се отвежда за охлаждане и повторна употреба. След освобождаването ѝ, отливката се почиства лесно и поради високата си размерна точност изисква минимална механична обработка.

Сравнителен анализ с други гравитационни методи

V-процесът превъзхожда традиционното пясъчно леење по отношение на размерната точност и гладкостта на повърхнините. Благодарение на стабилността на вакуумираната форма, металът запълва отлично дори много тънки сечения, а липсата на триене при изваждане на модела позволява леярските наклони да бъдат минимални.



Фиг. 3.19. Етапи за получаване на отливки чрез V-процес (The Open University, n.d.)

В табл. 3.5 са съпоставени основните параметри, които илюстрират предимствата на вакуумното формоване спрямо класическите и специалните гравитационни методи.

Таблица 3.5. Сравнителен анализ на методите, използващи гравитационните сили

Показател	Пясъчно леење	Черупково леење	V-процес	Кокилно леење
Запълваща сила	Гравитация	Гравитация	Гравитация	Гравитация
Размерна точност	Ниска	Висока	Висока	Много висока
Грапавост Ra, μm	25 - 100	6,3 - 12,5	6,3 - 12,5	1,6 - 6,3
Дебелина на стената, mm	5 - 8	3 - 5	2 - 3	3 - 5

Методът е приложим за широк спектър от сплави, като поради бавното охлаждане в пясъчната среда, вътрешните напрежения в детайлите са по-ниски в сравнение с тези при кокилното леење.

Основните *предимства* на метода са неговата икономичност, екологичност и изключителната възможност за 100% повторна употреба на пясъка. Въпреки това, той има и своите условни недостатъци. Ниската производителност го прави по-подходящ за едрогабаритни детайли, художествени отливки или малкосерийна моделна екипировка.

Проблемът със запрашеността и рискът от силикоза поради работата със сух пясък са реални, но се решават успешно чрез високоефективна вентилация. Също така трябва да се отчете силната зависимост от непрекъснатото електрозахранване. В съвременните леярни този риск е сведен до минимум чрез резервирани системи за захранване.

3.2.5. Леене в кокилни форми

Кокилното леене е технологичен метод за получаване на отливки чрез гравитационно запълване на постоянни метални форми (кокили). За разлика от леенето в еднократни пясъчни форми, кокилата се използва многократно, което гарантира висока геометрична точност и постоянство на размерите. Високата топлопроводност ускорява кристализацията на метала, при което отливките притежават дребнозърнеста структура и подобрени механични показатели (Алипиев, n.d.).

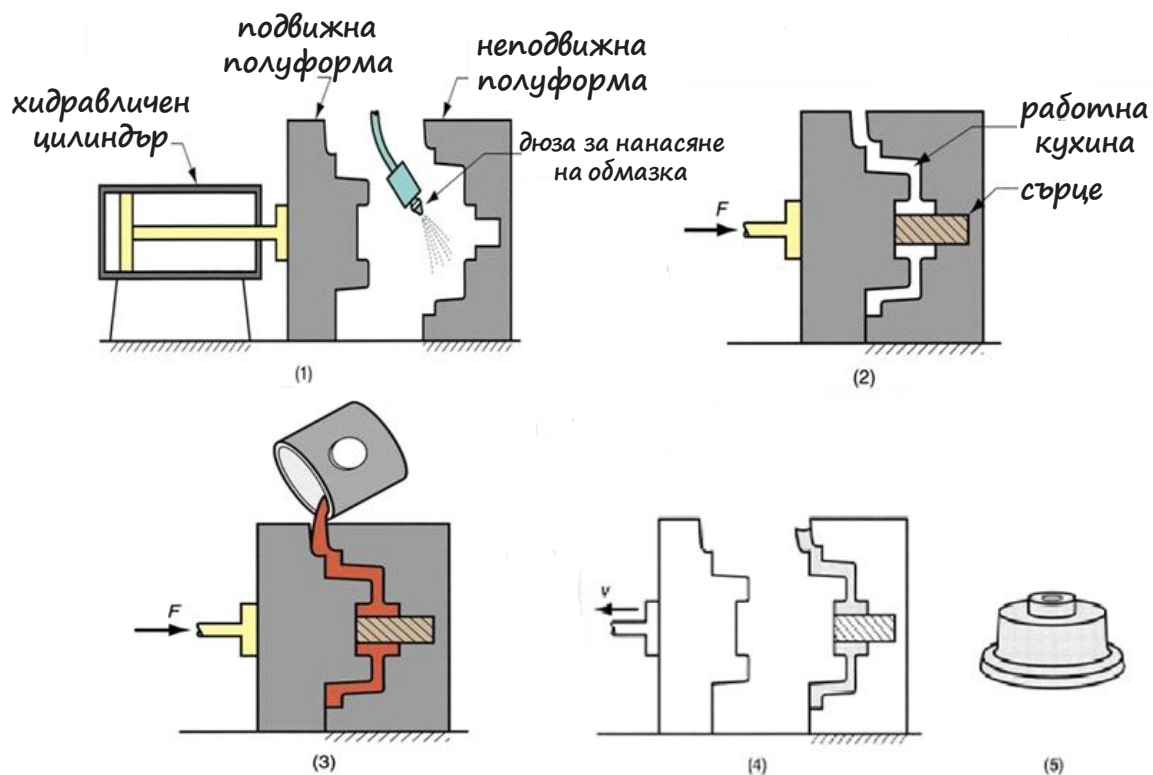
Технологичен процес и методи на запълване

Основните етапи на технологичния процес са:

- *Подготовка на кокилата* - включва основно почистване на повърхността на кокилата от нагар и предишни отливания; нагряване до работна температура (150–350°C) и нанасяне на защитни огнеупорни обмазки;
- *Сглобяване на формата* - поставяне на леярските сърца, затваряне и фиксиране на двете полуформи;
- *Заливане с метал* - осъществява се през леяковата система;
- *Охлаждане и кристализация*;
- *Изваждане на отливката и почистване* - кокилата се отваря и отливката автоматично се избива, отстраняват се елементите на леяковата система; при необходимост се извършва последваща термична или механична обработка.

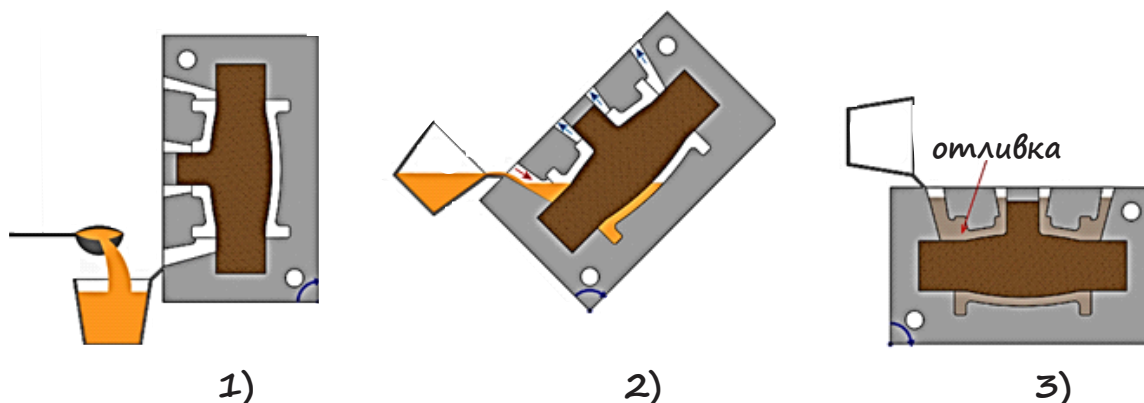
В зависимост от начина на подвеждане на метала към работната кухня се прилагат два основни метода:

- *Гравитационно заливане при фиксирано положение на формата* (фиг. 3.20): Схемата е конструктивно проста, но изисква прецизна леякова система за избягване на турбулентност.
- *Леене чрез накланяне (завъртане)* (фиг. 3.21): Стопилката навлиза в кухнята ламинарно чрез плавно завъртане на формата, което елиминира разплискването и гарантира висока плътност и херметичност на детайла. Процесът завършва с изваждане на отливката при 700 - 900 °C за осигуряване на структурна стабилност.



Фиг. 3.20. Класически процес на кокилно лееие

Фигура 3.21 илюстрира предимството на накланящото се лееие, при което се осигурява ламинарно движение на метала.

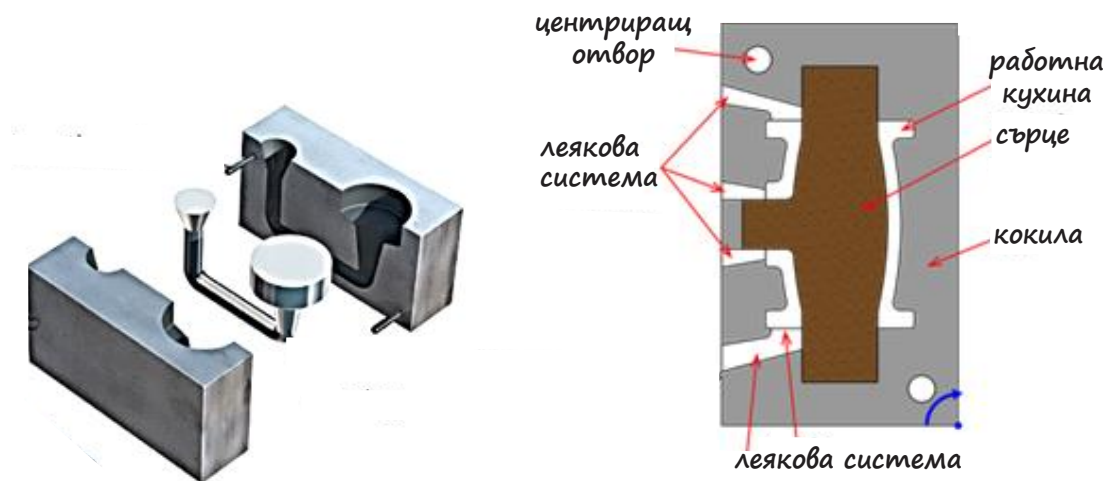


фиг. 3.21. Динамичен метод на запълване (Tilt-pour) (Dolin Casting, 2024)

Видове кокилни форми и конструктивни особености

В зависимост от конструкцията и начина на отваряне, кокилите се класифицират като: цели (неразглобяеми), с вертикална делителна равнина, с хоризонтална делителна равнина и сложни (комбинирани) форми.

На фиг. 3.22. са представени две кокилни форми с вертикална делителна равнина. Техните специфични конструктивни особености са следните:



Фиг. 3.22. Кокили с вертикална делителна равнина

- *При кокили с вертикално разделяне:* Тази конструкция е предпочитана за сравнително прости отливки с тегло до 30 kg. Правят се от две половини, на които равнината на свързване е и разделителна равнина. Леяковата система се осъществява също по тая равнина.

Обикновено запалването при тях е чрез сифонен леяк. Също целесъобразно е металът да се подава отгоре чрез сърце. При тази разделителна равнина лесно се постига рационален метод на заливане и се устройват удобни газоотводни канали. Като недостатъци се посочват неудобното обслужване (неудобно е например поставянето на висящи пясъчни сърца) и това, че половинките на кокилата са доста тежки и съединяването им преди заливането е неудобно; затова се използват специални приспособления - стативи, на които се закрепва едната половина неподвижно, а другата се приближава ръчно с винт или пневматично по направляващи релси. Това оскъпява внедряването на този тип кокили особено за по-големи изделия.

- *При кокили с хоризонтално разделяне:* Прилагат се универсално както за малки, така и за едрогабаритни детайли. Употребяват се за големи и малки отливки. Като правило биват едноместни. Долната част на кокилата е неподвижна, поставя се върху специална маса и се покрива с горната част, която е подвижна. Специални приспособления за сваляне на горната част обикновено не се правят; работи се ръчно или при много тежка горница се използва скрипец. Могат да се използват и моделни плочи, като формата остава в едната половина на кокилата.

Предимствата на тези кокили са, че се изработват и се обслужват по просто и удобно, сравнително не са скъпи, лесно се обработват механично, сърцата се залагат удобно, отливката се изважда твърде просто кокилата се завърта на 180 °. Като недостатъци се посочват трудно осъществимата

сифона леякова система, необходимостта от специални сърца за вливане на метала, неудобното изработване на отдушниците, затрудненото повдигане на капака.

- *При комбинирани кокили (полукокили):* Когато конфигурацията на отливката е твърде сложна за изцяло метална форма. Част от тяхната повърхност се образува от пясъчни сърца. Тези сърца трябва да бъдат здрави с минимална газоотводна способност и добра газопропускливост. Изработването им трябва да е точно. Правят се само с хоризонтално разделяне. Целесъобразността на употребата им в сравнение с целите кокили се решава при условията на работа, т.е. дали сърцата са прости за изработване.

Предимства: прости за направа и обслужване, удобна леякова система и по-голяма издръжливост, а недостатък е добавъчният разход на сърцевни смеси.

- *При цели (неразглобяеми) кокили:* Използват се за детайли с изключително проста геометрия, които нямат подрези (обратни наклони) и вътрешни кухини. При тях отливката се изважда чрез директно избиване или изсипване след втвърдяване. Задължително се предвиждат по-големи леярски наклони, за да се предотврати заклиняване на метала в монолитната форма. Най-често се използват за отливане на прости заготовки.

Технологични особености при кокилно леење на различните сплави

Приложението на кокилното леење и протичането на процеса в значителна степен се определят от вида на използваната сплав. Физико-химичните свойства на металите - температура на топене, тънколивност, склонност към окисляване, свиване при кристализация и взаимодействие с формата - оказват съществено влияние върху технологичния режим и конструкцията на кокилата.

В зависимост от тези особености се разграничават три основни групи материали: чугун, стомана и цветни сплави. Всяка от тях се характеризира със специфични изисквания към температурата на заливане, условията на охлаждане, използваните покрития и конструкцията на формата. Обобщена информация за технологичните параметри и мерки за контрол на качеството при различните материали е дадена в таблица 3.6.

Таблица 3.6. Особенности и технологичен режим при леење на различни сплави в кокила

Материал	Характерни дефекти	Обработка на стопилката (химичен състав)	Технологичен режим и охлаждане	Особености на кокилната форма
Чугун	Избелване (твърда повърхностна кора); пукнатини.	Модифициран е с FeSi; повишаване на	Подгряване на кокилата до 300-400°C;	Масивни стени; използване на дебели

		съдържанието на Si	последващо термично отгряване	топлоизолационни и бои
Стомана	Газови шупли; горещи пукнатини; „заваряване“ към формата	Прецизно раскисляване; стриктен контрол на сяра и фосфор	Висока температура на заливане; бързо изваждане от формата	Изработка от жароустойчиви стомани
Алуминиев и сплави	Газова порьозност; окисни включения; непълно запълване	Рафиниране; модифициране (с Na или Sr).	Контролирано сифонно заливане; поддържане на тесен температурен интервал.	Сложни вентилационни системи; тънки стени на формата; фини графитни покрития.
Медни сплави	Пригари; груба зърнеста структура на метала	Добавяне на легиращи елементи за раздробяване на зърното	Интензивно охлаждане на отливката; използване на графитни смазки	Вграждане на графитни или водни охладителни елементи

Технико-икономическа оценка на кокилното леење

Прилагането на кокилно леење в съвременното производство се определя от баланса между високите качествени показатели на детайлите и значителните инвестиционни разходи за оборудване.

Предимства на метода

- Висока производителност и ефективност: Благодарение на многократната употреба на металната форма се елиминират трудоемките операции по изработване на нова форма за всяко заливане (характерни за пясъчното леење). Това позволява автоматизация на цикъла и рязко съкращаване на времето за производство на една бройка, което е критично при масови серии.
- Подобрена микроструктура и механични свойства: Високата топлопроводимост на кокилата води до ускорено отнемане на топлината от течния метал. Резултатът е формиране на финокристална структура на отливката, която гарантира по-висока якост, твърдост и устойчивост на износване в сравнение с детайлите, лети в пясъчни форми.
- Геометрична прецизност и повърхностно качество: Металната форма притежава висока коравина, което предотвратява деформациите под действие на хидростатичното налягане. Това позволява постигането на строги допустими отклонения в размерите и ниска грапавост, което от своя страна минимизира или изцяло премахва нуждата от последваща механична обработка.

Технологични и икономически недостатъци

- Висока първоначална инвестиция: Проектирането и изработката на кокилите изискват използването на скъпи жароустойчиви материали и прецизна металообработка (често на CNC машини). Това прави метода икономически неизгоден за единични бройки или малки серии, тъй като цената на инструмента трябва да се разпредели върху голям брой изделия.
- Ограничен експлоатационен ресурс: Постоянното излагане на формите на резки температурни амплитуди (от стайна температура до температурата на стопилката) предизвиква появата на термична умора. С течение на времето по работните повърхности се образуват микропукнатини, които влошават качеството на детайла и в крайна сметка водят до бракуване на формата.
- Технологични рискове: Интензивното охлаждане, което е предимство за структурата, може да бъде и недостатък. При леене на чугун съществува сериозен риск от „избелване“ (образуване на цементит), което прави повърхността твърда и крехка. Освен това, твърдостта на формата ограничава свободното свиване на метала, което може да доведе до появата на значителни вътрешни напрежения или пукнатини в самата отливка.

Мерки за преодоляване на тези недостатъци

За да се отстранят част от посочените недостатъци и по-специално високата цена и краткия живот на кокилната форма, в практиката се прилагат мерки за удължаване на техния експлоатационен живот, като:

1. Нанасяне на работни покрития (Облицовка и обмазка)

Покритията са основната преграда, която предпазва металната форма от директния топлинен шок на стопилката:

- *Облицовка:* Нанася се върху повърхност, нагрята до 120 - 200 °C. Тя създава изолационен слой, който намалява температурния градиент в стените на кокилата, предпазвайки ги от микропукнатини.
- *Обмазка:* Нанася се при работна температура 300 - 350 °C. Тя действа като смазка, която предотвратява „заваряването“ на метала към формата и улеснява изваждането на детайла, намалявайки механичното износване.

2. Управление на термичния цикъл

Правилният температурен режим е критичен за избягване на термичната умора:

- *Предварително подгряване* (150-350 °C): Намалява разликата в температурите при първото заливане, което е най-честата причина за преждевременно напукване на формата.
- *Контролирано охлаждане:* При прегряване над 450 °C се прилага външно обдухване с въздух или водна мъгла. Стабилизирането на температурата предотвратява пластичните деформации на кокилата.

3. Правилна експлоатация и почистване

- *Технологични паузи:* Оставянето на 2-5 минути между заливанията позволява на топлината да се разпредели равномерно в обема на формата.
- *Почистване:* Използването на меки инструменти за отстраняване на нагара предпазва работната кухня от надраскване, което би развалило точността на следващите отливки.

Въпреки съществените си предимства, кокилното леене е ограничено от гравитационния характер на запълването на формата. При отливки със сложна конфигурация, тънки стени или повишени изисквания към точността и плътността, действието на собственото тегло на метала често се оказва недостатъчно за осигуряване на пълно и равномерно запълване на работната кухня.

Това налага използването на технологични методи, при които движението на стопения метал се осъществява под въздействието на външни сили. При тези процеси се създава контролирано налягане, което осигурява по-висока скорост на запълване, подобрени условия за формиране на структурата и възможност за получаване на отливки с висока точност и сложна геометрия.

Най-характерният представител на тази група е леенето под налягане, при което стопеният метал се въвежда в метална форма с помощта на външно налягане. Благодарение на това се постигат значително по-добри технологични и експлоатационни показатели в сравнение с гравитационните методи.

3.2.6. Леене под налягане

Леенето под налягане е технологичен метод за получаване на отливки, при който стопеният метал се въвежда принудително в постоянна метална форма, наречена пресформа, под действие на външно налягане. За разлика от кокилното леене, при което запълването на формата се осъществява под въздействието на гравитацията, при този процес движението на стопилката се осигурява чрез нагнетателна система. Характерна особеност на метода е, че налягането се поддържа не само по време на запълването на кухнята, но и през значителна част от периода на кристализация, което води до уплътняване на структурата и минимизиране на порьозността.

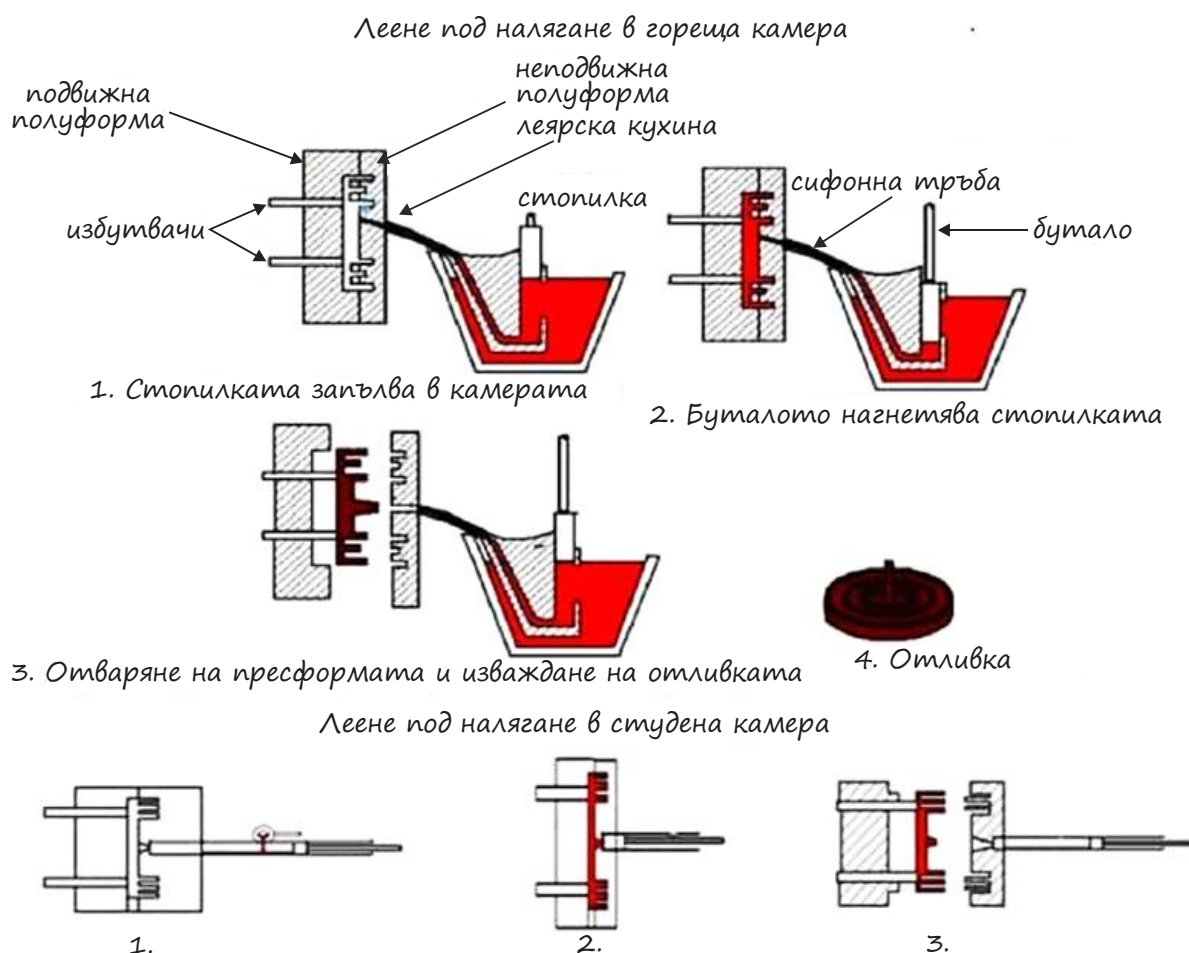
Благодарение на принудителното нагнетяване на метала процесът позволява получаването на отливки с много висока точност на размерите, малка грапавост на повърхността, тънки стени и сложна геометрия. Поради тези предимства леенето под налягане е един от най-широко използваните методи за масово производство на прецизни метални детайли.

Методът се прилага основно за цветни сплави - предимно алуминиеви, магнезиеви, цинкови и медни, като по-рядко се използва и за малогабаритни отливки от черни метали при специализирани технологични условия.

Общият технологичен процес при лееето под налягане включва следните основни операции:

1. *Подготовка на пресформата* - почистване, нанасяне на разделителни покрития и подгряване до работна температура;
2. *Затваряне и фиксиране на формата* - осигуряване на необходимата затваряща сила;
3. *Дозирание и нагнетяване на стопилката* - въвеждане на течния метал в пресоващата камера и впръскване в кухината под налягане;
4. *Поддържане на налягането при кристализация* - компенсиране на свиването и уплътняване на структурата;
5. *Охлаждане и втвърдяване*;
6. *Отваряне на пресформата и изваждане на отливката*;
7. *Отстраняване на леяковата система и довършителна обработка*.

Общата схема на процеса е представена на фиг. 3.23.



Фиг. 3.23. Общ технологичен процес на лееене под налягане на машина с гореща и студена камера (Thorat, 2026)

Съществената технологична особеност на лееенето под налягане е фазата на допресоване, при която налягането се поддържа активно по време на втвърдяването на метала. Това води до:

- компенсиране на обемното свиване при кристализация;
- елиминиране или силно намаляване на свиваемостната поръзност;

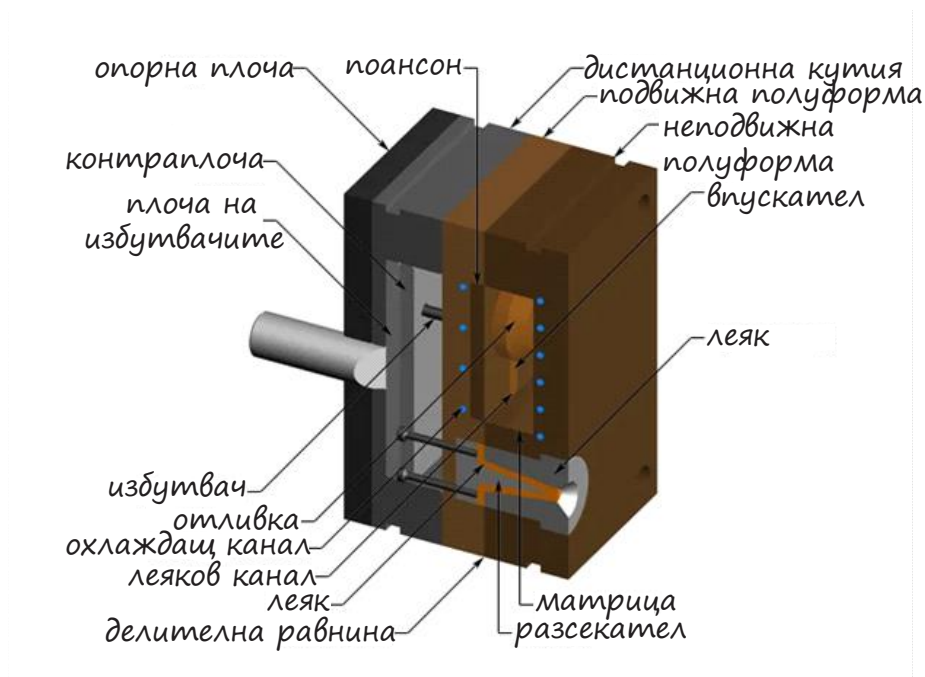
- повишаване на плътността на структурата;
- подобряване на механичните свойства на отливката;
- точно възпроизвеждане на геометрията на пресформата.

Поради високите скорости на нагнетяване, значителните налягания и интензивното термично натоварване, използваната пресформа представлява сложен високотехнологичен инструмент, включващ:

- оформяща кухня с висока геометрична точност;
- система за разпределение на метала;
- охлаждащи канали;
- вентилационни канали за отвеждане на въздуха;
- механизъм за избутване на отливката;
- подвижни вложки и плъзгачи при сложни геометрии.

Материалите за изработка на пресформите са високоякостни инструментални стомани с повишена топлоустойчивост и устойчивост на термична умора.

Основните конструктивни елементи на пресформа за лееие под налягане са показани на фиг. 3.24.



Фиг. 3.24. Основни конструктивни елементи на пресформа за лееие под налягане

Конструктивните особености на пресформата и начинът, по който стопеният метал се подава и нагнетява в нейната кухня, определят разнообразието от използваните машини за лееие под налягане. В зависимост от конструкцията на механизма за нагнетяване, нивото на работното налягане, разположението на камерата за пресоване и начина на затваряне на формата са разработени различни типове машини, предназначени за конкретни производствени условия. Поради това

машините за леење под налягане се класифицират по няколко основни признака.

1. Според температурата на пресоващата камера

Машини с гореща камера

При машините с гореща камера нагнетателният механизъм е постоянно потопен в стопилката. Металът постъпва в пресоващата система директно от вградения тигел и се нагнетява в пресформата чрез бутало.

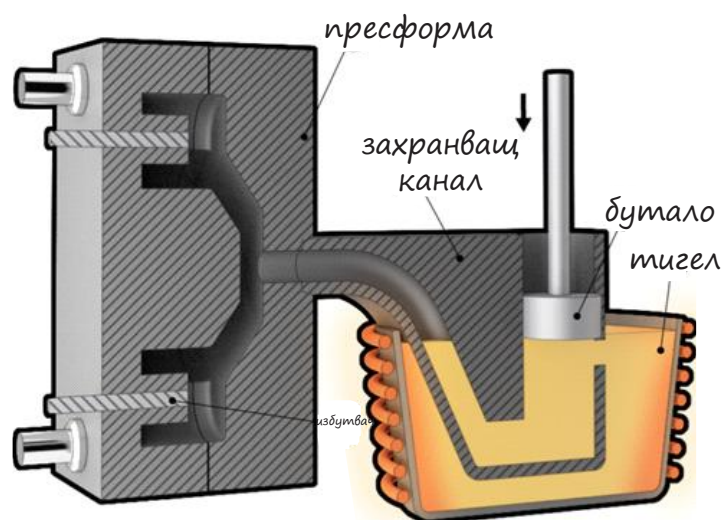
Тази конструкция осигурява:

- кратък работен цикъл;
- висока производителност;
- добра повтораемост на процеса.

Поради непрекъснатия контакт на нагнетателните елементи с течния метал, тези машини се използват само за сплави с ниска температура на топене, като:

- цинкови сплави;
- оловни сплави;
- калайни сплави.

Принципната схема на машина с гореща камера е представена на фиг. 3.25.



Фиг. 3.25. Машина с гореща камера (Manufacturing Guide, n.d.)

Машини със студена камера

При машините със студена камера стопеният метал се дозира в пресоващата камера непосредствено преди всеки работен цикъл. След това бутало нагнетява метала в кухината на пресформата.

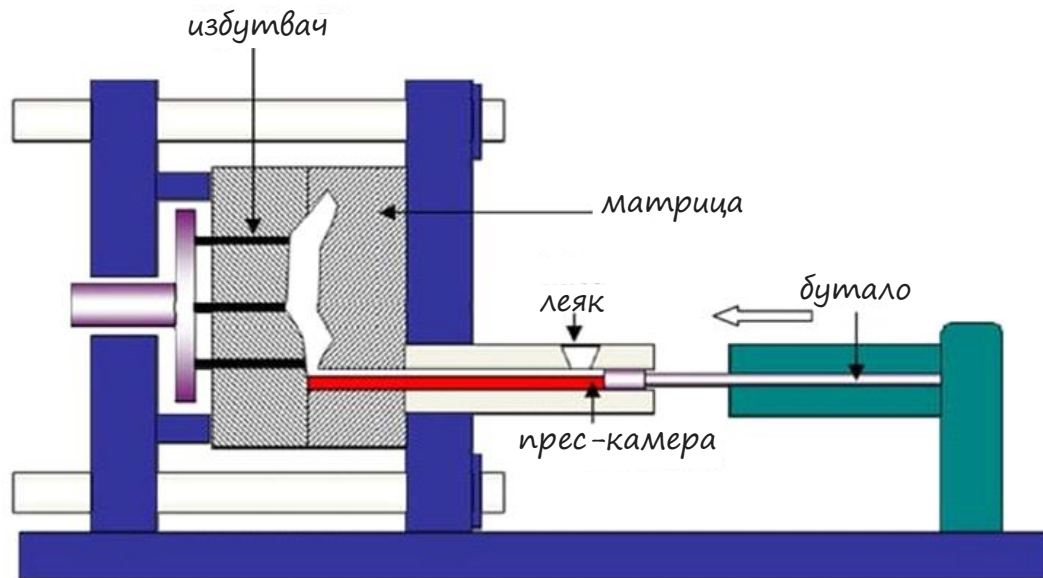
Тази конструкция позволява обработване на сплави с по-висока температура на топене, при които потапянето на нагнетателната система в стопилката би довело до бързо износване.

Машините със студена камера се използват основно за:

- алуминиеви сплави;
- магнезиеви сплави;

- медни сплави.

Принципът на работа на машина със студена камера е показан на фиг. 3.26.



фиг. 3.26. Принципна схема на машина със студена камера (Al-Helal, 2013)

2. Според начина на налягане

- *Бутални*: Налягането се създава от механично бутало. Това е стандартът за високо налягане.
- *Компресорни (Газодинамични)*: Налягането се създава от сгъстен въздух или инертен газ върху повърхността на метала (типично за леене под ниско налягане).

3. Според работното налягане

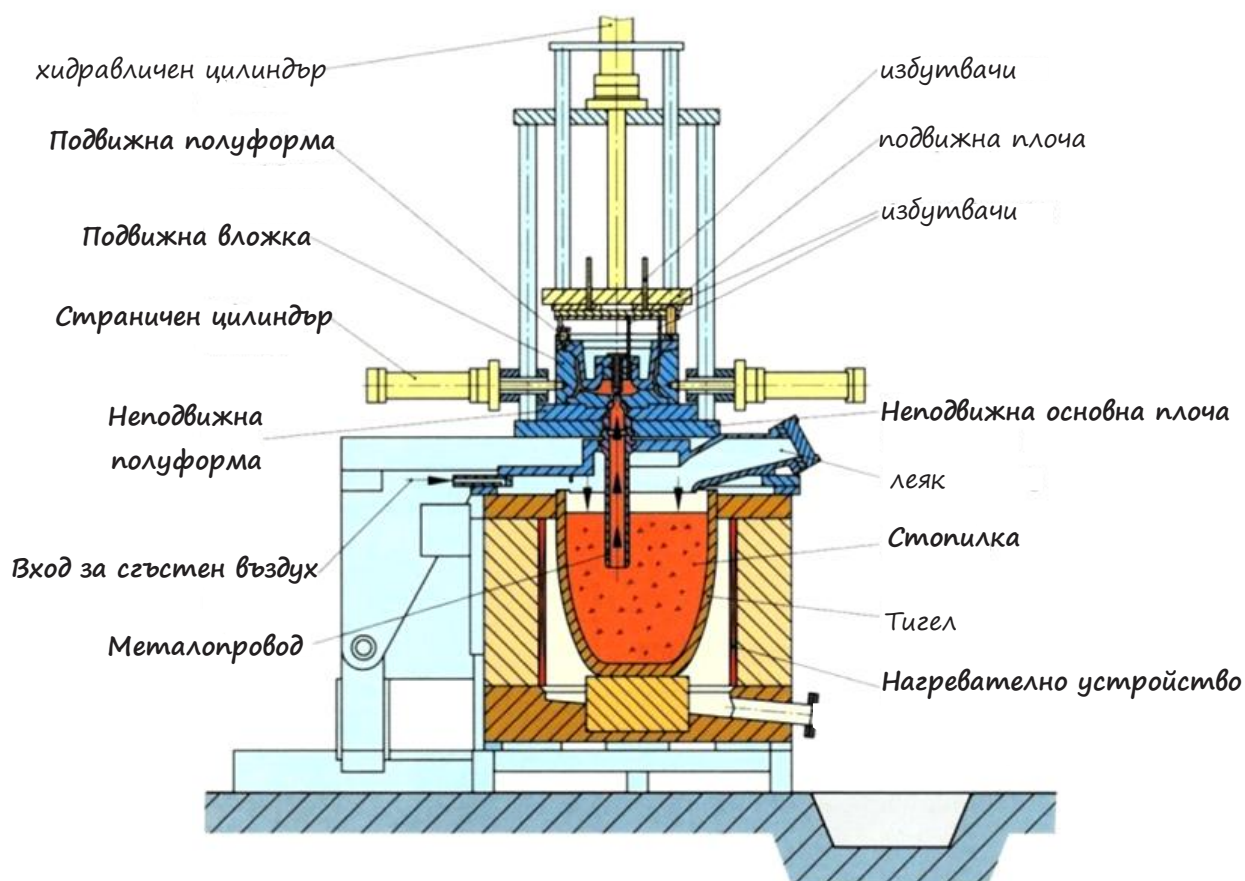
- *Под високо налягане*: От 100 до над 1500 bar. Използва се за тънки стени и висока производителност.
- *Под ниско налягане*: От 0.1 до 2 bar (фиг. 3.27). Осигурява много високо качество и плътност на метала.

4. Според разположението на пресоващата система

- *Хоризонтални*: Най-масовите машини, лесни за обслужване и автоматизация.
- *Вертикални*: Използват се за детайли с централно леене или при необходимост от вакуумиране.

5. Според механизма за затваряне на формата

- *Лостови (Коленни)*: Използват лостов механизъм за сигурно механично заключване. Икономични и бързи.
- *Хидравлични*: Силата на притискане се генерира изцяло от хидравличен цилиндър. По-гъвкави при настройка.
- *Хибридни*: Комбинират бързината на лостовата система с прецизността на хидравликата.



фиг. 3.27. Машина за леење под ниско налягане (Giesserei Lexikon, n.d.)

6. Според средата в камерата

- *Обикновени:* Леене в нормална среда.
- *Вакуумни:* От камерата и формата се изсмуква въздухът преди впръскване, за да се избегнат газови шупли.

Леенето под налягане се характеризира със следните основни технологични параметри:

- скорост на нагнетяване: 0,5-120 m/s;
- работно налягане: 10-150 MPa;
- време за запълване: 0,01-0,2 s;
- температура на пресформата: 150-300 °C.

Високата скорост на запълване позволява получаване на:

- тънкостенни детайли с дебелина до 0,5-1,5 mm;
- сложни пространствени форми;
- детайли с висока повторяемост на размерите.

Основните *предимства* на метода са:

- Много висока производителност - кратък работен цикъл и възможност за пълна автоматизация;
- Висока точност на размерите - тесни допуски и стабилна повторяемост;

- Отлично качество на повърхността - ниска грапавост и минимална нужда от механична обработка;
- Възможност за тънкостенни и сложни детайли;
- Добра плътност на структурата вследствие на допресоването;
- Икономичност при големи серии.

Наред с предимствата методът има и редица *ограничения*:

- Висока стойност на оборудването и пресформите;
- Икономическа нецелесъобразност при малки серии;
- Ограничения в масата и размерите на отливките;
- Риск от газова поръзност при неподходящо вентилиране;
- Високи изисквания към качеството на стопилката и режима на процеса;
- Ограничена приложимост при сплави с много висока температура на топене.

3.2.6.1. Леене с противоналягане

Леенето с противоналягане (Low Pressure Counter Pressure Casting) представлява високотехнологичен метод за производство на отливки, при който запълването на кухина на формата и последващата кристализация протичат под действието на контролирана разлика в налягането. Методът представлява усъвършенствано развитие на класическото леене под ниско налягане и осигурява значително по-висока плътност, по-ниска поръзност и подобрени механични свойства на отливките. Процесът е разработен от акад. А. Балевски и проф. И. Димов.

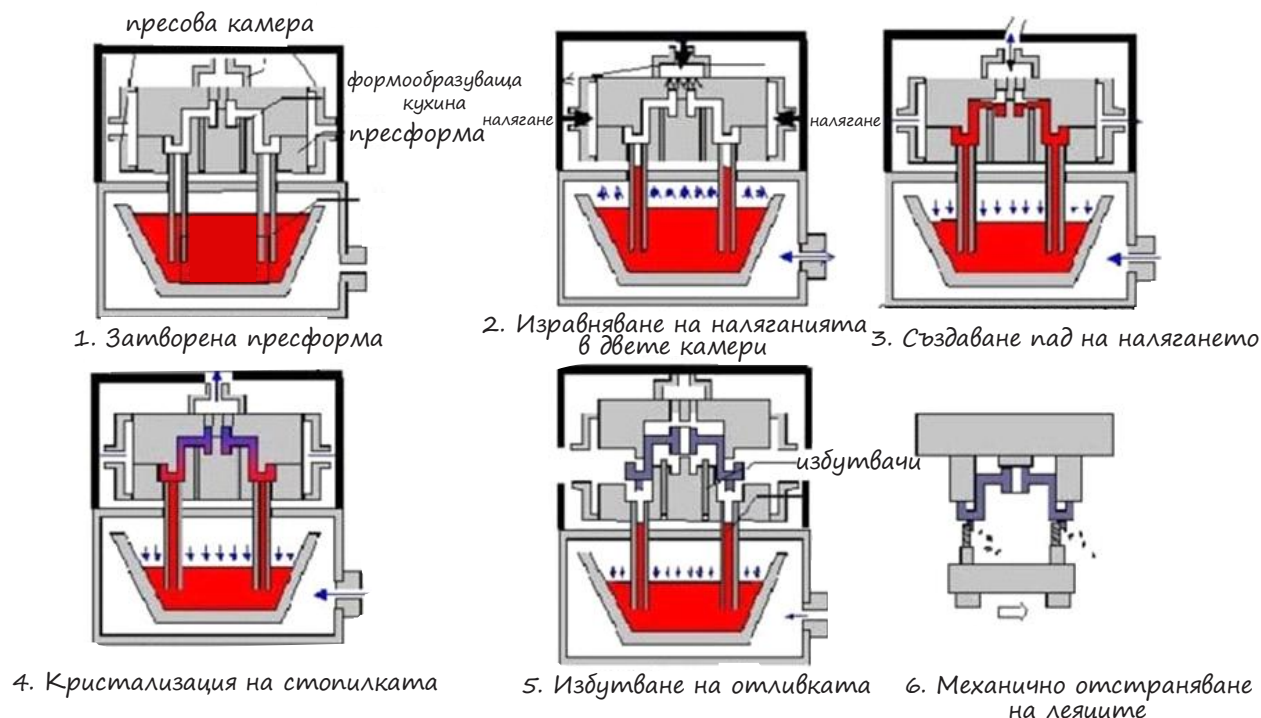
Машината за леене с противоналягане е съставена от две херметически изолирани камери:

1. Долна камера: В нея е разположена подгриващата пещ със стопилка.
2. Горна камера: В нея е монтирана пресформата.

Двете камери са свързани посредством леякова тръба, която в долния си край се намира във стопилката, а горният - към леяковия отвор на пресформата.

Технологичният процес протича в три основни етапа. Първоначално в двете камери едновременно се подава сгъстен газ (обикновено въздух или азот) до достигане на еднакво работно налягане p_1 , при което нивото на метала в леяковата тръба остава непроменено. След това чрез прецизна клападна система налягането в горната камера се понижава до стойност p_2 , в резултат на което възниква разлика в наляганията $\Delta p = p_1 - p_2$, която изтласква стопения метал нагоре по леяковата тръба и осигурява плавно запълване на формната кухина. След окончателното запълване в системата се поддържа високо абсолютно налягане (обикновено над 6 bar), което обезпечава непрекъснато хранване на отливката по време на кристализацията и практически елиминира образуването на газови шупли и микропоръзност.

Описаните етапи от технологичният процес на леене с противоналягане са посочени на фиг. 3.28.



Фиг. 3.28. Леене с противоналягане (Ruff et al., 2001)

Леенето с противоналягане се характеризира с редица съществени технологични предимства. Поддържането на високо налягане по време на втвърдяването практически предотвратява образуването на газови пори, вследствие на което се получават отливки с минимална порьозност и висока структурна плътност. Интензивният топлообмен между стопилката и формата благоприятства формирането на финозърнеста микроструктура, което води до повишени механични свойства в сравнение с отливките, получени чрез гравитационно леене. Допълнително предимство е високият рандеман на процеса - поради липсата на масивни леякови системи и мъртви глави коефициентът на използване на метала обикновено достига 80–95 %. Управляемото ламинарно запълване на кухината практически елиминира турбулентността и значително намалява окисляването на метала по време на процеса.

Благодарение на тези особености методът намира приложение при производството на високонадеждни конструктивни отливки, подложени на значителни динамични натоварвания и строги изисквания за газоплътност. Типични приложения са детайли за авиационната индустрия, елементи от автомобилното окачване (носачи, шенкели), както и отговорни компоненти за енергетиката.

3.2.6.2. Течно шамповане

Течно шамповане е хибриден производствен процес, който съчетава елементи от леенето под налягане и коването. При него разтопеният метал се втвърдява под въздействието на високо механично налягане, което води до получаване на детайли с изключително висока плътност и отлични

механични показатели.

При течното щамповане се използват постоянни метални форми, проектирани като прес-форми (с матрици и поансони). Поради комбинираното действие на високи термични напрежения и значителни специфични налягания (от 50 до 150 МПа), изискванията към материала на инструмента са критични. Инструментът се изработва от инструментални стомани, като най-често се използват марките X40CrMoV5-1 или X37CrMoV5-1. Металната форма се състои от матрица (неподвижна част), поансон (подвижна част, предаваща налягането) и избутвачи. За разлика от лееето в кокили, тук хлабините между подвижните части са минимални, за да се предотврати образуването на „мустаци“ (облой) под действие на налягането. Задължително е предварителното нагриване на прес-формата до 200–300 °С. Това намалява температурния градиент и предотвратява преждевременното втвърдяване на стопилката, като по този начин се осигурява достатъчна пластичност на метала по време на формообразуването.

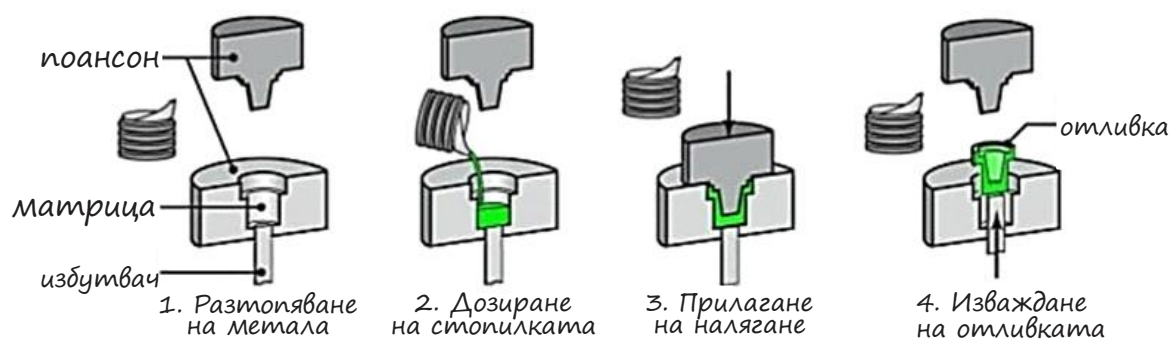
Отливките, получени чрез течно щамповане, се изработват предимно от цветни метали и техните сплави, тъй като те имат по-ниска температура на топене, което щади металните матрици и удължава живота им.

Процесът обикновено се извършва на хидравлична преса и включва следните стъпки:

1. Дозиране: Разтопеният метал се излива в предварително загрята долна половина на формата (матрица).
2. Затваряне и притискане: Горната половина на формата (поансон) се спуска и притиска метала, запълвайки кухината под високо налягане.
3. Втвърдяване под налягане: Налягането се поддържа, докато металът се втвърди напълно. Това предотвратява образуването на шупли.
4. Изваждане: Формата се отваря и готовият детайл се избутва.

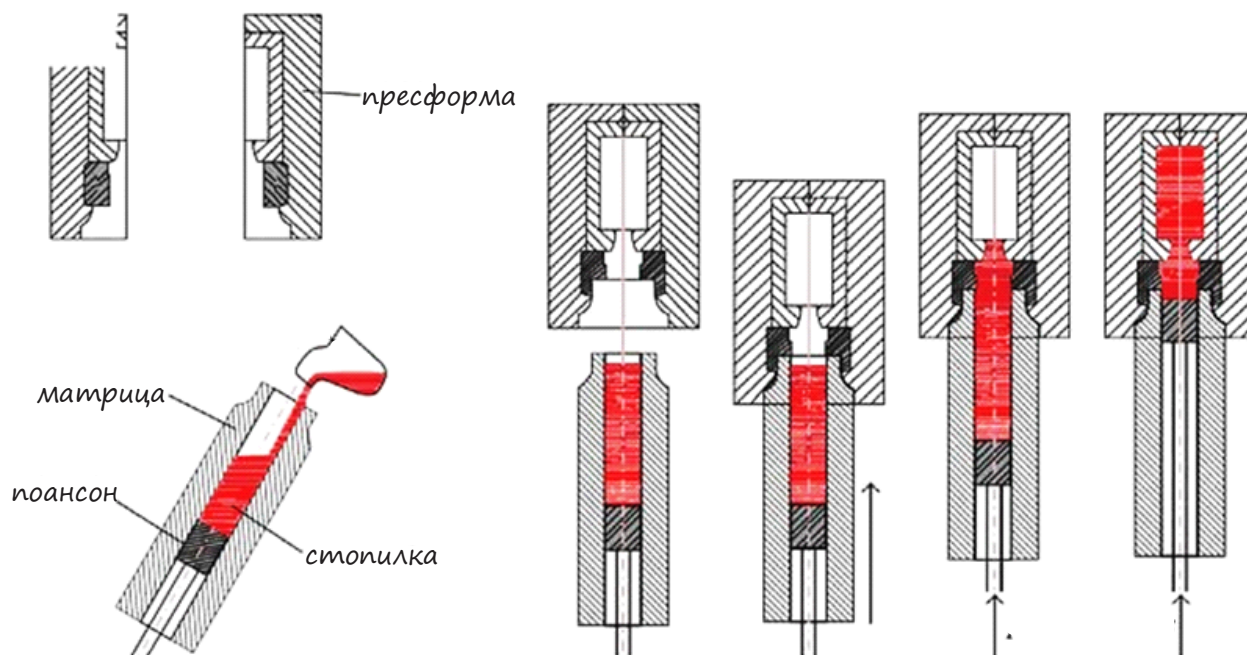
В зависимост от начина на прилагане на налягането течното щамповане (squeeze casting) се разделя на два основни вида: директно и индиректно.

При директното течно щамповане (Direct Squeeze Casting) (фиг. 3.29). Разтопеният метал се излива директно в отворената кухина на матрицата. След това поансонът притиска метала директно, докато той кристализира.



фиг. 3.29. Директно течно щамповане (Thorat, 2026)

Индиректно течно щамповане (Indirect Squeeze Casting) (фиг. 3.30)
 Методът е близък по същност до лееенето под налягане, но с ключови подобрения. Металът не се излива директно в кухината, а се впръсква в нея чрез бутало през леякова система. Скоростта на впръскване е много ниска (около 0,5 m/s), за да се избегне завихряне на въздух.



Фиг. 3.30. Индиректно течно щамповане (Wu et al., 2020)

В таблица 3.7 е направено сравнение между двата процеса, като са посочени техните особености, предимства и недостатъци и материали на отливките.

Таблица 3.7. Сравнение между директно и индиректно течно щамповане

Характеристика	Директно течно щамповане	Индиректно течно щамповане
Прилика процесите	коване	лееене под налягане
Сложност на детайла	Подходящо за прости и масивни форми	Позволява сложни форми с тънки стени
Предимства	Максимална плътност; липса на загуби от леяци; много високо качество на структурата.	Възможност за сложна геометрия; висока производителност; добра повърхностна гладкост.
Недостатъци	Ограничена сложност на детайла; трудно се автоматизира за големи серии.	По-висок разход на материал (за леяци); по-голямо износване на впръскващата система.
Материали	Алуминиеви и магнезиеви сплави; композити с метална матрица.	Алуминиеви, магнезиеви, цинкови и медни сплави (месинг, бронз).

Течното щамповане е метод, който запълва технологичната ниша между лееенето и коването. Неговата същност се състои в контролираната

кристализация под високо статично налягане, което води до следните крайни резултати:

- Елиминиране на дефектите: Налягането напълно компенсира обемното свиване, премахвайки поръзността и шуплите.
- Високи експлоатационни свойства: Получената структура е хомогенна и финозърнеста, което позволява последваща термична обработка (закаляване), невъзможна при обикновеното леене под налягане.
- Икономическа ефективност: Високият коефициент на използване на метала (особено при директния метод) и намалената механична обработка правят процеса предпочитан за високоотговорни детайли в автомобилостроенето и аеронавтиката.

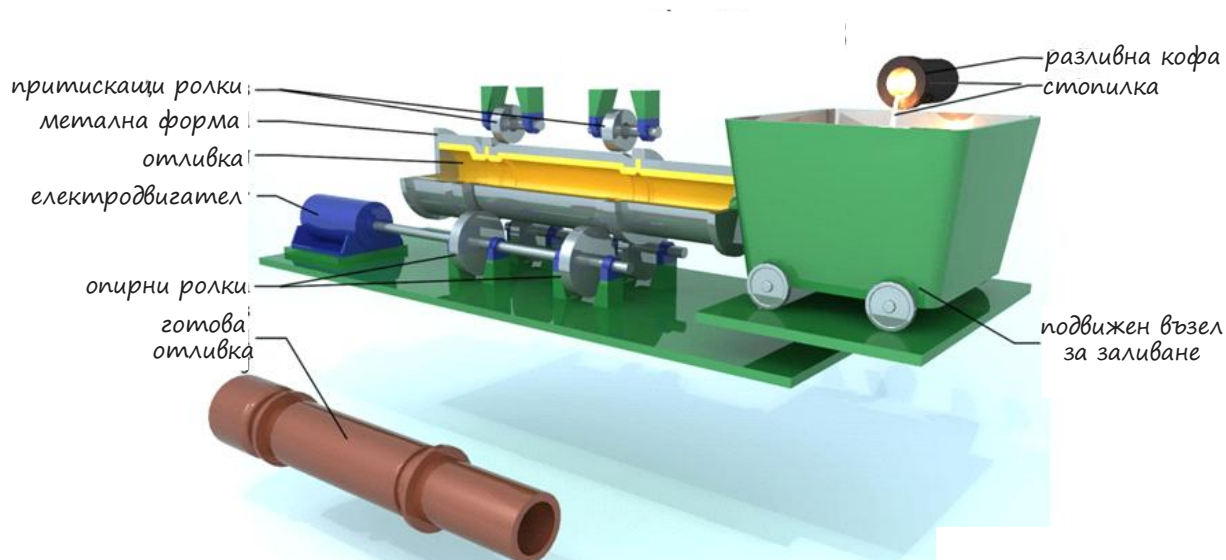
3.2.7. Центробежно леене

Центробежното леене е технологичен метод за получаване на отливки, при който запълването на работната кухня и формирането на конфигурацията им се извършват под действие на центробежни сили, породени от въртенето на металната форма. Основен параметър е гравитационният коефициент (K_g), който дефинира съотношението между центробежното и земното ускорение.

Методът осигурява висока плътност на метала и хомогенна финозърнеста структура, лишена от газови шупли и дефекти от свиване. Благодарение на насочената кристализация, протичаща от стената на формата към свободната повърхност, се постигат високи механични показатели. При кухите ротационни отливки (тръби, втулки) вътрешните повърхнини се оформят свободно, което елиминира нуждата от леярски сърца.

Процесът (фиг. 3.31) се реализира чрез следната строго дефинирана последователност от *технологични операции*:

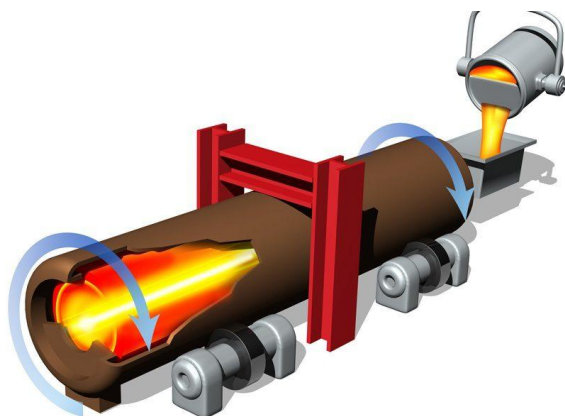
- *Подготовка на металната форма*: Извършва се почистване, динамично балансиране и подгряване до 200-300 °C. Този топлинен режим предотвратява термичния шок и гарантира необходимата тънколивкост на стопилката. Върху работната повърхност се нанася огнеупорна обмазка, която предпазва формата от ерозия и регулира скоростта на топлоотнемане.
- *Дозиране и въвеждане на стопилката*: Металът се подава в работната кухня на въртящата се форма чрез заливен улей или фуния. Дозирането определя дебелината на стената на отливката и се осъществява тегловно (по маса), обемно или чрез контролиране на времето за заливане.
- *Оформяне и рафиниране*: Под действие на високото центробежно налягане стопилката се уплътнява, като по-леките неметални включения, газове и оксиди ликвидират към свободната вътрешна повърхност. Това гарантира, че сечението на стената остава чисто и хомогенно.



Фиг. 3.31. Технологичен процес за получаване на отливки

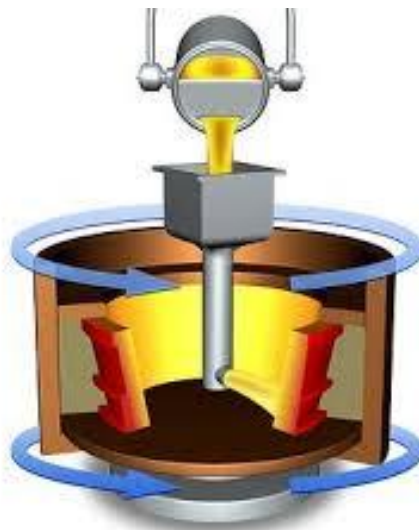
Геометричната точност и профилът на вътрешната повърхнина на отливката се определят от ориентацията на оста на въртене. В зависимост от нейното положение в пространството се различават следните технологични схеми:

- *Центробежно леене с хоризонтална ос* (фиг. 3.32): Прилага се за кухи отливки с голяма дължина (тръби, цилиндрични вложки). Високата периферна скорост генерира центробежно налягане, което компенсира влиянието на гравитацията и осигурява равностенност на отливката по целия периметър.



Фиг. 3.32. Центробежно леене с хоризонтална ос на въртене (Olsen, 2020)

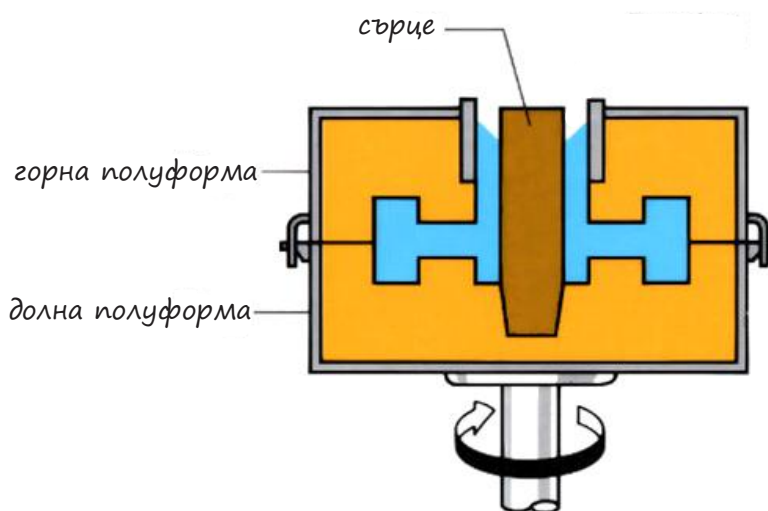
- *Центробежно леене с вертикална ос* (фиг.3.33): Използва се за отливки с голям диаметър и малка височина (пръстени, фланци). Свободната повърхност на стопилката приема формата на ротационен параболоид, което обуславя технологична конусност на вътрешния отвор.
- *Центробежно леене с наклонена ос*: Специфична модификация с ориентация на оста обикновено под ъгъл $15-30^\circ$. Прилага се за оптимизиране на хидродинамиката на пълнене при отливки с променливо сечение.



Фиг. 3.33. Центробежно лееие с вертикална ос на въртене

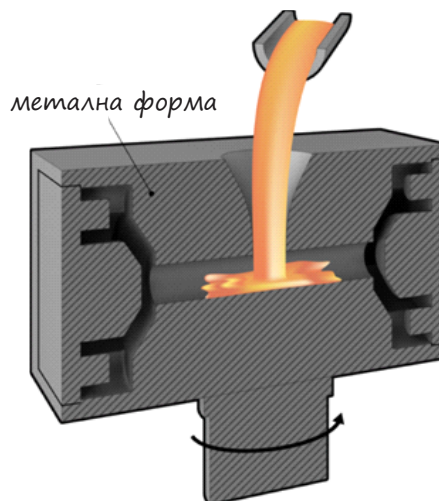
Освен пространствената ориентация на оста на въртене, определящ фактор за конфигурацията на отливката е разположението на работната кухина спрямо нея, въз основа на което се дефинират следните методи:

- *Същинско центробежно лееие* (True Centrifugal): Оста на отливката съвпада с оста на въртене, а вътрешната повърхнина се формира свободно под действие на центробежните сили без използване на леярски сърца.
- *Полуцентробежно лееие* (Semi-Centrifugal): Използва се за плътни ротационно-симетрични отливки (колела, дискове). Центробежната сила служи за повишаване на налягането при запълване на периферните зони и подобряване на захранването на отливката (фиг. 3.34).
- *Центрофугиране* (Centrifuge Casting): Работните кухини са разположени ексцентрично спрямо централния леяк. Центробежната сила генерира хидростатично налягане, което принудително запълва отдалечените от оста на въртене работни кухини през радиални леякови канали (фиг.3.35).



Фиг. 3.34. Полуцентробежно лееие (The Open University, n.d.)

Центробежното леење е приложимо за широк спектар от леярски сплави. Най-масово приложение методът намира при чугуните (тръби, цилиндрични вложки), стоманите (ролки, тръби за високо налягане) и медните сплави (бронзови и месингови втулки). Уникална възможност е производството на биметални отливки, получени чрез последователно изливане на различни стопилки, които образуват здрава металургична връзка.



Фиг. 2.35. Центруфугиране (Manufacturing Guide, n.d.)

В таблица 3.8 са посочени най-често произвежданите отливки, разпределени по материали и приложения.

Таблица 3.8. Геометрични параметри на отливките според материала и предназначението им

Тип отливка	Материал	Диаметър (външен), mm	Дължина, mm	Дебелина на стената, mm
Тръби (водопроводни)	Чугун Стомана	50 - 1 200	до 15 000	2,5 - 125
Втулки и лагери	Бронз Месинг	50 - 3 000	до 1 000	от 5 - 10
Индустриални ролки	Стомана Биметал	80 - 1 800	до 6 000	10 - 150
Пръстени и фланци	Неръждаема стомана	до 6 000	до 1 000	според нуждите
Вакуумни отливки	Суперсплави Титан	до 1 070	-	прецизни

3.2.8. Непрекъснато леење

Непрекъснатото леење е високопроизводителен метод за директно получаване на профилни отливки с постоянно напречно сечение. Технологиата позволява преобразуването на стопилката в отливка с неограничена дължина в постоянен режим на работа, което елиминира периодичността на производствения цикъл. Методът е основен за

производството на стоманени сляби, блюми и заготовки, както и на пръти, тръби и профили от цветни метали и техните сплави.

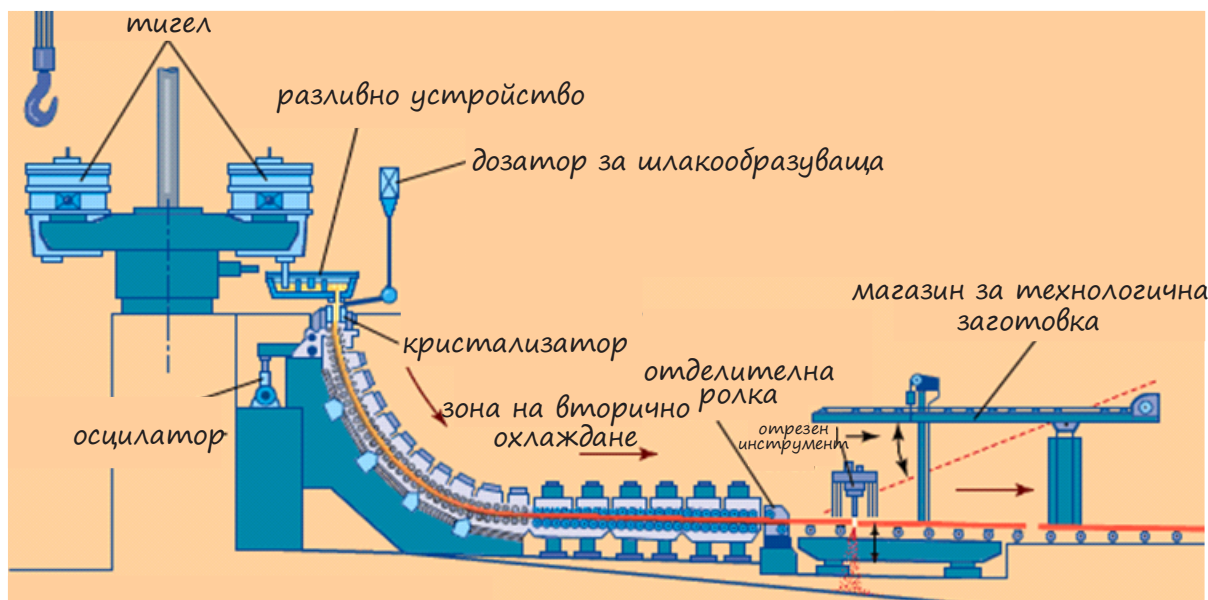
Основната конструктивна особеност на машината за непрекъснато леене, определяща същността на метода, е използването на проходен *кристализатор*. За разлика от периодичните методи за леене, тук работната кухина не е затворена, което позволява постоянното преминаване на метала през нея.

Кристализаторът представлява интензивно водно охлаждаема метална форма (обикновено медна), в която се извършва първичната кристализация. Неговата специфична роля е да отнеме количество топлина от повърхностния слой на стопилката, достатъчно за образуването на втвърдена периферна кора.

За подобряване на повърхностното качество на отливката, върху свободната повърхност на течната стомана в кристализатора се добавят шлакообразуващи смеси. Те изпълняват три критични функции: предпазват течния метал от вторично окисление, осигуряват топлоизолация на огледалото и служат като технологично смазващо вещество, което намалява триенето между втвърдяващата се кора и работните стени на кристализатора.

Процесът на получаване на непрекъснатата отливка се осъществява чрез следната технологична последователност (фиг. 3.36):

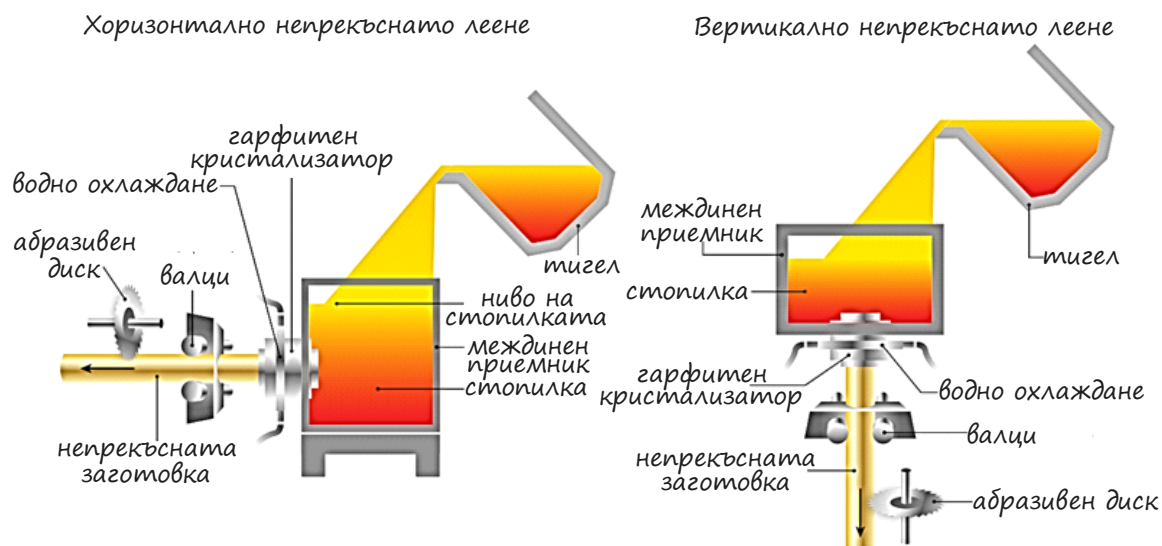
- *Захранване и металургична подготовка*: Стопилката се излива от леярската кофа в междинното разливно устройство. То осигурява постоянен дебит на стопилка към кристализатора и поддържа стабилен металостатичен напор, което гарантира технологичната непрекъснатост на процеса при смяна на захранващите кофи.
- *Първична кристализация*: Протича в кристализатора, където вследствие на интензивното контактно охлаждане се образува втвърдената кора на отливката. За предотвратяване на адхезията на кората към работните стени на инструмента, кристализаторът извършва възвратно-постъпателни движения.
- *Вторична кристализация*: Извършва се в зоната след кристализатора. Там чрез директно впръскване на охладител (водна струя или водовъздушна смес) се постига окончателното втвърдяване на цялото сечение на профила.
- *Изтегляне и изправяне*: Ролкова система изтегля непрекъснатата заготовка по зададена траектория, докато тя премине в хоризонтално положение. В началото на процеса се използва технологична заготовка(заглавка), която временно херметизира проходното сечение на кристализатора и извлича първата порция втвърден метал.
- *Разделяне*: В края на технологичната линия непрекъснатата нишка се нарязва на заготовки с определена дължина чрез газопламъчно рязане или механични ножици.



Фиг. 3.36. Технологичен процес за непрекъснато леење (Encyclopedia Britannica, n.d.)

В зависимост от ориентацията на технологичната линия и траекторията на отливката, агрегатите биват:

- **Вертикални:** Целият процес протича по вертикална ос. Осигуряват висока чистота на метала, но изискват голяма строителна височина (фиг. 3.37).
- **Радиални и криволинейни:** Отливката се деформира по дъга, което позволява хоризонталното ѝ извеждане. Това са най-разпространените промишлени машини (фиг. 3.36).
- **Хоризонтални:** Технологичният тракт е разположен хоризонтално, което е подходящо за леење на цветни метали и заготовки с малки сечения (фиг. 3.37).



Фиг. 3.37. Хоризонтално и вертикално непрекъснато леење

Технологичните предимства на непрекъснатото леење се определят преди всичко от високия рандеман, който достига до 98% поради отсъствието на леякови системи и дефекти от свиване. Методът осигурява получаването на хомогенна финозърнеста структура с минимална ликвация в сечението на отливката, като същевременно позволява пълна автоматизация и директна технологична връзка с валцови станове. Основните ограничения пред прилагането на технологията са свързани с високата първоначална инвестиция и сложността на системите за терморегулиране, което определя икономическата ѝ приложимост предимно при масово производство на профили с постоянно напречно сечение.

СЪВРЕМЕННИ ТЕНДЕНЦИИ В ЛЕЯРСКОТО ПРОИЗВОДСТВО

Съвременното леярско производство преживява значителна трансформация, която се определя от интеграцията на цифрови технологии, автоматизация и устойчиви производствени практики. Основните фактори за развитие включват икономическия натиск за оптимизация на разходите, екологичните изисквания за минимално въздействие върху околната среда, напредъка в материалознанието и нарастващите пазарни очаквания за бързо прототипиране и къси срокове за производство. В резултат на тези фактори модерното леярство се ориентира към повишаване на точността, качеството и производителността на процесите, без да се компрометира устойчивостта.

4.1. Основни направления в развитието на модерното леярство

За да се представят ясно и компактно ключовите направления на развитие в модерното леярство, може да се използва следната обобщаваща блок схема:



Фиг. 4.1. Основни тенденции и взаимовръзки в съвременното леярско производство

Фиг. 4.1 представя основните направления на развитие на съвременното леярство, които обхващат автоматизацията и роботизацията, цифровизацията и симулационните технологии, адитивното производство, развитието на нови материали, усъвършенстването на технологичните процеси и контрола на качеството, повишаването на енергийната ефективност и екологичната устойчивост, както и внедряването на интелигентни технологии.

4.2. Технологично развитие на леярското производство

Напредъкът в леярството се определя от синергията между пазарната динамика и иновациите в микроструктурния дизайн, оптимизирането на фазовия състав и екологичната устойчивост на материалите. Икономическите изисквания насочват производителите към оптимизация на конструкциите и намаляване на теглото на отливките, което води до икономия на метал и енергия. Екологичните фактори стимулират внедряването на „зелени“ технологии, като използване на безопасни свързващи вещества в формовъчните смеси и пълна регенерация на леярския пясък. В областта на материалознанието се наблюдава навлизане на нови композитни сплави и специални чугуни, които по здравина и якост се доближават до стоманата. Пазарните изисквания изискват бързо прототипиране, което намалява времето от проектната документация до готовата отливка и ускорява технологичните цикли.

Ключовите тенденции в технологичното развитие включват компютърно моделиране и симулация, адитивни технологии, автоматизация и роботизация на производствените линии, както и усъвършенстване на прецизните методи на леење, като леење под налягане и леење по стопяеми модели. Тези подходи позволяват минимизиране на дефектите, повишаване на ефективността и съкращаване на времето за производство (Campbell, 2015; Ravi, 2005).

Комплексното прилагане на тези технологии поставя основите на концепцията Foundry 4.0, при която производствените процеси са взаимосвързани, цифрово управлявани и оптимизирани в реално време.

4.3. Автоматизация и роботизация на леярските процеси

Автоматизацията трансформира традиционното леярство от трудоемък и опасен занаят в високотехнологично производство. Специализирани формовъчни линии, заливащи устройства и системи за почистване заменят ръчния труд, като гарантират еднакво качество и стабилност на процеса. Пример за това са безкасовите линии DISAMATIC, които позволяват производство на стотици форми на час с висока точност и минимално участие на човека. Роботите поемат задачи, свързани с манипулиране на горещи детайли, нанасяне на защитни покрития, прецизно шлайфане и контрол на качеството чрез интегрирани 3D скенери и рентгенови апарати. Внедряването на автоматизация води до значително увеличение на производителността, намаляване на брака, повишаване на безопасността и оптимизация на ресурсите (DISA, 2026; Лиу, 2025).

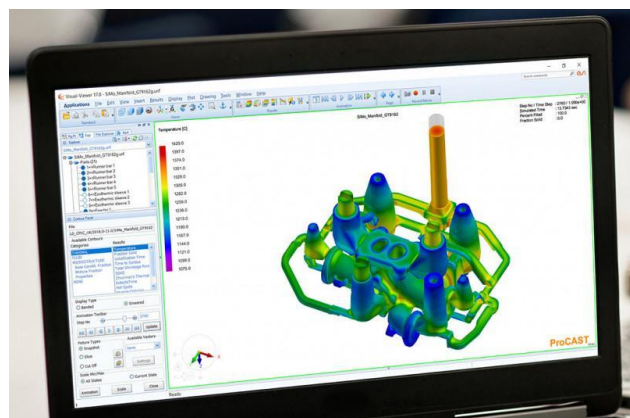
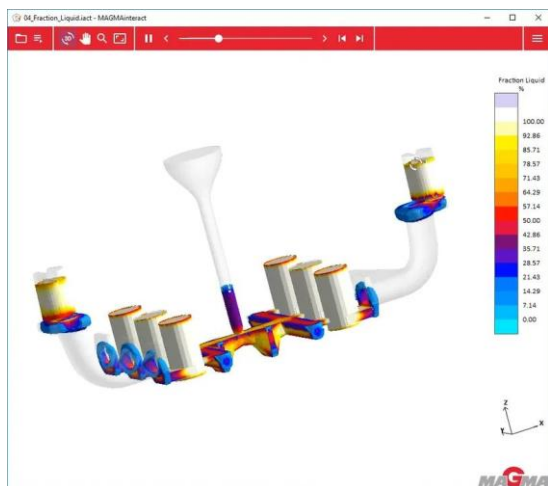
На фиг. 4.2 е представен пример за автоматизация и роботизация на леярски процеси.



Фиг. 4.2. Пример за автоматизация и роботизация на лярски процеси (KUKA Roboter GmbH, 2003)

4.4. Цифровизация и компютърно интегрирано производство

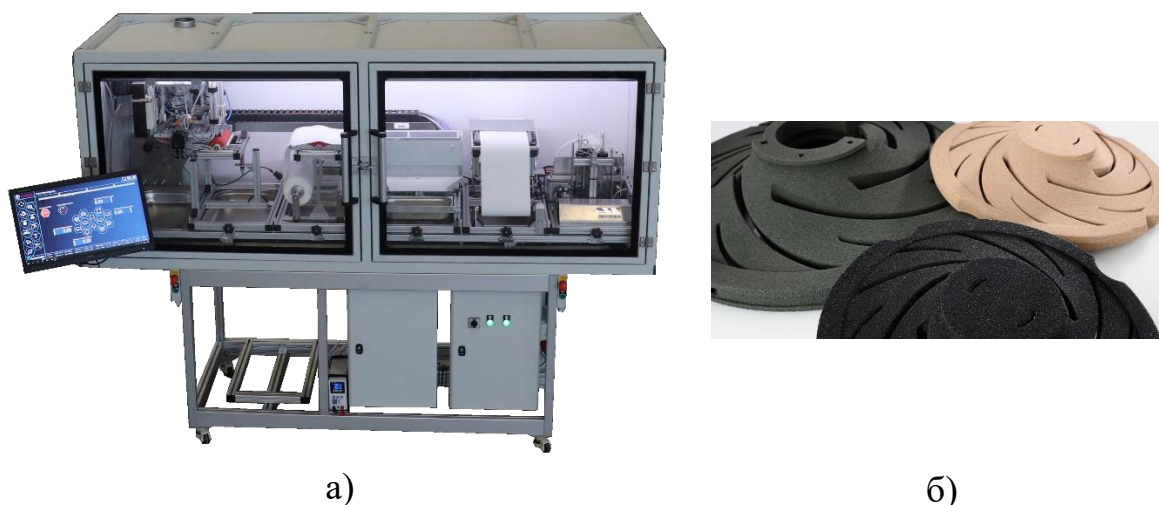
Дигиталната трансформация в лярството премахва традиционния метод „проба и грешка“ и въвежда прецизни математически изчисления и виртуално проектиране. CAD/CAM/CAE системите (фиг. 4.3) позволяват създаване на триизмерни модели на отливките, проектиране на ляркови системи и симулация на запълване и кристализация. Системите за цифров мониторинг и „цифрови близнаци“ осигуряват реалновремени контрол на технологичните параметри и позволяват прогнозно управление на процесите, което минимизира риска от дефекти и намалява разхода на суровини.



Фиг. 4.3. Компютърна симулация на запълването и кристализацията на отливка чрез CAD/CAE технологии (MAGMA GmbH, 2026)

4.5. Адитивни технологии

Адитивните технологии, включително 3D принтиране на модели, пясъчни форми и сърца, променят класическите подходи в лееството. Те позволяват изработване на сложни геометрии, които са технологично невъзможни чрез традиционно формоване, интегриране на сърца в конструкцията и бързо прототипиране. Адитивните методи намират приложение и при дребносериенно производство, ремонт на резервни части и изработка на индивидуализирани изделия в медицината и арт индустрията. Ограниченията включват размер на работната камера, повърхностна грапавост и разход на консумативи, но предимствата в гъвкавост и време за производство значително надвишават тези ограничения (Инженеринг ревю, n.d.; Europages, 2026; Alloy Casting Industries, 2026).



Фиг. 4.4. Адитивни технологии при лееене: а) 3D принтер (ExOne, 2026); б) модели (Fraunhofer IGCV, 2026)

4.6. Съвременни материали и консумативи

Развитието на формовъчните и сърцевите смеси е насочено към повишаване на точността, намаляване на дефектите и минимизиране на екологичното въздействие. Използват се синтетични пясъци, хромитни и циркониеви добавки, екологично чисти свързващи вещества и високоефективни покрития. Новите материали позволяват получаване на отливки с минимална нужда от последващо почистване и създават по-безопасна и устойчива работна среда (Foseco, 2026; Quaker City Castings, n.d.).

4.7. Усъвършенстване на методите и повишаване качеството

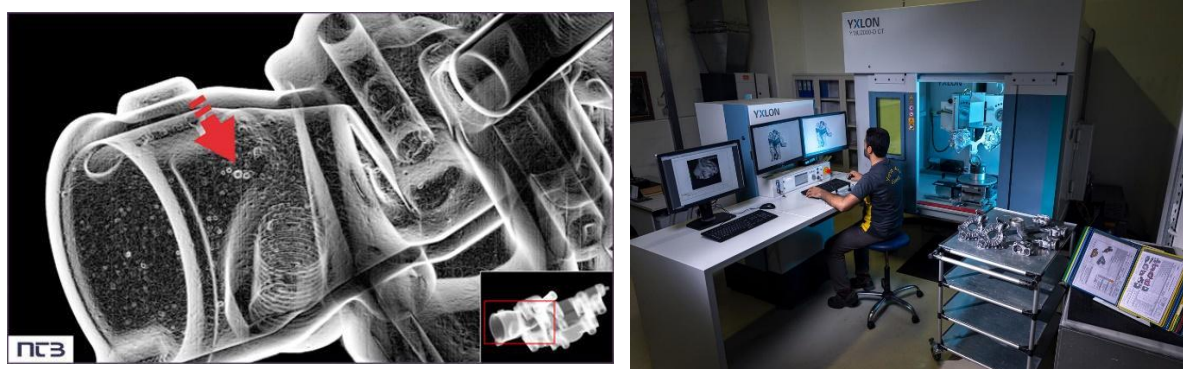
Съвременните методи за лееене се модернизират чрез хибридни подходи, вакуумно лееене, Giga-casting и контролирано налягане върху стопилката. Това позволява производството на тънкостенни и сложнопрофилни отливки с минимални механични операции. Технологии като инвестиционно лееене и лазерно сканиране осигуряват висока размерна

точност и повърхностен финиш, сравними с резултатите от механична обработка (Daye Motors, 2024; Метал Престо, n.d.).

4.8. Контрол и осигуряване на качеството

Контролът на качеството се интегрира в целия производствен процес и включва безразрушаващи методи като рентгенова дефектоскопия, ултразвуков контрол, магнитно-прахов метод и спектрален анализ. Мониторингът на технологичните параметри в реално време чрез SCADA системи и използването на статистически методи за управление на процесите гарантират ранно откриване и корекция на отклоненията. Тези подходи водят до значително намаляване на дефектите и осигуряват надеждност в критични отрасли като авиацията и енергетиката (UTI, 2023; WH Labs, 2026; American Metal Testing, n.d.).

Фиг. 4.6 представлява пример за осъществяване на рентгенов контрол на отливки.



Фиг. 4.6. Рентгенов контрол на отливка за откриване на вътрешни дефекти (NTB XRAY, 2026, Çelikel Alüminyum, 2026)

4.9. Енергийна ефективност и екология

Модерното леярство се стреми към нисковъглеродно производство и оптимизация на ресурсите. Това включва модернизация на пещите, използване на системи за оползотворяване на отпадната топлина и смарт мониторинг на консумацията на енергия. Ограничаването на емисиите, безопасните свързващи вещества и регенерацията на материали са основни стратегии за устойчиво производство. Рециклирането на пясък и метален скрап, както и използването на шлаката в строителството, са примери за прилагане на кръгова икономика (Xian Huan-Tai Technology, 2023).

На фиг. 4.7 е показан пример за затворен цикъл на повторно използване на материалите в леярското производство.



Фиг. 4.7. Кръгова икономика в съвременното леярско производство

4.10. Перспективи и бъдещи направления

Бъдещето на сектора е в автоматизираните леярни, където всеки процес е дигитално проследим и оптимизиран от интелигентни системи. Изкуственият интелект позволява прогнозен анализ, адаптивно управление и машинно зрение, а хибридните технологии и безвъглеродното топене осигуряват устойчиво и високо автоматизирано производство. Разработват се формовъчни материали с възможност за самовъзстановяване, които в бъдеще се очаква да подобрят надеждността на формите, да намалят вероятността от дефекти и да повишат качеството на отливките.

ЛИТЕРАТУРА

СТАНДАРТИ

БДС 423-85 „Пясък кварцов за леярското производство. Технически изисквания“

БДС EN 10213. Стоманени отливки за съдове под налягане.

БДС EN 10283. Корозионноустойчиви стоманени отливки.

БДС EN 1559. Леярство. Технически условия за доставка.

БДС EN 1561. Леярство. Сив чугун.

БДС EN ISO 1101. Геометрични спецификации на продукти (GPS). Геометрични допуски. Допуски на формата, посоката, разположението и биенето.

БДС EN ISO 8062. Геометрични спецификации на продукти (GPS). Допуски на размерите и геометричните допуски и надбавки за механична обработка на отливки.

БДС EN ISO 8062-3. Геометрични спецификации на продукти (GPS). Допуски на размерите и геометричните допуски и надбавки за механична обработка на отливки. Част 3: Общи допуски на размерите, геометрични допуски и надбавки за механична обработка на отливки.

ЛИТЕРАТУРА НА КИРИЛИЦА

АЛИПИЕВ, Д. (n.d.). *Вакуумно формоване (V-process in brief)*. [online] Casting Area. Available at: <https://www.castingarea.com/education/v/v-process.htm>.

АЛИПИЕВ, Д. (n.d.). *Леене в кокили (Gravity Die Casting in brief)*. [online] CastingArea. Available at: <https://www.castingarea.com/education/gdc/gdc.htm>.

Амуджев, И., М. Атанасова. *Планиране на разполагането на производството*. Габрово: Екс-прес, 2019. ISBN 9789544906467.

Ангелов, Г. *Технология на леярското производство*. София: Техника, 1988.

Видове заготовки. *Машиностроителни технологии: Електронно помагало* [онлайн]. Достъпно на: kitnk.org.

Григорьев, В. М. *Разработка технологии изготовления отливки: Учеб. пособие*. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2004. 67 с.

Димитрович, А. М. *Справочник литейщика*. Минск: Вышэйшая школа, 1988.

Евдокимова, О. П., С. Б. Скобелев. *Проектирование и производство заготовок*. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. ISBN 978-5-8149-1621-1.

ИНЖЕНЕРИНГ РЕВЮ (n.d.). *Индустриални технологии и оборудване* (Е-книга). [online] TLL Media. Available at: engineering-review.bg .

Клаев, Л. *Технология на машиностроителните материали*. София: Техника, 1987.

Классификация способов получения заготовок. StudFile: Файловый архив студентов [онлайн]. 17.03.2015. Достъпно на: <https://studfile.net/preview/2152556/page:6/>

КЛИМЕНКОВ, С. С. *Проектирование и производство заготовок*. Витебск: УО „ВГТУ“, 2004. 385 с. ISBN 985-6655-96-X.

Ковачев, Т. *Технология на изработване на заготовки: Ръководство за лабораторни упражнения*. Габрово: Унив. изд. „Васил Априлов“, 2009. ISBN: 978-954-683-418-8

Круглов, Е. П., Э. Р. Галимов, А. Г. Аблясова и др. *Выбор и способы изготовления заготовок для деталей машиностроения*. Учебник. 2015.

ЛИУ, Д. (2025). *Как да подобрим степенята на автоматизация на лелярските машини?*. [онлайн] Кингдао Бестех Машини Со., ООД. Достъпен на: <https://bg.bestech-foundry.com/blog/how-to-improve-the-automation-degree-of-foundry-machinery-156074.html>.

Максимов, Й. Т., В. П. Дунчев, В. П. Тодоров. *Металознание и термична обработка*. Ч. 1, Металознание. Габрово: Унив. изд. „Васил Априлов“, 2024. 200 с. ISBN 978-954-683-695-3.

МЕТАЛ ПРЕСТО (n.d.). *Технология на леене*. [online] Достъпен на: <https://metal-presto.com/%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F/> .

Савов, Г. Глава 8. *Прахова металургия*. Casting Area [онлайн]. Достъпно на: <https://www.castingarea.com/education/nt/tm09.htm> .

Технически университет - София, катедра МТТ. *Кристализация на металите* [онлайн]. Достъпно на: <http://machinery.kitnk.org/page5.html>. За подробности посетете сайта на катедра МТТ.

Шаркова, С. *Технология на лелярското производство*. Габрово: Унив. изд. „Васил Априлов“, 1994.

ЛИТЕРАТУРА НА ЛАТИНИЦА

AL-HELAL, K. (2013). *New Approaches to Casting Hypereutectic Al-Si Alloys to Achieve Simultaneous Refinement of Primary Silicon and Modification of Eutectic Silicon*. [Thesis/Research Paper]. Available at: doi.org.

ALLOY CASTING INDUSTRIES (2026). *The 3D Printing Revolution in Sand Casting: Transforming the Foundry Industry*. [online] Available at: <https://www.alloycasting.com/resources/insights/3d-printing-revolution-in-sand-castings> .

AMERICAN METAL TESTING (n.d.). *NDT 101: The Basics of Non-Destructive Testing*. [online] Available at: <https://www.americanmetaltesting.com/resources/ndt-101>

Bernal, J. A. *Solidification of Metal. Engineering Cheat Sheet* [online]. 2023. Available at: engineeringcheatsheet.com.

Bernal, J. A. *Solidification of Metal. Engineering Cheat Sheet* [online]. 2023. Available at: engineeringcheatsheet.com .

ÇELIKEL ALÜMİNYUM. *Corporate, High Tech Production* [онлайн]. Istanbul: Çelikel, ©2026. Достъпен на: celikel.com

DAYE MOTORS (2024). *5 Иновативни технологии за леење под налягане, които променят производството*. [online] Достъпен на: <https://www.dayemotors.com/bg/blog/5-innovative-die-casting-technologies-reshaping-manufacturing> .

DISA (2026). *DISAMATIC C-Line – a reliable and affordable way of producing castings*. [online] Norican Group. Available at: <https://www.disagroup.com/foundry-products/moulding-solutions/disamatic/disamatic-c-lines/> .

DoITPoMS. Dendritic Growth. *Solidification of Alloys* [online]. University of Cambridge, 2004-2026. Available at: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/solidification_alloys/dendritic.php .

DOLIN CASTING (2024). *Aluminum Gravity Die Casting*. [online] Available at: dolincasting.com.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA (n.d.). *Slab caster (continuous casting)*. [image] Available at: [britannica.com](https://www.britannica.com).

EngineeringTechnology.org. *Sand Casting Procedure. Casting Processes* [online]. 2026. Available at: <https://engineeringtechnology.org/manufacturing/casting-processes/sand-casting/sand-casting-procedure/> .

EPS INDUSTRIES (2014). *The EPS Lost Wax Investment Casting Process*. [online] Available at: <https://www.epsind.com/lost-wax-investment-casting-process/> .

EUROPAGES (2026). *Доставчици и производители на форми за леење*. [online] Достъпен на: <https://www.europages.bg/bg/showroom-cate/%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B8%20%D0%B7%D0%B0%20%D0%BB%D0%B5%D0%B5%D0%BD%D0%B5-615232> .

EXONE. *Sand Mold Casting Applications: Case Studies* [онлайн]. North Huntingdon: The ExOne Company, ©2026. Достъпен на: <https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/Sand-Mold-Casting-Applications>

FOSECO (2026). *Chemical Bonded Sand Casting*. [online] Vesuvius. Available at: <https://www.foseco.com/en/casting-processes/chemical-bonded-sand-casting>.

FOSECO. (2000). *Ferrous Foundryman's Handbook* (11th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075064284-2/50010-7>

FRAUNHOFER IGCV. *3D sand printing* [онлайн]. Augsburg: Fraunhofer Institute for Casting, Composite and Processing Technology IGCV, ©2026. Достъпен на: <https://www.igcv.fraunhofer.de/en/research/competences/3D-sand-printing.html>

GIESSEREI LEXIKON (n.d.). *Low pressure gravity die casting process*. [online] Available at: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/low-pressure-gravity-die-casting-process-4419/> .

GIESSEREI LEXIKON (n.d.). *Stripping plate*. [online] Available at: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/stripping-plate-4585/> .

IMPRO PRECISION (2020). *Investment Casting Waxes: Different Wax Types*. [online] Available at: <https://www.improprecision.com/investment-casting-waxes-different-wax-types/> .

IndiaMART. *Match Plate Pattern - Match Plate Foundry Pattern Latest Price, Manufacturers & Suppliers* [онлайн]. Достъпен на: indiamart.com

INTRADEFAIRS (2026). *Sand casting*. [online] Available at: <https://intradefairs.com/sand-casting> .

KEWEI (2025). *Steps of Investment Casting*. [online] Available at: <https://www.kwcasting.com/steps-of-investment-casting/>

KUKA ROBOTER GMBH. *Automation of foundry with robot* [онлайн]. Wikimedia Commons, 2003. Достъпен на: [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org)

Li, J., X. Xu, N. Ren et al. *A review on prediction of casting defects in steel ingots: from macrosegregation to multi-defect model*. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, Vol. 29, pp. 1901–1914. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00848-7> .

Loy, P., C. B. P. Chiranth. *Solidification, Phase Diagram & Steels* [online]. Module Two, SJEC, Mangaluru. Available at: <https://gateformme.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/08/chapter-4-solidification.pdf> .

M/S SHIVASAI ENGINEERS (2026). *Automatic Cold Box Core Shooter Machine*. [online] IndiaMART. Available at: indiamart.com.

MAGMA GmbH, "Simulation in Action: Casting Quality, Realizing Innovations, Reducing Costs," MAGMA Europe, References. [Онлайн].
Достъпно на:
<https://www.magmasoft.de/en/solutions/steel/reference/Simulation-in-Action-Casting-Quality-Realizing-Innovations-Reducing-Costs>.

MANUFACTURING GUIDE (n.d.). *Centrifugal form casting*. [online] Available at: <https://www.manufacturingguide.com/en/centrifugal-form-casting> [Accessed 10 May 2026].

MANUFACTURING GUIDE (n.d.). *Shell Molding*. [online] Available at: <https://www.manufacturingguide.com/en/shell-molding> .

MEM-103 Manufacturing Processes-I. Lesson 1: *Casting Process* [online]. Dayalbagh Educational Institute (DEI). Available at: <https://msvs-dei.vlabs.ac.in/mem103/Unit3lesson1.html> .

MINHE FOUNDRY (2025). *Plaster mold casting process, advantages & comparison*. [online] Available at: <https://www.nodularcastiron.com/blog/plaster-mold-casting/> .

MODUS ADVANCED. LEARNING CENTER: *Educational engineering and manufacturing content* [online]. 2026. Available at: <https://www.modusadvanced.com/resources> .

Mohanty, U. K., H. Sarangi. *Solidification of Metals and Alloys*. In: Z. Abdallah, N. Aldoumani (Eds.). *Casting Processes and Modelling of Metallic Materials*. London: IntechOpen, 2020. Available at: doi.org .

NTB XRAY. *Material Testing* [онлайн]. Garbsen: NTB Elektronische Geräte GmbH, ©2026. Достъпен на: ntbxray.com

OLSEN, D. (2020). *What is Centrifugal Casting and How Does It Work?*. [online] MetalTek International. Available at: <https://www.metaltek.com/blog/what-is-centrifugal-casting/> .

QUAKER CITY CASTINGS (n.d.). *Types of Sand for Sand Casting*. [online] Available at: <https://quakercitycastings.com/types-sand-sand-casting/> .

RUFF, G., PRUCHA, T., BARRY, J. and PATTERSON, D. (2001). *Pressure Counter Pressure Casting (PCPC) for Automotive Aluminum Structural Components*. [Technical Paper] SAE Technical Papers. Available at: doi.org .

Solidification at the scale of the ingot or the cast part. *The heart of crystalline materials* [online]. IMT Mines Albi-Carmaux, 2014. Available at: <https://nte.mines-albi.fr/SciMat/en/co/SM4uc3-5.htm> .

THE OPEN UNIVERSITY (n.d.). *Centrifugal casting*. [online] OpenLearn. Available at: open.edu .

THE OPEN UNIVERSITY (n.d.). *Full mould casting (evaporative pattern)*. [online] OpenLearn. Available at: open.edu.

THE OPEN UNIVERSITY (n.d.). *V-process (vacuum sealed moulding process)*. [online] OpenLearn. Available at: open.edu .

THORAT, S. (2026). *Die Casting – Types, Steps in Pressure die Casting Process*. [online] Learn Mechanical Engineering. Available at: <https://learnmech.com/die-casting-types-steps-pressure-die-casting-process/> .

THORAT, S. (2026). *Squeeze Casting Process – Advantages and Disadvantages*. [online] Learn Mechanical Engineering. Available at: <https://learnmech.com/squeeze-casting-process-advantages-disadvantages/> .

Tops Precision. *Optimizing Die Casting Mold: A Comprehensive Guide*. Blogs [online]. 09.04.2026. Available at: <https://topsbest-precision.com/blog/die-casting-mold/> .

UTI (2023). *What is Non-Destructive Testing (NDT)? Methods and Examples*. [online] Universal Technical Institute. Available at: <https://www.uti.edu/blog/ndt/what-is-non-destructive-testing> .

WH LABS (2026). *NDT Inspection & Non-Destructive Testing*. [online] Available at: <https://www.whlabs.com/ndt-inspection-non-destructive-testing> .

WU, G., WANG, C., SUN, M. and DING, W. (2020). *Recent developments and applications on high-performance cast magnesium rare-earth alloys*. [online] Journal of Magnesium and Alloys. Available at: doi.org .

XIAN HUAN-TAI TECHNOLOGY (2023). *Прецизност и иновации в леенето на метали*. [online] Достъпен на: <https://bg.almoldcasting.com/news/precision-and-innovation-in-metal-casting-71406318.html> .