

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

Центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ»

Зав. кафедрою МЛВ

к.т.н. доцент

\_\_\_\_\_Олександр КУЗИК

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем  
вищої освіти

на тему:

**«Дослідження механізмів утворення та методів запобігання  
гарячих тріщин у сталевих виливках на основі керування  
процесами структуроутворення»**

«Research into the mechanisms of formation and methods of preventing hot cracks  
in steel castings based on controlling structure formation processes»

**Виконав здобувач вищої освіти:**

II курсу, групи ПМ-24Мз-1

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 Прикладна механіка

\_\_\_\_\_ Олександр ПАНІШКО

**Керівник роботи:**

к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Олександр КУЗИК

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

Центральноукраїнський національний технічний університет

Центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Спеціальність 131 "Прикладна механіка"

Освітньо-професійна програма «Прикладна механіка»

---

### **ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувача кафедри \_\_\_\_\_

к.т.н. доцент, Олександр КУЗИК

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

## **ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Панішка Олександра Володимировича

1. Тема роботи: "Дослідження механізмів утворення та методів запобігання гарячих тріщин у сталевих виливках на основі керування процесами структуроутворення"

2. Керівник роботи Кузик Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент

Затверджені наказом вищого навчального закладу від "04"серпня 2025 року № 24-13

3. Строк подання роботи до захисту "9" грудня 2025 року

4. Метою магістерської роботи є встановлення закономірностей утворення гарячих тріщин у сталевих виливках та розроблення методів їх запобігання на основі керування процесами структуроутворення в період кристалізації.

Задачі роботи:

– проаналізувати сучасні наукові уявлення щодо умов і механізмів утворення гарячих тріщин у сталевих виливках у процесі кристалізації;

– дослідити макроструктурні ознаки гарячих тріщин та особливості їх розвитку у сталевих виливках з метою достовірної ідентифікації дефектів;

– вивчити мікроструктурні та фазові особливості металу в зонах формування гарячих тріщин;

– оцінити хімічну неоднорідність металу та характер міжкристалітної ліквідації в дефектних зонах залежно від відстані від поверхні виливка;

– проаналізувати вплив технологічних умов заливки та кристалізації на формування гарячих тріщин у сталевих виливках;

– обґрунтувати методи запобігання гарячим тріщинам шляхом керування процесами структуроутворення та умовами кристалізації.

#### 5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	доц., Олександр КУЗИК		
Розділ 2	доц., Олександр КУЗИК		
Розділ 3	доц., Олександр КУЗИК		

#### ***КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН***

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1	02.10	
2	Розділ 2	23.10	
3	Розділ 3	22.11	
4	Презентаційний матеріал	05.12	

Дата видачі завдання

«2» 09 2025 року

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року

\_\_\_\_\_ Олександр ПАНІШКО

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну магістерську роботу виконав здобувач вищої освіти Панішко Олександр Володимирович, студент заочної форми навчання II курсу, групи ПМ-24Мз-1, ОПП «Прикладна механіка» спеціальності 131 «Прикладна механіка», на тему «Дослідження механізмів утворення та методів запобігання гарячих тріщин у сталевих виливках на основі керування процесами структуроутворення». Робота складається з пояснювальної записки обсягом 77 сторінок формату А4, що містить 23 рисунки і 2 таблиці, а також ілюстративного матеріалу у вигляді 10 слайдів.

Магістерська робота присвячена дослідженню механізмів утворення гарячих тріщин у сталевих виливках та розробленню методів їх запобігання шляхом керування процесами структуроутворення в період кристалізації. Актуальність теми зумовлена високою небезпекою гарячих тріщин як кристалізаційних дефектів, що істотно знижують міцність, герметичність і надійність сталевих литих деталей та призводять до зростання виробничого браку.

У роботі узагальнено сучасні наукові уявлення щодо природи гарячих тріщин у сталевих виливках і показано, що їх формування відбувається в температурному інтервалі твердодірного стану внаслідок неузгодженого перебігу процесів кристалізації, структуроутворення та усадки металу. Встановлено, що вирішальну роль у цьому процесі відіграють особливості формування кристалічного каркаса та міжкристалічної рідкої фази, збагаченої ліквіційними домішками.

У межах методичної частини обґрунтовано комплексний підхід до дослідження гарячих тріщин, який поєднує макроструктурний аналіз дефектів, мікроструктурні дослідження околodefектних зон і оцінювання локальної хімічної неоднорідності металу. Це дозволяє достовірно ідентифікувати гарячі тріщини та встановити механізми їх виникнення і розвитку.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що гарячі тріщини мають переважно міжкристалітний характер і локалізуються в зонах термічних вузлів та підвищеного гальмування усадки. У дефектних зонах виявлено підвищену концентрацію ліквіційних елементів і неметалевих включень, що сприяє формуванню низькоплавких міжкристалітних фаз і зниженню міцності меж зерен у період кристалізації.

На основі отриманих результатів обґрунтовано напрями запобігання гарячим тріщинам у сталевих виливках, які полягають у керуванні процесами структуроутворення шляхом оптимізації хімічного складу сталі, температури заливки, швидкості охолодження, умов тепловідведення та конструктивно-технологічних рішень. Реалізація запропонованих підходів дозволяє підвищити тріщиностійкість сталевих виливків і зменшити виробничий брак.

Ключові слова: сталеві виливки, гарячі тріщини, кристалізація, структуроутворення, міжкристалітна ліквіація, усадка, тріщиностійкість.

## **ABSTRACT**

The master's qualification thesis is devoted to the study of the mechanisms of hot cracking formation in steel castings and the development of methods for their prevention based on controlling structure formation during the crystallization process. The relevance of the research is determined by the high danger of hot cracks as crystallization defects that significantly reduce the strength, tightness, and reliability of steel cast components and lead to increased production losses.

The thesis summarizes modern scientific concepts regarding the nature of hot cracks in steel castings and demonstrates that their formation occurs in the temperature range of the solid–liquid state as a result of the non-uniform interaction of crystallization, structure formation, and shrinkage processes. It is shown that the decisive factor in hot cracking is the formation of a rigid crystalline framework

combined with the presence of an intergranular liquid phase enriched with segregating elements.

A comprehensive methodological approach is substantiated, combining macrostructural analysis of defects, microstructural examination of crack-adjacent zones, and assessment of local chemical heterogeneity of the metal. This approach ensures reliable identification of hot cracks and allows clarification of the mechanisms of their initiation and development.

Experimental studies revealed that hot cracks in steel castings are predominantly intergranular in nature and are localized in thermal nodes and areas of increased shrinkage restraint. Elevated concentrations of segregating elements and non-metallic inclusions were found in defect zones, promoting the formation of low-melting intergranular phases and reducing grain boundary strength during crystallization.

Based on the obtained results, effective directions for preventing hot cracking are substantiated. These include controlling structure formation through optimization of steel chemical composition, pouring temperature, cooling rate, heat removal conditions, and design-technological solutions. The implementation of these measures contributes to reducing shrinkage localization, narrowing the brittleness temperature range, and improving the crack resistance of steel castings.

The results of the thesis have practical significance and can be used in the development and improvement of technologies for manufacturing critical steel castings, as well as for analyzing defect causes and selecting effective measures to prevent hot cracking in industrial practice.

**Keywords:** steel castings, hot cracking, crystallization, structure formation, intergranular segregation, shrinkage, crack resistance.

## ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УТВОРЕННЯ ГАРЯЧИХ ТРІЩИН У СТАЛЕВИХ ВИЛИВКАХ.....	10
1.1 Загальні закономірності утворення гарячих тріщин у сталевих виливках..	10
1.2 Механізми утворення гарячих тріщин у процесі кристалізації сталевих виливків.....	15
1.3 Вплив технологічних факторів на утворення гарячих тріщин.....	21
1.4 Вплив технологічних і конструктивних факторів на утворення гарячих тріщин.....	27
1.5 Критерії утворення гарячих тріщин у сталевих виливках.....	31
Висновки до розділу 1.....	36
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРЯЧИХ ТРІЩИН ТА СТРУКТУРНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ.....	39
2.1 Характеристика матеріалів і об'єктів дослідження.....	39
2.2 Методи оцінювання схильності сталевих виливків до гарячих тріщин.....	40
2.3 Методи дослідження процесів структуроутворення.....	42
2.4 Методичні підходи до керування процесами кристалізації.....	43
Висновки по розділу 2.....	44
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ГАРЯЧИХ ТРІЩИН У СТАЛЕВИХ ВИЛИВКАХ.....	45
3.1 Вплив технологічних умов заливки та кристалізації на механізм утворення гарячих тріщин.....	45
3.2 Макроструктурні особливості дефектів типу гарячих тріщин та навколодефектної зони.....	50
3.3 Хімічна неоднорідність та роль неметалевих включень у зоні гарячих тріщин.....	60
3.4 Мікроструктурні ознаки та критерії ідентифікації гарячих тріщин.....	65
3.5 Методичні підходи до прогнозування зон утворення гарячих тріщин у сталевих виливках.....	67
Висновки до розділу 3.....	71
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	73
Список використаних джерел.....	75

## ВСТУП

Литі сталеві виливки широко застосовуються у машинобудуванні, енергетиці, транспортному та гірничо-металургійному обладнанні завдяки поєднанню високої міцності, зносостійкості та технологічності. Водночас якість і надійність таких виробів значною мірою визначаються відсутністю дефектів кристалізаційного походження, серед яких особливо небезпечними є гарячі тріщини. Ці дефекти формуються на стадії затвердіння металу та суттєво знижують експлуатаційні властивості виливків, а в ряді випадків призводять до їх повного браку.

Актуальність дослідження гарячих тріщин зумовлена складністю механізмів їх виникнення, які визначаються сукупною дією термодинамічних умов кристалізації, хімічної неоднорідності металу та напружено-деформованого стану поверхневої корочки виливка. У процесі кристалізації в умовах обмеженої живильності та розвитку усадочних деформацій у металі формуються локальні розтягувальні напруження, що перевищують пластичні можливості матеріалу в інтервалі високих температур, унаслідок чого виникають гарячі тріщини.

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених проблемі гарячої тріщинуватості сталей, питання комплексного аналізу структурних ознак дефектних зон, локальної хімічної неоднорідності та напружено-деформованого стану металу в умовах кристалізації залишаються недостатньо систематизованими. У більшості випадків дослідження зосереджуються на окремих факторах, що ускладнює цілісне розуміння умов формування гарячих тріщин у реальних сталевих виливках.

Гарячі тріщини є одним із найбільш небезпечних і складних для ідентифікації дефектів сталевих виливків, що формуються в температурному інтервалі кристалізації та раннього тверднення металу. Їх виникнення зумовлене поєднанням структурних, термодинамічних і деформаційних чинників, зокрема розвитком дендритної структури, сегрегацією домішок по міждендритних прошарках, утворенням низькоплавких евтектик та обмеженою пластичністю

металу в інтервалі крихкості. Наявність гарячих тріщин істотно знижує герметичність, міцність і надійність литих деталей, а також призводить до зростання браку та виробничих витрат.

У зв'язку з цим актуальним є комплексне дослідження механізмів утворення гарячих тріщин у сталевих виливках та розроблення ефективних методів їх запобігання шляхом керування процесами структуроутворення під час кристалізації і тверднення металу.

Метою магістерської роботи є встановлення закономірностей утворення гарячих тріщин у сталевих виливках та розроблення методів їх запобігання на основі керування процесами структуроутворення в період кристалізації.

**Об'єкт дослідження** – процеси кристалізації та тверднення сталевих виливків.

**Предмет дослідження** – механізми утворення гарячих тріщин у сталевих виливках та вплив структурних і технологічних чинників на їх розвиток.

У роботі передбачається вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасні наукові уявлення щодо умов і механізмів утворення гарячих тріщин у сталевих виливках у процесі кристалізації;
- дослідити макроструктурні ознаки гарячих тріщин та особливості їх розвитку у сталевих виливках з метою достовірної ідентифікації дефектів;
- вивчити мікроструктурні та фазові особливості металу в зонах формування гарячих тріщин;
- оцінити хімічну неоднорідність металу та характер міжкристалітної ліквідації в дефектних зонах залежно від відстані від поверхні виливка;
- проаналізувати вплив технологічних умов заливки та кристалізації на формування гарячих тріщин у сталевих виливках;
- обґрунтувати методи запобігання гарячим тріщинам шляхом керування процесами структуроутворення та умовами кристалізації.

У магістерській роботі:

**Встановлено** закономірності утворення гарячих тріщин у сталевих виливках з урахуванням особливостей формування кристалічного каркаса та міжкристалітної рідкої фази в температурному інтервалі кристалізації.

**Уточнено** роль міжкристалітної ліквідації домішкових елементів у механізмі міжкристалітного руйнування та формуванні гарячих тріщин у сталевих виливках.

**Обґрунтовано** взаємозв'язок між макроструктурними ознаками гарячих тріщин і мікроструктурними особливостями околодефектних зон, що дозволяє підвищити достовірність ідентифікації кристалізаційних тріщин.

**Показано**, що нерівномірні умови кристалізації та локальне гальмування усадки є визначальними чинниками локалізації гарячих тріщин у зонах термічних вузлів сталевих виливків.

**Запропоновано** підхід до запобігання гарячим тріщинам, який базується на керуванні процесами структуроутворення шляхом оптимізації умов кристалізації та хімічного складу сталі.

# РОЗДІЛ 1

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УТВОРЕННЯ ГАРЯЧИХ ТРІЩИН У СТАЛЕВИХ ВИЛИВКАХ

### 1.1 Загальні закономірності утворення гарячих тріщин у сталевих виливках

На сучасному етапі дослідження механізмів утворення гарячих тріщин у сталевих виливках основна увага зосереджується на ролі процесів структуроутворення в твердорідкому стані та їх впливі на формування напружено-деформованого стану металу в період кристалізації. Саме особливості формування мікро- та макроструктури сталі — характер зародження і зрощення кристалів, утворення та безперервність кристалічного каркаса, наявність міжкристалічних рідких прошарків — визначають здатність вилівка компенсувати усадкові деформації без руйнування.

Гарячі тріщини утворюються у високотемпературному інтервалі кристалізації внаслідок локалізації напружень, яка є прямим наслідком неузгодженого перебігу процесів усадки та структуроутворення в різних зонах вилівка під час його охолодження в ливарній формі. Нерівномірність формування структури зумовлює відмінності реологічних властивостей сплаву, що призводить до концентрації напружень у ділянках раннього утворення кристалічного каркаса. У разі перевищення напруженнями граничних значень міцності сталі при розтягу за відповідних умов деформування (температура, швидкість деформації, схема напруженого стану, наявність концентраторів напружень) у тілі вилівка відбувається ініціювання гарячих тріщин.

У науковій літературі відсутній єдиний підхід до визначення температурного інтервалу утворення гарячих тріщин, що зумовлено складністю процесів структуроутворення в період кристалізації. У низці досліджень цей інтервал ототожнюють з ефективним інтервалом кристалізації, який обмежений температурою початку лінійної усадки та температурою солідус. В інших

роботах використовується поняття температурного інтервалу крихкості, що пов'язується з формуванням і розвитком кристалічного каркаса та різким зниженням пластичності металу.

Водночас повне ототожнення ефективного інтервалу кристалізації та температурного інтервалу крихкості є методологічно некоректним, оскільки ці інтервали не завжди відповідають однаковому структурному стану металу. Зокрема, внаслідок явища передусадкового розширення температура початку лінійної усадки може бути нижчою за температуру формування суцільного кристалічного каркаса. Таким чином, вирішальним чинником утворення гарячих тріщин є не лише температурний інтервал, а передусім стан і еволюція структури сталі в процесі кристалізації.

Верхня межа температурного інтервалу крихкості відповідає такому співвідношенню рідкої та твердої фаз, за якого відбувається зрощення первинних кристалів у безперервний кристалічний каркас, що різко обмежує можливість релаксації напружень. Нижня межа цього інтервалу визначається переходом механізму руйнування від крихкого до в'язкого та залежить від завершення формування структури твердого металу. Для окремих сталей ці межі можуть зміщуватися відносно лінії солідус, що ще раз підтверджує визначальну роль процесів структуроутворення.

Отже, механізм утворення гарячих тріщин у сталевих виливках безпосередньо пов'язаний із закономірностями формування структури в твердорідкому стані, а ефективні методи запобігання цьому дефекту мають базуватися на цілеспрямованому керуванні процесами структуроутворення шляхом оптимізації хімічного складу, температурно-часових параметрів кристалізації та умов тепловідведення, що повністю відповідає меті даної магістерської роботи.

За зовнішніми морфологічними ознаками гарячі тріщини у сталевих виливках являють собою звивисті, інколи переривчасті розриви металу, бічні поверхні яких мають виражений окиснений характер. У ливарному виробництві під цим дефектом, як правило, розуміють міжкристалітні тріщини різної

глибини, злам яких характеризується дрібнодендритною окисленою структурою. Такий характер руйнування безпосередньо вказує на формування дефекту в період кристалізації, коли структура металу ще не набула суцільності та визначається взаємним розташуванням кристалітів твердої фази і міжкристалічних рідких прошарків.

Відповідно до міжнародної класифікації ливарних дефектів, характерною ознакою дефекту типу С221 «гарячі тріщини» є розриви неправильної форми, що виникають у зонах дії підвищених напружень. Поверхні таких тріщин мають окислений вигляд і характеризуються дендритною морфологією, що свідчить про їх утворення за високих температур у твердорідкому стані металу. У зарубіжній практиці ідентифікації гарячих тріщин значна увага приділяється саме морфологічним та структурним ознакам, які дозволяють достовірно встановити механізм формування дефекту.

До характерних ідентифікаційних ознак гарячих тріщин належать рвана, розгалужена форма несплошності; наявність головної тріщини з численними короткими відгалуженнями міжзернистого характеру, що особливо чітко проявляється на полірованих шліфах під час мікроскопічного аналізу; дендритна морфологія поверхні тріщини; а також окислена поверхня зламу, яка для сталевих виливків зазвичай має вигляд темного матового шару. Сукупність цих ознак є надійним свідченням того, що дефект сформувався в умовах високотемпературної кристалізації, до завершення формування суцільної структури металу.

Як правило, гарячі тріщини формуються в зоні дії термічних вузлів вилівка — у ділянках, де в процесі кристалізації сплаву відбувається локальне випереджальне формування кристалічного каркаса і усадкові напруження досягають критичних значень. Водночас у практиці ливарного виробництва можливі випадки хаотичного розподілу гарячих тріщин у межах однієї партії виливків або їх прихованого розташування в тілі вилівка, що ускладнює виявлення дефекту без структурного аналізу.

Визначальною умовою утворення гарячих тріщин є схильність сплаву до цього виду дефекту, яка зумовлюється наявністю температурного інтервалу затвердіння, величиною ливарної усадки та особливостями формування структури в твердорідкому стані. У зв'язку з цим ключовим напрямом запобігання утворенню гарячих тріщин у сталевих виливках є цілеспрямоване керування процесами структуроутворення, зокрема шляхом оптимізації хімічного складу сталі, температурно-часових параметрів кристалізації та умов тепловідведення. Такий підхід забезпечує узгоджене формування кристалічного каркаса, зниження локалізації напружень і, відповідно, підвищення тріщиностійкості виливків, що повністю відповідає меті даної магістерської роботи.

У вітчизняних роботах з ливарного виробництва, за аналогією з металургійними та зварювальними процесами, гарячі тріщини часто називають кристалізаційними. Відмінною особливістю ливарних кристалізаційних гарячих тріщин є міжкристалітний характер руйнування, що проходить уздовж меж дендритних зерен, унаслідок чого злам має нерівну, хвилясту поверхню з виступами та западинами.

Відповідно до вимог нормативного документа ДСТУ 19200-80 «Виливки з чавуну і сталі. Терміни та визначення дефектів», гарячі тріщини у ливарному виробництві визначаються як дефект у вигляді розриву або надриву тіла виливка усадочного походження, що виникає в температурному інтервалі затвердіння. Характерною ознакою таких тріщин є нерівна окиснена поверхня, на якій часто спостерігаються дендритні сліди. Таким чином, у визначенні підкреслюється саме усадочний механізм утворення гарячих тріщин.

Значний практичний інтерес становлять роботи, у яких гарячі тріщини розглядаються не лише як окремий дефект, а як результат поєднання конструктивних, технологічних і структурних чинників, що визначають рівень локалізації усадково-термічних напружень у двофазній зоні. У ряді праць запропоновано деталізовані типології гарячих тріщин за умовами їх формування (масивність виливка, характер гальмування усадки, геометричні концентратори,

хімічний склад і технологія плавки), що дозволяє пов'язувати морфологію дефекту з конкретними механізмами руйнування в інтервалі кристалізації. Водночас у вітчизняній навчально-методичній літературі гарячі тріщини систематизуються в межах загальної класифікації дефектів виливків і розглядаються як розриви тіла відливки, чутливі до податливості форми/стрижнів та режимів охолодження, що є важливим для вибору технологічних заходів керування процесами структуроутворення з метою запобігання дефекту [1-6].

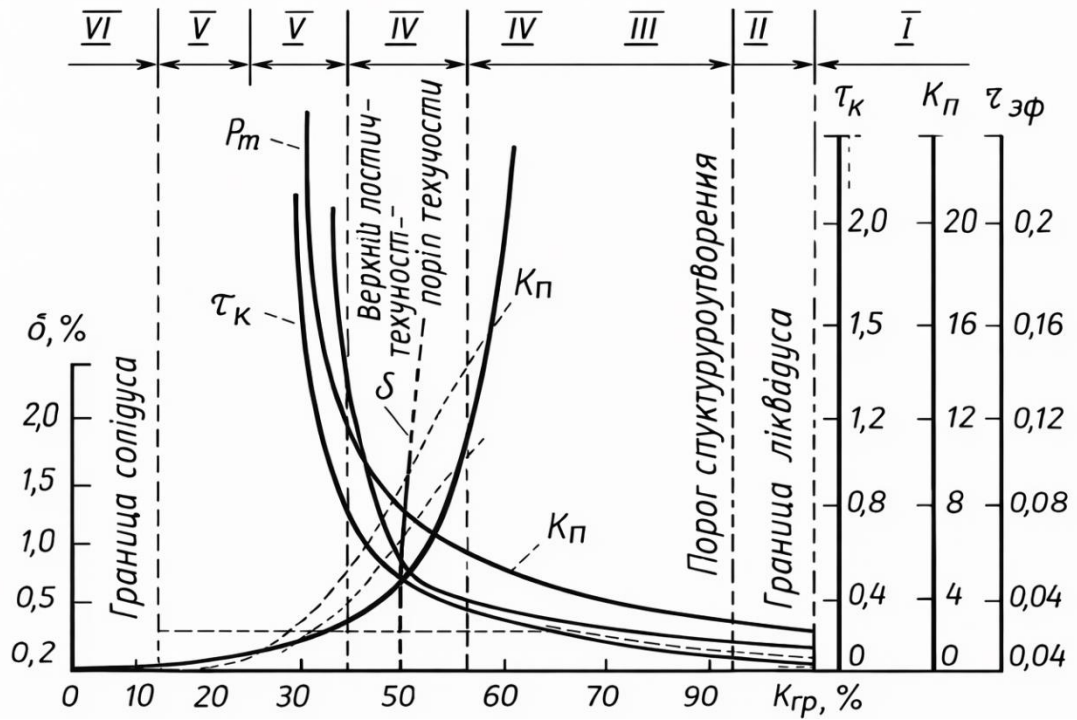
## **1.2 Механізми утворення гарячих тріщин у процесі кристалізації сталевих виливків**

Принциповою відмінністю гарячих тріщин від інших видів дефектів є те, що вони виникають у вузькому температурному інтервалі кристалізації, за якого сталевий розплав характеризується різкою зміною структурно-механічних властивостей унаслідок зростання частки твердої фази. У цьому інтервалі формується кристалічний каркас, що обмежує рухливість рідкої фази та призводить до накопичення усадочних напружень.

Для аналізу механізмів утворення гарячих тріщин доцільно розглядати зміну структурно-механічних характеристик сплаву у високотемпературному інтервалі кристалізації зі зростанням об'ємної частки твердої фази. Особливе значення має перехідна зона між рідко-твердим і твердо-рідким станом, яка розташована між границею умовної текучості та границею початку лінійної усадки.

Границя умовної текучості відповідає такій концентрації твердої фази, за якої сплав втрачає здатність до вільного плину під дією зсувних навантажень. У цей момент кристаліти твердої фази починають взаємно заклинюватися, утворюючи початковий кристалічний каркас, що супроводжується виникненням внутрішніх напружень.

Для пояснення механізмів утворення гарячих тріщин доцільно проаналізувати зміну структурно-механічних характеристик сталевого розплаву у високотемпературному інтервалі кристалізації зі зростанням частки твердої фази. Узагальнену модель будови металевої рідини та еволюції її фізико-механічних властивостей у процесі затвердіння наведено на рисунку 1.1.



Рисунка 1.1 – Зміна структурно-механічного стану сталевого розплаву в процесі кристалізації в температурному інтервалі утворення гарячих тріщин

На рисунку 1.1 наведено узагальнену схему еволюції структурного та реологічного стану сталевій системи в процесі переходу від рідкого до твердого стану залежно від об'ємної частки твердої фази. Схема відображає взаємозв'язок між фазовим станом, характеристиками рідкої та твердої фаз і зміною деформаційних та міцнісних параметрів металу у високотемпературному інтервалі кристалізації.

У початковій області (I–II) метал перебуває переважно в рідкому стані, а тверда фаза представлена ізольованими первинними кристалами, повністю змоченими рідкою фазою. У цьому інтервалі система характеризується високою плинністю, відсутністю механічної міцності та можливістю компенсації усадкових деформацій за рахунок вільного переміщення розплаву.

У перехідній зоні (III–IV) зі зростанням частки твердої фази відбувається інтенсивне зближення та взаємодія кристалітів, формуються частково з'єднані кристалічні агрегати. Рідка фаза втрачає суцільність, з'являється зв'язана капілярна пористість, різко знижується проникність міжкристалічного простору. Саме в цьому інтервалі спостерігається істотне зростання в'язкості, падіння здатності до фільтраційного живлення та початок локалізації усадкових деформацій.

Найбільш небезпечною з точки зору утворення гарячих тріщин є зона (IV–V), яка відповідає формуванню суцільного кристалічного каркаса. У цьому стані тверда фаза утворює неперервну просторову сітку, а рідка фаза зберігається лише у вигляді тонких міжкристалітних прошарків. Метал поводить як капілярно-пористе тіло з мінімальною пластичністю та різко зростаючою жорсткістю. За наявності гальмування усадки з боку ливарної форми або нерівномірного тепловідведення в цій зоні виникають максимальні розтягувальні напруження, що при перевищенні локальної міцності кристалічного каркаса призводять до міжкристалітного руйнування і формування гарячих тріщин.

Після досягнення температури солідус (зона VI) система переходить у повністю твердий стан, що супроводжується різким зростанням міцності та відновленням пластичності металу. У цьому інтервалі ймовірність утворення гарячих тріщин суттєво зменшується, а подальші дефекти мають вже іншу природу.

Таким чином, наведена схема наочно демонструє, що схильність сталевих виливків до утворення гарячих тріщин визначається не лише величиною усадки, а передусім особливостями структуроутворення в двофазній області кристалізації. Керування процесами формування кристалічного каркаса, шириною небезпечного інтервалу та проникністю міжкристалічного простору є одним з ключових напрямів запобігання утворенню гарячих тріщин у сталевих виливках, що повністю узгоджується з метою даної магістерської роботи.

Деформаційна здатність сталевого сплаву в температурному інтервалі утворення гарячих тріщин (ТЮГТ) визначається сумарним внеском пружної складової, пружного післядіяння та пластичної деформації. Пластична деформація, яка значною мірою контролюється товщиною, просторовим розташуванням і протяжністю рідких міжкристалітних прошарків уздовж меж кристалітів, зменшується зі зниженням об'ємної частки рідкої фази в процесі кристалізації. Поблизу нижньої межі ТЮГТ деформаційна здатність сталевого виливка визначається переважно величиною граничної пружної деформації, оскільки зі сформуванням суцільного каркаса кристалітів твердої фази метал набуває несівної здатності, яка зростає в усьому температурному інтервалі утворення гарячих тріщин.

Наявність рідких міжкристалітних прошарків, збагачених елементами ліквіації, істотно впливає на механічні властивості сталі за високих температур. Роль цієї рідкої фази є двоїстою. З одного боку, змочування меж кристалітів рідкою фазою призводить до зниження міжзеренної міцності внаслідок адсорбційного послаблення зв'язків (ефект Ребіндера), що сприяє крихкому міжкристалітному руйнуванню. З іншого боку, наявність рідкої фази створює передумови для реалізації механізмів міжзеренної деформації та залечування гарячих тріщин шляхом фільтрації розплаву в зоні локального розкриття.

За даними низки досліджень, ключову роль у механізмі утворення гарячих тріщин відіграють два основні параметри рідкої фази: товщина міжкристалітного рідкого прошарку та величина поверхневого натягу на межі «рідка фаза – кристаліт». Характер розподілу рідкої фази між кристалітами визначається величиною міжфазного натягу. За низьких значень міжфазного натягу рідка фаза рівномірно змочує поверхні зерен, формуючи суцільні прошарки, тоді як за високих значень вона локалізується у вигляді ізольованих включень між зернами. В останньому випадку збільшується площа безпосереднього контакту між кристалітами, що підвищує опір матеріалу дії розтягувальних напружень.

Робота утворення міжкристалітної тріщини за умов змочування кристалітів рідкою фазою може бути описана співвідношенням [27]:

$$A = 2\sigma_{S-L} - \sigma_S = \sigma_S \left( \frac{1}{\cos\frac{\theta}{2}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

де,  $A$  – робота утворення тріщини, Дж;  $\sigma_S$  – поверхнева енергія меж зерен, Дж/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{S-L}$  – міжфазна енергія на межі «тверда фаза – рідина», Дж/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – двогранний кут включення рідкої фази.

З'ясовано що, у певний момент часу в локальній зоні вилівка напруження досягають критичного значення, співрозмірного із силами зчеплення між зернами, внаслідок чого міжкристалітна рідка прошарка розривається, ініціюючи утворення гарячої тріщини. Силу, необхідну для розриву міжкристалітної рідкої прошарки за умови її товщини не меншої ніж  $10^{-5}$  см, можна оцінити за виразом:

$$P = \frac{2\alpha F}{1000gb}, \quad (1.2)$$

де,  $P$  – сила розриву прошарку, Н;  $\alpha$  – поверхневий натяг на межі «рідка фаза – кристал», Дж/м<sup>2</sup>;  $F$  – площа поперечного перерізу зони тріщиноутворення, м<sup>2</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $b$  – товщина міжкристалітного прошарку, м.

Із наведеного співвідношення випливає, що зменшення товщини міжкристалітної рідкої прошарки є одним із ключових чинників підвищення тріщиностійкості сталевих виливків. Товщина цієї прошарки насамперед визначається розміром зерна та ступенем чистоти сплаву. За умов формування дрібнозернистої структури та зниження вмісту домішок істотно зростає сумарна поверхня зерен, унаслідок чого кількість рідкої фази, що припадає на одиницю поверхні, зменшується, що приводить до зменшення товщини міжкристалітних рідких прошарків. При цьому саме товщина прошарки має більш вирішальний вплив на тріщиностійкість, ніж величина поверхневого натягу на межі «кристал–розплав».

У низці випадків процес формування гарячих тріщин супроводжується їх частковим або повним залічуванням. Залічування полягає у заповненні рідкою

фазою міжкристалітних порожнин і надривів, що утворюються під час проходження сплавом твердо-рідкого інтервалу, переважно поблизу верхньої межі температурного інтервалу утворення гарячих тріщин. Переміщення рідкої фази з перегрітих зон у двофазну область зумовлюється сукупною дією металостатичного та капілярного тиску, тиску стискальної твердої кірки, а в окремих випадках — і атмосферного тиску, а також умовами фільтрації міжкристалітної рідини, які визначаються протяжністю двофазної зони, в'язкістю рідкої фази, розміром зерна, шириною інтервалу кристалізації та рівнем деформацій.

Після припинення масопереносу маточного розплаву компенсація усадки та залічування гарячих тріщин можливі лише за рахунок фільтрації міжзеренної рідини через канали між твердими кристалітами. У цьому випадку двофазну область доцільно розглядати як капілярно-пористе середовище, пори та канали якого заповнені рідкою фазою, причому їх характерні розміри зменшуються від центральних зон виливка до периферійних.

Хімічний склад міжкристалітної рідкої фази та рідкого металу з центральної зони виливка, який відповідає середньому вихідному складу сплаву, відрізняється внаслідок зональної ліквідації. У процесі кристалізації формується трикомпонентна система, що складається з:

- міжкристалітної рідкої фази, збагаченої ліквідаційними компонентами маточного розплаву;
- твердих кристалітів, які містять знижений вміст ліквіруючих елементів;
- маточного розплаву, хімічний склад якого є більш наближеним до складу твердих кристалітів, ніж склад міжкристалітної рідини.

У зв'язку з цим міжфазний поверхневий натяг на межі «маточний розплав – тверді кристаліти»  $\sigma_{S-L1}$  є меншим, ніж міжфазний натяг на межі «кристаліти – міжкристалітна рідина»  $\sigma_{S-L2}$ . Крайовий кут змочування визначається співвідношенням поверхневих натягів і міжфазної енергії на межі поділу фаз і описується залежністю [9]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_S - \sigma_{S-L}}{\sigma_L}, \quad (1.3)$$

де,  $\theta$  – крайовий кут змочування;  $\sigma_S$  – поверхневий натяг твердої фази, Дж/м<sup>2</sup>;  $\sigma_L$  – поверхневий натяг рідкої фази, Дж/м<sup>2</sup>;  $\sigma_{S-L}$  — міжфазна енергія на межі «тверда фаза – рідина», Дж/м<sup>2</sup>.

З наведеного співвідношення випливає, що змочуваність поверхні зростаючих кристалів маточним розплавом є вищою, ніж змочуваність цих самих поверхонь міжкристалітною рідиною, яка накопичується в порах капілярно-пористого середовища.

Умови переміщення рідкої фази в двофазній області визначаються капілярним тиском, величина якого зростає зі зменшенням радіуса пор і каналів у твердо-рідкому інтервалі кристалізації [7-9]:

$$p_{\text{кап}} = \frac{2\sigma}{r} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2), \quad (1.4)$$

де,  $p_{\text{кап}}$  – капілярний тиск, Па;  $\sigma$  – поверхневий натяг рідкої фази, Дж/м<sup>2</sup>;  $r$  – радіус пори або каналу в двофазній області, м;  $\theta_1$  – кут змочування кристалів маточним розплавом;  $\theta_2$  – кут змочування кристалів міжкристалітною рідиною, збагаченою лікватами.

Таким чином, наведені співвідношення підтверджують, що вирішальним чинником тріщиностійкості є не абсолютний рівень поверхневого натягу, а геометрія та товщина міжкристалітних рідких прошарків, які безпосередньо залежать від зернистості структури.

Таким чином, зі зменшенням ширини тріщини та зі зростанням поверхневого натягу рідкої фази створюються більш сприятливі умови для її залічування. Для характеристики поведінки сплавів у температурному інтервалі крихкості у зварювальному виробництві застосовують мікроструктурний критерій, що ґрунтується на визначенні кута зрощення зустрічних кристалітів ( $\theta/2$ ). У металургійній практиці для ідентифікації гарячих тріщин широко використовують металографічні методи, зокрема з використанням реактивів

Стеда та інших мідьвмісних травників, які забезпечують виявлення первинної дендритної будови сплаву в околodefектній зоні.

### **1.3 Вплив технологічних факторів на утворення гарячих тріщин**

Поява гарячих тріщин у сталевих виливках зумовлюється сукупною дією технологічних чинників, пов'язаних із параметрами виплавки та позапічної обробки металу, умовами заливання розплаву у форму, режимами охолодження і кристалізації, взаємодією металу з ливарною формою та стрижнями, а також конструктивною технологічністю виробу. Значна кількість як контрольованих, так і неконтрольованих параметрів ускладнює однозначну оцінку їхнього впливу на утворення гарячих тріщин, у зв'язку з чим доцільним є виділення факторів, що мають визначальний вплив на формування структури та тріщиностійкість сталевих виливків.

Одним із ключових чинників, що визначають схильність сталі до утворення гарячих тріщин, є її хімічний склад. Він безпосередньо впливає як на механічні властивості сплаву в твердорідкому стані, так і на величину лінійної усадки та ширину температурного інтервалу кристалізації. У практиці виготовлення відповідальних сталевих виливків хімічний склад металу, як правило, жорстко регламентується нормативною документацією. Водночас навіть незначні коливання вмісту окремих елементів у межах марочного складу можуть суттєво змінювати характер структуроутворення в процесі кристалізації та, відповідно, рівень тріщиностійкості сталі.

Узагальнений вплив основних хімічних елементів на схильність вуглецевих сталей до утворення гарячих тріщин наведено на рисунок 1.2, де показано взаємозв'язок між хімічним складом, особливостями формування міжкристалітної рідкої фази та механічною поведінкою сплаву в температурному інтервалі утворення гарячих тріщин.

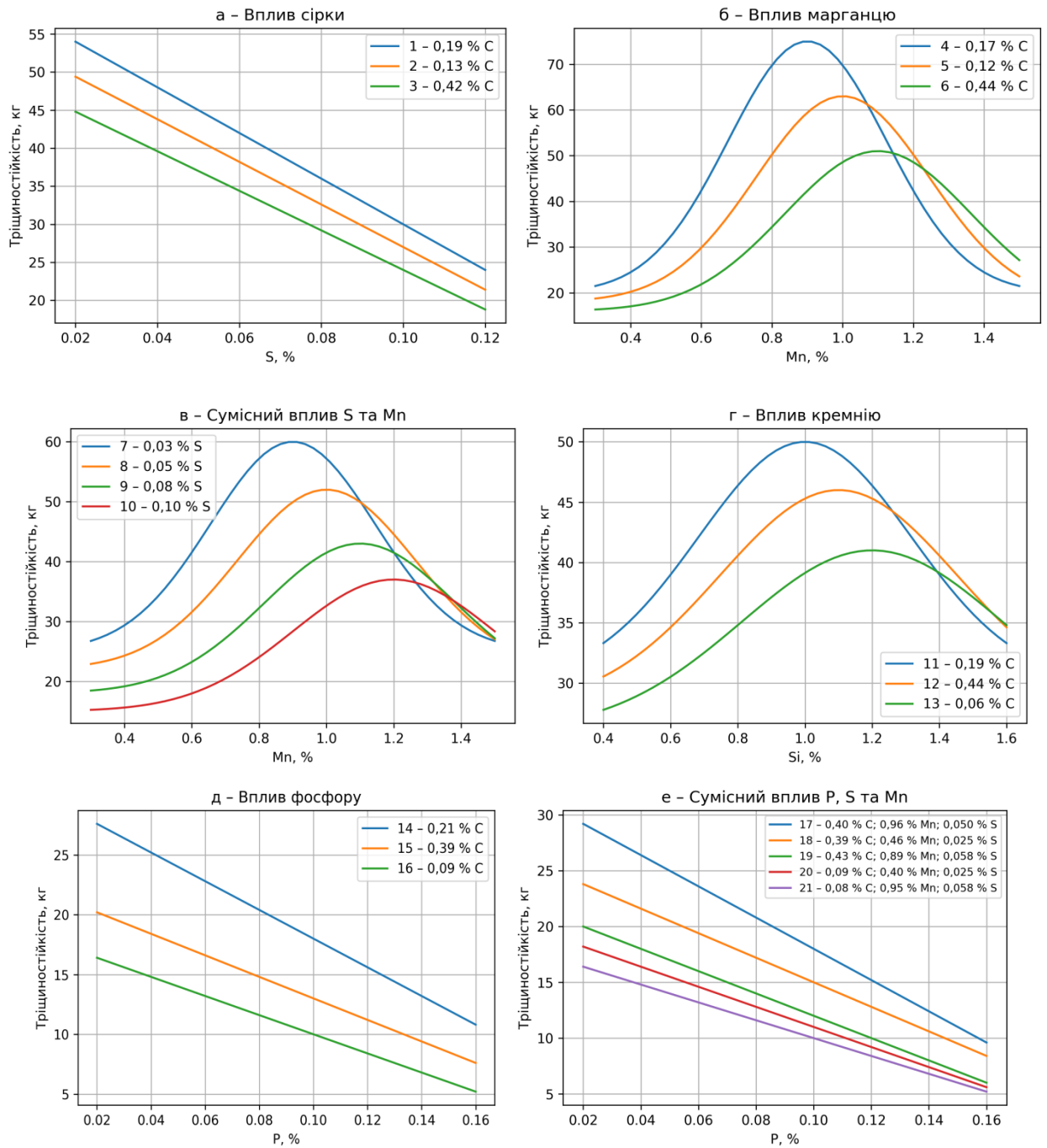


Рисунок 1.2 – Залежність тріщиностійкості вуглецевої сталі при температурі заливки на 50 °С вище точки ліквідусу від: а – вмісту сірки; б – вмісту марганцю; в – впливу сірки та марганцю; г – вмісту кремнію; д – вмісту фосфору; е – фосфору, сірки та марганцю.

Наведені на рисунку 1.2 залежності узагальнюють вплив основних хімічних елементів на тріщиностійкість вуглецевих сталей у температурному інтервалі утворення гарячих тріщин та відображають їх роль у процесах структуроутворення в твердорідкому стані. Аналіз кривих свідчить, що

схильність сталевих виливків до утворення гарячих тріщин визначається не ізольованим впливом окремих елементів, а їх взаємодією через формування міжкристалітної рідкої фази, ширину температурного інтервалу кристалізації та умови зрощення кристалічного каркаса.

Залежності, наведені на рисунку 1.2, а, демонструють виражене зниження тріщиностійкості зі збільшенням вмісту сірки. Це зумовлено її інтенсивною ліквідацією в міжкристалітні області та утворенням низькоплавких евтектичних плівок, які зберігають рідкий стан у широкому температурному інтервалі і різко знижують міжзернову міцність у період формування кристалічного каркаса. За цих умов навіть незначні усадкові деформації призводять до міжкристалітного руйнування.

Вплив марганцю (рисунок 1.2, б) має екстремальний характер. Підвищення його вмісту до певного оптимального рівня супроводжується зростанням тріщиностійкості, що пояснюється зв'язуванням сірки у вигляді сульфідів марганцю та зменшення кількості рідкої фази, збагаченої ліквідаційними домішками. Подальше збільшення вмісту марганцю призводить до ускладнення структуроутворення та розширення температурного інтервалу кристалізації, внаслідок чого ефект підвищення тріщиностійкості знижується.

Сумісний вплив сірки та марганцю (рисунок 1.2, в) підтверджує регулюючу роль марганцю щодо дії сірки. За достатнього співвідношення Mn/S спостерігається зменшення негативного впливу сірки на тріщиностійкість, що пов'язано з порушенням суцільності міжкристалітних рідких прошарків та підвищенням міцності кристалічного каркаса в твердорідкому стані.

Залежності, наведені на рисунку 1.2, г, свідчать, що вплив кремнію на тріщиностійкість має помірний характер і проявляється через зміну умов кристалізації та морфології дендритної структури. Оптимальний вміст кремнію сприяє формуванню більш рівномірної структури та зменшенню локалізації усадкових напружень, тоді як його надлишок може розширювати температурний інтервал кристалізації та погіршувати умови релаксації напружень.

Фосфор є одним із найбільш небезпечних елементів з точки зору утворення гарячих тріщин (рис. 1.2, д). Зі зростанням його вмісту спостерігається різке зниження тріщиностійкості, що пов'язано з інтенсивною міжкристалітною ліквідацією та формуванням низькоплавких фосфідних евтектик, які істотно знижують міжзернову міцність у температурному інтервалі кристалізації.

Найбільш несприятливі умови для формування тріщиностійкої структури реалізуються за сумісної дії фосфору, сірки та марганцю (рисунок 1.2, е). У цьому випадку відбувається накопичення значної кількості рідкої фази в міжкристалітному просторі, розширюється температурний інтервал утворення гарячих тріщин та різко зростає схильність сталі до міжкристалітного руйнування в період формування кристалічного каркаса.

Таким чином, аналіз наведених залежностей підтверджує, що тріщиностійкість сталевих виливків у температурному інтервалі утворення гарячих тріщин визначається сукупною дією хімічних елементів через їх вплив на процеси структуроутворення. Це обґрунтовує доцільність цілеспрямованого керування хімічним складом сталі як одного з ключових методів запобігання утворенню гарячих тріщин у сталевих виливках.

Усунення наявних у літературі суперечностей щодо впливу вмісту вуглецю на тріщиностійкість сталей можливе за умови врахування ступеня гальмування усадки, який кількісно оцінюється коефіцієнтом гальмування усадки  $K_T$ . Даний коефіцієнт визначають як відношення величини вільної усадки до дійсної (утрудненої) усадки вилівка та використовують як узагальнений параметр, що характеризує інтенсивність накопичення усадкових напружень у процесі кристалізації. Зі збільшенням  $K_T$  швидкість зростання усадкових напружень підвищується, при цьому залежність між цими величинами має близький до прямопропорційного характер.

Визначальною умовою утворення гарячих тріщин є випереджальний розвиток усадкових напружень порівняно з формуванням механічних властивостей сталі в твердорідкому стані. За значень коефіцієнта гальмування

усадки  $K_T \leq 1,8$ , що відповідає дійсній усадці понад 1,2...1,3 %, сталі перитектичного складу демонструють вищу стійкість до утворення гарячих тріщин, ніж сталі з іншим вмістом вуглецю. Натомість за  $K_T \geq 1,8$ , коли величина дійсної усадки зменшується до 1,2...1,3 %, тріщиностійкість сталей істотно знижується.

Аналіз кінетичних діаграм затвердіння показує, що максимум на кривих відповідає вмісту вуглецю близько 0,18 %, за якого спостерігається найбільш інтенсивний розвиток перитектичної реакції. Для сталей з вмістом вуглецю близько 0,2 % охолодження відбувається по лінії М–М у безпосередній близькості до перитектичної точки *I* (рисунок 1.3).

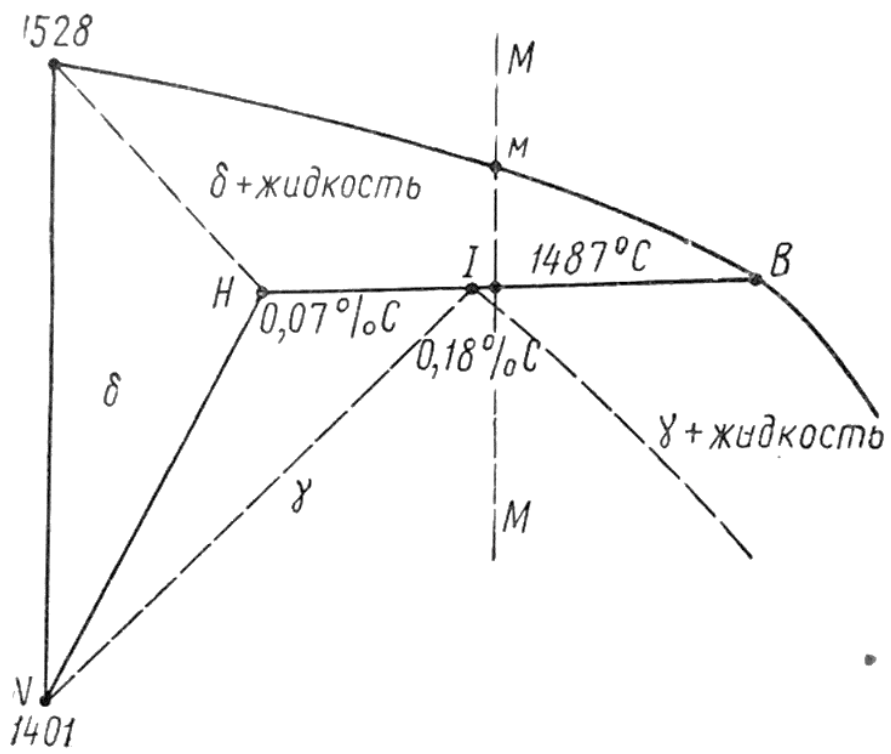


Рисунок 1.3 – Верхній кут діаграми стану системи Fe–C

У точці *M* розпочинається кристалізація твердого розчину вуглецю в δ-залізі (Feδ). Подальше охолодження до перитектичної лінії *HIB* призводить до перетворення Feδ → Feγ, яке відбувається приблизно за наявності близько 50 % твердої δ-фази, при цьому рідкий розплав у процесі затвердіння переходить в аустеніт.

Перитектичне перетворення  $Fe\delta \rightarrow Fe\gamma$  супроводжується різким зменшенням об'єму металу, що зумовлює значну лінійну усадку виливка, співрозмірну з повною величиною до перлітної усадки в температурному інтервалі крихкості. За умов обмеження вільної усадки це створює сприятливі передумови для інтенсивного наростання розтягувальних напружень у твердорідкій області та ініціювання гарячих тріщин.

Сталі перитектичного складу характеризуються більш розвиненою областю твердорідкого стану в процесі кристалізації, що істотно впливає на умови формування їх структурно-механічних властивостей. За таких умов міжкристалітні рідкі прошарки, локалізовані між дендритами та вздовж їх осей, проникають глибше в область твердого металу, що зумовлює суттєве зниження механічних властивостей на початкових стадіях затвердіння порівняно зі сталями з іншим вмістом вуглецю. На завершальному етапі кристалізації механічні властивості перитектичних сталей зростають інтенсивніше, оскільки такі сталі проходять ефективний інтервал крихкості за коротший проміжок часу, що зменшує тривалість перебування металу в найбільш небезпечному з точки зору тріщиноутворення стані.

Збільшення коефіцієнта гальмування усадки призводить до зміщення схильності сталі до утворення гарячих тріщин у напрямку вищих температур, ближче до області початку кристалізації, тоді як зменшення його зумовлює зміщення небезпечної зони в бік завершальних стадій затвердіння. Це свідчить про визначальну роль умов обмеження усадки у формуванні напружено-деформованого стану металу в температурному інтервалі утворення гарячих тріщин та підтверджує доцільність керування цими умовами з метою підвищення тріщиностійкості сталевих виливків.

Зміщення вмісту вуглецю в межах марочного складу в бік підвищених значень під час виготовлення фасонних виливків із низьковуглецевих сталей, схильних до утворення гарячих тріщин, дозволяє знизити ймовірність їх виникнення за рахунок більш сприятливого перебігу процесів структуроутворення. Додаткове підвищення тріщиностійкості забезпечується

введенням елементів, що сприяють подрібненню зерна при первинній кристалізації та зміцненню меж зерен унаслідок утворення дисперсних карбідів, нітридів та інших сполук (титан, ванадій). Це приводить до формування більш стійкого кристалічного каркаса та зменшення схильності сталей до міжкристалітного руйнування в температурному інтервалі утворення гарячих тріщин.

Поряд із металургійними чинниками, істотний вплив на утворення гарячих тріщин мають технологічні та конструктивні фактори, які визначають умови тепловідведення, характер усадки та напружено-деформований стан вилівка в процесі затвердіння.

#### **1.4 Вплив технологічних і конструктивних факторів на утворення гарячих тріщин**

Конфігурація вилівка є одним із визначальних технологічних чинників, що впливають на його схильність до утворення гарячих тріщин. Геометрія вилівка, наявність стрижнів, виступаючих елементів форми та місць підведення розплаву визначають особливості процесу затвердіння й характер розподілу усадкових напружень у тілі вилівка. Під час проектування ливарних деталей доцільно прагнути до мінімізації перепадів товщини стінок, усунення або раціонального розташування термічних вузлів, а також виконання заокруглень у місцях сполучення елементів конструкції, що сприяє більш рівномірному розвитку усадкових деформацій.

Ефективним шляхом зниження ймовірності утворення гарячих тріщин є розосередження усадки за рахунок оптимального вибору та взаємного розміщення конструктивних і технологічних елементів. Орієнтація вилівка у формі та розташування стрижнів повинні забезпечувати мінімальний опір зменшенню об'єму металу під час охолодження. Під час проектування ливниково-живильної системи доцільно організувати розосереджений підвід

металу, орієнтований, за можливості, на тонкостінні ділянки виливка, що сприяє вирівнюванню температурного поля та умов затвердіння.

Оскільки конфігурація виливка значною мірою визначається формою готового виробу, можливості запобігання гарячим тріщинам на стадії конструювання часто є обмеженими. У таких випадках доцільним є попереднє виявлення потенційно небезпечних зон шляхом чисельного моделювання ливарних процесів або аналізу статистичних даних щодо браку, після чого застосовують відповідні технологічні заходи, спрямовані на зниження локалізації напружень.

Основною причиною формування гарячих тріщин є напруження, що виникають у виливку внаслідок нерівномірної усадки його окремих частин. У процесі затвердіння на вилівок діє сукупність внутрішніх напружень, яка включає усадкову, термічну та фазову складові. Фазові напруження зумовлені неодночасним перебігом фазових і структурних перетворень у різних зонах виливка та можуть як послаблювати, так і підсилювати дію термічних напружень. Зокрема, у роботі показано суттєвий вплив перетворення  $\delta \rightarrow \gamma$  на ймовірність утворення гарячих тріщин у виливках зі сталі 20ГЛ.

Термічне гальмування усадки виникає внаслідок нерівномірного охолодження різних ділянок виливка та формування теплових вузлів, що обумовлено конструктивними особливостями виробу. Низька теплопровідність сталі та значна неоднорідність товщини стінок сприяють розвитку підвищених температурних градієнтів і, відповідно, термічних напружень. Зменшення їх негативного впливу досягається шляхом організації більш рівномірного затвердіння ділянок виливка з різною масивністю. Вирівнювання швидкості охолодження можливе за рахунок раціонального підведення рідкого металу до робочої порожнини форми, зокрема шляхом збільшення кількості живильників і забезпечення більш рівномірного теплового режиму.

Дієвим засобом керування процесами затвердіння є використання холодильників, а також формувальних і стрижневих матеріалів з підвищеною теплопровідністю та теплоємністю. У цьому разі доцільно застосовувати

технологічні прийоми локального інтенсивного відведення тепла від термічних вузлів вилівка з метою забезпечення більш рівномірного затвердіння та зниження локалізації усадкових напружень.

Вагомий внесок у формування напруженого стану роблять усадкові напруження, що виникають унаслідок опору усадці з боку ливарної форми. Механічне гальмування усадки проявляється як протидія формувальних матеріалів і стрижнів зменшенню розмірів вилівка в процесі охолодження. Для зниження негативного впливу цього чинника застосовують оптимізацію складу формувальних і стрижневих сумішей у напрямі підвищення їх податливості, особливо за високих температур, а також зменшення площ контактних поверхонь, що перешкоджають усадці. При цьому бажано, щоб деформація суміші відбувалася у мінімально можливий термін після завершення заливки та формування достатньо міцної поверхневої кірки на вилівку. Одним із найбільш ефективних методів запобігання утворенню гарячих тріщин є створення податливої ливарної форми, здатної деформуватися під дією тиску з боку усаджуваного металу.

Температура заливання також істотно впливає на схильність сталевих виливків до утворення гарячих тріщин. Підвищення температури заливання сприяє формуванню локальних теплових вузлів, зростанню температурних градієнтів, розвитку транскристалізації та укрупненню зерна, що негативно позначається на тріщиностійкості. Водночас підвищена температура металу забезпечує кращу рідкотекучість, яка сприяє залечуванню міжкристалітних надривів на початкових стадіях формування гарячих тріщин. У роботах [99, 100] встановлено прямий зв'язок між тріщиностійкістю та рідкотекучістю сталі. Заливання металу з температурою, нижчою за температуру ліквідус, істотно підвищує ризик інтенсивного ураження виливків гарячими тріщинами, що підтверджено експериментальними дослідженнями. Таким чином, вибір температури заливання повинен забезпечувати компроміс між достатньою рідкотекучістю та обмеженням несприятливих температурних і структурних чинників.

Швидкість охолодження істотно впливає на утворення гарячих тріщин через її взаємозв'язок із рівнем напружень, що формуються у виливку в процесі затвердіння. За невеликої швидкості охолодження усадка, як правило, компенсується фільтраційним капілярним живленням, унаслідок чого ймовірність утворення дефектів зменшується. Високі швидкості тепловідведення сприяють фронтальному характеру кристалізації, зростанню температурного градієнта та звуженню двофазної зони, що покращує умови проникнення рідкого металу в міжкристалітні проміжки і підвищує ефективність залечування тріщин. Водночас найбільш небезпечними є середні швидкості кристалізації у поєднанні з широким температурним інтервалом між ліквідусом і солідусом. У таких умовах гарячі тріщини найчастіше формуються в ослаблених зонах виливка, які охолоджуються повільніше. Виливки зі значною змінною товщиною перерізу виявляють більшу схильність до тріщиноутворення, ніж виливки з однорідною товщиною стінок. Формування стовпчастої структури за наявності значних температурних градієнтів додатково підвищує чутливість металу до утворення гарячих тріщин, тоді як організація послідовного затвердіння сприяє утворенню суцільної твердої кірки, здатної сприймати діючі напруження.

Супутні ливарні дефекти, зокрема спаї, несплавлення та недоливи, істотно впливають на механізм утворення гарячих тріщин. Порушення суцільності структури в зоні таких дефектів призводить до різкого зниження механічних властивостей металу в температурному інтервалі формування гарячих тріщин. Локальні усадкові та газові раковини послаблюють переріз виливка і слугують концентраторами напружень, що сприяє ініціюванню та розвитку тріщин. Додатково негативний вплив чинять молекулярний водень, хімічна неоднорідність складу та наявність неметалевих включень, які знижують міцність сталі за високих температур, характерних для інтервалу утворення гарячих тріщин.

## 1.5 Критерії утворення гарячих тріщин у сталевих виливках

Критерії утворення гарячих тріщин у ливарних сплавах умовно поділяють на критерії, що характеризують гарячеламкість самого сплаву, та критерії, які оцінюють тріщиностійкість виливків з урахуванням реальних умов їх затвердіння. Перші орієнтовані переважно на властивості металу в температурному інтервалі кристалізації, тоді як другі враховують також вплив конструктивно-технологічних чинників і неоднорідність напружено-деформованого стану в тілі виливка.

Одним із найбільш узагальнених і фізично обґрунтованих показників стійкості сплаву до утворення кристалізаційних тріщин є запас пластичності в ефективному інтервалі крихкості, який визначається як різниця між мінімальною пластичністю металу та величиною його вільної температурної деформації (лінійної усадки) при відповідній температурі:

$$\Delta = \min(\varepsilon_{\text{пл}} - \varepsilon_{\text{у}}), \quad (1.5)$$

де,  $\Delta$  — запас пластичності сплаву, %;  $\varepsilon_{\text{пл}}$  — пластичність сплаву, %;  $\varepsilon_{\text{у}}$  — деформація розтяг, зумовлений усадкою, %.

Фізичний зміст цього критерію полягає у співставленні здатності металу до пластичної деформації з інтенсивністю усадкових деформацій у температурному інтервалі утворення гарячих тріщин. Якщо усадкові деформації випереджають розвиток пластичних властивостей металу, виникають умови для міжкристалітного руйнування. Таким чином, вирішальним чинником є не абсолютне значення міцності, а співвідношення між пластичністю та швидкістю накопичення деформацій у твердорідкому стані.

Подальший розвиток критеріїв тріщиностійкості пов'язаний з урахуванням локалізації деформацій у різних зонах виливка. У реальних умовах затвердіння напружено-деформований стан є неоднорідним і визначається як структурними особливостями сплаву, так і конструктивною жорсткістю елементів виливка, швидкістю охолодження та ступенем гальмування усадки. У

цьому випадку тріщиностійкість оцінюють через співвідношення між температурною залежністю міцності металу та фактичними напруженнями, що виникають у процесі затвердіння.

Суттєвий розвиток у сучасних дослідженнях отримали немеханічні критерії, які безпосередньо пов'язують утворення гарячих тріщин із процесами масопереносу та гідродинаміки в двофазній зоні кристалізації. Найбільш відомим з них є критерій Rappaz–Drezet–Gremaud (RDG), згідно з яким утворення гарячих тріщин відбувається у випадку, коли падіння тиску в міждендритній рідині перевищує критичне (кавітаційне) значення:

$$\Delta p = \Delta p_{sh} + \Delta p_{mec} + \rho gh, \quad (1.6)$$

де,  $\Delta p$  – загальне падіння тиску в двофазній зоні, МПа;  $\Delta p_{sh}$  – складова, пов'язана з усадкою при затвердінні, МПа;  $\Delta p_{mec}$  – складова, індукована течією рідкого металу, МПа;  $\rho$  – густина сплаву, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – висота стовпа розплаву, м.

Зазначені критерії мають переважно концептуальний характер і використовуються для якісного аналізу механізмів утворення гарячих тріщин, без прямої візуалізації процесів у реальних фасонних сталевих виливках.

Як впливає з цього підходу, схильність до тріщиноутворення визначається не лише рівнем напружень, а й здатністю рідкого металу фільтруватися в міждендритному просторі та компенсувати усадкові деформації. Важливими структурними параметрами, що впливають на реалізацію цього механізму, є відстань між вторинними осями дендритів, об'ємна частка твердої фази та температура зрощення дендритів.

Інші критерії, запропоновані в літературі (Feurer, Clyne–Davies та їх модифікації), також ґрунтуються на співвідношенні між швидкістю усадкових деформацій і можливостями їх релаксації за рахунок масопереносу та структурної перебудови металу в двофазній зоні. Спільною рисою цих підходів є врахування структурних характеристик сплаву, інтервалу затвердіння та розміру зерна як визначальних факторів тріщиностійкості.

Узагальнюючи наведені критерії, можна зробити висновок, що утворення гарячих тріщин у сталевих виливках є результатом взаємодії усадкових деформацій, напруженого стану та особливостей структуроутворення в твердорідкому стані. Це підтверджує доцільність подальшого детального аналізу процесів формування структури та їх цілеспрямованого керування як одного з основних шляхів запобігання утворенню гарячих тріщин у сталевих виливках.

Узагальнення наукових підходів української школи до проблеми утворення гарячих тріщин у сталевих виливках

У вітчизняній науковій школі сталюого лиття проблема утворення гарячих тріщин традиційно розглядалася як багатофакторна, однак уже в ранніх фундаментальних дослідженнях було чітко окреслено визначальну роль властивостей металу в твердорідкому стані та процесів структуроутворення під час затвердіння. У класичних роботах зі сталюого лиття вперше було запропоновано систематизацію факторів, що впливають на утворення гарячих тріщин, із виокремленням групи чинників, пов'язаних із механічними властивостями сталі за високих температур. Показано, що саме недостатня здатність металу чинити опір деформаціям у критичному температурному інтервалі є однією з головних причин тріщиноутворення. При цьому наголошувалося, що підвищення пластичності сталі в ефективному інтервалі крихкості є значно ефективнішим засобом запобігання гарячим тріщинам, ніж формальне зростання рівня міцності при високих температурах.

Подальший розвиток цих положень у працях вітчизняних дослідників показав, що механічні властивості сталевих виливків у період утворення гарячих тріщин є просторово неоднорідними та змінюються від поверхні до осі виробу. Це зумовлено структурною, хімічною та фізичною неоднорідністю металу, що формується в процесі кристалізації. Особливу роль у зниженні тріщиностійкості відіграє фізична неоднорідність, зокрема наявність усадкової або газової рихлоти, яка істотно послаблює метал у температурному інтервалі утворення гарячих тріщин.

Узагальнення експериментальних і теоретичних досліджень, виконаних у межах української школи ливарного виробництва, привело до однозначного висновку про те, що процеси затвердіння та характер сформованої структури безпосередньо визначають схильність сталевих виливків до тріщиноутворення. Хімічний склад сплаву розглядався як базовий фактор, що задає рівень механічних властивостей, однак підкреслювалося, що вирішальним є не стільки сам склад, скільки швидкість зростання міцності та пластичності металу в міру зниження температури. Було показано, що швидке формування міцного кристалічного каркаса істотно зменшує ймовірність утворення гарячих тріщин навіть за наявності значних усадкових напружень.

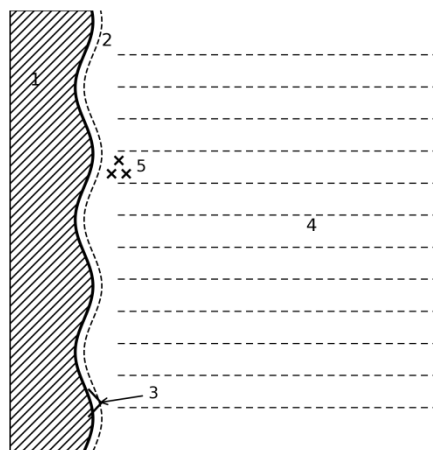
Особливу увагу вітчизняні дослідники приділяли ролі зернистості структури. Обґрунтовано, що одним із найбільш ефективних шляхів зниження браку за гарячими тріщинами є подрібнення зерна, яке забезпечує підвищення міжкристалітної міцності та сприяє рівномірнішому розподілу деформацій у твердорідкому стані. У цьому контексті було показано, що формування дрібнодисперсної структури в приповерхневій зоні виливків є прогресивним напрямом підвищення рівня механічних властивостей сталі при високих температурах.

Подальші дослідження механізмів структуроутворення в поверхневому шарі сталевих виливків і злитків дали змогу детально описати умови зародження та росту кристалів у пристінковій зоні. Запропоновано різноманітні методи впливу на розплав у процесі кристалізації, зокрема механічні коливання та ультразвукову обробку, які дозволяють ефективно підвищувати дисперсність структури й, відповідно, механічні властивості сплавів у критичному температурному інтервалі.

Сучасні українські дослідження в галузі фасонного сталевого лиття розвивають ці підходи на основі чисельного моделювання процесів структуроутворення, затвердіння та формування внутрішніх напружень у виливках. У цих роботах підтверджено, що підвищення тріщиностійкості кристалізуючого металу може бути досягнуте шляхом цілеспрямованого

формування сприятливої мікроструктури саме в поверхневому шарі виливків, де реалізуються максимальні розтягувальні напруження.

У межах цього напрямку розглядалися традиційні технологічні прийоми керування структуроутворенням, такі як модифікування, зниження вмісту шкідливих ліквацийних домішок, використання внутрішніх і зовнішніх холодильників для створення локального переохолодження. Поряд із цим аналіз показав, що більшість зазначених методів мають об'ємний характер дії та не завжди забезпечують формування необхідної дрібнодисперсної структури в поверхневому шарі в початковий період затвердіння. У зв'язку з цим у вітчизняних дослідженнях звернено увагу на вплив мікрогеометрії поверхні ливарної форми на процеси кристалізації.



1 – ливарна форма; 2 – оксидна плівка на поверхні розплаву; 3 – мікропорожнина на стінці форми; 4 – рідкий метал; 5 – кристалічний зародок.

Рисунок 1.4 – Схема нерівномірного контакту металевого розплаву з поверхнею ливарної форми та зародження кристалів у пристінковому шарі під час кристалізації.

Наведена схема (рис. 1.4) ілюструє механізм нерегулярного контакту розплаву зі стінкою ливарної форми, за якого локальні виступи мікрорельєфу забезпечують інтенсифікацію тепловідведення та створюють сприятливі умови для зародження кристалів у пристінковій зоні. Формування дрібнодисперсної структури в цій області сприяє підвищенню механічних властивостей металу в

критичному температурному інтервалі та зменшенню схильності до утворення гарячих тріщин.

Показано, що мікрорельєф стінки ливарної форми істотно впливає на умови теплообміну та зародження кристалів у пристінковій зоні вилівка. Підвищена шерохуватість поверхні сприяє локальній інтенсифікації тепловідведення, що створює сприятливі умови для активного зародження кристалів і формування дрібнодисперсної структури поверхневого шару. Водночас наявні в літературі суперечності щодо механізмів цього впливу, зокрема ролі преддендритних зародків і дендритного росту на виступах мікрорельєфу, свідчать про складність і багатофакторність процесів структуроутворення. У цілому узагальнення наукових підходів української школи дозволяє зробити висновок, що визначальним чинником тріщиноустійкості сталевих виливків є структура металу, сформована на початкових стадіях затвердіння, передусім у поверхневому шарі. Це обґрунтовує доцільність розроблення методів запобігання утворенню гарячих тріщин, заснованих на цілеспрямованому керуванні процесами структуроутворення, що повністю відповідає тематиці та науковій логіці даної магістерської роботи.

## **Висновки до розділу 1**

1. Аналіз наукових джерел показав, що утворення гарячих тріщин у сталевих виливках є складним багатофакторним процесом, який реалізується у вузькому температурному інтервалі кристалізації та визначається взаємодією усадкових деформацій, напруженого стану і процесів структуроутворення металу в твердорідкому стані.

2. Встановлено, що визначальним чинником схильності сталевих виливків до гарячого тріщиноутворення є характер формування кристалічного каркаса, розподіл міжкристалітної рідкої фази та еволюція структурно-механічних властивостей сталі в процесі затвердіння, а не лише абсолютна величина ливарної усадки.

3. Узагальнення літературних даних свідчить, що хімічний склад сталі та технологічні параметри лиття впливають на утворення гарячих тріщин опосередковано — через зміну ширини температурного інтервалу кристалізації, інтенсивність ліквідаційних процесів і умови зрощення кристалітів твердої фази.

4. Показано, що технологічні й конструктивні фактори (конфігурація виливка, умови тепловідведення, температура заливання, швидкість охолодження, податливість ливарної форми) визначають рівень локалізації усадкових напружень та істотно впливають на тріщиностійкість виливків через механізми структуроутворення.

5. Аналіз існуючих критеріїв утворення гарячих тріщин підтвердив, що найбільш інформативними є підходи, які враховують співвідношення між швидкістю накопичення усадкових деформацій і здатністю металу до їх релаксації за рахунок пластичної деформації та фільтрації рідкої фази в двофазній зоні.

6. Узагальнення наукових підходів української школи ливарного виробництва дозволяє зробити висновок, що підвищення тріщиностійкості сталевих виливків доцільно забезпечувати шляхом цілеспрямованого керування процесами структуроутворення, особливо в початковий період затвердіння та в поверхневому шарі виливків, що визначає наукову логіку подальших досліджень.

Гарячі тріщини є одним із найбільш небезпечних і складних для ідентифікації дефектів сталевих виливків, що формуються в температурному інтервалі кристалізації та раннього тверднення металу. Їх виникнення зумовлене поєднанням структурних, термодинамічних і деформаційних чинників, зокрема розвитком дендритної структури, сегрегацією домішок по міждендритних прошарках, утворенням низькоплавких евтектик та обмеженою пластичністю металу в інтервалі крихкості. Наявність гарячих тріщин істотно знижує герметичність, міцність і надійність литих деталей, а також призводить до зростання браку та виробничих витрат.

У зв'язку з цим актуальним є комплексне дослідження механізмів утворення гарячих тріщин у сталевих виливках та розроблення ефективних методів їх запобігання шляхом керування процесами структуроутворення під час кристалізації і тверднення металу.

Метою магістерської роботи є встановлення закономірностей утворення гарячих тріщин у сталевих виливках та розроблення методів їх запобігання на основі керування процесами структуроутворення в період кристалізації.

**Об'єкт дослідження** – процеси кристалізації та тверднення сталевих виливків.

**Предмет дослідження** – механізми утворення гарячих тріщин у сталевих виливках та вплив структурних і технологічних чинників на їх розвиток.

У роботі передбачається вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасні наукові уявлення щодо умов і механізмів утворення гарячих тріщин у сталевих виливках у процесі кристалізації;
- дослідити макроструктурні ознаки гарячих тріщин та особливості їх розвитку у сталевих виливках з метою достовірної ідентифікації дефектів;
- вивчити мікроструктурні та фазові особливості металу в зонах формування гарячих тріщин;
- оцінити хімічну неоднорідність металу та характер міжкристалітної ліквідації в дефектних зонах залежно від відстані від поверхні виливка;
- проаналізувати вплив технологічних умов заливки та кристалізації на формування гарячих тріщин у сталевих виливках;
- обґрунтувати методи запобігання гарячим тріщинам шляхом керування процесами структуроутворення та умовами кристалізації.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРЯЧИХ ТРІЩИН ТА СТРУКТУРНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ ВИЛИВКІВ

#### 2.1 Характеристика матеріалів і об'єктів дослідження.

Об'єктами дослідження у даній роботі були сталеві фасонні виливки, виготовлені за типовими технологіями ливарного виробництва у піщано-глинистих формах, у структурі яких у процесі затвердіння формувалися дефекти типу гарячих тріщин. Дослідження орієнтоване на аналіз закономірностей утворення таких дефектів та оцінювання можливостей їх запобігання шляхом керування процесами структуроутворення в твердорідкому стані металу.

Як матеріал дослідження використовували вуглецеву литу сталь типу 20ГЛ, яка широко застосовується у виробництві відповідальних фасонних виливків та характеризується підвищеною чутливістю до утворення гарячих тріщин за несприятливих умов кристалізації. Вибір даної марки сталі обумовлений її типовістю для ливарного виробництва, достатньо широким температурним інтервалом кристалізації та схильністю до формування міжкристалітної рідкої фази, збагаченої ліквацийними компонентами.

Хімічний склад сталі контролювали відповідно до вимог чинних нормативних документів із використанням оптико-емісійного спектрального аналізу та стандартних хімічних методів визначення вмісту вуглецю, сірки та фосфору. Особливу увагу приділяли концентрації домішок сірки й фосфору, а також співвідношенню Mn/S, які істотно впливають на умови формування міжкристалітної рідкої фази, ширину температурного інтервалу крихкості та рівень міжзеренної міцності сталі в процесі затвердіння.

Для забезпечення репрезентативності результатів аналіз виконували на вибірці промислових виливків із різним ступенем прояву дефектів гарячого тріщиноутворення. Об'єкти дослідження відбирали з ділянок виливків, що за

умовами теплообміну, геометрії та гальмування усадки є потенційно небезпечними з точки зору локалізації напружень у твердорідкому стані, без прив'язки до конкретного конструктивного призначення виробів.

Такий підхід до вибору матеріалів і об'єктів дослідження забезпечує універсальність отриманих результатів і дозволяє екстраполювати встановлені закономірності на широкий клас сталевих фасонних виливків. Це повністю відповідає меті роботи, спрямованій на дослідження механізмів утворення гарячих тріщин та розроблення методів їх запобігання на основі керування процесами структуроутворення.

## 2.2 Методи оцінювання схильності сталевих виливків до гарячих тріщин

Для оцінювання схильності сталевих виливків до утворення гарячих тріщин використовували сукупність методів неруйнівного контролю та подальшого структурного аналізу. Первинне виявлення дефектів здійснювали магніто-порошковим і вихрострумним методами контролю відповідно до виробничих інструкцій (рис. 2.1).

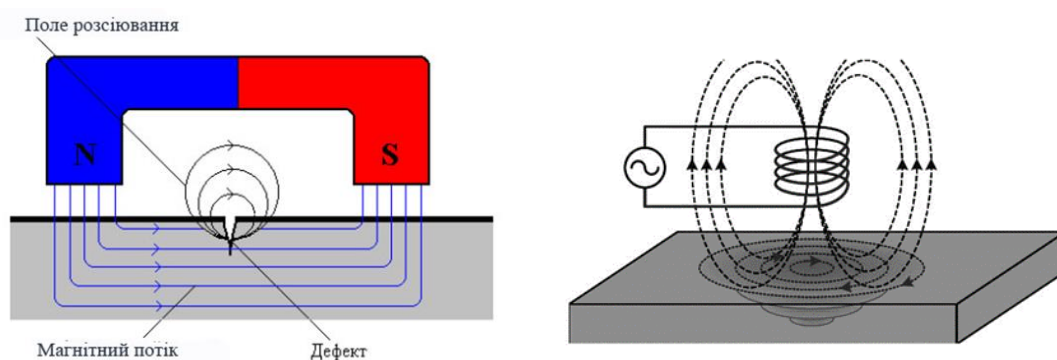


Рисунок 2.1 – Методи неруйнівного контролю гарячих тріщин у сталевих виливках: а – магнітопорошковий контроль; б – вихрострумний контроль.

Магнітопорошковий контроль ґрунтується на намагнічуванні ферромагнітного виробу та реєстрації витоків магнітного потоку в місцях порушення суцільності металу. За наявності тріщини або іншої несплошності магнітні силові лінії виходять на поверхню, утворюючи локальне магнітне поле,

в якому концентруються феромагнітні частинки порошку. У результаті дефект візуалізується у вигляді чіткої індикаторної смуги, що повторює його форму та орієнтацію. Метод є високочутливим до поверхневих і близькоповерхневих гарячих тріщин та широко застосовується для контролю сталевих виливків.

Вихрострумний контроль базується на індукції вихрових струмів у поверхневому шарі металу змінним електромагнітним полем зонда. Наявність тріщин або інших дефектів призводить до локальної зміни електропровідності та магнітної проникності матеріалу, що фіксується у вигляді зміни імпедансу вимірювальної котушки. Метод дозволяє виявляти поверхневі дефекти без прямого контакту з поверхнею виробу та є ефективним для контролю зон складної геометрії після механічної обробки.

Застосування зазначених методів неруйнівного контролю дозволяє здійснювати попередню ідентифікацію дефектних зон, після чого виконувати детальний структурний і фрактографічний аналіз з метою встановлення механізму утворення гарячих тріщин.

Перед контролем поверхні досліджуваних зон піддавали механічній обробці з метою зменшення впливу шорсткості на достовірність результатів. Після виявлення дефектних ділянок їх вирізали з відливок механічним або термічним способом. Для визначення глибини тріщин та виявлення прихованих несплошностей виконували поперечне фрезерування зразків. З метою дослідження морфології поверхні тріщин дефектні ділянки додатково доламували на гідравлічному пресі, що забезпечувало розкриття дефекту та можливість аналізу поверхонь зламу.

Фрактографічний аналіз бокових поверхонь гарячих тріщин проводили методами світлової фрактографії. Отримані фрактограми демонстрували характерне для гарячих тріщин ручійну та дендритну структура поверхні зламу, що підтверджує їх формування у твердорідкому стані металу.

Фрактографічний аналіз бокових поверхонь гарячих тріщин проводили з метою встановлення механізмів їх утворення та характеру руйнування металу в температурному інтервалі кристалізації. Дослідження виконували методами

світлової фрактографії, які дозволяють виявити морфологічні ознаки поверхонь зламу, притаманні гарячим тріщинам у сталевих виливках.

Для аналізу використовували дефектні ділянки відливок, у яких після неруйнівного контролю було зафіксовано наявність гарячих тріщин. З метою відкриття бокових поверхонь тріщин дефектні зони піддавали контрольованому доламу, що забезпечувало формування природного зламу без додаткової пластичної деформації. Отримані поверхні зламу очищали від забруднень та продуктів корозії.

Світлову фрактографію проводили у відбитому світлі з використанням оптичних мікроскопів та макрозйомки. Аналізували характер рельєфу поверхні зламу, форму і напрям розвитку тріщин, а також наявність характерних ознак міжкристалітного руйнування. Особливу увагу приділяли виявленню дендритної морфології зламу, окиснених міжкристалітних прошарків та слідів рідкої фази, що є типовими ознаками гарячих тріщин, сформованих у твердо-рідкому стані металу.

Отримані фрактографічні ознаки використовували для підтвердження кристалізаційної природи тріщин, відмежування гарячих тріщин від холодних та інших видів дефектів, а також для встановлення зв'язку між умовами структуроутворення в поверхневій зоні відливки і механізмом зародження та розвитку дефекту.

### **2.3 Методи дослідження процесів структуроутворення.**

Для виявлення особливостей макро- та мікроструктури в зоні гарячих тріщин застосовували комплекс металографічних методів. Макроструктуру дефектних ділянок вивчали після глибокого травлення у 50 % водному розчині соляної кислоти при температурі 80 °С, що дозволяло видалити продукти окиснення та чітко окреслити межі дефектної зони.

Розподіл сульфідних включень досліджували за допомогою проби Баумана, яка забезпечує виявлення зон підвищеної концентрації сірковмісних

фаз у міжкристалітному просторі. Для аналізу мікроструктури використовували поперечні шліфи дефектних ділянок, підготовлені на автоматизованому шліфувально-полірувальному обладнанні.

Мікроструктурні дослідження проводили на інвертованих цифрових мікроскопах, при цьому для виявлення первинної дендритної структури в пристінковій зоні застосовували спеціальні травники, що дозволяли чітко ідентифікувати характер зародження та росту кристалів.

#### 2.4 Методичні підходи до керування процесами кристалізації.

Для дослідження впливу мікрорельєфу робочої поверхні ливарної форми на процеси кристалізації була розроблена модельна оснастка для відливки-проби (рисунок 2.2).

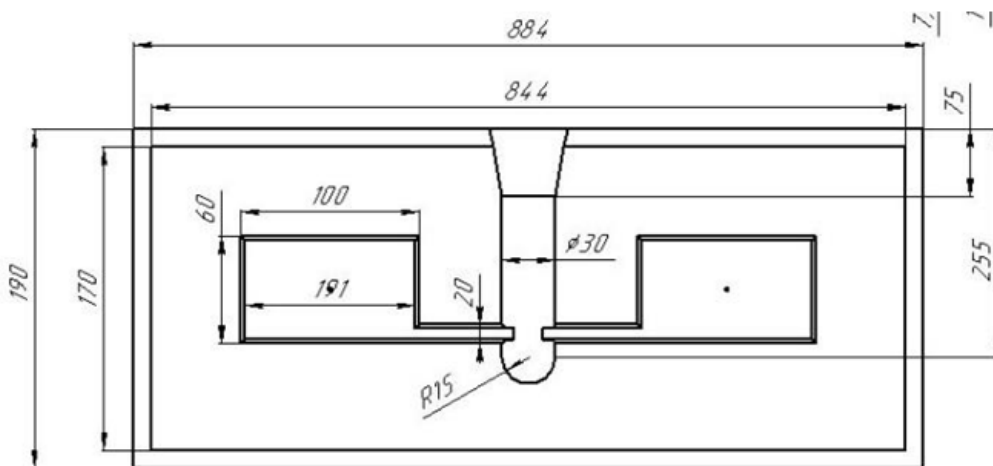


Рисунок 2.2 – Схема експериментальної моделі відливки

Температурні умови кристалізації в пристінковій зоні контролювали за допомогою системи термічного аналізу, при цьому гарячий спай термопарі фіксували на глибині 1...1,5 мм від поверхні робочої порожнини форми.

Механічні властивості сталі в поверхневій зоні оцінювали шляхом вимірювання твердості за методом Віккерса з побудовою карт розподілу твердості у приповерхневому шарі відливок. Отримані дані використовували для подальшої статистичної обробки та порівняльного аналізу впливу мікрорельєфу форми на структурний стан і властивості сталі.

## Висновки по розділу 2

1. У розділі сформовано цілісну методичну базу дослідження гарячих тріщин у сталевих виливках, яка поєднує методи неруйнівного контролю, фрактографічного та металографічного аналізу з оцінюванням процесів структуроутворення в твердорідкому стані металу.

2. Обґрунтовано вибір вуглецевої литої сталі типу 20ГЛ як репрезентативного матеріалу дослідження, що характеризується типовим для фасонного лиття інтервалом кристалізації та підвищеною чутливістю до утворення гарячих тріщин за несприятливих умов затвердіння.

3. Показано, що поєднання магнітопорошкового та вихрострумовеого контролю є ефективним засобом попередньої ідентифікації зон з порушенням суцільності металу, що дозволяє локалізувати дефектні ділянки для подальшого структурного та фрактографічного аналізу.

4. Встановлено доцільність застосування світлової фрактографії для підтвердження кристалізаційної природи гарячих тріщин, оскільки характер морфології поверхонь зламу (дендритна будова, міжкристалітний характер руйнування, окиснені прошарки) безпосередньо відображає умови формування дефекту в температурному інтервалі кристалізації.

5. Обґрунтовано використання металографічних методів, включаючи глибоке травлення, пробу Баумана та аналіз поперечних шліфів, для виявлення особливостей макро- і мікроструктури в околodefектній зоні та оцінювання ролі міждендритної ліквідації у механізмі тріщиноутворення.

6. Запропоновані методичні підходи до керування процесами кристалізації, зокрема через зміну умов теплообміну в пристінковій зоні та контроль температурного режиму, створюють основу для подальшого експериментального аналізу впливу структуроутворення на тріщиностійкість сталевих виливків, що логічно визначає напрям досліджень у наступному розділі роботи.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УТВОРЕННЯ ГАРЯЧИХ ТРІЩИН У СТАЛЕВИХ ВИЛИВКАХ

#### **3.1 Вплив технологічних умов заливки та кристалізації на механізм утворення гарячих тріщин**

Як було показано в розділі 1, на утворення гарячих тріщин у сталевих виливках впливає сукупність взаємопов'язаних технологічних, теплофізичних і структурних чинників. У виробничій практиці при розробленні заходів щодо зниження схильності до гарячого тріщиноутворення часто спостерігається характерна ситуація, коли дефект виникає локально – в окремих зонах виливка, та з нерегулярною періодичністю. При цьому в серії виливків, отриманих за однаковою технологією з металу однієї плавки, лише незначна частина може бути забракована через наявність гарячих тріщин, тоді як основна кількість виливків залишається бездефектною.

Для встановлення причин такого нестабільного характеру утворення гарячих тріщин було проведено порівняльний аналіз умов формування придатних і забракованих виливків. У результаті експериментальних досліджень виявлено чітку закономірність появи гарячих тріщин залежно від черговості заливки ливарних форм. Встановлено, що підвищена кількість дефектних виливків припадає на початковий та заключний етапи розливання металу зі стопорного ковша.

Гарячі тріщини в забракованих виливках мали вигляд надривів із нерівною, інтенсивно окисленою поверхнею, яка формувалася переважно вздовж меж кристалів і дендритних комірок (рисунок 3.1).

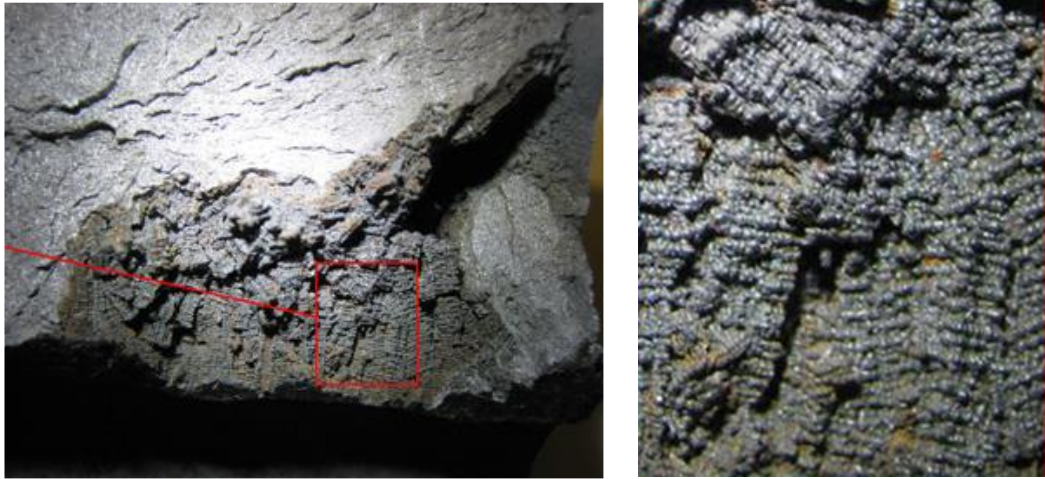
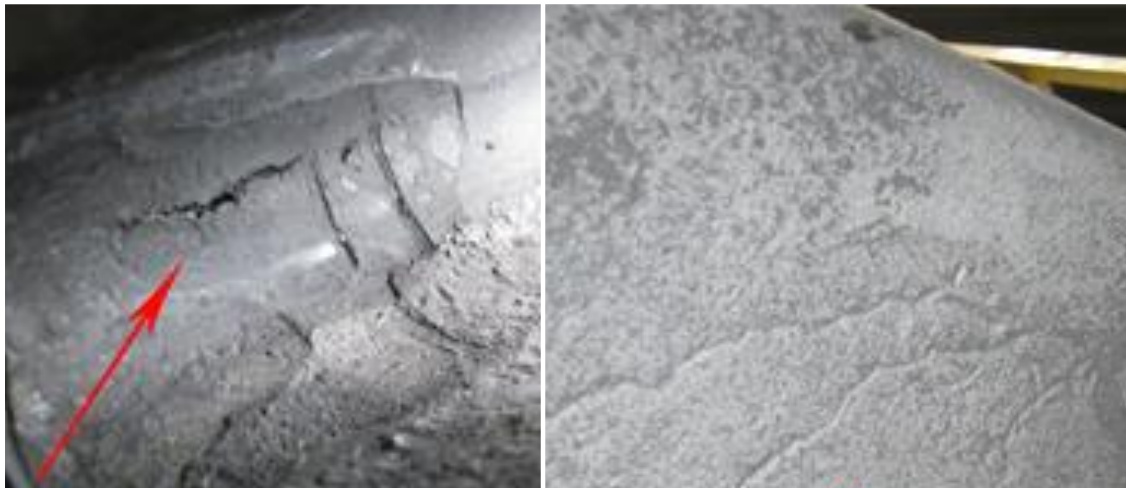


Рисунок 3.1 – Гаряча тріщина міжкристалітного типу, що проявляється у вигляді надривів з нерівним окисненим рельєфом уздовж меж кристалів.

На рисунку показано характерний вигляд гарячої тріщини, сформованої в процесі кристалізації сталі у твердорідкому стані. Дефект має міжкристалітний характер і розвивається переважно вздовж меж зерен та дендритних осередків, що зумовлено наявністю тонких прошарків рідкої фази, збагаченої ліквіційними домішками. Нерівний рельєф поверхні тріщини та наявність слідів окиснення свідчать про її формування за підвищених температур, коли метал ще не набув достатньої міжзеренної міцності. Така морфологія є типовою для гарячих тріщин і підтверджує їх кристалізаційну природу, пов'язану з обмеженою живильністю міждендритного простору та розвитком усадкових деформацій.

Одночасно з гарячими тріщинами в тих самих виливках спостерігалися супутні дефекти — недолив, несплавлення та спай, що є характерними ознаками заниженої температури заливки і недостатньої рідкотекучості металу (рис. 3.2).



а)

б)

Рисунок 3.2 – Прояви дефектів лиття: а – гаряча тріщина;  
б – дефект типу не злиття

На рисунку 3.2 наведено приклади дефектів, що формуються за несприятливих умов заливки та кристалізації сталевих виливків. Гаряча тріщина (а) має міжкристалітний характер і виникає внаслідок дії усадкових напружень у твердорідкому стані металу при недостатній міжзерній міцності. Дефект типу не злиття (б) обумовлений порушенням суцільності металу під час заповнення форми, що, як правило, пов'язано зі зниженою температурою заливки або недостатньою рідкотекучістю розплаву. Супутня присутність зазначених дефектів свідчить про несприятливий тепловий режим лиття та підтверджує визначальну роль температурних і структурних чинників у формуванні гарячих тріщин.

Аналіз літературних джерел показує, що питання зміни температури розплаву за висотою ковша в процесі розливки залишається дискусійним. За одними даними, температура перших порцій металу є максимальною і поступово знижується в ході розливки, тоді як за іншими — мінімальні температури спостерігаються саме на початковому та кінцевому етапах заливки.

Результати комп'ютерного моделювання процесів тепломасообміну в ковші місткістю 9 т під час витримки та розливки підтвердили нерівномірний розподіл температури розплаву по висоті ковша (рисунок 3.3).

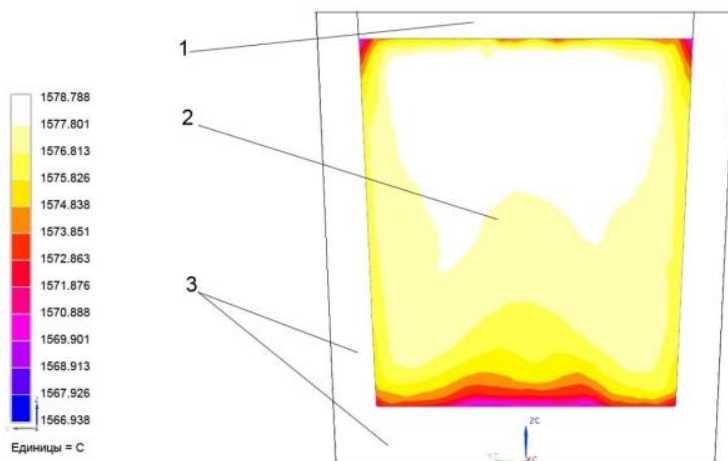
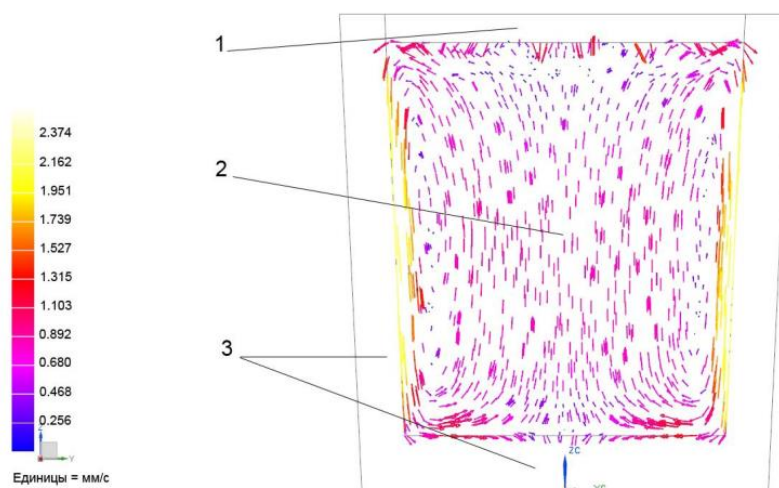


Рисунок 3.3 – Температурний профіль рідкого металу за висотою сталерозливного ковша: 1 – шлаковий шар; 2 – розплавлений метал; 3 – футерівка ковша

Донні шари рідкого металу інтенсивно віддають тепло футерівці днища, тоді як верхні шари охолоджуються в процесі розливки за рахунок теплового випромінювання та теплообміну зі шлаковою фазою. Дія конвекційних потоків у ковші (рисунок 3.4) призводить до переміщення більш холодних об'ємів металу в нижню частину, з якої здійснюється випуск розплаву на початковому етапі заливки. Аналогічне зниження температури спостерігається і наприкінці розливки внаслідок охолодження залишків металу.



1 – шлаковий шар; 2 – рідкий метал; 3 – футерівка ковша.

Рисунок 3.4 – Розподіл інтенсивності конвекційних потоків розплаву за висотою сталерозливного ковша

Таким чином, перші та останні ливарні форми заливаються металом з пониженою температурою і зниженою рідкотекучістю. За таких умов у процесі кристалізації не реалізується механізм «залічування» гарячих тріщин, який можливий лише за наявності достатньої кількості рідкої фази в міждендритному просторі. Відомо, що для ефективного заповнення міждендритних пустот наприкінці кристалізації відносний вміст рідкої фази має становити не менше 15 %. При зниженій температурі заливки це умовою не виконується.

Ріст розгалужених дендритів за дефіциту залишкової рідкої фази супроводжується утворенням усадочної пористості, мікрорихлоти та мікротріщин. Порушення суцільності структури зумовлює зниження механічних властивостей металу в твердорідкому інтервалі кристалізації та сприяє зародженню і розвитку гарячих тріщин. Отже, основною причиною їх виникнення в досліджених умовах є несприятливі умови заповнення і живлення виливка, зумовлені відносно низькою температурою заливки.

Додатково було проведено порівняльний аналіз хімічного складу сталі в придатних і забракованих виливках, зокрема оцінено відношення марганцю до сірки ( $Mn/S$ ), яке вважається одним із показників тріщиностійкості сталей. Статистичну значущість відмінностей середніх значень оцінювали з використанням  $t$ -критерію Стьюдента (таблиця 3.1). У ході досліджень встановлено, що значення відношення  $Mn/S$  у всіх проаналізованих виливках перевищувало мінімально допустимий рівень, необхідний для нейтралізації негативного впливу сірки. Це свідчить про те, що в даному випадку хімічний склад сталі, зокрема вміст сірки, не є визначальним чинником утворення гарячих тріщин.

Отримані результати підтверджують, що ключову роль у механізмі формування гарячих тріщин відіграють саме технологічні та теплофізичні умови кристалізації, передусім температура заливки і пов'язані з нею процеси живлення та структуроутворення в поверхневих і приповерхневих шарах сталевих виливків.

### 3.2 Макроструктурні особливості дефектів типу гарячих тріщин та навколодефектної зони.

Найбільш наочно гарячі тріщини проявляються у вигляді наскрізних або частково розкритих розривів стінки вилівки, що формуються в умовах дії значних усадкових напружень у поєднанні з недостатньою несучою здатністю твердодірного металу. Характерний приклад такого дефекту наведено на рисунку 3.5, де гаряча тріщина представлена у вигляді розриву тіла вилівки з нерівною, сильно окисленою поверхнею, морфологія якої визначається кристалічно-дендритною будовою сталі. Наявність на поверхні тріщини дендритів з гілками другого порядку свідчить про її формування безпосередньо в інтервалі кристалізації, коли міждендритні зв'язки ще не набули достатньої міцності для сприйняття усадкових деформацій.



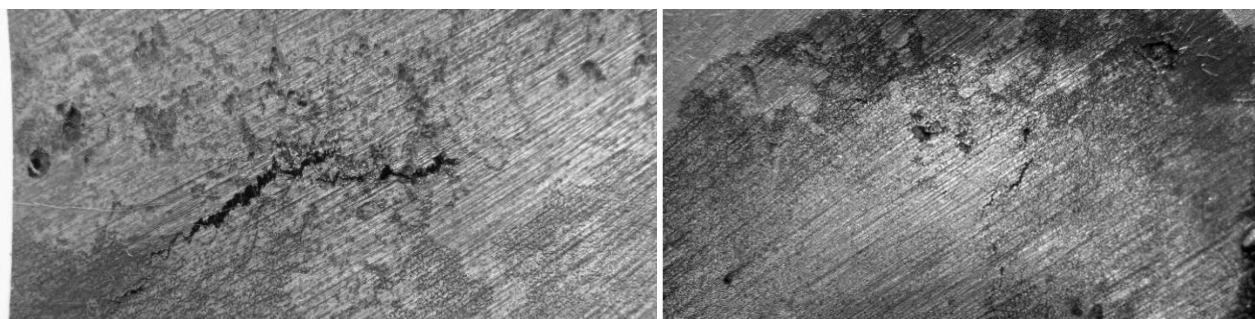
Рисунок 3.5 – Гаряча тріщина у вигляді наскрізного порушення суцільності вилівки та елемент дендритної структури з розвиненими гілками другого порядку

Представлений на рисунку 3.5 дефект гарячої тріщини сформувався в процесі кристалізації вилівки в умовах дії усадкових напружень, що перевищили міцність металу у твердодірному стані. Розрив тіла вилівки має нерівну, зламану конфігурацію, обумовлену кристалічною будовою сталі та орієнтацією дендритних кристалів у зоні затвердіння.

Бокові поверхні тріщини характеризуються наявністю чітко вираженого дендритного рельєфу з гілками другого порядку, що є прямим морфологічним підтвердженням утворення дефекту в високотемпературному інтервалі кристалізації. Така структура свідчить про руйнування міждендритних зв'язків у момент, коли метал ще містив залишкову рідку фазу і не був здатний ефективно компенсувати усадкові деформації.

Сильна окисленість поверхні тріщини вказує на її відкритість у період високих температур та наявність контакту з внутрішньоформовою атмосферою. Це додатково підтверджує кристалізаційну природу дефекту і дозволяє відрізнити гарячі тріщини від холодних, які формуються після повного затвердіння металу. Таким чином, морфологічні ознаки, наведені на рисунку 3.6, однозначно вказують на усадковий механізм утворення гарячої тріщини, зумовлений несприятливими умовами живлення та розвитку дендритної структури в поверхневій зоні виливки.

Для надійної ідентифікації гарячих тріщин у сталевих виливках ключовим є аналіз морфології їх поверхні та геометрії розвитку. Характер поверхні, колір і форма тріщини дозволяють чітко відрізнити гарячі тріщини від дефектів холодного походження, газових розривів і технологічних надривів, що формуються після повного затвердіння металу. У зв'язку з цим макроструктурне дослідження дефектних зон є обов'язковим етапом встановлення механізмів руйнування в інтервалі кристалізації (рисунок 3.6).



а)

б)

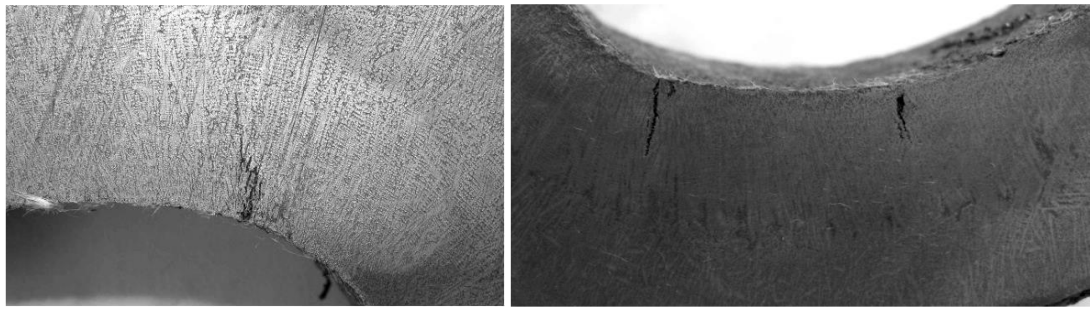
Рисунок 3.6 – Макроструктурні ознаки гарячих тріщин у сталевих виливках: нерівна окиснена поверхня (а) та дендритно зумовлена геометрія (б) розвитку дефекту

Характерними морфологічними ознаками гарячих тріщин є нерівна, сильно розчленована поверхня з вираженим рельєфом, що відтворює первинну кристалічну будову сталі. Поверхня тріщини має темне, часто чорне забарвлення, зумовлене інтенсивним окисненням металу в момент її утворення за високих температур. Така ознака свідчить про формування дефекту в твердорідкому стані сплаву, коли метал ще перебував у контакті з окиснювальним середовищем.

Геометрія гарячої тріщини характеризується складною, ламаною або криволінійною формою з великою кількістю дрібних гострокутних елементів. Ці елементи відображають кристалічне, переважно дендритне, будівництво металу та обумовлені міждендритним характером поширення тріщини. Розвиток дефекту відбувається вздовж меж дендритних осередків і міжкристалітних прошарків, ослаблених наявністю залишкової рідкої фази та ліквіційно збагачених компонентів.

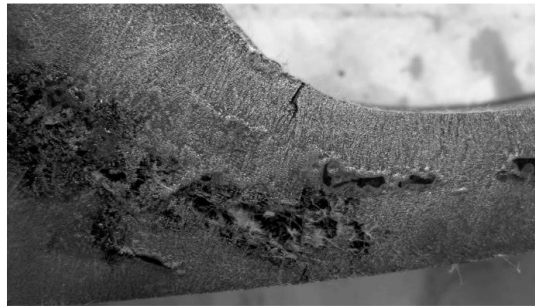
На макроструктурних зображеннях чітко простежується взаємозв'язок форми тріщини з напрямками росту дендритів: криволінійний характер надривів повторює конфігурацію дендритної сітки та відображає нерівномірність локальних усадкових деформацій у процесі затвердіння. Сукупність наведених ознак підтверджує кристалізаційну природу дефекту та дозволяє однозначно віднести його до гарячих тріщин.

Дослідження поперечних розрізів дефектних зон дали змогу детально простежити морфологію гарячих тріщин та встановити характерні особливості їх внутрішньої будови (рис. 3.8).



а)

б)



в)

Рисунок 3.8 – Макроструктурний вигляд зразків з радіусом 50 мм, з дефектами гарячих тріщин, поперечний перерізах на глибині 4 мм (а), 8 мм (б) та 5 мм (в).

За результатами макроструктурного аналізу встановлено, що як відкриті, так і приховані гарячі тріщини характеризуються чітко вираженою тенденцією до розкриття в напрямку поверхні вилівка (рис. 3.8). У процесі поширення дефекту спостерігається поступове збільшення ширини тріщини, що зумовлено нерівномірним розподілом напружень у приповерхневих структурних зонах металу в твердорідкому стані.

Довжина окремих надривів, як правило, перебуває в межах 3...5 мм і корелює з глибиною формування відповідних структурних зон, що чітко простежується на поперечних розрізах зразків (рис. 3.8 а, в). Відстань між кінцями суміжних ступінчастих ділянок тріщин становить приблизно 0,5...2 мм, що свідчить про дискретний, поетапний характер їх розвитку в процесі кристалізації.

Характерною морфологічною ознакою є також паралельне розташування кількох надривів, орієнтованих у близьких напрямках (рис. 3.8, а, б). Така будова вказує на складну внутрішню структуру гарячих тріщин та підтверджує ідентичність механізмів руйнування в різних локальних об'ємах металу. Це

свідчить про багатоосередковий характер зародження гарячих тріщин, обумовлений спільною дією усадкових напружень і структурної неоднорідності сталі у температурному інтервалі кристалізації.

Встановлено, що тріщини мають нерівномірний профіль із тенденцією до розширення у напрямку до поверхні виливки, що свідчить про їх розвиток у процесі кристалізації за дії усадкових напружень. У більшості випадків спостерігається каскадний характер будови тріщин, який проявляється у вигляді окремих надривів, розташованих на різних структурних рівнях та зміщених відносно один одного.

Поперечні розрізи показують, що глибина проникнення гарячих тріщин є змінною та визначається зональною будовою затверділого металу. У межах стінки виливки тріщини часто локалізуються в області столбчастих дендритних кристалів і можуть поєднуватися з внутрішніми дефектами усадкового або газо-усадкового походження. Морфологія тріщин характеризується зламаними, криволінійними контурами з чітко вираженою орієнтацією вздовж напрямків росту дендритів, що підтверджує міжкристалітний характер руйнування.

Виявлені особливості будови гарячих тріщин свідчать про їх формування в умовах твердодіючого стану металу, коли несуча здатність кристалізуючої корочки є недостатньою для компенсації усадкових деформацій, що виникають у процесі затвердіння виливки.

Для аналізу особливостей структуроутворення в зонах, схильних до утворення гарячих тріщин, було виконано узагальнення орієнтації росту дендритних кристалів. З цією метою реальні зображення макроструктури замінювалися умовною схемою, у якій головні осі дендритів відображалися у вигляді напрямних ліній, що відповідають переважному напрямку їх росту (рисунки 3.9). Такий підхід дозволяє наочно простежити закономірності просторової орієнтації дендритів без урахування другорядних морфологічних деталей, зосереджуючи увагу на ключових структурних факторах.

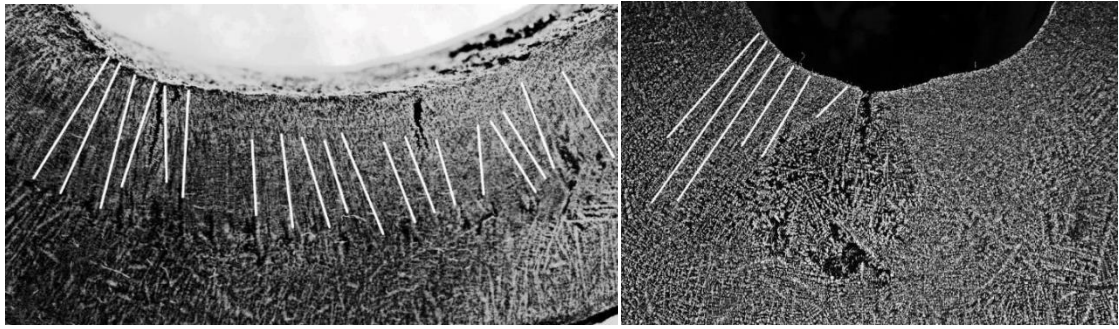


Рисунок 3.9 – Схематична модель дендритної структури в локальних зонах сталевій виливки, схильних до утворення гарячих тріщин: а – зона з переважанням стовпчастих кристалів; б – зона з більш розвинуеною неоднорідністю дендритного росту.

Схематизація напрямків росту дендритів дала змогу чітко виділити зони з різним характером кристалізації, а також встановити взаємозв'язок між орієнтацією дендритних осей і напрямками дії усадкових напружень у твердорідкому стані металу. Зокрема, було показано, що в областях з переважно паралельною орієнтацією головних осей дендритів формуються протяжні міждендритні прошарки рідкої фази, які є потенційними шляхами зародження та розвитку гарячих тріщин.

Таким чином, заміна реальних дендритних гілок на умовні напрямки їх росту є ефективним методичним прийомом для аналізу структурних передумов гарячого тріщиноутворення та дозволяє узагальнити вплив дендритної морфології на механізми руйнування сталевих виливків у процесі кристалізації.

Характерний приклад каскадного руйнування різних структурних рівнів металу наведено на рисунку 3.10. Даний тип руйнування відображає поетапний розвиток гарячої тріщини в процесі кристалізації сталевий виливка та є наслідком неоднорідності структурного стану металу за товщиною стінки.



Рисунок 3.10 – Каскадний характер руйнування металу в зоні гарячої тріщини у сталевому виливку

Каскадний характер руйнування полягає в тому, що тріщина формується не як суцільний прямолінійний розрив, а у вигляді послідовно з'єднаних надривів, розташованих на різних структурних рівнях. Кожен окремий надрив відповідає локальній зоні ослабленої міждендритної зв'язності, сформованої в умовах твердорідкого стану металу. При цьому розвиток тріщини відбувається ступінчасто — від однієї структурної зони до іншої, у міру зростання усадкових напружень і зменшення частки рідкої фази.

Такий механізм руйнування зумовлений зональним характером затвердіння сталевих виливків. У поверхневих шарах, де інтенсивний теплообмін із формою сприяє формуванню дрібнокристалічної структури, опір руйнуванню є вищим. Водночас у глибших шарах, представлених стовпчастими або грубодендритними кристалами, міждендритні прошарки рідкої фази зберігаються довше, що створює сприятливі умови для локального зародження надривів. Подальше охолодження та наростання усадкових деформацій призводить до їх об'єднання у єдину тріщину каскадного типу.

Таким чином, каскадне руйнування є наочним підтвердженням тісного зв'язку між механізмом утворення гарячих тріщин і неоднорідністю структуроутворення в процесі кристалізації. Наявність ступінчастого зламу свідчить про поетапний характер втрати суцільності металу та підкреслює

визначальну роль морфології дендритної структури у формуванні тріщиностійкості сталевих виливків.

Аналіз бокових поверхонь зламу (рис. 3.11) свідчить, що надриви, які формують гарячі тріщини, розвиваються переважно паралельно головним осям росту дендритів.

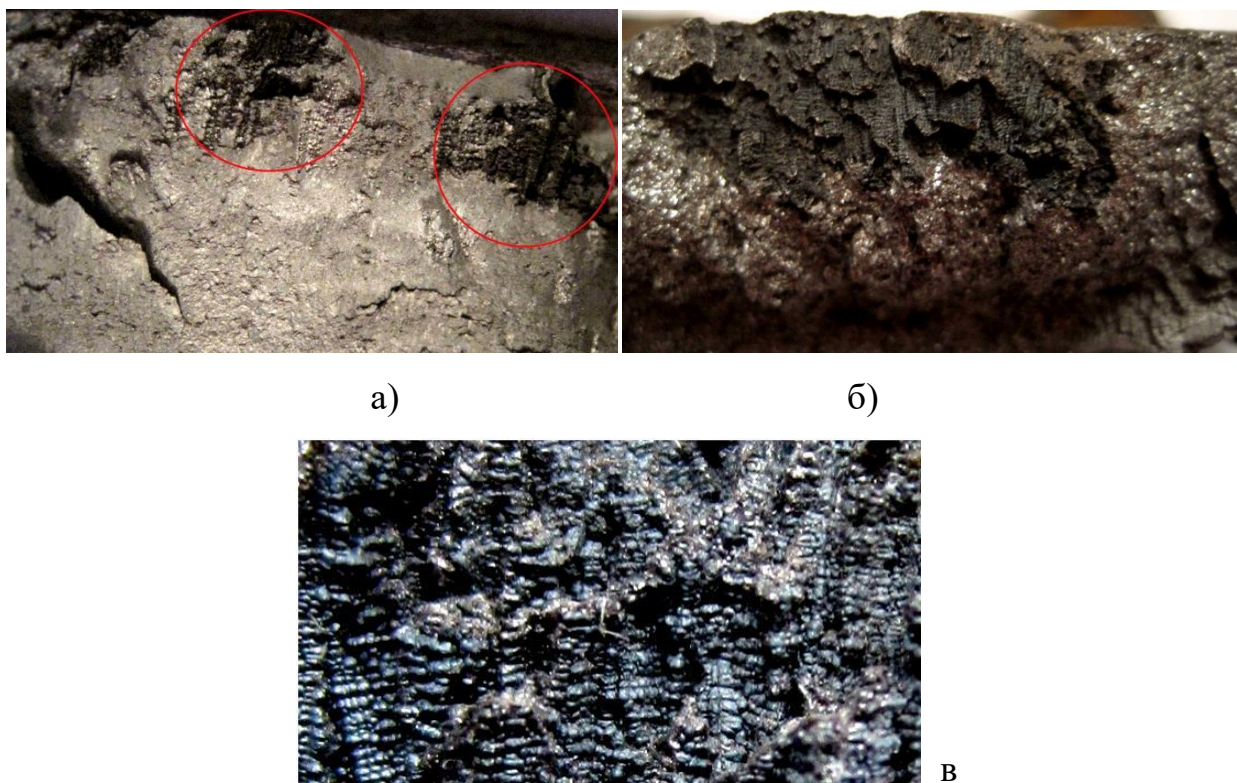


Рисунок 3.11 – Макроморфологія гарячих тріщин у сталевому виливку:  
а – злам стінки виливка (червоним зліва – явна гаряча тріщина, справа – прихована гаряча тріщина),  $\times 2$ ; б – злам стінки виливка,  $\times 5$ ; в – бокова поверхня гарячої тріщини на зламі,  $\times 50$ .

Така орієнтація поверхонь руйнування є характерною ознакою міжкристалітного механізму руйнування металу у твердорідкому стані та підтверджує кристалізаційну природу дефекту.

У приповерхневому шарі виливка в зоні утворення гарячих тріщин (рис. 3.11, б) спостерігається значна кількість дрібних виступів і нерівностей. Ці елементи рельєфу відповідають вершинам дрібних, хаотично орієнтованих кристалів, що сформувалися на початкових стадіях затвердіння. Така структура свідчить про інтенсивне зародження кристалів у пристінковій зоні та знижену цілісність кристалічного каркаса в умовах дії усадочних і термічних напружень.

Слід зазначити, що причинами утворення тріщин у сталевих виливках можуть бути не лише усадочні напруження, але й газові процеси, пов'язані з виділенням і перерозподілом розчинених газів у процесі кристалізації. Накопичення газів у міждендритному просторі призводить до локального підвищення внутрішнього тиску, який, у поєднанні з усадочними напруженнями, істотно підсилює напружено-деформований стан металу в теплових вузлах і сприяє формуванню тріщин змішаної природи.

У так званих «критичних» ділянках виливків — теплових вузлах, схильних до утворення гарячих тріщин, — можуть одночасно формуватися різні ливарні дефекти. Через подібність їх зовнішніх проявів при поверхневому контролі такі дефекти нерідко помилково ідентифікуються як класичні гарячі тріщини, що ускладнює правильну оцінку причин браку та вибір ефективних технологічних заходів.

Газо-усадкові дефекти в перерізі сталевих виливків за зовнішніми ознаками часто складно відрізнити від пористості або рихлоти, сформованої внаслідок дії «чистих» усадочних чи газових механізмів (рис. 3.12).

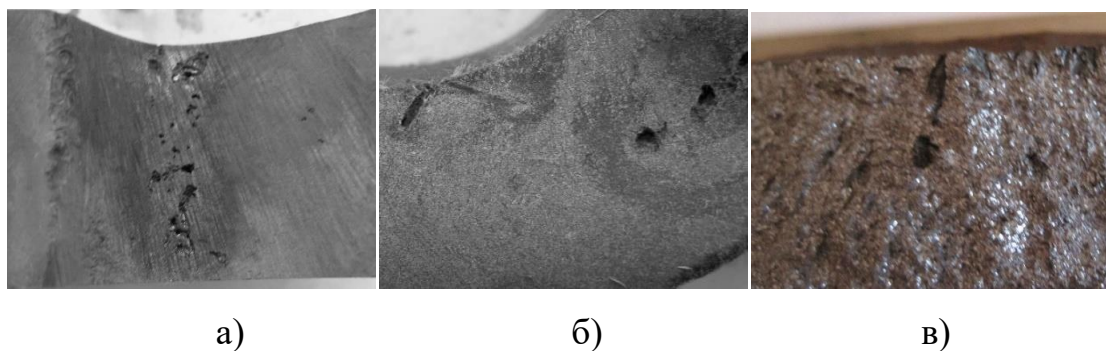


Рисунок 3.12 – Газо-усадкові дефекти у сталевому виливку змішаної природи: а – зовнішній вигляд дефекту на поверхні виливка після травлення; б – поперечний переріз стінки виливка в зоні формування дефекту; в – фрактограма зламу стінки виливка в області газо-усадкового дефекту.

Однак при детальному мікроструктурному аналізі в зонах газо-усадкової пористості чітко виявляється наявність окисненого шару та локально зневуглецьованої поверхні, а будова суміжних стінок дефекту характеризується вираженим дендритним рельєфом (рис. 3.12, а).

Морфологічно такі дефекти мають складну будову та, як правило, представлені сукупністю взаємопов'язаних пор. У відносно товстих стінках виливків газо-усадкова пористість зазвичай не має прямого виходу на поверхню виробу. При цьому окремі пори можуть формувати витягнуту, стрічкоподібну конфігурацію, що при поверхневому огляді здатне імітувати гарячу тріщину усадочного походження. Саме тому коректна ідентифікація таких дефектів можлива лише за результатами комплексного аналізу околodefектної зони, поперечних шліфів та поверхонь зламу.

Дослідження поперечного перерізу стінки в зоні локалізації дефекту (рис. 3.12, б) показало, що газо-усадкові дефекти характеризуються порівняно невеликою глибиною проникнення, переважно округлою формою в перерізі та гладкою внутрішньою поверхнею. На відміну від гарячих тріщин, у таких дефектах відсутній типовий для міжкристалітного руйнування дендритний характер поверхні. Крім того, вісь дефекту, як правило, орієнтована під кутом до зовнішньої поверхні вилівка, тоді як гарячі тріщини переважно поширюються перпендикулярно до неї.

Аналогічні морфологічні ознаки встановлено і при фрактографічному аналізі ламів стінок виливків у зоні розташування дефектів (рис. 3.12, в). Поверхня зламу газо-усадкових пор має згладжений характер, а звуження дефекту в напрямку до поверхні може створювати хибне враження тріщиноподібного руйнування, особливо за наявності кількох близько розташованих пор.

Усі виявлені морфологічні особливості газо-усадкових дефектів пояснюються дією надлишкового тиску газів, що виділяються з розплаву в процесі його кристалізації. Первинне зародження дефекту зумовлюється накопиченням газової фази в міждендритному просторі, яка ослаблює затверділу поверхневу кірку вилівка. На завершальному етапі затвердіння під дією усадкових напружень відбувається локальний розрив ослабленої ділянки металу.

При цьому внутрішні усадкові порожнини, представлені рихлотою в центральній частині стінки, не мають прямого зв'язку з газо-усадковими

дефектами, що виходять на поверхню. В окремих випадках у процесі затвердіння можливе втягування розплаву з поверхні до осьової зони виливка, що супроводжується захопленням газів з прикордонного шару «метал–форма». Перерозподіл газової фази в міждендритному просторі перешкоджає зварюванню сусідніх дендритів та унеможливує ефективне живлення дефектної зони маточним розплавом з теплового вузла.

Таким чином, газо-усадкові дефекти мають змішаний механізм формування, у якому провідну роль відіграють газові процеси на початковій стадії та усадкові напруження — на завершальному етапі затвердіння. Це принципово відрізняє їх від класичних гарячих тріщин і підкреслює необхідність комплексного структурного аналізу для коректної ідентифікації природи дефектів у сталевих виливках.

### **3.3 Хімічна неоднорідність та роль неметалевих включень у зоні гарячих тріщин.**

Одним із важливих чинників, що сприяють виникненню гарячих тріщин у сталевих виливках, є наявність у міждендритному просторі легкоплавких сульфідних, а також інших неметалевих включень, які істотно знижують тріщиностійкість металу в температурному інтервалі затвердіння. Для встановлення особливостей їх просторового розподілу в дефектних і бездефектних зонах було застосовано метод Баумана, за допомогою якого досліджено локалізацію сульфідних включень у стінці виливків (рис. 3.13).

Аналіз відбитків Баумана для бракованих виливків свідчить про чітко виражену концентрацію сульфідних включень у безпосередній близькості до зон утворення гарячих тріщин (рис. 3.13). Максимальний вміст сульфідів спостерігається в центральній частині стінки виливка, що пояснюється процесами ліквідації під час кристалізації. У ході росту дендритів від поверхні форми в напрямку до осьової частини стінки легкоплавкі компоненти, зокрема

сульфіди, витісняються в останню зону кристалізації, сформовану переважно рівноосними кристалами.

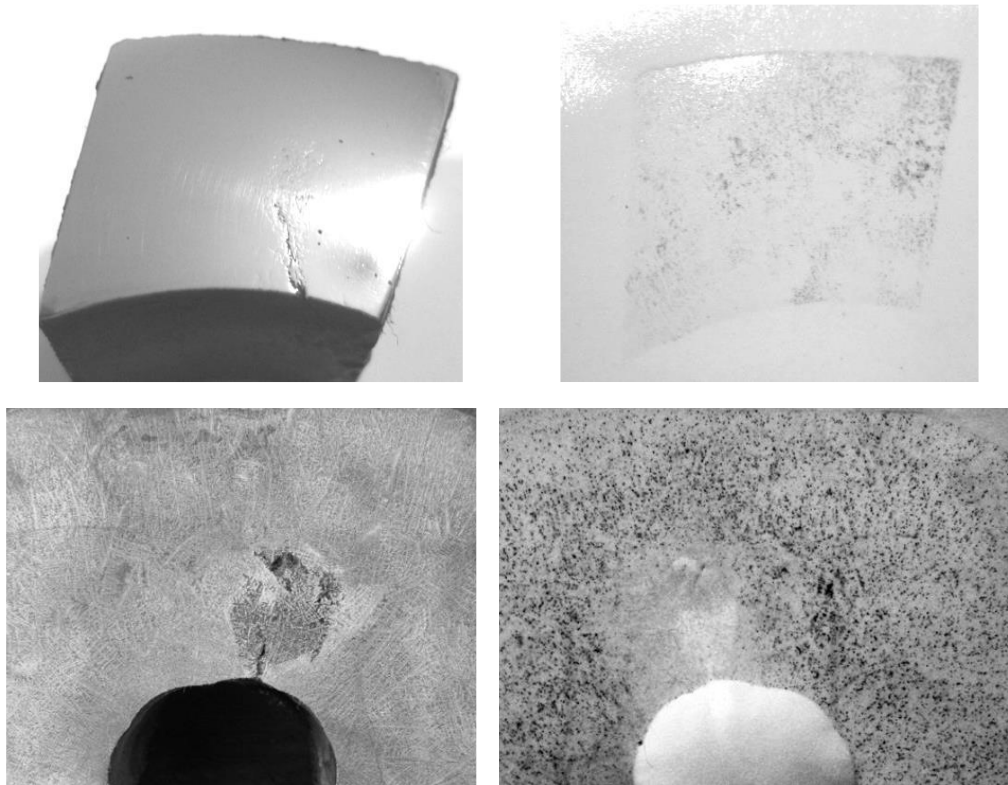


Рисунок 3.13 – Розподіл сульфідних включень у зоні формування гарячих тріщин у дефектних виливках

Слід підкреслити, що центральна зона стінки вилівка є своєрідним концентратором дефектів змішаної газо-усадкової та усадкової природи. За дії термодинамічних і металургійних факторів ці дефекти сприяють додатковому накопиченню сульфідних включень, що підсилює локальну хімічну неоднорідність і знижує здатність металу протистояти утворенню гарячих тріщин (рис. 3.14).

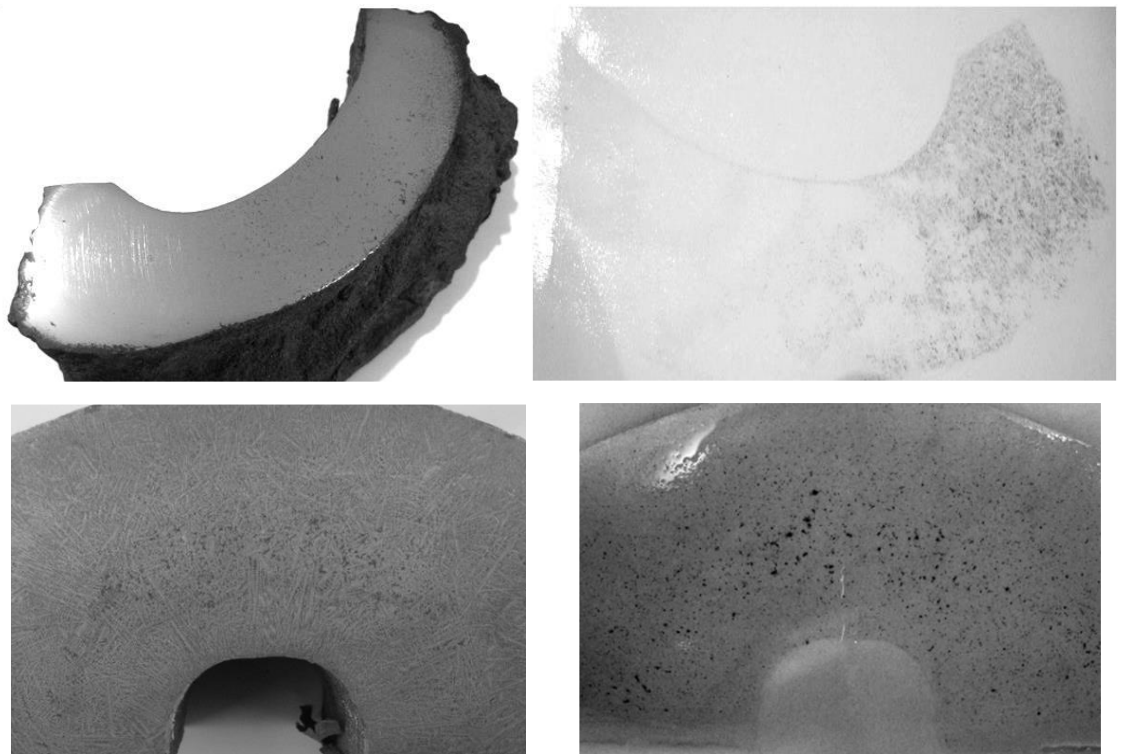


Рисунок 3.14 – Розподіл сульфідних неметалевих включень у зонах потенційного зародження гарячих тріщин

Порівняльний аналіз відбитків Баумана, отриманих у бездефектних ділянках виливків, показав інший характер розподілу сульфідних включень. У придатних виливках вони переважно зосереджені в теплових вузлах, зокрема в зонах переходу до потовщених ділянок стінки, які кристалізуються в останню чергу (рис. 3.14). Це свідчить про більш рівномірний перебіг процесів живлення та відсутність умов для розвитку тріщиноутворення в поверхневих шарах.

Для детальнішого аналізу хімічної неоднорідності дефектних зон виконано спектральний аналіз перерізу стінки виливків з визначенням вмісту основних елементів залежно від відстані від поверхні, результати якого наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад за товщиною дефектної зони стінки

Відстань від поверхні виливки, мм	Концентрація хімічних елементів, %				
	C	Si	Mn	P	S
0	0,205	0,345	1,18	0,017	0,022
2	0,243	0,340	1,20	0,015	0,025
4	0,232	0,340	1,21	0,016	0,026
6	0,228	0,338	1,23	0,021	0,026

На основі отриманих експериментальних даних побудовано графічні залежності зміни концентрацій елементів, які відіграють ключову роль у формуванні гарячих тріщин (рис. 3.15).

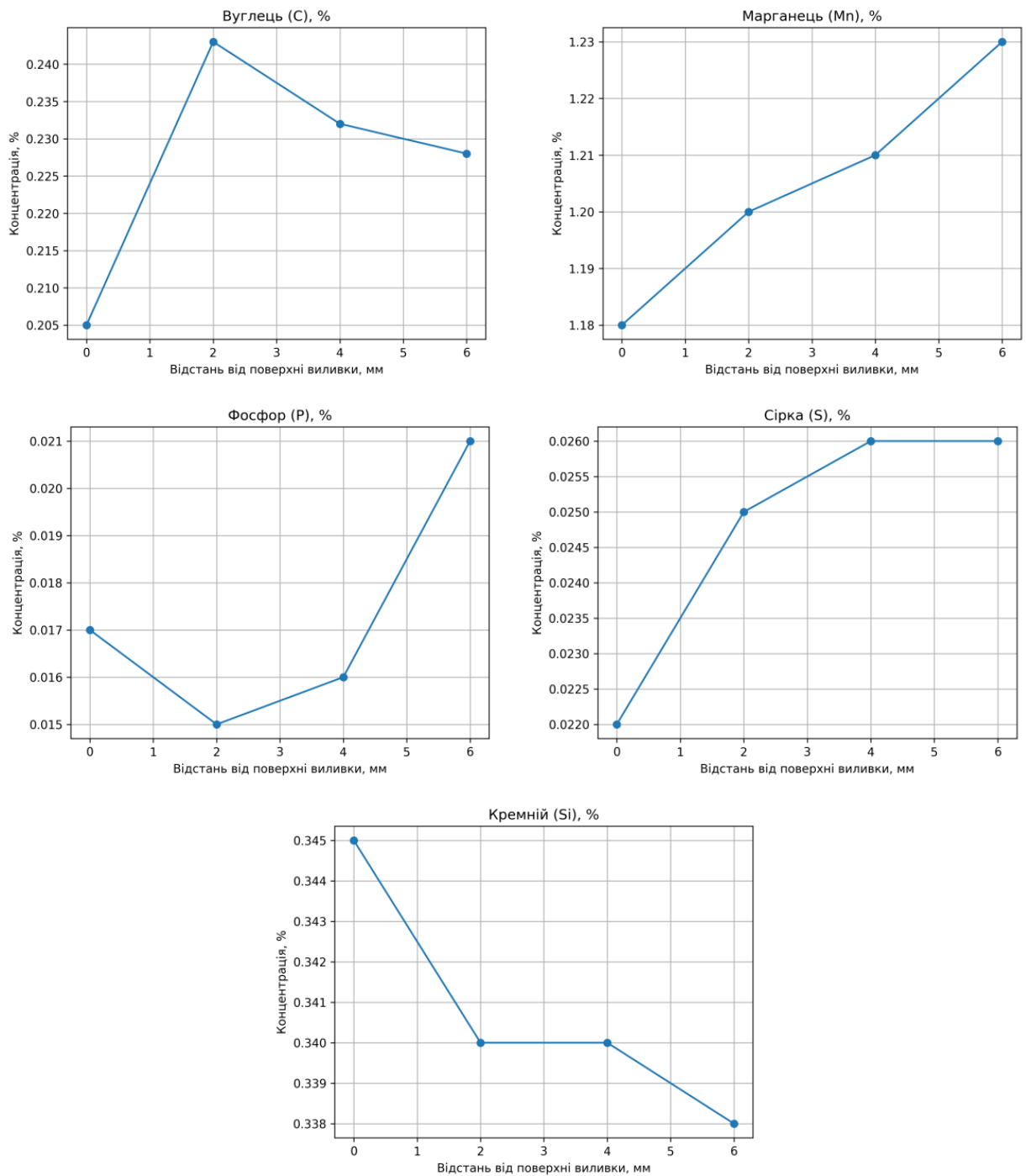


Рисунок 3.15 – Розподіл хімічних елементів по товщині стінки сталевого виливка в зоні гарячих тріщин

На рисунках подано результати аналізу розподілу вмісту вуглецю, марганцю, фосфору, сірки та кремнію по товщині стінки сталевого виливка залежно від відстані від його поверхні.

**Розподіл вуглецю (C)** має виражений неоднорідний характер. Безпосередньо біля поверхні виливка зафіксовано мінімальний вміст вуглецю, що зумовлено процесами поверхневого зневуглецювання під час затвердіння та інтенсивною взаємодією розплаву з газовим середовищем форми. На відстані близько 2 мм від поверхні спостерігається максимум концентрації вуглецю, після чого його вміст поступово зменшується у напрямку до центральної частини стінки. Така закономірність свідчить про ліквідаційний перерозподіл вуглецю в процесі кристалізації та формування різних структурних зон у виливку.

**Марганець (Mn)** демонструє монотонне зростання концентрації від поверхні до внутрішніх шарів стінки. Мінімальний вміст марганцю характерний для приповерхневої зони, тоді як максимальні значення зафіксовано у глибших шарах. Такий розподіл пояснюється спільною ліквідацією марганцю із сіркою та утворенням сульфїду марганцю в міждендритному просторі на пізніх стадіях затвердіння.

**Фосфор (P)** характеризується загальною тенденцією до збагачення внутрішніх зон стінки. Після відносно низького вмісту в приповерхневому шарі його концентрація зростає в напрямку до центру виливка. Це є типовим проявом ліквідації фосфору як елемента з низькою розчинністю в твердому розчині заліза та його накопичення в залишковій рідкій фазі.

**Сірка (S)** також демонструє чітку тенденцію до підвищення концентрації у внутрішніх шарах стінки з подальшою стабілізацією значень. Максимальний вміст сірки зафіксовано в осьовій зоні, що підтверджує її витіснення зростаючими дендритами та концентрацію в міждендритному просторі, особливо в теплових вузлах виливка.

**Кремній (Si)**, на відміну від інших елементів, розподіляється більш рівномірно по товщині стінки. Незначне зменшення його концентрації у

напрямку до центральної зони може бути пов'язане з особливостями дифузійних процесів і відсутністю інтенсивної ліквіації в умовах даної технології лиття.

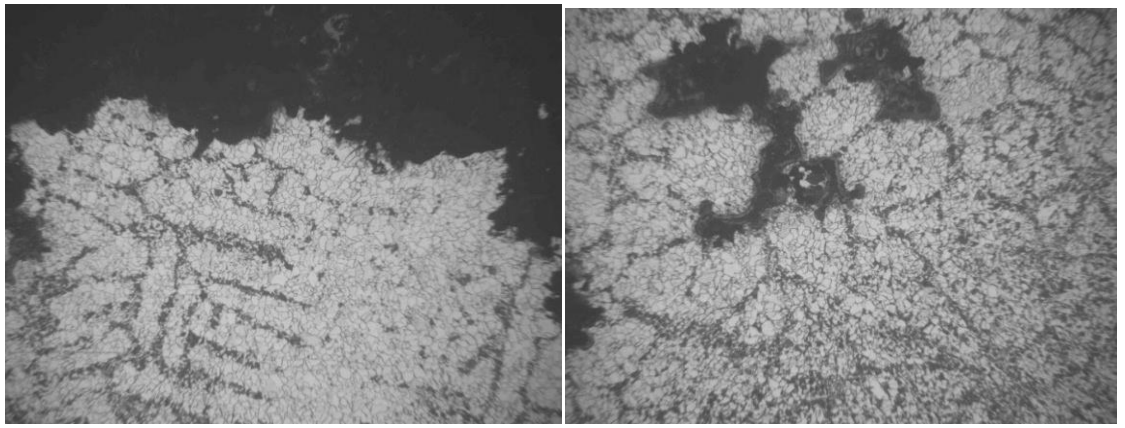
Отримані залежності свідчать, що в процесі кристалізації сталевих виливків формується виражена хімічна неоднорідність по товщині стінки. Збагачення внутрішніх зон такими елементами, як вуглець, марганець, фосфор і сірка, створює передумови для утворення міждендритних легкоплавких фаз, зниження міжкристалітної міцності та підвищення схильності металу до утворення гарячих тріщин. Виявлений характер розподілу хімічних елементів узгоджується з результатами макро- і мікроструктурних досліджень дефектних зон і підтверджує ліквіаційно-кристалізаційний механізм формування гарячих тріщин.

### **3.4 Мікроструктурні ознаки та критерії ідентифікації гарячих тріщин.**

Для коректної ідентифікації дефектів типу гарячих тріщин додатково застосовували мікроструктурний аналіз поверхні дефекту та прилеглої околодефектної зони. Зазначений підхід є одним із найбільш інформативних і достовірних методів встановлення природи формування тріщин у сталевих виливках. Саме мікроструктурні дослідження дозволяють отримати детальну інформацію про стан металу в зоні дефекту, зокрема про товщину та склад окисненого шару, глибину зневуглецювання, характер розподілу структурних складових, а також наявність неметалевих включень у міждендритному просторі.

На основі результатів мікроструктурного аналізу можливо не лише підтвердити кристалізаційну природу гарячих тріщин, але й уточнити механізм їх зародження та розвитку в процесі затвердіння сталі. Разом із тим, слід зазначити, що широке промислове використання даного методу обмежується його високою трудомісткістю та необхідністю спеціальної підготовки зразків.

Результати макроструктурних досліджень дендритної будови в зоні утворення гарячих тріщин узгоджуються з даними мікроструктурного аналізу.



а)

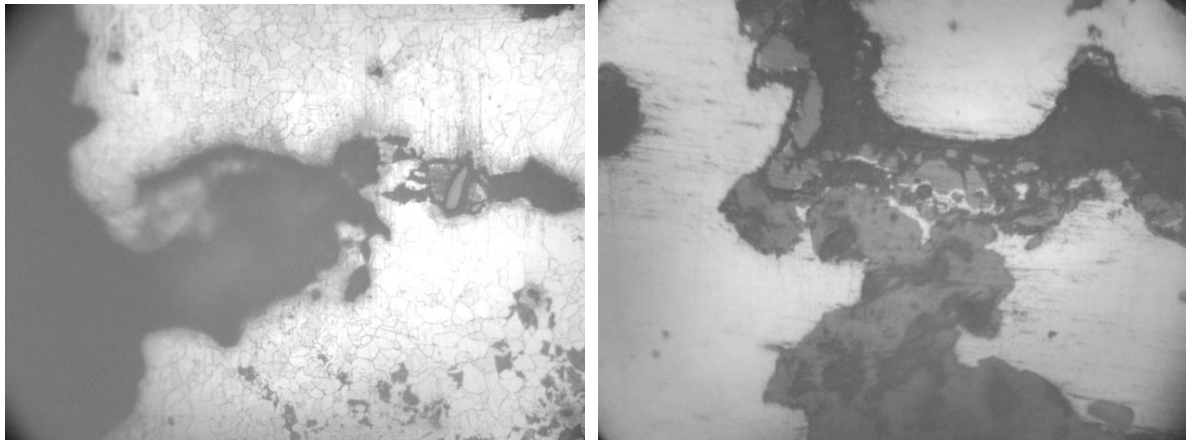
б)

Рисунок 3.16 – Мікроструктура сталі в зоні формування гарячих тріщин (травлення 4%-м спиртовим розчином азотної кислоти,  $\times 200$ ): а – поверхневий шар гарячої тріщини; б – пори в області зародження тріщини.

Як видно з мікроструктур у зоні дефекту, гілки дендритів другого порядку, що виходять на бокову поверхню гарячої тріщини, мають дезорієнтований характер і не демонструють впорядкованого розташування відносно зовнішньої поверхні вилівка (рис. 3.16, а). Розмір структурних складових у зоні гарячих тріщин є помітно більшим порівняно з мікроструктурою металу поза дефектною областю, що свідчить про локальні відмінності умов кристалізації.

У приповерхневому шарі в зоні гарячих тріщин частково зафіксовано явища знеуглецювання, що пояснюється дією окислювальної внутрішньоформової атмосфери за високих температур, характерних для періоду утворення дефекту. Це призводить до формування переважно феритної матриці у безпосередній близькості до поверхні тріщини та пор (рис. 3.16, б).

У початковій зоні зародження гарячої тріщини спостерігається значна кількість пор газо-усадочного походження. Окиснення поверхні пор у поєднанні з вигоранням вуглецю зумовлює локальне зниження міцності металу та створює сприятливі умови для розвитку міжкристалітного руйнування. Крім того, мікроструктурні дослідження показали наявність у зоні утворення гарячих тріщин значної кількості неметалевих включень різної природи — сульфідів, оксидів, силікатів та складних оксисульфідних фаз (рис. 3.17).



а)

б)

Рисунок 3.17 – Оксисульфідне включення: а – у вершині тріщини (травлення 4%-м спиртовим розчином азотної кислоти),  $\times 150$ ; б – в зоні формування гарячої тріщини (без травлення),  $\times 250$ .

На мікроструктурі, наведеній на рис. 3.17, а, показано приклад локалізації тріщини поблизу оксисульфідного включення. Ймовірно, таке включення виконувало роль концентратора напружень і ініціювало зародження гарячої тріщини, що узгоджується з відомими літературними даними. На рис. 3.17, б наведено приклад виходу крупного сульфідного включення безпосередньо на поверхню тріщини. Присутність сульфідів у зоні дефекту інтенсифікує процеси окиснення та додатково знижує міжкристалітну міцність металу, сприяючи розвитку та розкриттю гарячих тріщин.

### **3.5 Методичні підходи до прогнозування зон утворення гарячих тріщин у сталевих виливках.**

Однією з найбільш складних і водночас актуальних задач сучасного ливарного виробництва є розроблення ефективних заходів, спрямованих на запобігання утворенню гарячих тріщин у сталевих виливках. Вирішення цієї задачі вже на етапі проектування технологічного процесу передбачає необхідність попереднього визначення потенційно небезпечних ділянок виливка, схильних до локалізації зазначеного дефекту.

Гарячі тріщини формуються у період кристалізації виливка, коли метал перебуває у твердо-рідкому стані. Саме на цьому етапі відбувається інтенсивний розвиток усадочних процесів, що супроводжуються виникненням внутрішніх напружень у поверхневій корочці виливка. Тому надзвичайно важливим є своєчасне виявлення ділянок, у яких поєднання теплових, геометричних і структурних факторів створює умови для зародження гарячих тріщин, та впровадження відповідних технологічних рішень для зниження ймовірності їх утворення.

Чітке уявлення про механізм формування гарячих тріщин є основою для розроблення методик прогнозування їх появи у тілі виливка. У цьому контексті ефективним інструментом виступає використання спеціалізованих програм комп'ютерного моделювання, які дозволяють оптимізувати конструкцію ливарної форми, умови охолодження та режими заливання з метою повного усунення або істотного зменшення ймовірності виникнення дефектів типу гарячих тріщин.

Протягом останнього десятиліття комп'ютерне моделювання стало невід'ємною складовою оптимізації технологій ливарного виробництва. В основі сучасних програмних комплексів лежать математичні моделі, що забезпечують розрахунок і візуалізацію гідродинамічних, кристалізаційних, теплофізичних, деформаційних та напружено-деформованих процесів, які протікають у ливарній формі на різних стадіях формування виливка. Хоча більшість таких моделей орієнтована на вирішення окремих технологічних задач, їх комплексне використання дозволяє аналізувати взаємопов'язані явища різного рівня та робити узагальнені висновки щодо дефектоутворення.

Усі спеціалізовані програми для моделювання ливарних процесів надають можливість оцінювати розвиток усадочних і кристалізаційних явищ у динаміці затвердіння виливка. Крім того, значна частина програмних продуктів дозволяє визначати рівень напружень і деформацій, що виникають у металі під час його затвердіння. Водночас пряме прогнозування ділянок, схильних до утворення гарячих тріщин, залишається складним завданням. Для його вирішення

доцільним є застосування критерію Ніяма, який традиційно використовується в комп'ютерному моделюванні для оцінювання ймовірності утворення усадочної пористості.

Відомо, що одні й ті самі фізичні процеси, які протікають у процесі кристалізації, можуть призводити до формування різних типів дефектів. Поява гарячих тріщин тісно пов'язана з усадочними явищами, що розвиваються під час затвердіння відливки. Відповідно до класифікації дефектів, наведеної в ДСТУ 19200-80, до дефектів усадочного походження належать усадочні раковини, пористість, рихлота та утяжини. Механізм формування усадочної пористості, так само як і гарячих тріщин, обумовлений особливостями росту дендритної структури та дефіцитом «маточного» розплаву в інтервалі кристалізації.

Принципова відмінність між зазначеними дефектами полягає у стадії їх формування. Гарячі тріщини виникають переважно на початковому етапі затвердіння в поверхневих шарах вилівка, тоді як усадочна пористість формується на заключній стадії кристалізації в центральних, осьових зонах за умов недостатнього живлення металом. Результати досліджень дефектних зон підтверджують, що в основі гарячих тріщин у глибині тіла вилівка практично завжди присутні дефекти усадочного походження — рихлота або усадочна пористість, (макроструктурне травлення у 50 %-ному водному розчині HCl за температури 80 °С, тривалість 30 хв) (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Взаємозв'язок гарячої тріщини з усадочною пористістю у внутрішньому об'ємі сталевого вилівка

У ряді випадків спостерігається також безпосередній зв'язок гарячої тріщини зі схованою усадочною раковиною, локалізованою в центральній частині стінки виливка (рис. 3.19).



Рисунок 3.19 – Злам сталевого виливка з гарячою тріщиною, пов'язаною з усадочною раковиною, локалізованою в центральній частині стінки

З огляду на подібність механізмів формування гарячих тріщин і усадочних дефектів, прогнозування потенційних зон їх виникнення доцільно здійснювати на основі аналізу термодинамічних умов затвердіння виливка. Визначальну роль у цьому відіграють температурний градієнт, швидкість охолодження та інтервал кристалізації сплаву, які формують умови живлення та розвитку дефектів у процесі тверднення металу. Результати математичного моделювання свідчать, що пористість і пов'язані з нею дефекти переважно формуються в зонах з пониженим температурним градієнтом, а також у масивних теплових вузлах, де порушується спрямованість затвердіння.

Водночас при аналізі схильності виливків до утворення гарячих тріщин необхідно враховувати не лише теплові умови, а й напружений стан поверхневої корочки металу. Відомо, що гарячі тріщини формуються внаслідок дії усадочних напружень, які перевищують межу текучості металу в інтервалі високих температур. Для оцінки таких умов може бути використаний критерій критичного головного напруження, відповідно до якого руйнування настає у разі досягнення максимальним головним напруженням значення, рівного межі текучості сплаву.

У більш загальному випадку для чисельного моделювання напружено-деформованого стану вилівка доцільно застосовувати критерій Мізеса–Генкі, який враховує сумарний вплив головних напружень, що виникають у процесі усадки металу під час кристалізації. Комплексне врахування термодинамічних умов затвердіння та напруженого стану металу дозволяє підвищити достовірність прогнозування дефектонебезпечних зон і більш обґрунтовано оцінювати умови формування гарячих тріщин у сталевих виливках.

### **Висновки по розділу 3**

1. Встановлено, що механізм утворення гарячих тріщин у сталевих виливках визначається сукупною дією технологічних умов заливки та кристалізації, які формують нерівномірний напружено-деформований стан металу в температурному інтервалі кристалізації. Ключову роль відіграє гальмування усадки в поєднанні з випереджальним формуванням кристалічного каркаса в окремих зонах вилівка.

2. Показано, що макроструктурні ознаки гарячих тріщин — звивиста форма, розгалужений характер, наявність окисненої поверхні та дендритних слідів – є достовірним свідченням їх формування в твердорідкому стані металу. Локалізація тріщин переважно в термічних вузлах і зонах підвищеного гальмування усадки підтверджує визначальний вплив теплових і механічних умов затвердіння.

3. Виявлено, що в зоні гарячих тріщин спостерігається підвищена хімічна неоднорідність металу, зумовлена міжкристалітною ліквідацією домішкових елементів. Накопичення сірки, фосфору та продуктів їх взаємодії у міждендритному просторі призводить до утворення низькоплавких фаз, які знижують міжзернову міцність і сприяють міжкристалітному руйнуванню в температурному інтервалі кристалізації.

4. Установлено, що неметалеві включення, локалізовані в міжкристалітних прошарках, відіграють роль додаткових концентраторів напружень і ініціаторів розкриття гарячих тріщин. Їх негативний вплив особливо проявляється в умовах обмеженої податливості форми та за підвищених температурних градієнтів.

5. Мікроструктурний аналіз околodefектних зон підтвердив міжкристалітний характер руйнування з чітким зв'язком тріщин із дендритною будовою сталі. Виявлені структурні ознаки — розрив між дендритними осями, залишки міжкристалітної рідкої фази та окиснені межі зерен — дозволяють надійно ідентифікувати гарячі тріщини та відрізнити їх від дефектів холодного походження.

6. Обґрунтовано, що прогнозування зон утворення гарячих тріщин можливе на основі комплексного аналізу геометрії виливка, умов тепловідведення та характеру гальмування усадки. Поєднання макроструктурних спостережень із урахуванням термкінетичних умов кристалізації дозволяє визначати найбільш небезпечні ділянки ще на стадії проєктування технології лиття.

7. Показано, що ефективним напрямом запобігання гарячим тріщинам є керування процесами структуроутворення шляхом оптимізації температури заливки, швидкості охолодження, податливості ливарної форми та хімічного складу сталі. Реалізація таких заходів забезпечує зменшення локалізації напружень, звуження температурного інтервалу крихкості та підвищення тріщиностійкості сталевих виливків.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що гарячі тріщини у сталевих виливках є кристалізаційними дефектами, формування яких відбувається в температурному інтервалі твердодічного стану та зумовлюється неузгодженим перебігом процесів структуроутворення і розвитку усадково-термічних деформацій. Визначено, що вирішальним чинником їх утворення є формування кристалічного каркаса за умов обмеженої пластичності металу.

2. Показано, що схильність сталевих виливків до гарячого тріщиноутворення визначається сукупною дією термодинамічних умов кристалізації, хімічної неоднорідності та напружено-деформованого стану металу. При цьому ключове значення має швидкість накопичення розтягувальних напружень відносно темпів формування механічних властивостей сталі в інтервалі кристалізації.

3. У межах методичних досліджень обґрунтовано доцільність комплексного підходу до оцінювання гарячих тріщин, який поєднує макроструктурний аналіз, мікроструктурні дослідження та оцінку хімічної неоднорідності металу. Такий підхід забезпечує достовірну ідентифікацію гарячих тріщин і дозволяє встановити механізми їх формування.

4. Експериментально встановлено, що гарячі тріщини мають міжкристалітний характер і локалізуються переважно в зонах термічних вузлів та підвищеного гальмування усадки. В околodefектних зонах виявлено підвищену хімічну неоднорідність, зумовлену міжкристалітною ліквідацією домішкових елементів і накопиченням низькоплавких фаз, що знижують міжзернову міцність сталі.

5. Показано, що технологічні параметри лиття — температура заливки, швидкість охолодження, умови тепловідведення та податливість ливарної форми — істотно впливають на механізм утворення гарячих тріщин через зміну

умов формування кристалічного каркаса та рівня локалізації напружень у тілі виливка.

6. Обґрунтовано, що ефективним шляхом запобігання гарячим тріщинам у сталевих виливках є керування процесами структуроутворення шляхом оптимізації хімічного складу сталі, температурно-часових параметрів кристалізації та конструктивно-технологічних рішень. Реалізація такого підходу забезпечує підвищення тріщиностійкості та якості сталевих виливків у промислових умовах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Школярєнко В. П., Нурадїнов А. С., Пригунов С. В. Аналіз дефектів сталєвих виливків та шляхи їх запобїгання // Ливарне виробництво. – 2020. – № 3. – С. 15–23.
2. Дусанюк Ж. П., Шилїна О. П. Дефекти литих заготовок та методи їх усунення : навч. посїб. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – 124 с.
3. Абдулов А. М. Технологїя одержання ливарних сплавів та дефекти виливків : метод. вказївки. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – 86 с.
4. Рубаха С. В. Аналіз дефектів литих деталей та шляхи їх мїнїмїзацїї // Вісник Тернопїльського національного технїчного унїверситету. – 2021. – № 2. – С. 232–239.
5. ДСТУ 9051:2020. Виливки з чорних і кольорових металів. Дефекти. Термїни та визначення. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 18 с.
6. Кропївний В. М., Босий М. В. Ливарнї сплави та формування їх структури : монографїя. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 256 с.
7. Аулін В. В., Кузик О. В., Кропївний В. М. Основи ливарного виробництва : навчальний посїбник. – Київ : НТУУ «КПШ ім. Ігоря Сїкорського», 2016. – 312 с.
8. Швець В. Д., Величко О. Л., Крикун Д. П. Матерїалознавство металів і сплавів: структура, властивостї, застосування. – Київ : КНЕУ, 2017. – 356 с.
9. Stefanescu D. M. Science and Engineering of Casting Solidification. — 2nd ed. — New York : Springer, 2010. — 406 p. — ISBN 978-0-387-74612-8. — DOI: <https://doi.org/10.1007/b135947>.
10. von Mises, R. Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand // Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. — 1913. — S. 582–592.
11. Huber, M. T. Specific work of strain as a measure of material effort // Czasopismo Techniczne. — 1904. — Vol. 22. — P. 81–98.

12. Hencky, H. Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. — 1924. — Vol. 4, No. 5. — P. 323–334.

<https://doi.org/10.1002/zamm.19240040502>

13. Hill, R. The Mathematical Theory of Plasticity. — Oxford : Clarendon Press, 1950. — 356 p.

14. Lubliner, J. Plasticity Theory. — New York : Macmillan, 1990. — 563 p.

15. Kachanov, L. M. Foundations of the Theory of Plasticity. — Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1971. — 482 p.

16. Lemaitre, J., Chaboche, J.-L. Mechanics of Solid Materials. — Cambridge : Cambridge University Press, 1990. — 556 p.

17. Belytschko, T., Liu, W. K., Moran, B. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. — Chichester : John Wiley & Sons, 2000. — 752 p.

18. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. The Finite Element Method. Vol. 2: Solid Mechanics. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. — 479 p.

19. Yuzevych, L. V. Stress–strain state assessment of structural materials using the Huber–Mises–Hencky criterion // Archives of Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 98, No. 2. — P. 53–60.

20. ДСТУ 9051:2020. Виливки із чавуну та сталі. Дефекти. Терміни та визначення понять. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. — 20 с. НМетАУ

21. ДСТУ 8781:2018. Виливки зі сталі. Загальні технічні умови. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. УЦСБ

22. ДСТУ 8981:2020. Виливки з металів та сплавів. Допуски розмірів, маси та припуски на механічне оброблення. — Київ : ТК 177 «Ливарне виробництво», 2020. — 7 с. DSpace Repository

23. Школяренко В. П. Схильність до утворення гарячих тріщин у виливках (за термінами ДСТУ 9051:2020) [Електронний ресурс]. — 2023.

24. Грім С. О. Проект ливарного цеху сталевого литва (аналітичні відомості щодо механізмів гарячих тріщин) [Електронний ресурс]. — Кропивницький, 2022. DSpace Repository

25. Абдуллоє О. А. Проеєтування та виробництво заготовок деталей машин. Розділ 6. Лиття : навчальний посібник [Електронний ресурс]. — Сєєєродоєєцьк : СНУ ім. В. Даєя, 2009. — 124 с. УЦСБ
26. Дунаєюк М. В. Проеєтування та виробництво заготовок деталей машин : навчальний посібник. — Луцьк : ЛНТУ, 2009. — 304 с. [kubg.edu.ua](http://kubg.edu.ua)
27. Шиліна О. П. Технологія конструкційних матеріалів. Частина друга. Конструкційні матеріали: влаєивості, класифікація, виробництво [Електронний ресурс]. — Вінниця : ВНТУ, 2025. — 155 с. [pdf.lib.vntu.edu.ua](http://pdf.lib.vntu.edu.ua)
28. Літовченко П. І., Іванова Л. П. Технологія конструкційних матеріалів : навчальний посібник [Електронний ресурс]. — Харків, 2016. — 306 с.
29. Кондратюк С., Кіндрачук М. Металознаєство та обробка металів : навчальний посібник [Електронний ресурс]. — 2000. [vru36balin.km.ua](http://vru36balin.km.ua)
30. Технологічний процес виготовлення ливарних форм і стрижнів (розділ «Ливарне виробництво») : навчально-практичні матеріали [Електронний ресурс]. — Київ, 2020. НУБіП України