

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

# **КРИСТАЛІЗАЦІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ У ВИЛИВКАХ**

**Методичні вказівки  
до лабораторних робіт**

**для студентів спеціальності  
136 «Металургія» денної та заочної форм навчання**

Затверджено  
на засіданні  
методичної ради  
Протокол № 1 від 21.09.2017

Краматорськ  
ДДМА  
2017

Кристалізація та властивості сталі у виливках : методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів спеціальності 136 «Металургія» денної та заочної форм навчання / уклад. О. Р. Абдулов. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – 39 с.

Методичні вказівки призначені для підготовки до лабораторних робіт з дисципліни «Кристалізація та властивості сталі у виливках». Містять загальні відомості, порядок виконання робіт і вимоги до оформлення звітів з лабораторних робіт для студентів спеціальності 136 «Металургія» денної та заочної форм навчання. Для перевірки знань з вивченого матеріалу наведені контрольні питання після кожної лабораторної роботи.

Укладач

О. Р. Абдулов, доц.

Відп. за випуск

М. А. Турчанін, проф.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
Лабораторна робота 1. Комп'ютерне моделювання процесу дослідження ливарних властивостей рідкої сталі .....	5
Лабораторна робота 2. Комп'ютерне моделювання процесу кристалізації рідкої сталі і побудова термічних кривих кристалізації ...	11
Лабораторна робота 3. Застосування сучасних CAD/CAE-систем для дослідження кінетики тверднення сталевих виливків .....	16
Лабораторна робота 4. Дослідження впливу конструкції ливникової системи на якість виливків .....	22
Лабораторна робота 5. Технологічні особливості виготовлення виливків зі спеціальних сталей .....	30
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	36
ДОДАТОК А. Варіанти завдань до лабораторної роботи 5 .....	37

## ВСТУП

Сталю називають сплав заліза з вуглецем до 2,14% і іншими елементами. У практиці зазвичай використовують сталі з вмістом вуглецю до 1,5 %.

На відміну від інших сплавів сталі мають високу міцність і пластичність, що обумовлює їх широке застосування в різних галузях промисловості. Щорічно в світі виробляється близько 6...7 млн т сталевих виливків, що становить ~ 9 % від загального випуску лиття. Особливо висока питома вага сталевих виливків у виробництві тракторів, дорожніх, транспортних, сільськогосподарських машин, в металургії, будівництві, теплоенергетиці. Багато виливки працюють в складних умовах спільної дії високих навантажень, низьких або високих температур, агресивних середовищ.

Широке використання сталевих виливків обумовлено рядом обставин, серед яких:

- порівняно рівномірна структура в різних перетинах литий деталі, що забезпечує ізотропність властивостей;

- високий рівень пластичних властивостей, що забезпечують експлуатацію литих виробів в широкому температурному інтервалі;

- хороша зварюваність, що дозволяє отримувати зварювально-литі вироби будь-якої складної форми і великої маси, а також проводити їх ремонт і відновлення;

- економічність і ефективність виготовлення складних за конструкцією виливків;

- широкі можливості автоматизації виготовлення виливків.

Для отримання високоякісних виливків необхідно знати особливості процесів структуроутворення литої сталі, вплив на них процесів плавки, легування, модифікування, термічної обробки, швидкості охолодження в формах і багатьох інших факторів. Вивчення цих процесів, як правило, здійснюється за допомогою діаграми стану системи Fe-Fe<sub>3</sub>C, а також більш складних діаграм.

Важливими в отриманні високоякісних виливків є ливарні властивості сталей – це їх основні технологічні характеристики. Під ливарні властивості розуміють певну сукупність фізичних, теплофізичних, фізико-хімічних властивостей і процесів, що виявляється на різних етапах отримання виливків і відчутно допомагає безпосередній вплив на їх якість.

Велику увагу приділено розгляду структури, властивостей і областей застосування виливків з вуглецевих і легованих сталей, а також процесам їх плавки і кристалізації виливків, ливарним властивостям, основам легування, мікролегування і модифікування, механізмам утворення різних дефектів у виливках і заходам щодо їх запобігання або усунення.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛИВАРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІДКОЇ СТАЛІ

**Мета роботи:** вивчити властивості рідких сталей; навчитися експериментальним шляхом визначати властивості рідких розплавів; вивчити вплив властивостей рідкої сталі на структуру в твердому стані.

### 1.1 Загальні відомості

Розплавлені метали і сплави складають групу металевих рідин. Міжчасткові зв'язки в них виникають переважно внаслідок взаємодії позитивних іонів з вільними електронами. Рідкі чисті метали відрізняються відносно простою будовою, проте їх композиції – сплави – в цьому відношенні виключно складні, що і визначає різноманітність їх властивостей. За своїми властивостями і будовою рідини набагато ближче стоять до твердих тіл, ніж до газів, особливо при температурах, близьких до температури кристалізації.

Абсолютна більшість реальних металевих рідин – це взаємні розчини та їх сплави багатьох елементів, інакше кажучи, багатокомпонентні системи. При їх вивченні особлива увага приділяється ступеню мікронеоднорідності, під якою слід розуміти відмінності в структурі ближнього порядку окремих мікрооб'ємів рідини.

Структура, склад і технологічні параметри рідких сплавів визначають і основні їх властивості: щільність, в'язкість, змочуваність, дифузійні і теплові процеси. Склад, властивості і, отже, якість металевих розплавів залежать від режимів плавки. Знання фізико-хімічних основ процесу плавки ливарних сплавів і вміння правильно визначити режими плавки дозволяють отримати розплав з необхідними властивостями. Щоб забезпечити високу якість виливки необхідне знання фізичних процесів, що відбуваються при заливці і заповненні форм розплавом. Гідравлічні процеси в ливарній формі залежать від властивостей, сплаву і форми. Правильність розрахунків всіх порожнин форми, швидкості заповнення їх розплавом залежить від точності вибору режимів роботи кожного елемента в системі каналів і параметрів фізики течії розплаву.

Фізико-хімічні процеси, що відбуваються на межі метал–форма визначають всі основні дефекти в виливках. Уміння управляти цими процесами, прогнозувати можливі види взаємодій дозволяє ливарник розробити комплекс заходів, що забезпечують отримання високоякісний литих виробів.

Для отримання якісного ливарного сплаву заданого хімічного складу з високим рівнем ливарних властивостей потрібно попереднє рішення багатьох питань. Для цього необхідно правильно вибрати потрібний агрегат,

який забезпечив би оптимальний режим плавки при достатній продуктивності. Слід попереджати можливі забруднення сплавів продуктами взаємодії з атмосферою, матеріалами футерування печі, флюсами. При необхідності важливо вибрати найбільш ефективний спосіб легування, рафінування, модифікування розплавів. Крім того, потрібно забезпечити умови, при яких втрати металу на випаровування, окислення, шлакоутворення були б мінімальними.

Від температури плавлення металу залежить спосіб його плавки, матеріал футеровки плавильної печі або тигля і ливарної форми. Значення щільності використовують в розрахунках маси розплаву або виливків за геометричними розмірами або їх об'єми, якщо відома маса. У техніці прийнято виділяти групу легких металів, які є основою конструкційних металевих матеріалів. До легких металів відносять ті, у яких щільність не перевищує  $5 \text{ г/см}^3$ , тобто в цю групу входять титан, алюміній, магній, берилій, літій. З підвищенням температури від кімнатної до температури плавлення щільність більшості металів зменшується на 3...5% внаслідок того, що перехід металу в рідкий стан супроводжується збільшенням об'єму. Виняток становлять гелій, вісмут, сурма, германій і кремній, які при плавленні зменшуються в об'ємі при відповідному підвищенні щільності розплаву.

В'язкість, або внутрішнє тертя, є внутрішній опір, який чиниться взаємному переміщенню суміжних шарів рідини, тому і визначати її можна тільки при русі розплаву.

У той час, як тверде тіло має властивість чинити опір самої деформації, рідина чинить опір збільшенню швидкості деформації. Це властивість рідини називається в'язкістю.

В'язкість  $\eta$  являє собою відношення дотичного напруження  $\tau$ , чинного між шарами речовини, що тече в напрямку його руху, до величини градієнта швидкості  $dv/dx$ , який перпендикулярний до потоку. Динамічна в'язкість дорівнює

$$\eta = \frac{\tau}{dv/dx}.$$

Допоміжною одиницею виміру є  $\text{Па}\cdot\text{с}$ :  $\text{Па}\cdot\text{с} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Вплив внутрішнього тертя на швидкість течії розплаву краще виражає кінематична в'язкість, що враховує щільність розплаву

$$\nu = \eta/\rho.$$

Допоміжною одиницею виміру є стокс:  $\text{СТ} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

В'язкість (при невеликих перегрівках понад ліквідусом) є структурно-чутливою властивістю, що активно реагує на особливості будови рідкого сплаву. Рідкі метали і сплави завжди містять велику кількість зважених включень. Кількість, форма, стан (рідке або тверде) і розподіл неметалевих включень впливають на в'язкість сплаву. Коли в рідкому металі утворюються тверді включення, його в'язкість істотно підвищується.

Визначення в'язкості рідких металів представляє великі труднощі внаслідок високої температури і великої реакційної здатності металевих розплавів. Для вимірювання в'язкості рідких металів і сплавів мають значення наступні методи: ротаційний і вібраційний, згасаючих крутильних коливань і падаючої кульки.

При заливці розплаву, як правило, в холодну форму, метал, протікаючи по каналах ливникової системи і порожнини форми, охолоджується, втрачає теплоту перегріву, тобто, почавши тверднути, його потік може зупинитися. При правильному виборі технологічних параметрів метал в момент закінчення заливання повинен бути рідким.

Різні сплави при порівнянних теплових і однакових гідравлічних властивостях мають різну здатність текти і заповнювати ливарну форму. Теоретично розрахувати процес заповнення форми та призначити режим заливки важко, хоча все ширше використовується тривимірне комп'ютерне моделювання, яке дозволяє з тим або іншим наближенням вирішувати завдання заповнення форми. Однак моделювання є процесом дорогим і трудомістким, крім того, важливе дотримання умови, щоб процеси, що відбуваються при моделюванні, відповідали реальним.

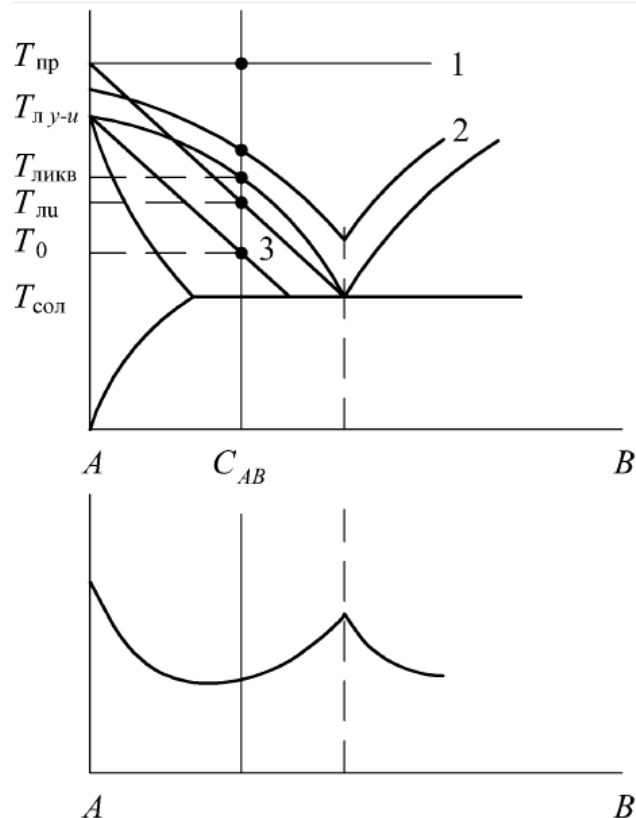
Рідкоплинність – здатність сплаву текти і заповнювати стандартну ливарну форму і відтворювати найтонші її обриси, а також забезпечувати гарне живлення виливків.

Якщо сплав має низьку рідкоплинність, то для великих тонкостінних виливків течення металу може припинитися раніше, ніж буде заповнена форма. У литві виникає дефект «недолив». Якщо при низькій рідкоплинності в формі утворюються зустрічні потоки, то вони можуть не злитися і утворюється дефект «неслітін», який порушує суцільність виливки. Якщо розміри цього дефекту невеликі, то він може бути вирубаний до чистого металу і заварений.

Розрізняють такі види рідкоплинності (рис. 1.1): практична, умовно-істинна, істинна і нульова.

Практична рідкоплинність визначається в умовах постійної температури заливки сплаву  $T_{\text{зал}}$  і, отже, неоднакового перегріву для всіх сплавів даної групи. Це зручна оцінка рідкоплинності, наприклад, в залежності від хімічного складу сплаву, коли температура в печі підтримується постійною.

Істинну рідкоплинність визначають в умовах однакового перегріву над температурою лінії нульової рідкоплинності. Нульова рідкоплинність настає при температурі, що лежить між ліквідусом і солідусом, при певній кількості твердої фази, коли сплав втрачає свою рухливість. Проте положення лінії істинної жидкотекучести важко знайти і оцінити рідкоплинність важко. Тому в умовах однакового перегріву сплавів над лінією ліквідусу визначають умовно-справжню рідкоплинність при однаковому перегріві їх вище температури ліквідусу.



*1 – практична; 2 – умовно-справжня; 3 – справжня*  
*Рисунок 1.1 – Рідкоплинність сплавів*

Для різних діаграм стану подвійних сплавів можна нанести лінії рідкоплинності і визначити залежність її від виду діаграми. На рис. 1.1 показано зв'язок рідкоплинності з діаграмою стану евтектичного типу. Найбільшу рідкоплинність мають евтектичні сплави, чисті метали і інтерметалічні сполуки, які кристалізуються при постійних температурах. По мірі збільшення інтервалу кристалізації рідкоплинність зменшується. Однак мінімальна рідкоплинність спостерігається не при концентрації граничної розчинності добавки в основі сплаву, де інтервал кристалізації досягає максимального значення; він відповідає точці перетину лінії нульової рідкоплинності з лінією евтектичної платформи. Різниця між рідкоплинністю в цих двох точках зазвичай невелика. Фактично на рідкоплинність вирішальний вплив оказує область, створена між лініями ліквідусу і нульової рідкоплинності. Максимальний інтервал температур в межах цієї області відповідає найвигіднішим умов накопичення твердих кристалів в потоці сплаву, які за найкоротший час утворюють досить міцну пробку для зупинки розплаву. І навпаки, в сплавах, в яких кристали утворюються тільки при певній температурі або у вузькому інтервалі, накопичення твердих частинок буде відбуватися повільно.

Рідкоплинність залежить від великої кількості факторів, які можна об'єднати в три основні групи:

– фактори, пов'язані з властивостями сплаву (в'язкість, поверхневий натяг, теплота і інтервал кристалізації, теплопровідність, теплоємність і ін.);



- фактори, пов'язані з властивостями ливарної форми (шорсткість стінок форми, теплопровідність, газопроникність і т. д.);
- фактори, що залежать від умов заповнення форми (металостатичний напір, надлишковий зовнішній тиск на розплав, перегрів розплаву, температура ливарної форми, конструкція ливникової системи і т. д.).

При зміні умов плавки металу, складу шихти, модифікаторів, при впровадженні нових або зміні складу відомих сплавів важливо оцінити відповідну зміну рідкоплинності металу і (при необхідності) компенсувати зниження її шляхом коригування технології виготовлення виливка (перегрів металу, конструкція ливникової системи, перетин живильників і т. д.).

Для вивчення рідкоплинності розплавів в основному застосовують спіральні проби. Моделі цієї проби і ливникової системи для неї повинні відповідати ГОСТ 16438–70. Спіральний канал має трапецієдальний переріз. Під заливку форму встановлюють строго горизонтально по рівню. У нижній півформі розташовують спіральні канали проби і металопримач, у верхній ливникову чашу і стояк.

Модель спіральної проби приведена на рис. 1.2, 1.3.

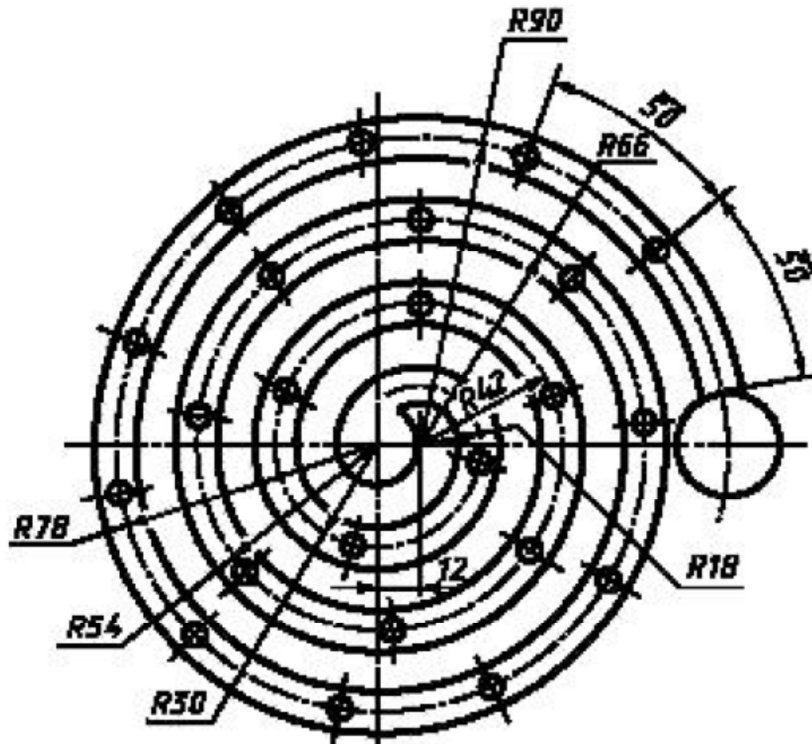
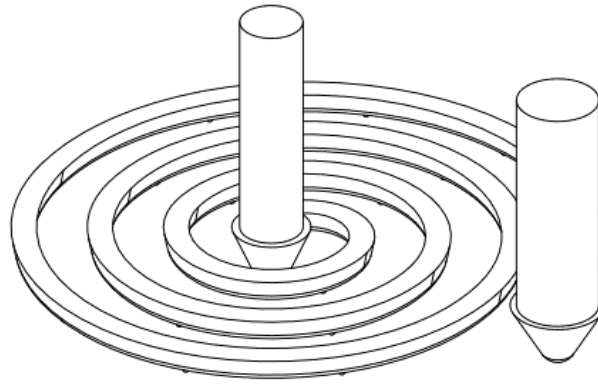


Рисунок 1.2 – Спіральна проба для дослідження рідкоплинності розплавів згідно з ГОСТ 16438–70



*Рисунок 1.3 – Об'ємна модель спіральної проби*

## **1.2 Порядок виконання роботи**

1. Для комп'ютерного моделювання експерименту по дослідженню рідкоплинності сталей скористатися наявними можливостями CAD/CAE-систем.

2. Створити 3D-модель спіральної проби згідно ГОСТ 16438-70 із застосуванням CAD-систем (КОМПАС-3D, SolidWorks і т. д.).

3. Підготувати дану модель для моделювання процесу заповнення проби рідкої сталлю. Для цього скористатися CAE-системою LVM Flow.

4. В якості матеріалу, що заливається в пробу вибрати сталі 35Л і 35ХМЛ. Процес моделювання виконати при температурах заливки 1550, 1570 і 1590 °С.

5. Проаналізувати отримані результати і зробити висновок про вплив  $T_{\text{зал}}$  на рідкоплинність розплавів.

6. У звіті повинні бути вказані назва та ціль роботи, наведені загальні та стислі теоретичні відомості і порядок виконання роботи. Звіт повинен містити результати моделювання рідкоплинності сталей 35Л і 35ХМЛ при трьох температурах. Представити отримані результати на одному графіку. Зробити висновок за результатами моделювання в програмі LVM Flow.

## **1.3 Контрольні питання**

1. Рідкий стан речовини.
2. Температура плавлення металів.
3. Щільність металів.
4. В'язкість рідких сплавів.
5. Поверхневий натяг.
6. Змочуваність і незмочуваність форми рідким металом.
7. Ливарні властивості рідких сплавів.
8. Методи визначення властивостей рідких сплавів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ РІДКОЇ СТАЛІ І ПОБУДОВА ТЕРМІЧНИХ КРИВИХ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

**Мета роботи:** вивчити основні принципи і особливості кристалізації ливарних сталей; навчитися будувати термічні криві кристалізації сталі.

### 2.1 Загальні відомості

Процес формування структури в реальних виливках залежить від багатьох факторів, які визначаються властивостями кожного конкретного сплаву, формою і конструкцією виливка. На тверднення впливають теплофізичні властивості сплаву і форми, температура заливання сплаву і форми перед заливанням, металоємність форми і середня товщина стінки виливка. Починається кристалізація завжди під стінками форми по гетерогенному типу. Величина структурних зон в литті, від якої залежать експлуатаційні властивості готової литий деталі, залежить від технологічних процесів з регулювання кристалізаційних процесів.

Після випуску металу з печі в ківш при температурі  $t_k$  протягом часу  $\tau_k$  метал витримується і охолоджується в ковші (рис. 2.1, а).

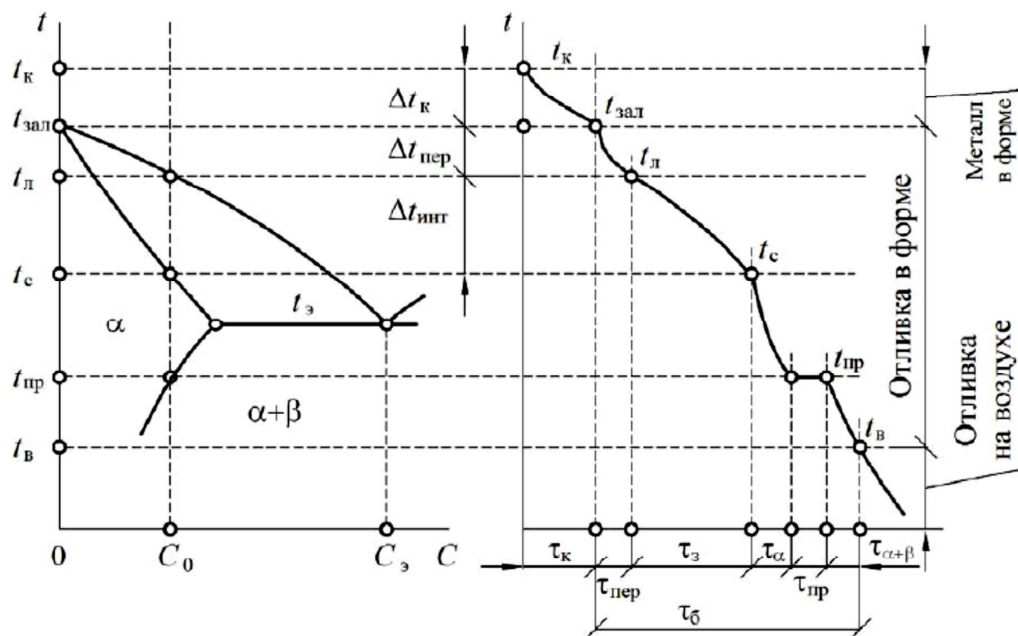


Рисунок 2.1 – Зміна температури сплаву складу  $C_0$  в процесі формування виливка по діаграмі стану (а) і в часі (б) при охолодженні в заливальному ковші в формі і на повітрі

Це необхідно, щоб доставити ківш від плавильної ділянки до місця заливки форм. Також в цей момент часу виробляються ковшові металургійні операції: введення добавок для отримання заданої структури і властивостей литого металу, рафінування рідкого металу, обробки спеціальними шлаками, вакуумування, фільтрування через кускові або сітчасті фільтри і т. д.

Подальше охолодження вилівка відбувається на повітрі. За час  $\tau_v$  охолодження металу в формі від  $t_{зал}$  до  $t_v$  послідовно відбувається ряд процесів, що визначають якість вилівка:

- плинність металу при заповненні порожнини форми і всередині вилівка, що твердне;

- кристалізація металу, тобто перехід з рідкого стану в твердий з утворенням центрів кристалізації, зростання яких призводить до формування литої структури;

- виділення розчинених в металі газів при зниженні температури розплаву і в процесі його тверднення з утворенням великих газових пузирів (газових раковин) і мікроскопічних пузирів (пор);

- виділення неметалічних включень, їх спливання в рідкому металі і видалення, а також застрівання в об'ємі твердо-рідкого металу, що кристалізується;

- ліквідація домішок в результаті виборчої кристалізації і переміщення рідкої фази, збагаченої домішками, по перерізу вилівка з утворенням макроскопічної (зональної) і мікроскопічної (дендритної) ліквідації;

- об'ємна усадка (зменшення об'єму) металу при зниженні температури і фазовий перехід з утворенням концентрованих усадочних раковин і розсіяної усадочною пористості;

- лінійна усадка (зменшення зовнішніх розмірів) вилівка, що викликає появу деформацій, напружень, викривлення і тріщин.

Перераховані процеси, що включають є наслідком складного комплексу взаємопов'язаних фізичних явищ теплообміну, гідродинаміки, дифузії, фільтрації і так далі. При нераціональній технології виготовлення вилівка ці процеси призводять до появи різноманітних дефектів.

Ливарні сплави завжди кристалізуються в інтервалі температур, їх область тверднення розташовується між ізотермічними поверхнями в литті з температурами ліквідуса і солідуса (рис. 2.2).

Область тверднення складається з твердорідкої зони (скелет з твердої фази і включення рідкої фази) і жідкотвердої зони (рідина з включеннями розрізнених виділень твердої фази). Якщо з незатверділого вилівка вилити рідку фазу, то з нею піде рідко-тверда зона. Тому межа між двома зонами області називається виліваністю.

У твердорідкій зоні виділяється ділянка, в якому рідка фаза роз'єднана зростаючими кристалами і не може підживлюватися по мікроканалам. Кордон цієї ділянки – кордон живлення. На діаграмі стану вона розташовується трохи нижче межі виліваності (нульової рідкоплинності).

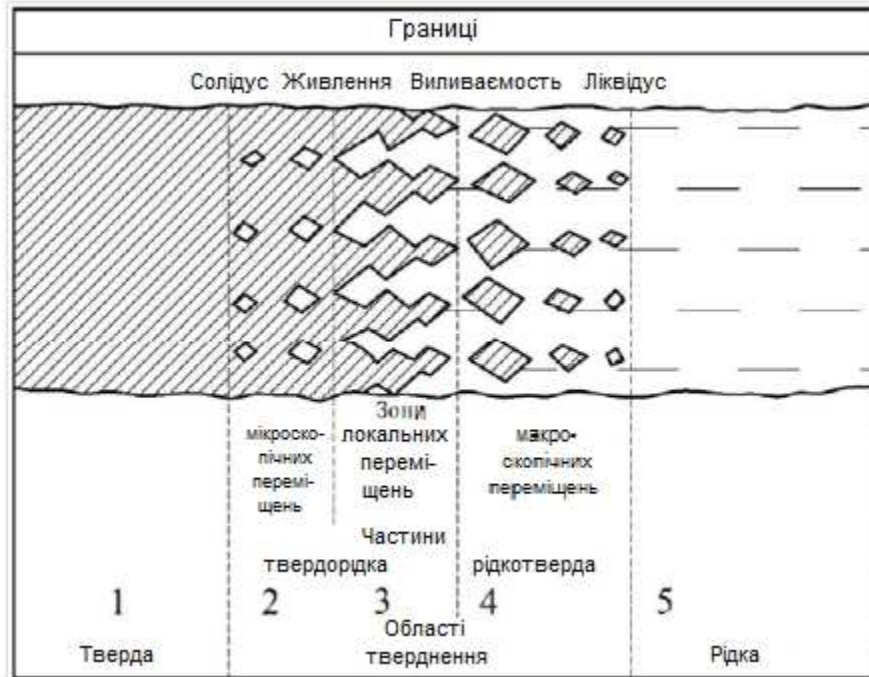


Рисунок 2.2 – Будова вилівка, що твердне

Механізм протікання процесу тверднення сильно впливає на характер фронту кристалізації, від якого, в свою чергу, залежать кількість розплаву, що ізолюється в процесі тверднення від решти об'єму рідкої фази, і схильність до утворення деяких характерних дефектів виливків (мікроусадкова пористість).

При однакових умовах тверднення (однакове середовище, в яке заливається метал при однакових умовах) з підвищенням вмісту елементу в сплаві, що додається, відбувається перехід від екзогенного зростання компактних кристалів до ендогенної дендритної кристалізації.

Як тільки температура сплаву під стінками форми впаде до температури ліквідусу в цій зоні починається кристалізація. У разі, якщо сплав твердне в інтервалі температур, то в зоні тверднення присутні дві фази – тверда і рідка. У момент, коли температура сплаву впаде до температури солідусу, тверднуть залишки рідкої фази і у всьому виливку буде тільки тверда фаза. У процесі тверднення одночасно можуть існувати три зони: зона твердого металу, ширина якої згодом безупинно збільшуватися; двофазна зона, ширина якої залежить від інтервалу тверднення і градієнта температури; зона розплаву, ширина якої безперервно зменшується.

Поверхня, яка утворює кордон між зоною твердого металу та двофазною зоною, називається ізосолідусом (температура відповідає солідусу). Поверхня, яка утворює кордон між двофазною зоною і зоною розплаву, називається ізоліквідусом (тут температура відповідає температурі ліквідусу сплаву, що заливається). В чистих металах або евтектичних сплавах, які тверднуть не в інтервалі температур, двофазна зона не утворюється.

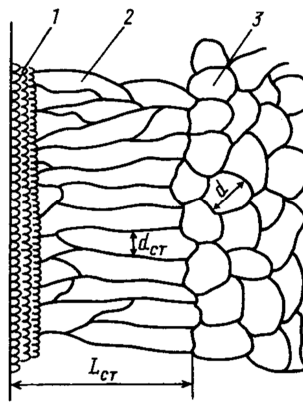
Ширина двофазної зони впливає, як на структуру сплаву, так і на ступінь ліквідації. Чим ширше двофазна зона, тим менше утворюється стов-

пчастих (орієнтованих) кристалів. Істотний вплив на неї надає ширина двофазної зони і на ступінь дендритної і зональної ліквідації, що є наслідком виборчого тверднення складових сплаву як всередині окремих дендритів, так і стінок виливка. Ширина двофазної зони впливає також на мікропористість структури. При широкій двофазній зоні утворюються ізольовані острівці розплаву, при усадці яких утворюються мікропори.

Структура сталевих виливків характеризується формою і розмірами кристалів, які зазвичай називаються зернами і видимих при спеціальному травленні на шліфах без збільшення або при невеликому збільшенні (до  $\times 20$ ), а також елементів дендритної мікроструктури, які спостерігаються під мікроскопом.

Макроструктура виливка, що затверднув має три зони (рис. 2.3):

- 1) зовнішню дрібнозернисту зону раз орієнтованих кристалів;
- 2) проміжну зону стовпчастих кристалів, витягнутих у напрямку тепловідводу;
- 3) центральну зону рівноосних кристалів.



*1 – зовнішня дрібнозерниста зона; 2 – зона стовпчастих кристалів;  
3 – центральна зона крупних рівноосних кристалів*

*Рисунок 2.3 – Макроструктура сталевих виливків*

У початковий період кристалізації кірка, температура якої близька до температури солідусу, а також нагріті стінки і зазор між кіркою і формою зменшують теплопередачу від рідкої сталі і ступінь переохолодження. При цьому зростають переважно кристали, головні осі яких орієнтовані паралельно напрямку тепловідведення. Утворюється зона стовпчастих кристалів, причому переріз зерен, що ростуть в напрямку тепловідводу, збільшується в міру віддалення від поверхні форми внаслідок блокування і поглинання ними зерен з менш сприятливим орієнтуванням.

Зона стовпчастих кристалів межує з зоною великих рівноосних зерен в центрі перерізу стінки виливка. Вони утворюються з рідкої фази, коли через невелике переохолодження виникає мала кількість зародків кристалізації і є в розплаві безпорадково розкидані готові центри у вигляді твердих частинок: уламки дендритів, неметалеві включення і ін.

Величина тієї чи іншої зони в виливку залежить в першу чергу від хімічного складу сталі (інтервалу кристалізації), швидкості охолодження виливка, матеріалу форми, її теплоакumuлюючої здатності, температури заливання металу в форму.

Металографічні дослідження показали, що і стовпчасті, і рівноосні кристали починають рости за дендритним механізмом, який потім змінюється комірчасто-дендритним. Двома основними характеристиками структури є протяжність стовпчастої зони (якщо вона є) і величина зерна у рівноосній області. Ці характеристики можуть бути виражені кількісно та визначаються різними факторами. Однак за винятком деяких випадків точна залежність поки не встановлена через велике розмаїття змінних параметрів, що впливають на процес. Останні можна розділити на дві групи:

- параметри, що визначаються металом;
- параметри, пов'язані з властивостями форми.

Метал характеризується складом, здатністю до зародкоутворення, температурою розливання і руху під час потрапляння до форми, формою – її тепловими властивостями, температурою і геометрією.

## 2.2 Порядок виконання роботи

1. Для комп'ютерного моделювання експерименту по дослідженню характеру кристалізації та тверднення виливка скористатися наявними можливостями CAD/CAE-систем.

2. Створити 3D-модель майбутнього виливка в формі куба зі стороною 100 мм (рис. 2.4) із застосуванням CAD-систем (КОМПАС-3D, SolidWorks і т.д.).

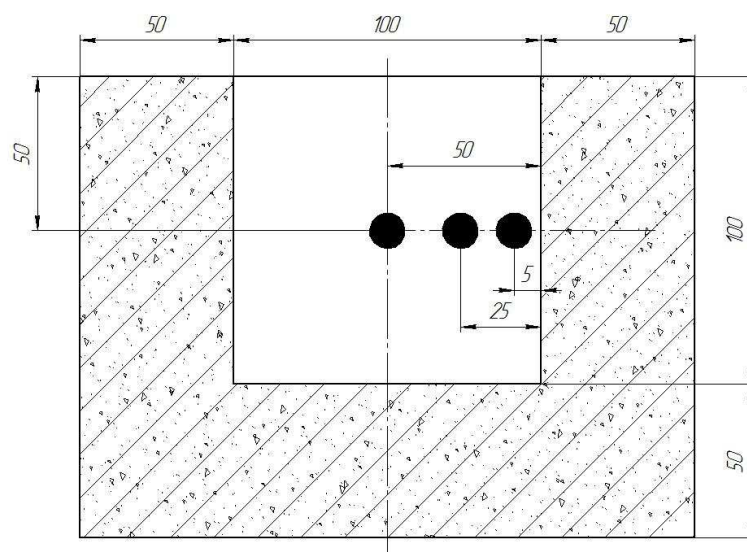


Рисунок 2.4 – Модельна система «метал-форма» для лабораторних досліджень та місця встановлення термопар у формі

3. Підготувати дану модель для моделювання процесу заповнення проби рідкої сталлю. Для цього скористатися CAE-системою LVM Flow.

4. У 3D конвертері програми LVM Flow створити об'єкт моделювання з розширенням .svg. В якості вихідних умов вибрати наступні: товщина всіх стінок форми – 50 мм; товщина верхньої стінки – 0 мм; матеріал виливки – сталь 35Л; початкова температура – 1570 °С; матеріал форми – піщано-глиниста.

5. Проставити місця установки датчиків, як це показано на рис. 2.4.

6. Із застосуванням створеної моделі провести моделювання тверднення виливка.

7. Записати термічні криві охолодження рідкої сталі. Проаналізувати вид термічних кривих і відзначити температури перетворень в сталі. Зробити висновок про характер перетворень в вуглецевій сталі.

8. У звіті повинні бути вказані назва та ціль роботи, наведені загальні та стислі теоретичні відомості і порядок виконання роботи. Звіт повинен містити результати моделювання теплових процесів в формі із застосуванням програми LVM Flow. Зробити висновок за результатами експерименту і моделювання.

### **2.3 Контрольні питання**

1. Параметри, що впливають на тверднення виливка.
2. Типи діаграм стану.
3. Особливості фазових перетворень в діаграмах стану.
4. Процеси, що відбуваються при кристалізації рідкої сталі.
5. Будова виливка, що твердне.
6. Макроструктура виливка.
7. Способи дослідження кристалізаційних процесів.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3 ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ САД/САЕ-СИСТЕМ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТВЕРДНЕННЯ СТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ**

**Мета роботи:** вивчити характер зміни температури в процесі затвердіння сталевих виливків; навчитися будувати кінетичні діаграми і температурні поля по кривим затвердіння сплавів.



### 3.1 Загальні відомості

Безпосередньо з процесом тверднення, з його параметрами, пов'язане утворення різних структурних зон, розвиток хімічної неоднорідності, формування розсіяною і місцевої пористості, а також інших видів дефектів, від яких залежить ступінь однорідності і суцільності металу по перерізу виливка, що визначають якість литого виробу.

Вирішення проблеми підвищення якості литої заготовки, її щільності і однорідності по всьому перерізу з високими механічними властивостями можливо тільки при активному втручанні в процес формування виливка шляхом управління параметрами процесу затвердіння.

Як правило, всі експериментальні роботи і теоретичні розрахунки процесу тверднення проводили з чистими металами, які не мають інтервалу кристалізації і кристалізуються при постійній температурі. Тверднення виливків з таких сплавів відбувається шляхом поступового поширеного наростання твердої кірки. В цьому випадку тверда і рідка частини виливка поділяються чітким кордоном – фронтом тверднення, який поступово просувається від поверхні до центру виливка.

Однак, тверднення більшості реальних сплавів типу твердих розчинів, в тому числі і сталі, відбувається не при постійній температурі, а в інтервалі температур кристалізації «ліквідус-солідус». В цьому випадку тверднення виливків відбувається не монолітними шарами з різкою межею між твердою і рідкою фазами, а в перехідній зоні двофазного стану, в якій знаходяться одночасно рідка і тверда фази. Цю зону зазвичай називають «зоною тверднення».

Температура цієї зони змінюється від ліквідусу до солідусу. Внутрішня межа цієї зони визначається краями кристалів, які виступають вглиб рідкої частини виливка, і відповідає кордону ліквідусу. Її зовнішня межа визначається останніми краплями рідкої фази, що твердіє в оточенні твердого металу, і відповідає кордону солідусу.

Вочевидь, що для сплавів, які кристалізуються в двофазній зоні, не можна вже говорити про просування фронту тверднення в звичайному розумінні. Слід говорити про просування кордону початку тверднення – ізотерми ліквідусу, межі закінчення тверднення – ізотерми солідусу і проміжних ізотермах, яким відповідно до двофазної діаграмою стану Fe–Fe<sub>3</sub>C відповідає та чи інша кількість затверділої фази, зокрема, ізотерми утворення безперервного жорсткого «скелета» або ізотерма кордону виливаності.

На думку більшості дослідників межа виливаності принципово може поєднуватися з кордоном початку лінійної усадки (А. А. Бочвар), кордоном нульової рідкоплинності (Ю. А. Нехендзі, Н. І. Хворінов) або кордоном живлення (Б. Б. Гуляев).

Згідно з теоретичними розрахунками, проведеними Ю. А. Нехендзі, межі переходу металу з рідинно-твердого в твердо-рідкий стан (межа плинності) має відповідати виділення близько 20% обсягу твердої фази.

Однак, як зазначає цей же автор, ця межа може змінюватися в залежності від умов руху рідини (її напорю і інших чинників), від будови сплаву.

В даний час питання про фактичну кількість твердої фази, відповідному кордоні плинності сталі, вимагає свого подальшого вивчення на основі експериментальних даних і математичних розрахунків.

Досліди, проведені Н. І. Хворіновим методом виливання, показали, що в твердо-рідкій зоні, що залишається у вигляді затверділої кірки, може міститися, в залежності від характеру тверднення, 10...60% рідкого металу. Характер розвитку зони тверднення визначається, з одного боку, швидкістю зовнішнього охолодження, а з іншого – властивостями самого сплаву: інтервалом кристалізації, теплофізичними властивостями. Ширина зони тверднення буде тим менше, чим більше швидкість охолодження, менше інтервал кристалізації, теплоємність і схована теплота кристалізації сплаву і чим нижче його теплопровідність.

А. І. Вейник, розглядаючи особливості процесу тверднення виливків зі сплавів, що кристалізуються в інтервалі температур, показав, що ширина зони тверднення залежить від співвідношення інтервалу температур кристалізації до перепаду температури по перерізу вилівка і чим менше це відношення, тим вужче зона, і навпаки. З цим же співвідношенням А. І. Вейник пов'язує особливості послідовного і об'ємного розвитку процесу тверднення.

Для забезпечення послідовного тверднення, що характеризується вузькою двофазною зоною і її швидким просуванням від периферії до центру, необхідний крутий температурний перепад протягом всього процесу затвердіння і малий інтервал кристалізації.

При твердненні виливків із середньовуглецевих марок сталей, що мають перитектичне перетворення в інтервалі температур кристалізації, можна відзначити наступні кордони в зоні тверднення:

- початок виділення первинних кристалів – ліквідус;
- кінець виділення первинних кристалів і початок перитектичної реакції;
- кінець перитектичної реакції і початок виділення вторинних кристалів.

Відповідно до цього вся зона тверднення може бути розділена ще на три зони: зону виділення первинних кристалів  $\delta$ -Fe, зону перитектичного перетворення за участю рідини,  $\delta$ -Fe і  $\gamma$ -Fe.

У роботі В. Я. Білика розглянуто коло найважливіших питань, пов'язаних з методикою дослідження кінетики тверднення сплавів, що кристалізуються в інтервалі температур, з урахуванням їх складу та діаграми стану. На основі температурних кривих проведена побудова кінетичних діаграм (рис. 3.1), що характеризують закономірність просування по перерізу вилівка різних кордонів в інтервалі температур ліквідусу-солідусу з моменту заливання і до кінця твердіння вилівки.

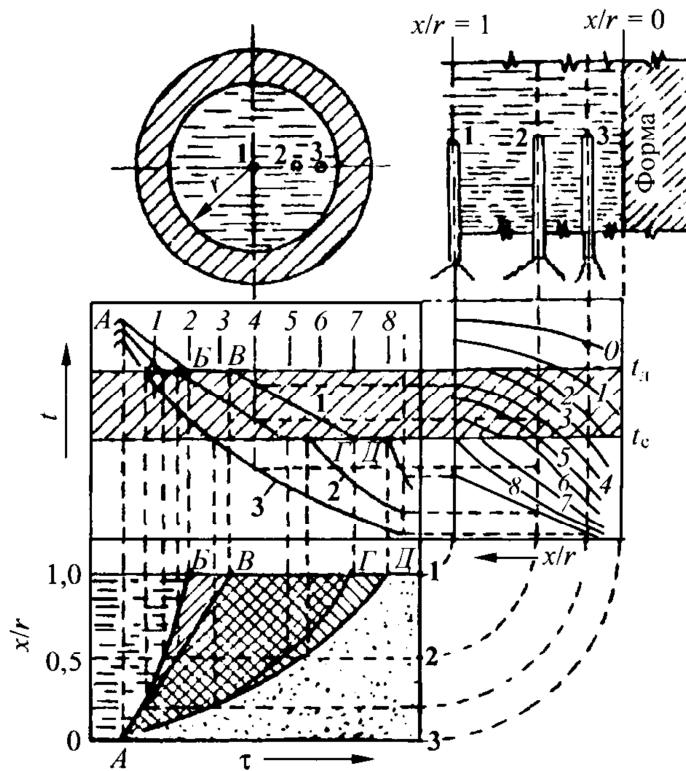


Рисунок 3.1 – Метод побудови кінетичних діаграм та температурних полів за кривими тверднення сплавів

Отже, прийнятий більшістю дослідників спосіб побудови температурних полів сталевих виливків, що кристалізуються в інтервалі температур і мають перетворення в цьому інтервалі, за одними температурними кривими охолодження може привести до помилкового уявлення про нібито параболічний характер розподілу температури по перерізу виливка на всьому протязі процесу її тверднення.

Однією з основних цілей експериментального вивчення особливостей процесу тверднення є встановлення закономірностей кінетики цього процесу в залежності від умов зовнішнього охолодження і властивостей самого сплаву. Знання цих законів дозволило б ще на стадії проектування технології розраховувати і призначати такі її параметри, при яких досягається необхідний рівень якості литої заготовки.

Вирішенню цього питання присвячена велика кількість теоретичних і експериментальних робіт багатьох вчених, які наводять численні формули, як правило, для визначення часу тверднення виливків при різних умовах охолодження.

Уявлення про особливості лінійного розвитку процесу тверднення базуються в основному на результатах експериментів, виконаних методом виливання рідкого залишку і вимірювання товщини твердої кірки, що лишилася. Однак, як відзначають багато дослідників, цей метод відрізняється низькою точністю, а можливості його застосування вкрай обмежені.

Загальна закономірність лінійного розвитку процесу тверднення така: в початковий період відбувається уповільнення просування кордонів

тверднення (у відповідності з параболою), а на кінцевій стадії тверднення центральних областей виливків, що мають кінцеві розміри – прискорення. З аналізу наведених вище даних, що характеризують лінійний розвиток процесу тверднення, видно, що наявні в даний час залежності, які виражають лінійну швидкість тверднення металу в функції часу, не можуть бути використані для точного опису пізніших стадій тверднення або для визначення часу повного тверднення виливків кінцевих розмірів.

Більш повне уявлення про кінетику затвердіння можна отримати тільки на основі точних знань температурних полів по перерізу вилівка, що твердіє, і закономірностей виділення твердої фази в інтервалі температур ліквідусу-солідусу, встановлених з використанням діаграми стану Fe-Fe<sub>3</sub>C.

Поряд з цим про закономірності виділення твердої фази і еквівалентної їй теплоти кристалізації можна також судити по нагріванню ливарної форми. Дослідженню цього важливого питання стосовно умов тверднення сталевих виливків в ливарних формах з використанням цих двох методів присвячена робота Н. І. Хворінова.

На основі аналізу літературних даних з питань кінетики процесу тверднення сталевих виливків можна зробити наступні висновки.

Відомі наближені рішення процесу тверднення вилівки є, як правило, спрощенням закону «квадратного кореня» і характеризують розвиток ідеалізованого, неіснуючого в реальних умовах процесу. Їх значення обмежується рішенням приватних завдань, наприклад, визначенням загального часу тверднення і встановленням загальної закономірності процесу відбору тепла формою.

Відомі в даний час роботи дозволяють встановити загальне якісне розходження між кінетикою лінійного і об'ємного розвитку процесу тверднення реальних виливків. Однак в даний час ще не представляється можливим точно визначити кількісну залежність, що характеризує особливості лінійного розвитку процесу тверднення, а також закономірність розподілу твердої фази в зоні двофазного стану і швидкість її виділення.

Подальші дослідження закономірностей кінетики процесу тверднення сталевих виливків можливі тільки на основі точних знань закономірностей зміни температурного поля вилівка з моменту її заливки і до кінця тверднення, з одного боку, а з іншого, – особливостей виділення твердої фази і розвитку фізико-хімічних явищ в зоні тверднення, зумовлених природою самого сплаву, що кристалізується в інтервалі температур ліквідусу-солідусу.

Для вирішення цієї проблеми необхідно мати достовірні експериментальні дані щодо зміни температурних полів у вилівку і формі, отримані на сталевих виливках різної товщини і при різних умовах охолодження, з моменту заливки металу і до кінця його тверднення в ливарній формі.

### 3.3 Порядок виконання роботи

1. Для комп'ютерного моделювання експерименту по дослідженню кінетики тверднення рідкої сталі скористатися наявними можливостями CAD/CAE-систем.

2. Створити 3D-модель майбутнього виливка в формі куба зі стороною 100 мм (рис. 3.2) із застосуванням CAD-систем (КОМПАС-3D, SolidWorks і т.д.).

3. Підготувати дану модель для моделювання процесу заповнення проби рідкої сталлю. Для цього скористатися CAE-системою LVM Flow.

4. У 3D конверторі програми LVM Flow створити об'єкт моделювання з розширенням .svg. В якості вихідних умов вибрати наступні: товщина всіх стінок форми – 50 мм; товщина верхньої стінки – 0 мм; матеріал виливка – сталь 35Л; початкова температура – 1570 °С; матеріал форми – піщано-глиниста.

5. Проставити місця установки датчиків, як це показано на рис. 3.2.

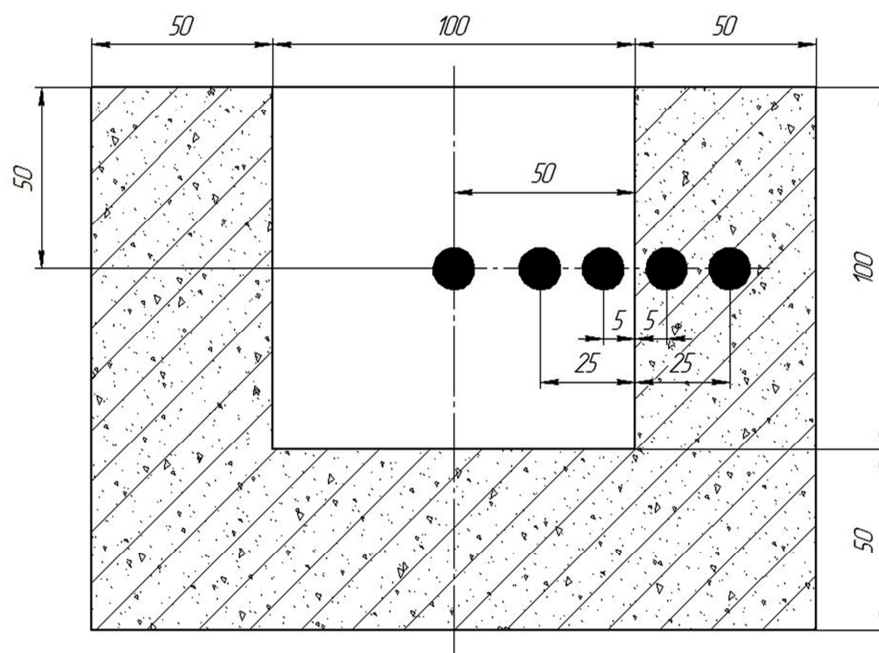


Рисунок 3.2 – Модельна система «метал-форма» для лабораторних досліджень і місця установки термопар у формі

6. Із застосуванням створеної моделі провести моделювання тверднення виливка.

7. Записати термічні криві охолодження рідкої сталі, а також криві нагрівання й охолодження формувальної суміші. Побудувати кінетичну діаграму процесу тверднення виливка і розподілу температури по перерізу виливка. Проаналізувати характер тверднення виливка і зробити висновок про особливості формування структури ливарних сталей.

8. Отримані термічні криві охолодження використовувати для дослідження особливостей просування фронту кристалізації. Для цього побудувати графік залежності часу, за який досягається температура солідусу в різних ділянках виливка.

9. У звіті повинні бути вказані назва та ціль роботи, наведені загальні та стислі теоретичні відомості і порядок виконання роботи. Звіт повинен містити результати моделювання теплових процесів в формі із застосуванням програми LVM Flow. Зробити висновок за результатами експерименту і моделювання.

### **3.3 Контрольні питання**

1. Особливості тверднення ливарних сплавів.
2. Методи дослідження характеру тверднення розплавів.
3. Особливості тверднення перитектичних сплавів.
4. Температурні поля охолодження виливків у формі.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ЛИВНИКОВОЇ СИСТЕМИ НА ЯКІСТЬ ВИЛИВКІВ**

**Ціль роботи:** вивчити основні принципи конструювання ливникових систем для виготовлення сталевих виливків; дослідити вплив конструкції ливникової системи на характер розподілу дефектів у виливку після її за-твердіння.

### **4.1 Загальні відомості**

Ливникова система – це система каналів і елементів ливарної форми, що служить для підведення розплавленого металу в порожнину форми, забезпечення її заповнення та живлення виливка під час її тверднення. Конструкція ливникової системи і розміри її елементів визначають такі важливі фактори технологічного процесу виготовлення виливків:

- швидкість заповнення ливарної форми рідким металом;
- напрямок потоку рідкої сталі в порожнині ливарної форми;
- розігрівання окремих частин форми і виливка;
- спрямованість процесу тверднення металу в формі;
- витрати металу на виготовлення якісного виливка.

Ливникова система для виготовлення сталевих виливків складається з таких елементів:

- ливникова воронка – металоприймач для направлення руху рідкої сталі в стояк;

- стояк – вертикальний ливниковий канал, що примикає зверху до воронки, а знизу – до металоприймача (зумпфа);

- металоприймач (зумпф) – поглиблення під стояком для пом'якшення удару струменя металу об дно форми, зменшення можливості утворення корольків на початку заливки форми і попередження від попадання в потік металу неметалічних включень з дна форми;

- ливниковий хід – ливниковий канал, що з'єднує стояк з іншими елементами ливникової системи;

- живильники – ливникові канали, що передають рідкий метал безпосередньо в порожнину ливарної форми;

- випор – вертикальний канал, який розташовується в найвищій частині порожнини ливарної форми і призначений для виведення газів з форми, видалення неметалевих включень, а також для спостереження за процесом заповнення форми розплавом;

- надлив – елемент ливникової системи, який слугує для живлення вилівка рідким металом під час її тверднення і усадки.

Заливку форм здійснюють чайниковим і стопорними ковшами.

Конструкція ливників для отримання виливків зі сталей не передбачає уловлювання шлаку, які випадково потрапляють до порожнини ливникових каналів.

При проектуванні ливникової системи необхідно виконувати такі вимоги:

- довжина ливникових каналів, особливо живильників, повинна бути мінімально допустимою, але достатньою для ущільнення суміші в місцях її розташування;

- метал в порожнину ливарної форми слід підводити живильниками в напрямку поздовжньої осі вилівка;

- заливку форми необхідно здійснювати через постійно заповнені металом канали ливникової системи;

- підведення розплаву живильниками слід здійснювати в такі місця, розігрівання яких сприятиме посиленню ефекту спрямованого тверднення металу в ливарній формі;

- ливникові канали необхідно розташовувати за межами знаків стрижнів на доступній відстані від стінок вилівка і опоки;

- розташовувати живильники на достатній відстані від місць установки холодильників і жеребійок;

- забезпечувати односторонній напрямок руху розплаву в порожнині форми, створювати умови для винесення в надлив спливаючих неметалевих включень, (наприклад, тангенціальним розташуванням живильників);

- розосереджувати підведення металу в форму декількома живильниками в тонкі частини вилівка з забезпеченням прискореного охолодження товстостінних частин;

– використовувати переважно сифонне підведення металу або підведення, що забезпечує мінімальну висоту вільного падіння струменя розплаву на початку заливання форми;

– переріз ливникових каналів повинен мати найменшу площу охолодження, тобто бути круглим або напівкруглим;

– при виробництві великогабаритних виливків слід забезпечувати подачу перших порцій розплаву в форму сифоном, а наступних порцій – під затоплений рівень, а також подачу розплаву в надлив через спеціальні ливникові канали або доливанням зверху з ковша.

Залежно від місця підведення металу в форму розрізняють такі ливникові системи:

– горизонтальну – з живильниками, розташованими в горизонтальній площині роз'єму ливарної форми;

– вертикальну – з живильниками, розташованими у вертикальній площині роз'єму ливарної форми щодо положення його при заливці (до вертикальних відносять вертикально-щілинні і ярусні ливникові системи);

– верхню – систему подачі рідкого металу в порожнину ливарної форми зверху;

– дощову – систему подачі металу в форму через велику кількість тонких живильників (різновид верхньої ливникової системи);

– сифонну – систему подачі металу в форму знизу через один або кілька живильників.

При розрахунку ливникових систем необхідно керуватися такими положеннями:

– розміри і побудова ливникових телевізійного мовлення встановлюють виходячи з необхідності забезпечення оптимального режиму заповнення форми розплавом;

– в залежності від розмірів, маси, конфігурації, матеріалу виливки і прийнятої технології формоутворення визначають:

1) спосіб заливки форми (з чайникового або стопорного ковша);  
2) необхідні місця підведення металу (місця розташування живильників);

3) конструкцію ливникової системи;

4) розташування і довжину ливникового ходу;

5) місце розташування стояка;

6) спосіб доливання надливів.

Розміри ливникових каналів розраховують за певними методиками;

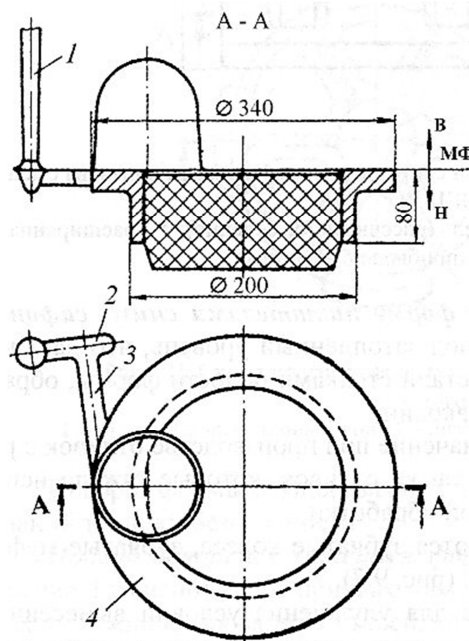
– вихідним критерієм, що впливає на розміри ливникових каналів, є оптимальна тривалість заливки форми. Істотне відхилення від неї в більшу або меншу сторону негативно впливає на якість виливків і особливо сприяє утворенню таких дефектів як спаї, ужимини, газові раковини, пористість і ін.

Залежно від конфігурації, товщини стінок, габаритних розмірів сталевих виливків використовують ливникові системи, які класифікують за способом розташування живильників:



- збоку по роз'єму форми з частковим вільним падінням потік; розплаву в її порожнину;
- знизу сифоном;
- зверху вільним падінням потоку розплаву;
- комбінований – на різних рівнях порожнини форми;
- вертикальний – у вигляді щілинного каналу.

Розташування живильників збоку по роз'єму форми використовують при машинному формуванні дрібних, середніх і великих, відносно невисоких виливків з вуглецевої і низьколегованої сталей за умови незначного (до 100...200 мм) вільного падіння потоку розплаву в порожнину ливарної форми (рис. 4.1).



*1 – стояк; 2 – ливниковий хід; 3 – живильник; 4 – виливок  
Рисунок 4.1 – Схема ливникової системи для виготовлення  
виливка «Ступиця»*

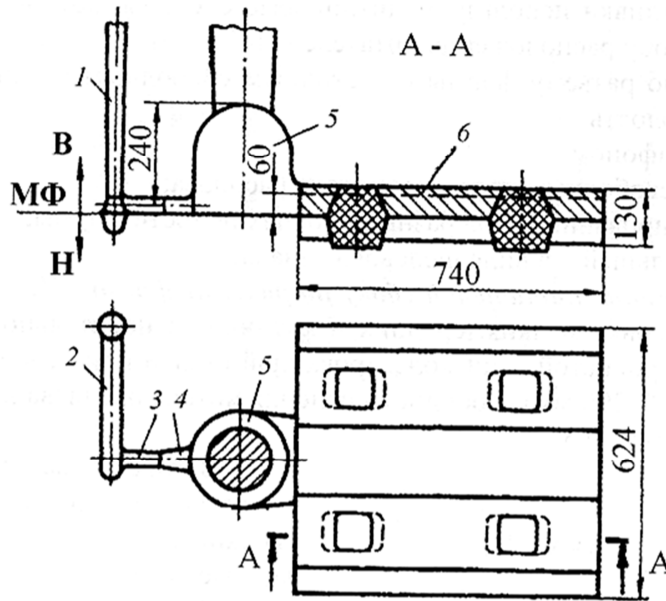
У цих випадках потік сталі з живильників не повинен обмивати плоскі стінки форми, розташовані вище. Високолеговані сталі необхідно заливати сифоном тільки під затоплений рівень.

Таку технологію використовують також при наявності бокових надливів, коли підведення металу безпосередньо в надлив сприяє створенню умов спрямованого тверднення виливка (рис. 4.2).

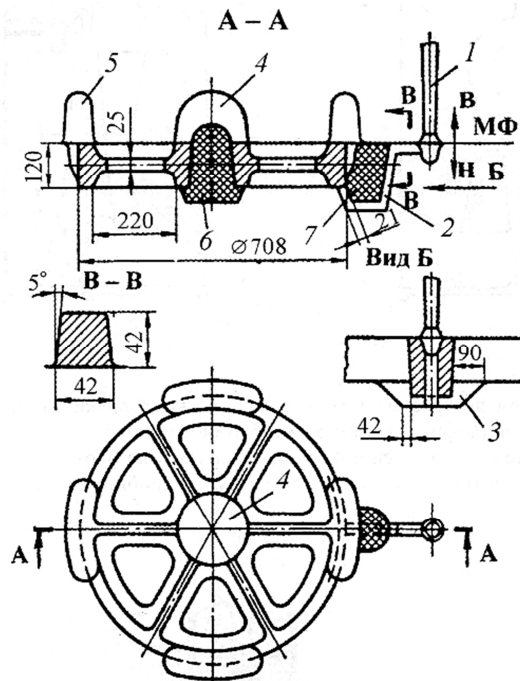
У таких випадках необхідно уникати вільного падіння потоку розплаву з живильників.

Підведення металу в ливарну форму живильниками знизу, сифоном використовують з метою заливання форм під затоплений рівень, що дає можливість уникнути стікання потоку сталі по стінкам порожнини форми, утворення при цьому ужимин і піщаних раковин. Це має особливо велике значення при виробництві виливків з розвиненими плоскими поверхнями,

а також виливків, які важко виправити заварюванням після механічної обробки. Прикладом таких виливків є зубчасті колеса, зубчасті муфти, тонкостінні гальмівні шківни та ін. (рис. 4.3).



1 – стояк; 2 – ливниковий хід; 3 – живильник;  
4 – розширена частина живильника; 5 – надлив; 6 – виливок  
Рисунок 4.2 – Схема ливникової системи для виготовлення виливка  
«Плита» зі сталі 110Г13Л

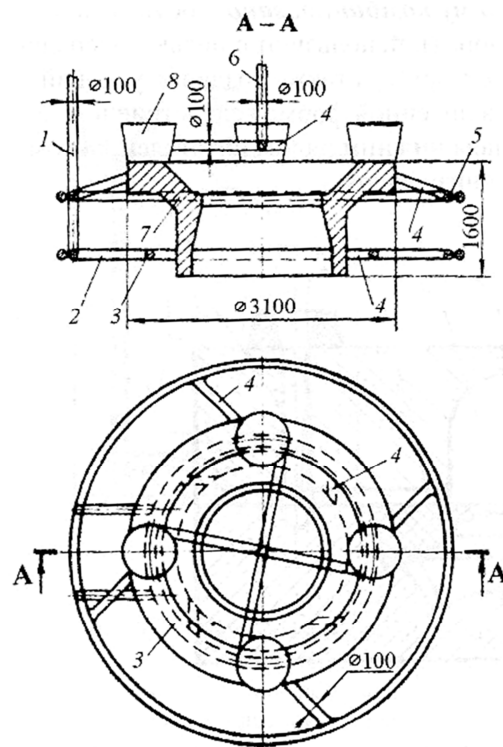


1 – стояк; 2 – ливниковий хід; 3 – живильник; 4, 5 – надливи;  
6, 7 – стрижні  
Рисунок 4.3 – Схема ливникової системи для виготовлення  
виливка «Колесо»

Підведення металу в ливарну форму зверху має обмежене застосування. Його використовують при виготовленні великих виливків з вуглецевих і складнолегованих сталей. При такому способі метал підводять в кільцеву або швидко відокремлюваний надлив, за умови невисокого падіння потоку розплаву в порожнину форми (до 100 мм при машинній формовці «по-сирому»), при цьому потік металу не вдаряється о стінки форми.

Підведення металу в ливарну форму комбіновано здійснюють на різних рівнях порожнини ливарної форми, використовують з метою розосередження металу, що подається, по висоті форми, а також створення умов спрямованого тверднення виливка в ливарній формі внаслідок послідовного заповнення порожнини спочатку нижнім рядом живильників, потім наступними рядами в напрямку знизу вгору. Цей спосіб використовують при виробництві великих виливків. Подача металу на різні рівні порожнини ливарної форми досягається використанням багаторядних літників.

Багаторядні ливникові системи конструюють з використанням одного або декількох стояків, з'єднаних одночасно з двома або більшою кількістю окремих ливникових ходів (рис. 4.4), у вигляді кількох самостійних рядів, не пов'язаних один з іншим або ж у вигляді комбінацій двох описаних вище способів.



- 1 – стояк I та II рядів; 2 – проміжний канал; 3 – ливниковий хід I ряду;  
 4 – живильник; 5 – ливниковий хід II ряду; 6 – стояк;  
 7 – виливок; 8 – надлив

Рисунок 4.4 – Схема побудови багаторядної ливникової системи для виготовлення виливка «Фланець»

Підведення металу в ливарну форму вертикальним щілинним живильником використовують переважно при виготовленні виливків гальмівних шківів, зубчастих муфт, зубчастих коліс і ін.

## 4.2 Матеріали, обладнання

Програмні продукти для створення тривимірних моделей виливків з ливниково-живильними системами і моделювання ливарних процесів.

## 4.3 Порядок виконання роботи

1. Із застосуванням програм КОМПАС-3D або Solid створити об'ємну модель виливка «Плита» з розмірами 1000×1000 мм і товщиною стінки 250 мм, матеріал виливка – сталь 35ХМЛ.

2. Розрахувати розміри всіх елементів ливниково-живильної системи для виготовлення виливка «Плита» в залежності від схеми підведення рідкого металу в порожнину форми і схеми живлення виливка (рис. 4.5). Варіанти завдань для кожного студента представлені на рис. 4.5.

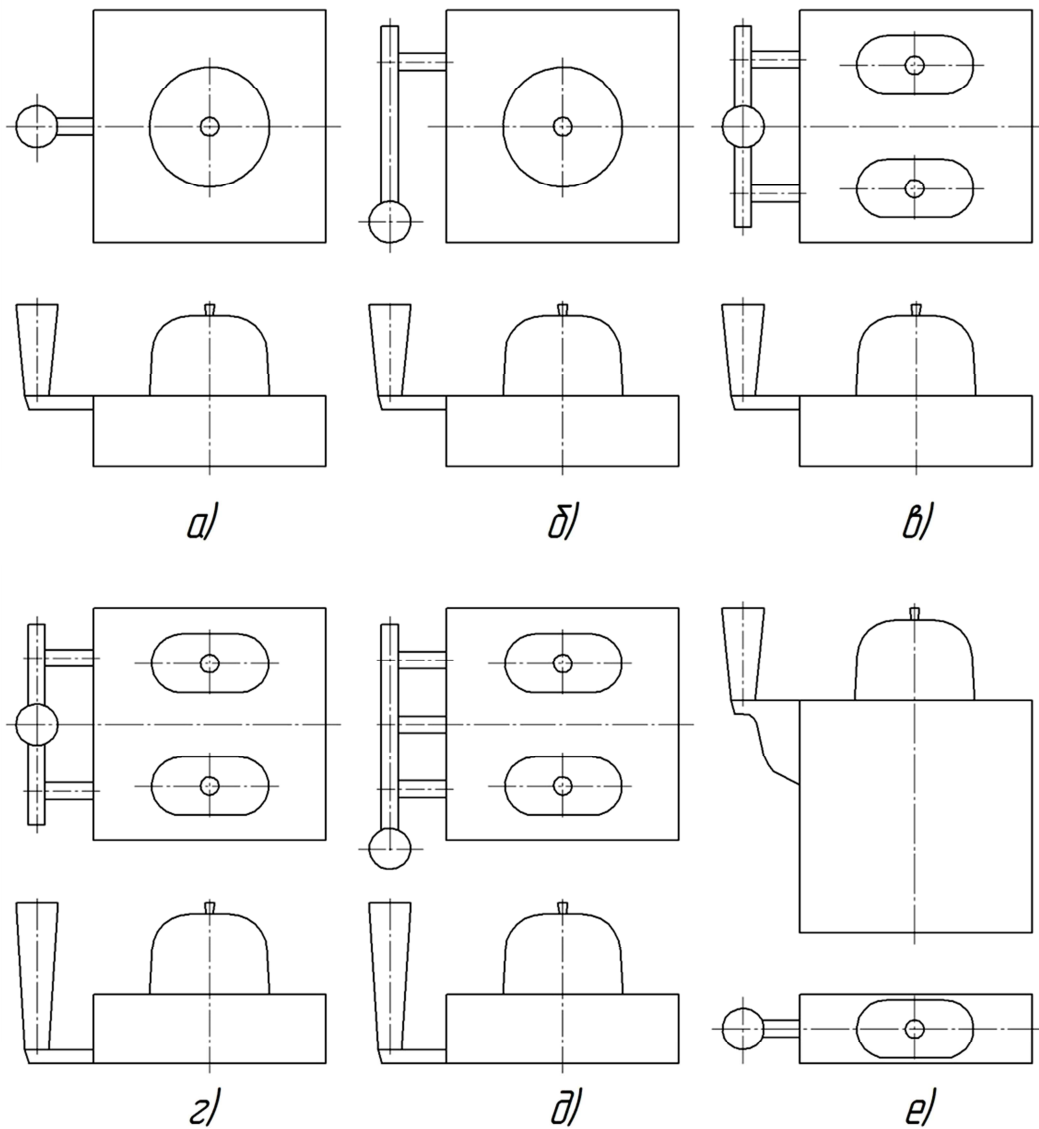
3. Після виконання відповідних розрахунків кожен студент буде об'ємну модель виливка з ливниково-живильною системою.

4. У 3D-конвертері програми LVMFlow створити об'єкт моделювання з розширенням .svg. В якості вихідних умов вибрати наступні: товщина всіх стінок форми – 250 мм; товщина верхньої стінки – 0 мм; матеріал виливка – сталь 35Л; початкова температура – 1570 °С; матеріал форми – піщано-глиниста.

5. Виконати моделювання процесу заливки і кристалізації виливка «Плита» в програмі LVMFlow.

6. Із застосуванням інструментів і можливостей програми LVMFlow проаналізувати характер розподілу дефектів в виливку «Плита» і зробити висновок про вплив типу ливникової системи на структуру готового вилика.

7. У звіті повинні бути вказані назва та ціль роботи, наведені загальні та стислі теоретичні відомості і порядок виконання роботи. Звіт повинен містити розрахунок ливниково-живильної системи для виготовлення виливка «Плита» і тривимірну модель виливка з ливниково-живильної системою. Привести в звіті результати моделювання процесу отримання виливка «Плита» і схеми розподілу дефектів в виливку при різних способах її виготовлення. За результатами моделювання зробити висновок про характер розподілу дефектів усадочного характеру в сталевому виливку в залежності від устрою ливниково-живильної системи.



*а – варіант №1, б – варіант № 2, в – варіант № 3, г – варіант № 4,  
 д – варіант № 5, е – варіант № 6*

*Рисунок 4.5 – Схеми живлення вилівка «Плита»*

#### **4.4 Контрольні питання**

1. Конструкції ливникових систем для виготовлення сталевих виливків.
2. Характеристика елементів ливникових систем.
3. Фактори, що впливають на конструкцію ливникових систем.
4. Способи заливання ливарних форм.
5. Вимоги при проектуванні ливникових систем.
6. Типи ливникових систем.
7. Способи розрахунку розмірів елементів ливникових систем.
8. Проектування ливникових систем.
9. Вплив конструкції ливникових систем на характер розподілу дефектів у литій сталі.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ЗІ СПЕЦІАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

**Мета роботи:** вивчити основні принципи конструювання ливникових систем для виготовлення сталевих виливків; дослідити вплив конструкції ливникової системи на характер розподілу дефектів у виливку після його тверднення.

#### 5.1 Загальні відомості

Для виготовлення сталевих виливків з різних типів сталей необхідно керуватися відповідними вимогами при проектуванні ливникових систем. Для отримання виливків зі сталей із спеціальними властивостями ці вимоги є особливо суворими, оскільки високолеговані сталі мають незадовільні ливарні властивості: низька рідкоплинність, значна ліквация і т.д.

Рідкоплинність високохромистої жаростійкої сталі нижче, ніж звичайної вуглецевої. Після підвищення вмісту хрому та вуглецю практична рідкоплинність сталі значно поліпшується, оскільки знижуються температура плавлення розплаву і його теплопровідність. Ледебуритні хромисті сталі мають рідкоплинність приблизно таку ж, як сірий чавун.

Хромисті сталі легко забруднюються неметалевими включеннями, при цьому виникають великі плівки оксидів, для запобігання утворенню яких, необхідно перегрівати сталь перед випуском з печі. Температура металу перед заливкою його в форму залежить від вмісту вуглецю та хрому, а також від конфігурації і необхідних властивостей виливків.

Заливку розплаву у форми необхідно здійснювати сифоном через численні живильники. Швидкість заповнення форми цими сталями повинна бути максимальною. При досить високій швидкості заливки і відповідному перегріві сталі форма добре заповнюється металом, при цьому виливки мають чисту якісну поверхню і чіткі геометричні контури.

Надмірне перегрівання сталі сприяє утворенню грубозернистої структури металу і, отже, збільшення крихкості виливків. Крім того, виливки при цьому мають підвищені газонасиченість і схильність до утворення утяжин і тріщин. Хромисті сталі мають більшу схильність до утворення усадочних раковин, ніж звичайні вуглецеві сталі.

Крім того, ці сталі, як уже зазначалося, мають низьку теплопровідність, тому при надмірному підвищенні температури і швидкості заливки форм збільшуються кількість і обсяг усадочних дефектів. Для усунення таких дефектів слід використовувати надливи збільшених розмірів, що істотно знижують вихід придатного литва.

Високохромисті сталі відносять до металів з широким температурним інтервалом зниженою міцності і пластичності в області високих температур, тому під час тверднення виливків, особливо з крупнозернистою структурою, існує небезпека утворення тріщин, незважаючи на те, що зі збільшенням вмісту хрому зменшується загальна лінійна усадка.

Перевага хромистих сталей, в порівнянні з аустенітними, полягає в тому, що перші мають менший коефіцієнт лінійного розширення в області пружних деформацій. Це означає, що при однакових значеннях модуля пружності і коефіцієнта теплопровідності обох металів внутрішня напруга в виливку з феритних хромистих сталей будуть меншими, ніж з аустенітних, наприклад, в виливках, що виготовляються з високомарганцевих, нікелевих або хромонікелевих сталей. Однак у виливках з хромистих сталей внутрішні напруги бувають досить високими.

Аустенітні хромонікелеві жароміцні сталі мають гірші ливарні властивості, ніж вуглецеві або низьколеговані конструкційні сталі. Рідкоплинність аустенітних сталей ще більше погіршується після додавання титану, незважаючи на те, що хром і нікель знижують температуру ліквідусу на 25...30 °С.

Ливарні властивості залежать від багатьох чинників, зокрема від рідкоплинності, яка швидко зменшується після випуску сталі в ківш, оскільки цей процес супроводжується утворенням плівок внаслідок вторинного окислення металу. Розливання сталі потрібно здійснювати швидко, при цьому слід використовувати спеціальні ливникові системи. Обрана ливникова система істотно впливає на однорідність металу у виливках. Приблизно такий же вплив на якість металу у виливках надають розміри і розташування надливів і холодильників.

Загальні рекомендації щодо підвищення якості виливків з хромонікелевих сталей можна сформулювати наступним чином:

- форми і стрижні можна виготовляти зі звичайних піщано-глинистих сумішей, сушити і фарбувати, при цьому форми і стрижні повинні бути податливими;
- перед розливанням металу доцільно підігрівати форми, причому бажано, щоб стрижні мали температуру вище, ніж форма;
- ливникова система повинна забезпечувати безперервне та оптимально швидке заповнення форми металом, тому його необхідно підводити декількома живильниками. краще використовувати сифонну заливку;
- температура рідкої сталі перед заливкою в форму повинна бути не нижче 1570 °С. Найкращі показники властивостей металу мають місце при температурі заливання 1580...1600 °С;
- високу температуру заливання рекомендують використовувати навіть тоді, коли це сприяє утворенню пригару на виливках.

Підвищений вміст марганцю в зносостійкій сталі 110Г13Л сприяє підвищенню рідкоплинності, однак більш корисним є вплив марганцю на цю характеристику в залежності від температури розливання сталі в форми.

Оптимальна температура випуску сталі з печі в підігрітій до 700...750 °С ківш повинна бути 1500...1570 °С. Для отримання якісного литва заливку форм необхідно здійснювати швидко і забезпечувати прискорене тверднення.

Усадка є причиною утворення тріщин у виливках, але разом з тим вона зменшує пористість металу. При достатньому утепленні надливів їх можна використовувати значно меншими, ніж для вуглецевих. При виробництві великого і середнього лиття слід виконувати такі правила:

- чим товще стінки виливки, тим менше в сталі повинно міститися вуглецю (відношення Mn:C має бути більше 10);

- при товщині стінки виливка більше 120 мм сталь необхідно додатково легувати нікелем, а вміст вуглецю при цьому має бути мінімальним.

У зв'язку з тим, що виливки неможливо обробляти різанням, конструкції використовуваних надливів і літників повинні забезпечувати можливість їх відділення від виливків газовим різанням або вручну кувалдою, при цьому зберігаючи якість виливка.

Оскільки сталі мають низьку теплопровідність і пластичність в литому стані відділення автогеном надливів і живильників може сприяти утворенню в виливку тріщин при кімнатній температурі внаслідок накопичення значних температурних напружень в місцях різання

Крім того, при температурах 400...600 °С в металі починають виділятися карбіди, що сприяють місцевому підвищенню крихкості сталі і зниження опору зносу.

Слід використовувати надливи, що швидко видаляються, і відрізати їх автогеном на відстані 15...30 мм від тіла виливки. Залишки надливів і живильників можна усувати наждаковими колами.

Краще використовувати розгалужену литникову систему, яку легше відокремлювати від виливка. Стрижні при виробництві великих виливків встановлюють так щоб після заливки металом вони не були міцно закріплені в формі і не чинили опір усадці виливка. Для досягнення рівномірного прогрівання форми товщину її стінок прагнуть зменшувати.

Аустенітну високомарганцеву сталь обробляють, в основному, наждаковими колами, тому ця операція повинна бути зведена до мінімуму використанням стрижнів оптимальної конструкції.

Необхідно враховувати, що рідка сталь інтенсивно реагує з формувальною сумішшю, тому потрібно ретельно підбирати формувальні матеріали.

Виливки з тонкими стінками масою до 100 кг виготовляють в сирих формах. Виливки масою до 350 кг виготовляють в підсушених формах, робоча поверхня яких покривається шаром протипригарного покриття на основі магнезиту або дистен-силіманіту. Форми для великих виливків слід сушити і фарбувати при температурі 400...450 °С.

До сталей для виготовлення вимірювальних інструментів пред'являють комплекс вимог, з яких найбільш важливими є висока зносостійкість, збереження стабільності лінійних розмірів і форми при експлуатації, висока чистота поверхні (висока здатність до полірування). Для ви-



мірjuвальних інструментів використовують високовуглецеві заевтектоїдні сталі і сталі з додатковим легуванням хромом, марганцем, вольфрамом і ванадієм. Висока твердість сталі забезпечує високу чистоту поверхні інструменту після полірування внаслідок рівномірно розподілених дрібних надлишкових карбідів і підвищення металургійної чистоти сталі.

Для виготовлення литого інструменту використовують переважно ті ж марки сталей, які піддають куванню або прокатуванню. Основною перевагою виготовлення інструменту методами лиття є мінімальні припуски на їх механічну обробку. Коефіцієнт використання металу, в залежності від способу лиття, може досягати 85...95%.

Другою перевагою є максимальне використання для виплавки сталей ламаних і зношених інструментів.

Однак практично всі інструментальні сталі мають незадовільні ливарні властивості: велику усадку, низькі рідкоплинність і теплопровідність, що сприяють росту зерна і коагуляції карбідів. Крім того, структура сталей в литих інструментах неоднорідна, особливо це стосується ледебуритних сталей, які зберігають сітку евтектики і великі карбіди, які за структурними ознаками відносять до евтектичних. Такі карбіди утворюються в складі евтектики під час твердіння металу. До них же відносять ту частку вторинних карбідів, які не розчиняються в аустеніті при температурах гарту.

Розміри, форма і розташування надлишкових карбідів визначаються умовами тверднення вилівка і майже не змінюються під час термічної обробки. Ці карбіди перешкоджають росту зерна при температурах гарту і підвищують зносостійкість сталі. Разом з тим надлишкові карбіди знижують міцність, в'язкість і разгаростійкість металу.

Вмістом вуглецю визначається і важлива властивість ливарних інструментальних сталей – рідкоплинність. Зі збільшенням в сталі вуглецю практична рідкоплинність підвищується, але одночасно зростає кількість карбідів і змінюються кількість і морфологія карбідної фази, що сприяє зниженню механічних властивостей і істотно впливає на зносостійкість сталей.

Наприклад, сталь P5M2ФЛ, яка має задовільні ливарні властивості, використовують для виготовлення інструментів складного профілю (свердла, черв'ячні фрези і ін.).

Однак ливарна сталь не може замінити катану, з якої виробляють інструменти невеликих перерізів, наприклад ножі, ріжучі пластини, свердла малих діаметрів і т.п.

Дуже важливим є правильний вибір технологічного процесу лиття. У зв'язку з високим вмістом вуглецю, температури заливання форм повинні бути зниженими 1500...1480 °С для сталей 100P8M3Л і P5M2ФЛ, і 1520...1530 °С – для сталі P12Ф3.

Швидкість охолодження вилівоків у формах повинна бути високою, особливо в інтервалі температур 1500...900 °С. Евтектична сітка в цьому випадку більш тонка і будова металу по перерізу виробу стає більш однорідною.

Для виготовлення литого інструменту використовують методи лиття в піщані, оболонкові, керамічні та металеві форми. Для виготовлення дрібного інструменту використовують лиття по виплавлюваних або моделях, що газифікуються. Інструменти, що мають форму тіл обертання, рекомендують виготовляти відцентровим литтям. На особливу увагу заслуговує електрошлакове лиття інструменту, що наближає його властивості до інструменту, отриманого з кованих заготовок. Виготовлення якісного литого інструменту різного призначення можливо тільки при використанні спеціальних технологічних прийомів:

- підігрівання ливарних форм перед заповненням їх сталлю;
- підвищення металостатичного напору;
- примусове прискорене охолодження виливків у формі і ін.

Отже, при виробництві литого інструменту центральну роль слід відводити ливарній формі.

## **5.2 Матеріали, обладнання**

Креслення виливків зі спеціальних сталей, технологічні карти виробництва виливків, нормативна документація; програмні продукти для створення тривимірних моделей виливків з ливниково-живильними системами і моделювання ливарних процесів.

## **5.3 Порядок виконання роботи**

1. Вивчити креслення деталі, виданий викладачем кожному студенту. Варіанти індивідуальних завдань представлені в Додатку. Виконати ескіз деталі в звіті з лабораторної роботи. Охарактеризувати матеріал, з якого буде виготовлятися виріб. Описати конфігурацію деталі.

2. Вибрати метод і спосіб виготовлення виливка.

3. Проаналізувати технологічність конструкції литої деталі для обраного способу лиття.

4. Вибрати розташування виливки у ливарній формі.

5. Визначити поверхні, що піддаються механічній обробці і позначити на ескізі виливка оброблювані поверхні.

6. Нанести на ескіз деталі формувальні ухили і закруглення в місцях, де це необхідно.

7. Визначити кількість стрижнів, їх кордони і знаки.

8. Спроекувати ливниково-живильну систему для подачі рідкого металу в форму і живлення виливка в процесі тверднення.

9. У звіті повинні бути вказані назва та ціль роботи, наведені загальні та стислі теоретичні відомості і порядок виконання роботи. Привести ескіз

деталі і нанести на неї всі необхідні елементи ливарної форми згідно з ГОСТ 3.1125-88 «Правила графічного виконання елементів ливарних форм і виливків». Описати всі етапи роботи, зазначені в пунктах 1...8. Привести в роботі заповнену технологічну карту. Зробити висновок про особливості розробки технологічного процесу виготовлення сталевих виливків.

#### **5.4 Контрольні питання**

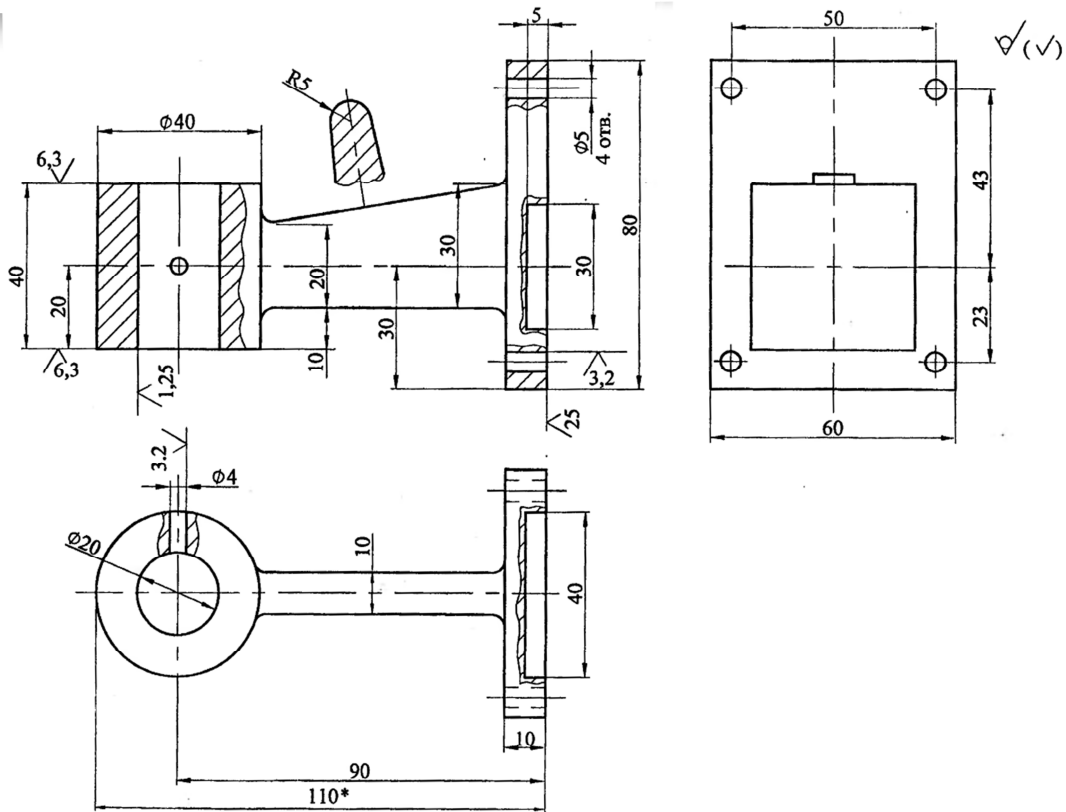
1. Розробка технологічного процесу виготовлення виливків.
2. Принципи оформлення креслення ЕЛФ.
3. Технологічність литих виробів.
4. Визначення норм точності вилівка і величини припусків на механічну обробку.
5. Проектування стрижнів і ливниково-живильної системи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стальное литье : монография / Г. Е. Федоров, М. М. Ямшинский, Е. А. Платонов, Р. В. Лютый ; ред.: Л. Н. Сыропоршнев. – К. : Випол, 2013. – 896 с.
2. Производство стальных отливок / Козлов Л. Я. и др. – М. : МИСИС, 2003. – 352 с.
3. **Можарин В. П.** Литейное производство : учебное пособие в двух книгах. Книга 1 / В. П. Можарин. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 408 с.
4. **Макаревич, О. П.** Виробництво виливків із спеціальних сталей / О. П. Макаревич, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов. – К. : Видавництво НТУУ „КПІ“, 2005. – 712 с.
5. **Назаратин В. В.** Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения / В. В. Назаратин. – М. : Машиностроение, 2006. – 234 с.
6. **Голод В. М.** Теория, компьютерный анализ и технология стального литья / В. М. Голод, В. А. Денисов ; под общ. ред. В. М. Голода. – СПб. : ИПЦ СПГУТД, 2007. – 610 с.
7. **Пикунов М. В.** Плавка металлов, кристаллизация сплавов, затвердевание отливок.: учеб. пособ. для вузов — М. : МИСИС, 1997. — 376 с.
8. ГОСТ 977–88. Отливки стальные. Общие технические условия.

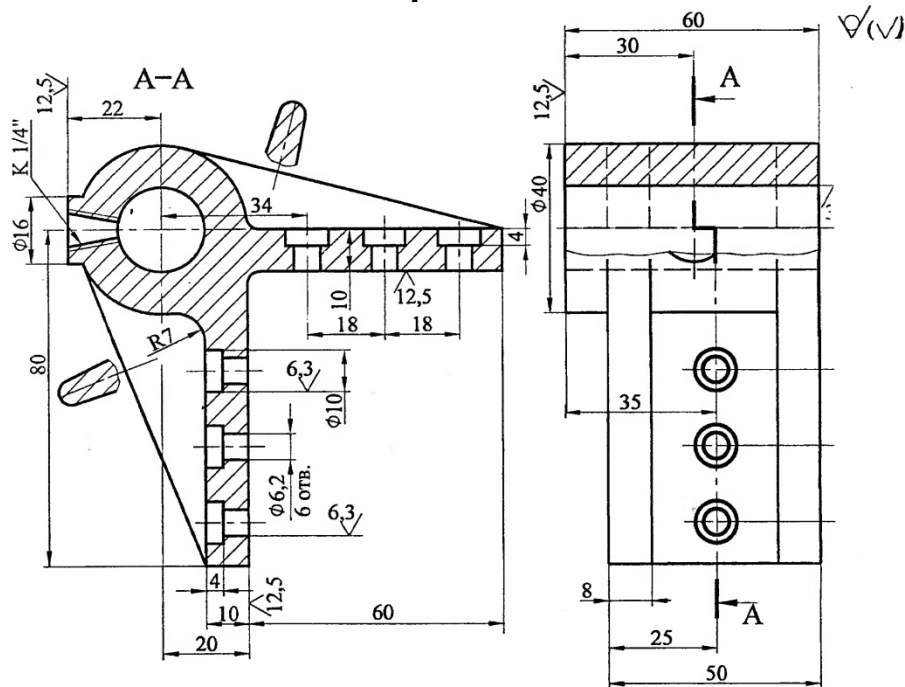
**ДОДАТОК А**  
**Варіанти завдань до лабораторної роботи 5**

**Варіант 1**



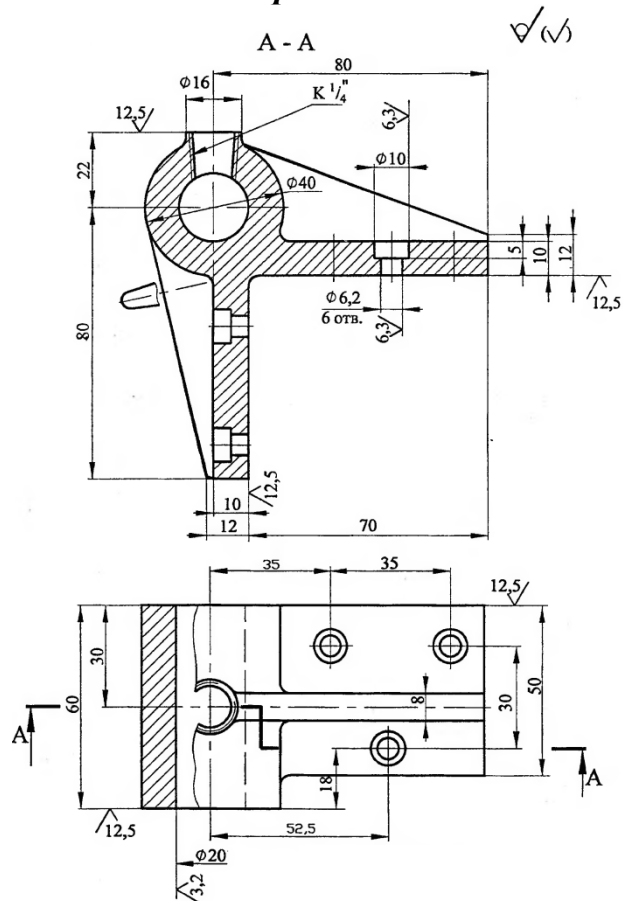
Виливок «Стойка»; матеріал виливка – сталь 40Х9СЛ

**Варіант 2**



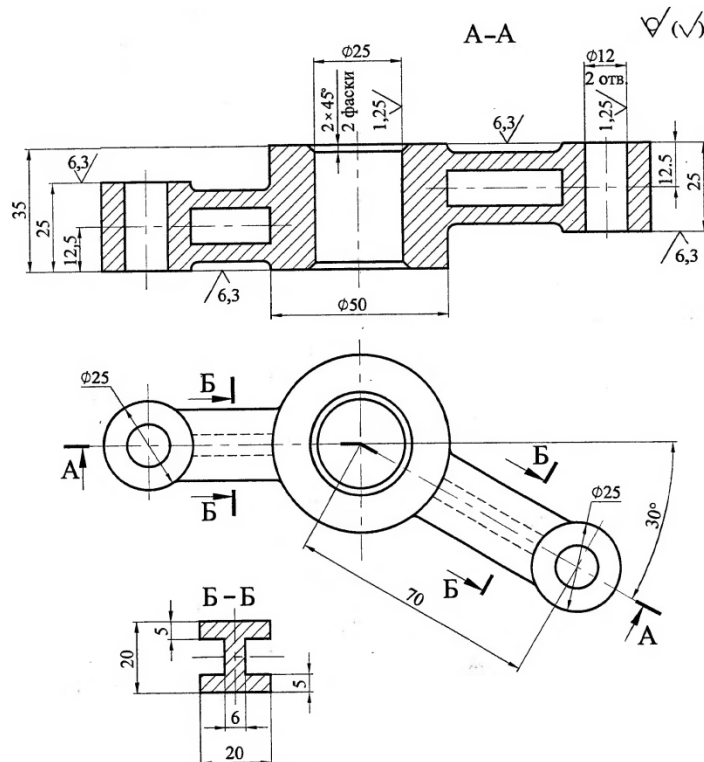
Виливок «Опора»; матеріал виливка – сталь 15Х23Н18Л

### Вариант 3



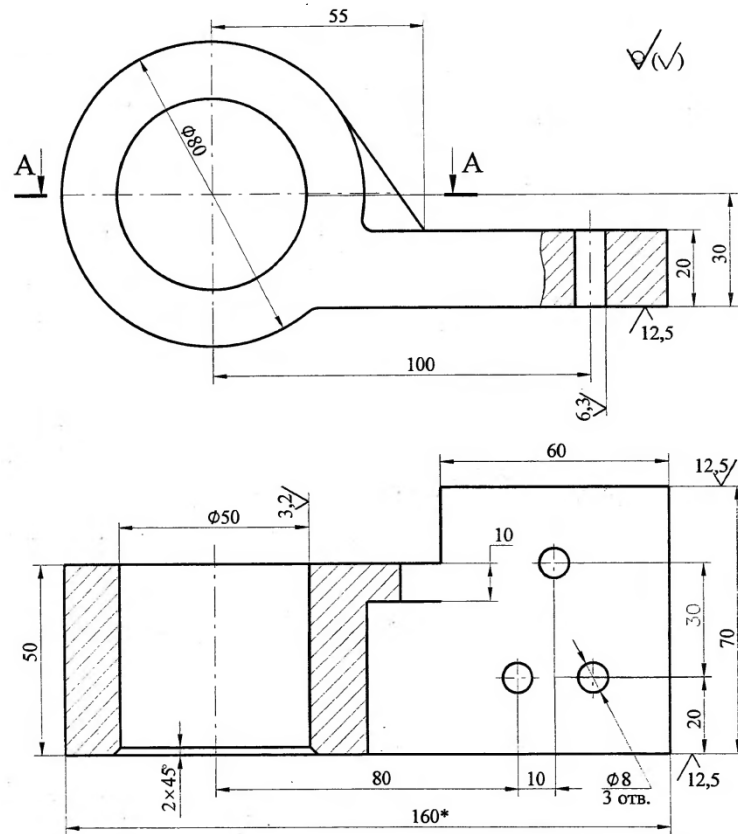
Виливок «Кронштейн»; матеріал виливка – сталь 10X18Н9Л

### Вариант 4



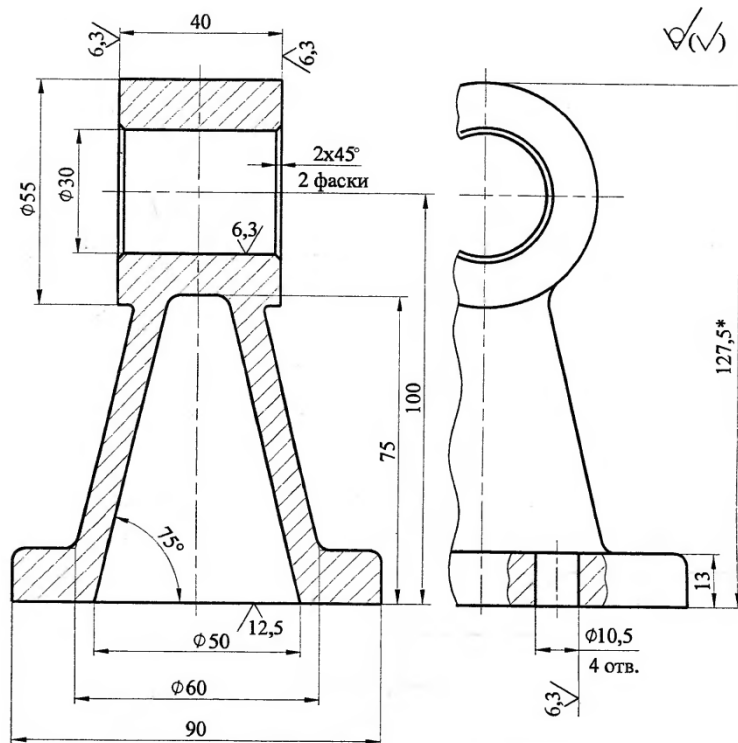
Виливок «Тяга»; матеріал виливка – сталь 31X19Н9МВБТЛ

**Варіант 5**



Виливок «Опора»; матеріал вилівка – сталь Х5МЛ

**Варіант 6**



Виливок «Стойка»; матеріал вилівка – сталь 20Х8ВЛ

*Навчальне видання*

## **Кристалізація та властивості сталі у виливках**

**Методичні вказівки  
до лабораторних робіт  
для студентів спеціальності 136 «Металургія»  
денної та заочної форм навчання**

Укладач      АБДУЛОВ Олександр Радікович

За авторським редагуванням

Комп'ютерне верстання      О. М. Болкова

12/2016. Формат 60 × 84/16.  
Ум. друк. арк. 2,33. Обл.-вид. арк. 2,26.

Видавець і виготівник  
Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК №1633 від 24.12.2003