

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

Металургія  
(назва кафедр)

Кваліфікаційна робота (проект)

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз причин та засобів запобігання  
випадковим дефектам сталювого зливу

Виконав: студент II курсу, групи 8.1360-НЕМ

спеціальності 136 металургія  
(код і назва спеціальності)

освітньої програми металургія сорня металів  
(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціалізації)

А.В. Омельченко  
(підпис та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Феденківська О.С.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. Гресько Т.М.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

Кафедра металургії  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 135 металургія  
Освітня програма металургія  
Спеціалізація \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри [Підпис]  
«25» червня 2021 року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Олександр Ярославович Волонтинович

1 Тема роботи (проєкту) Аналіз причин та способів запобігання виникненню дефектів сталевих зливків  
керівник роботи Веденікова О.С. кін. доц.

затверджені наказом ЗНУ від «30» червня 2021 року № 075-С

2 Строк подання студентом роботи 01.07.21

3 Вихідні дані до роботи Науково-технічна література, патенти, ГОСТи, ДСТУ

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Резюме, Анотація, Вступ, Розділ 1, Розділ 2, Розділ 3, Розділ 4, Загальні висновки, Перелік джерел посилання, Додатки.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Акуловий лист-1, Вступ-2, розділ-3, розділ-4; розділ 3-1, розділ 4-5, загальні висновки-2

6 Консультанти розділів роботи

| Розділ  | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---|---|----------------|------------------|
|   |   | завдання видав | завдання прийняв |
| 1 Основні загальнофізичні процеси лінійної електронної трубки   | Вулицько                                  | 01.09.21       | 01.09.21         |
| 2 Інтереси стовбурового з'єднання: основні види та методи вимірювання                                 | Вулицько                                  | 01.09.21       | 01.09.21         |
| 3 Методи збільшення виходу оптичного сигналу при радіофотодіоді у волоконній оптиці                   | Вулицько                                  | 01.09.21       | 01.09.21         |
| 4 Методи вимірювання пропуску чіпів між дротами оптичних стовбурових з'єднань при кристалізації сітки | Вулицько                                  | 01.09.21       | 01.09.21         |

7 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи      | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1.    | Роботи А.М.Вулицько                      | 6.09.21-20.09.21              |          |
| 2.    | Розділ 1                                 | 13.09.21-27.09.21             |          |
| 3.    | Розділ 2                                 | 28.09.21-7.10.21              |          |
| 4.    | Розділ 3                                 | 8.10.21-20.10.21              |          |
| 5.    | Розділ 4                                 | 21.10.21-7.11.21              |          |
| 6.    | Загальні висновки, оформлення дисертації | 8.11.21-11.11.21              |          |
| 7.    | Знаходження кастиміа                     | 22.11.21-30.11.21             |          |

Студент С.Р.В. (підпис) С.В.Семоненко (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) С.В.В. (підпис) О.С.Варшнікова (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер С.В.В. (підпис) Р.М.Ваняк (ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 92 с., 5 табл., 42 рис., 64 джерела.

### СТАЛЕВИЙ ЗЛИВОК, ДЕФЕКТИ СТРУКТУРИ, ВИХІД ПРИДАТНОГО МЕТАЛУ, МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗЛИВКИ СТАЛІ, ДЕФЕКТИ УСАДКОВОГО ПОХОДЖЕННЯ

Тема кваліфікаційної роботи – аналіз причин та засобів запобігання виникнення дефектів сталевих зливок.

Мета роботи – пошук шляхів зменшення кількості дефектів макроструктури сталевих зливок та відповідно збільшення виходу придатного металу при розливці сталі у виливниці.

У розділі 1 визначено закономірності кристалізації сталевих зливок.

У розділі 2 проаналізовано основні дефекти макроструктури сталевих зливок та можливі причини їх виникнення, а також визначено основні методи збільшення виходу придатного металу.

У розділі 3 досліджено процес формування 50-ти тонного листового зливка зі сталі типу 15Г2СФ шляхом 3D-моделювання.

У розділі 4 досліджено кінетику затвердіння зливок на основі фізичного моделювання процесу розливки і кристалізації сталі.

Результати аналітичних досліджень можуть бути використані в навчальному процесі при викладанні спеціальних дисциплін за спеціальністю 136 «Металургія», зокрема, дисципліни «Теорія та технологія розливки і кристалізації сталі».



## АНОТАЦІЯ

Омельченко Я. В. Аналіз причин та засобів запобігання виникнення дефектів сталевого зливку.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 136 «Металургія», науковий керівник О. С. Воденнікова. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра металургії, 2021.

Розглянуто основні закономірності кристалізації сталевого зливка, приведено дефекти структури зливка та можливі причини їх виникнення. Показано, що для забезпечення найбільш сприятливих умов формування зливка спокійної сталі з мінімально можливою кількістю дефектів структури та відповідно збільшення виходу придатного металу рекомендується проводити захист металу у виливниці від окислення, а також застосовувати спеціальні методи теплоізоляції та обігріву верха зливка. Проаналізовано особливості формування 50-ти тонного листового зливка з конструкційної сталі типу 15Г2СФ та за допомогою програмного пакету «MagmaSoft» виконано комп'ютерне 3D-моделювання процесу розливки та затвердіння металу. Приведено результати фізичного моделювання процесів затвердіння зливків з використанням інокуляторів, що вводяться в розплав в кількості від 1 до 12 %.

Ключові слова: СТАЛЕВИЙ ЗЛИВОК, ДЕФЕКТИ СТРУКТУРИ, ВИХІД ПРИДАТНОГО МЕТАЛУ, МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗЛИВКИ СТАЛІ, ДЕФЕКТИ УСАДКОВОГО ПОХОДЖЕННЯ

## ABSTRACT

Omelchenko Y. V. Causes and Means of Defect Preventing Analysis of Steel Ingot.

Qualification work for a master's degree in specialty 136 «Metallurgy», supervisor O.S. Vodennikova. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute, named after Yu. M. Potebnia, Department of Metallurgy, 2021.

The main regularities of crystal ingot crystallization are considered, defects of ingot structure and possible causes of their occurrence are given. It is shown that to ensure the most favourable conditions for the formation of a calm steel ingot with the minimum possible number of structural defects and increase the yield of suitable metal, it is recommended to protect the metal in the mould from oxidation and use special methods of thermal insulation and heating. The peculiarities of forming a 50-ton sheet ingot from structural steel type 15G2SF were analysed. It was performed with the help of the software package «MagmaSoft» computer 3D-modeling of the process of casting and curing of metal. The results of physical modelling of ingot curing processes using inoculators introduced into the melt in the amount of 1 to 12 %.

Key words: STEEL IN-GROUND, STRUCTURAL DEFECTS, YIELD OF USEFUL METAL, SIMULATION OF STEEL CASTING PROCESS, DEFECTS OF SHRINKING DERIVATION

## АННОТАЦИЯ

Омельченко Я. В. Анализ причин и методов предотвращения возникновения дефектов стального слитка.

Квалификационная работа на соискание высшего образования магистра по специальности 136 «Металлургия», научный руководитель О. С. Воденникова. Запорожский национальный университет, Инженерный учебно-научный институт им. Ю.М. Потебни, кафедра металлургии, 2021.

Рассмотрены основные закономерности кристаллизации стального слитка, приведены дефекты структуры слитка и возможные причины их возникновения. Показано, что для обеспечения наиболее благоприятных условий формирования слитка спокойной стали с минимально возможным количеством дефектов структуры и соответственно увеличения выхода годного металла рекомендуется проводить защиту металла в изложнице от окисления, а также применять специальные методы теплоизоляции и обогрева верха слитка. Проанализированы особенности формирования 50-ти тонного листового слитка из конструкционной стали типа 15Г2СФ и с помощью программного пакета «MagmaSoft» выполнено компьютерное 3D-моделирование процесса разлива и затвердевания металла. Приведены результаты физического моделирования процессов затвердевания слитков с использованием вводимых в расплав инокуляторов в количестве от 1 до 12 %.

Ключевые слова: СТАЛЬНОЙ СЛИТОК, ДЕФЕКТЫ СТРУКТУРЫ, ВЫХОД ГОДНОГО МЕТАЛЛА, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗЛИВКИ СТАЛИ, ДЕФЕКТЫ УСАДОЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 10 |
| 1 ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СТАЛЕВОГО ЗЛИВКА.....                              | 13 |
| 1.1 Основні уявлення про кристалізацію сталі та сплавів.....                              | 13 |
| 1.2 Особливості кристалізації сталевих зливок.....  | 16 |
| 1.2.1 Структура зливка спокійної сталі.....   | 16 |
| 1.2.2 Структура зливка напівспокійної сталі.....  | 24 |
| 1.2.3 Структура зливка киплячої сталі.....  | 26 |
| 1.5 Висновки.....   | 29 |
| 2 ДЕФЕКТИ СТАЛЕВОГО ЗЛИВКА: ОСНОВНІ ВИДИ ТА МЕТОДИ БОРОТЬБИ З НИМИ.....                   | 30 |
| 2.1 Основні дефекти сталевих зливок.....  | 30 |
| 2.2 Методи боротьби з дефектами сталевих зливок.....                                      | 41 |
| 2.3 Висновки.....   | 44 |
| 3 МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ВИХОДУ ПРИДАТНОГО МЕТАЛУ ПРИ РОЗЛИВЦІ СТАЛІ У ВИЛИВНИЦІ .....         | 45 |
| 3.1 Основні шляхи збільшення виходу придатного металу при розливці сталі у виливниці..... | 45 |
| 3.2 Вставки теплоізоляційні типу МКРВ-340.....  | 49 |
| 3.3 Прибуткові надставки.....   | 51 |
| 3.3.1 Основні уявлення про прибуткові надставки.....                                      | 49 |
| 3.3.2 Види конструкцій прибуткових надставок.....   | 51 |
| 3.4 Висновки.....   | 56 |
| 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТІВ СТАЛЕВОГО ЗЛИВКА ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СТАЛІ.....    | 60 |
| 4.1 3D-моделювання формування 50-тонного листового зливка зі сталі типу 15Г2СФ.....       | 60 |



|  |    |
|--|----|
| 4.2 Дослідження кінетики затвердіння зливків на основі фізичного моделювання процесу розливки і кристалізації сталі..... | 69 |
| 4.3 Висновки.....  | 76 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....   | 77 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....  | 79 |
| ДОДАТКИ.....   | 86 |
| ДАДАТОК А НАУКОВІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА.....  | 86 |

## ВСТУП

*Актуальність роботи.* Одним з проблемних питань підвищення якості сталевих зливків є контроль та зменшення кількості дефектів структури зливка. Насамперед, серед дефектів, які важко усуваються, слід виділити  $\Lambda$ -подібну зональну ліквацию, V-подібну осьова сегрегацію, а також донний конус від'ємної ліквациї, в якому зосереджена значна кількість великих неметалевих включень. При цьому розвиток пов'язаної з цим хімічної та структурної неоднорідностей за висотою та перерізом зливків призводить до нестабільності механічних властивостей металопродукції [1].

Процес розливки та кристалізації сталі є важливим етапом отримання сталевих зливків. При цьому для підвищення якості металу використовують:

- контроль технологічних та геометричних параметрів зливка [2–4];
- введення модифікаторів для впливу на структуру зливка [5–7];
- захист струменя металу, що розливається, від вторинного окислення з застосуванням спеціальних пристроїв [8–10];
- струменеве вакуумування при розливці сталі [2, 11–14].

*Мета та задачі роботи.* Мета роботи – пошук шляхів зменшення кількості дефектів макроструктури сталевих зливків та відповідно збільшення виходу придатного металу при розливці сталі у виливниці.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні теоретичні та прикладні завдання:

1. Визначити закономірності кристалізації сталевих зливків.
2. Проаналізувати основні дефекти макроструктури сталевих зливків та можливі причини їх виникнення.
3. Визначити основні методи збільшення виходу придатного металу.
4. Дослідити процес формування 50-ти тонного листового зливка зі сталі типу 15Г2СФ шляхом 3D-моделювання.
5. Дослідити кінетику затвердіння зливків на основі фізичного моделювання процесу розливки і кристалізації сталі.

*Об'єкт дослідження:* макроструктура сталевого зливка; процес формування в сталевому зливку дефектів усадкового походження; процес введення інокуляторів під час розливки сталі.

*Предмет дослідження:* 3D-моделювання формування 50-ти тонного листового зливка зі сталі типу 15Г2СФ; кінетика затвердіння зливків на основі фізичного моделювання процесу розливки і кристалізації сталі.

*Методи дослідження:* при узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку дослідження дефектів сталевого зливка та методів боротьби з ними використовувався комплексний підхід; обробку аналітичних даних проводили з використанням персонального комп'ютера.

*Наукова новизна одержаних результатів.* Приведені результати 3D-моделювання процесу розливки та кристалізації сталевого зливка дозволить визначити можливі шляхи зменшення дефектів зливка (наприклад, усадкового походження) для отримання якісної металопродукції, конкурентоспроможної на світовому ринку.

*Практичне значення одержаних результатів.* Результати аналітичних досліджень можуть бути використані в навчальному процесі при викладанні спеціальних дисциплін за спеціальністю 136 «Металургія», зокрема, дисципліни «Теорія та технологія розливки і кристалізації сталі».

*Особистий внесок дослідника.* Основні результати, наведені в кваліфікаційній роботі магістра, отримані автором особисто. Ним виконано постановку завдань дослідження, обрано методику аналітичних досліджень, проаналізовано та узагальнено основні результати досліджень, сформульовано загальні висновки.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автором приведені основні дефекти сталевого зливка та запропоновані методи боротьби з ними [1, 2].

*Апробація результатів роботи.* Основні висновки та результати кваліфікаційної роботи магістра доповідалися та обговорювалися на:

– всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів, аспірантів та молодив вчених «Актуальні питання сталого

науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України» (м. Запоріжжя, 19–21 жовтня 2021 р.);

– всеукраїнській науково-практичній конференції «Теоретичні та практичні засади розвитку економіки, обліку, фінансів, менеджменту та права» (м. Запоріжжя, 23–24 листопада 2021 р.);

– наукових семінарах кафедри металургії Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету (м. Запоріжжя, 2021 р.).

*Публікації.* Основні результати кваліфікаційної роботи магістра знайшли відображення у двох тезах доповідей на всеукраїнських конференціях.

*Структура і обсяг роботи.* Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку джерел посилання та додатку. Загальний обсяг роботи становить 92 сторінок, з них 5-ть таблиць, 42 рисунки, 64 джерел посилання.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

1. Омельченко Я. В., Воденнікова О. С. Дефекти сталевих зливок: основні види та методи боротьби з ними. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України* : всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти, аспірантів, аспірантів та молодих вчених (м. Запоріжжя, 19–21 жовтня 2021 р.). Запоріжжя : ЗНУ, 2021. С. 225–227.

2. Воденнікова О. С., Омельченко Я. В. Основні методи боротьби з дефектами сталевих зливок. *Теоретичні та практичні засади розвитку економіки, обліку, фінансів, менеджменту та права* : всеукр. наук.-практ. конф. (м. Запоріжжя, 23–24 листопада 2021 р.). Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 148–150.

# 1 ЗАКОНОМІРНОСТІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СТАЛЕВОГО ЗЛИВКА

## 1.1 Основні уявлення про кристалізацію сталі та сплавів

В основі кристалізації сплавів (процесу переходу сплаву з рідкого стану у твердий з утворенням кристалічних ґраток (кристалів)), як і чистих металів, лежить прагнення системи до найстійкішого стану при даних умовах, тобто прагнення до стану з мінімальною, вільною енергією. Проте, розглядаючи кристалізацію сплавів слід мати на увазі, що зміна рівноважного стану багатокомпонентної системи визначається не тільки такими зовнішніми факторами як температура і тиск, але і внутрішніми, оскільки з уведенням у метал інших елементів з'являється нова термодинамічна змінна – склад (концентрація).

Процес кристалізації металевих сплавів і пов'язані з ним численні закономірності їх будови описуються за допомогою так званих діаграм стану (діаграм фазової рівноваги).

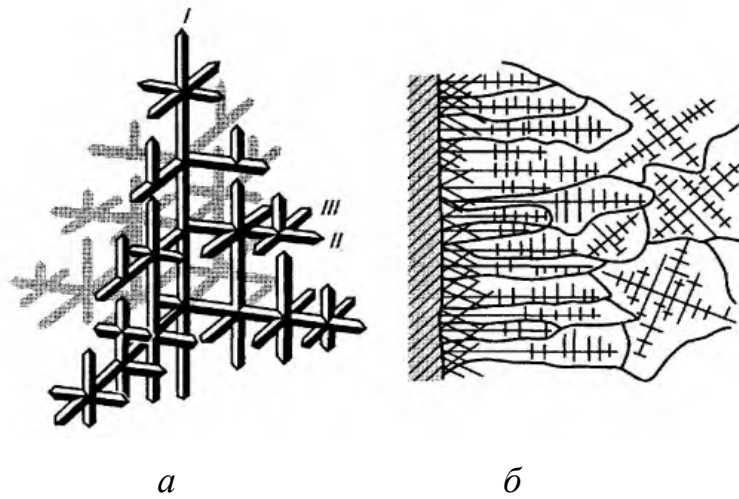
Дендритна кристалізація була помічена ще Д. К. Черновим. Кристал імені Д. К. Чернова представляє зразок дендрита («дендрит» – дерево), що виріс в умовах кристалізації сталевих зливок до величезних розмірів і ваги (висота 39 см, вага 345 кг).

Схема утворення дендритів згідно роботам Д. К. Чернова представлена на рис. 1.1 та 1.2. Приклад дендритної будови металу представлений на рис. 1.3а, де зображено кристалічне утворення з великою кількістю яскраво виражених дендритних кристалів заліза.

Різновидом дендритних кристалізацій є утворення в зливках стовпчастих (шестоватих) кристалів. Явище утворення стовпчастих дендритів, які пронизують зливку від периферії до серцевини, носить назву транскристалізації (рис. 1.3б). Потонання осей дендритів, що проростають у розплав, та їх фрагментація потоками охолодженого розплаву показані на рис. 1.4.

Розміри кристала, для якого робота утворення максимальна, називають

критичними, а сам зародок кристала – критичним зародком.



*I–III* – порядок осей дендритів

Рисунок 1.1 – Схема будови дендритного кристалу (*a*) та росту дендритів за перерізом зливка (*б*)

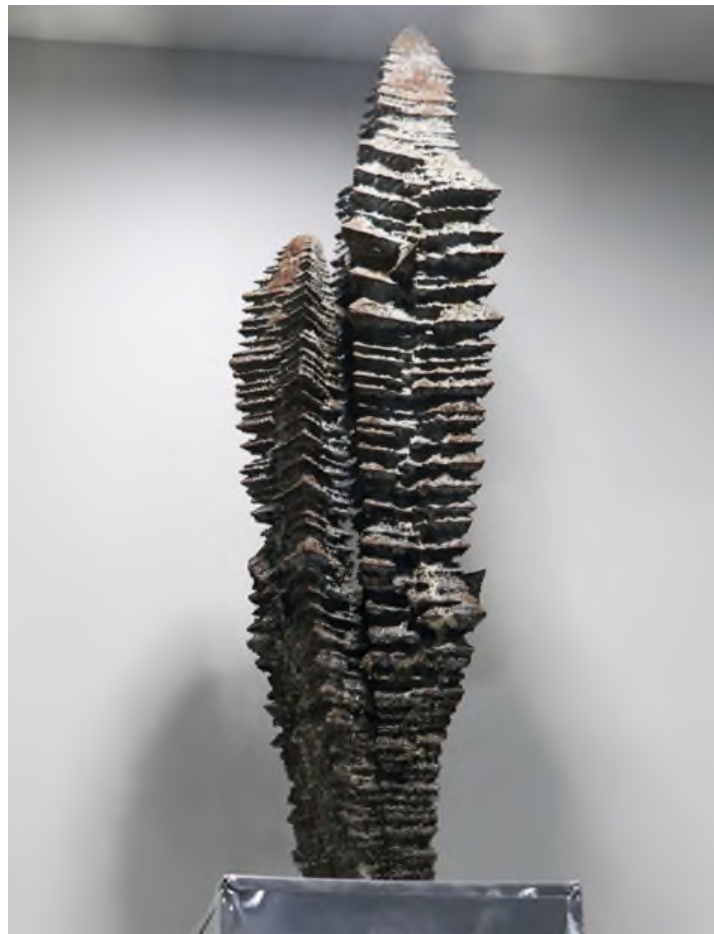


Рисунок 1.2 – Дендрит з витягнутою віссю 1-го порядку [16]



Форма та розмір кристалів, що утворюються після первинної кристалізації, можуть бути різними в залежності від присутності домішок та умов кристалізації. При значній швидкості охолодження утворюється дендритна структура (рис. 1.5).

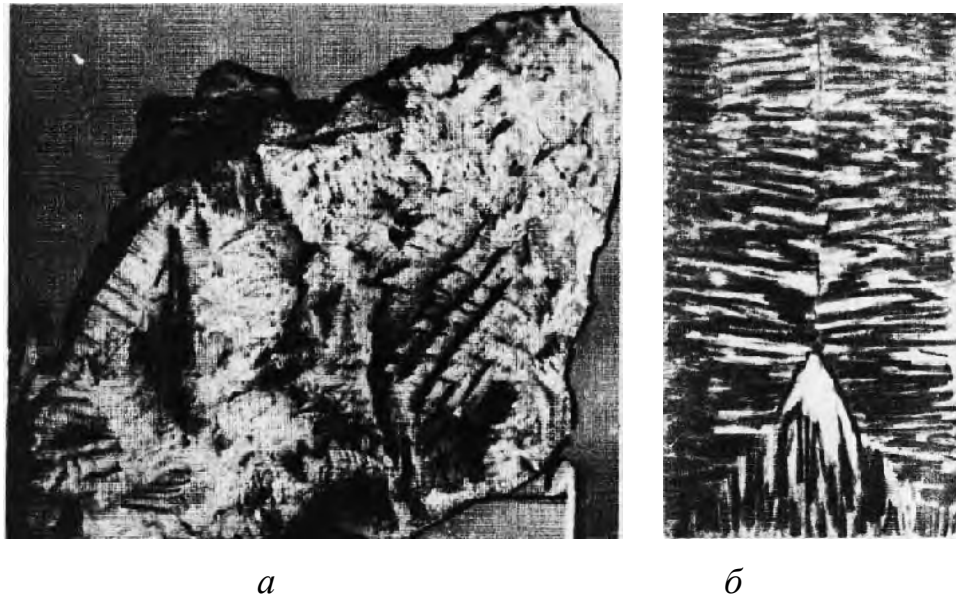


Рисунок 1.3 – Макроструктура зливка з дендритом заліза (а) та макроструктура зливка з транскристалізацією (б)



*a–г* – послідовні стадії процесу

Рисунок 1.4 – Потонання осей дендритів, що проростають у розплав, та їх фрагментація потоками охолодженого розплаву [17]

Подрібнення зерна при кристалізації можна досягнути двома шляхами – регулюванням ступеня переохолодження, тобто зміною швидкості охолодження при кристалізації, і модифікуванням (введення в рідкий матеріал

певних речовин, які утворюють додаткові центри кристалізації, завдяки чому подрібнюється зерно).

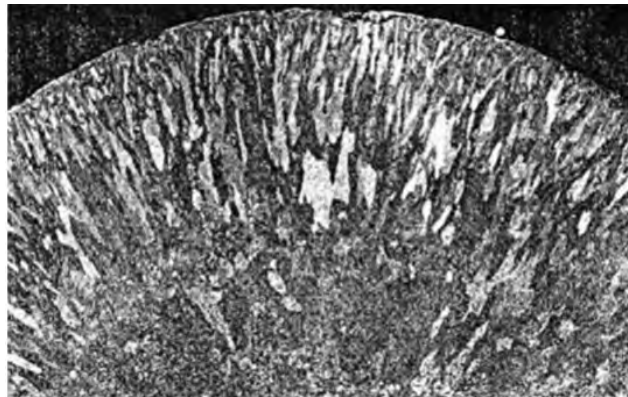


Рисунок 1.5 – Дендритний стан сталі [16]

## **1.2 Особливості кристалізації сталевого зливка**

### **1.2.1 Структура зливка спокійної сталі**

Звичайна структура зливка спокійної сталі (рис. 1.6) характеризується наявністю шести основних зон:

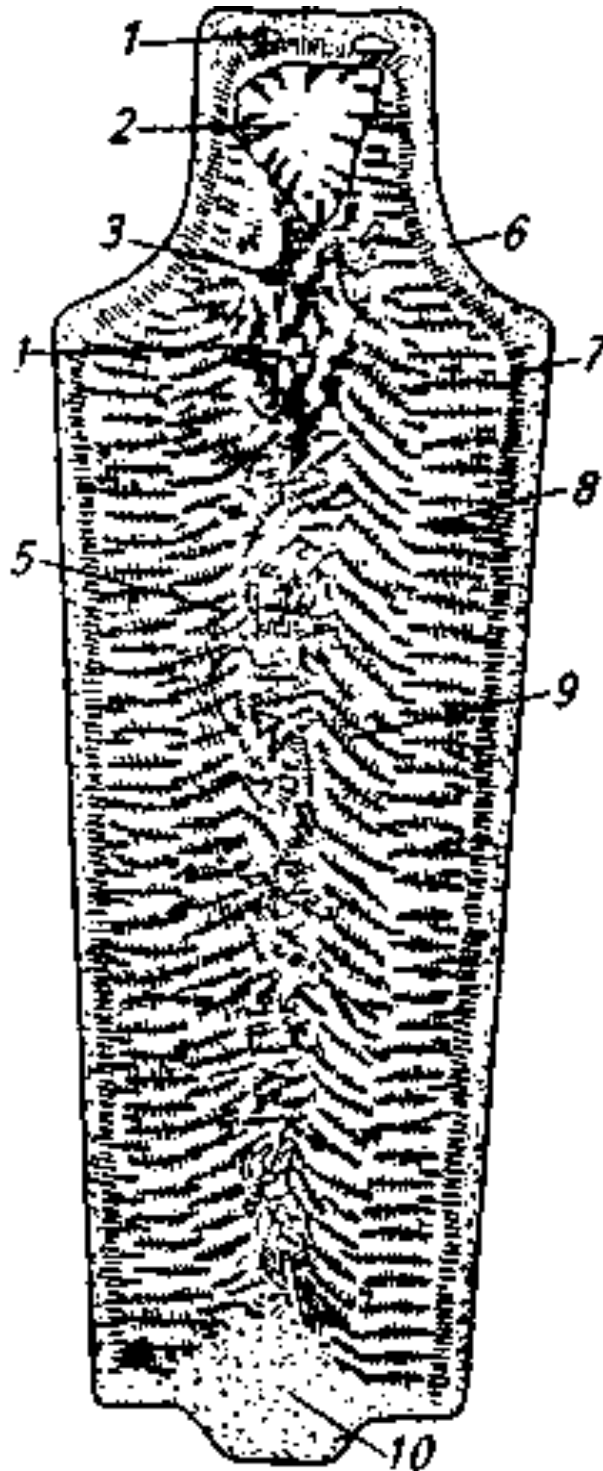
#### **1. Тонкий поверхневий шар.**

Тонкий поверхневий шар утворюється у момент зіткнення рідкого металу із стінками виливниці. Цей шар (часто його називають скориночкою зливка) складається з дрібних безладно орієнтованих кристалів; за хімічним складом він близький до складу рідкого металу в ковші.

#### **2. Зона стовбчастих кристалів.**

Протяжність і характер цієї зони визначаються хімічним складом сталі, інтенсивністю охолодження та різницею температур рідкого металового розчину і зовнішньої охолоджуваної поверхні. У міру збільшення ширини зони стовбчастих кристалів інтенсивність передачі тепла через цей товстий шар знижується; одночасно зменшується охолоджуюча здатність виливниці, що нагрівається; усадка зливка, який формується, приводить до утворення зазору

між виливницею і скориночкою зливка, що також різко погіршує умови тепловідведення [15–17].



*1* – міст над усадковою раковиною; *2* – усадкова раковина; *3, 4* – порожнечі та рихлість; *5* – рівноорієнтовані кристали; *6* – дрібні рівноосні кристали; *7, 8* – зона стовбчастих кристалів; *9* – стовбчасті кристали, направлені до теплового центру; *10* – конус осадження

Рисунок 1.6 – Схема кристалічної структури зливка спокійної сталі

### 3. Зона, що характеризується уповільненням зростання кристалів.

Зона, що характеризується уповільненням зростання кристалів, зменшенням їх розмірів і деяким їх відхиленням вгору, у бік теплового центру зливка. Повільно зростаючі кристали вже не встигають «захоплювати» гази, що виділяються при кристалізації; ланцюжок цих газів захоплює з собою ліквати, і в затверділому зливку залишаються відповідні сліди ( $\Lambda$ -подібна ліквация або «вуса» (рис. 1.7–1.10). Кінець кристалізації третьої зони відповідає моменту утворення по всьому периметру зливка теплоізолюючого зазору між застиглим зливком і виливницею. Температура виливниці до цього моменту досягає температури червоного коління, а направлене тепловідведення в зоні рідкого металу, що залишився, практично припиняється, і починається поступове охолодження всієї рідкої маси металу, що залишилася в центрі зливка.

### 4. Зона безладно орієнтованих кристалів.

Супроводжуючі кристалізацію ліквацийні явища приводять до того, що в матковому розчині, що залишився в центрі зливка, є велике число центрів кристалізації. В результаті ця (осьова) зона зливка характеризується наявністю безладно орієнтованих рівновісних кристалів. Унаслідок усадки зливка звичайними дефектами цієї зони є осьова рихлість та V-подібна ліквация (рис. 1.9).

### 5. Зона конуса осадження.

Зона має конусоподібну форму і розташована в нижній частині зливка. Ця область є конгломератом зрощених кристалів, частка яких зростала вгору під впливом охолоджуючої дії піддону, частка опускалася вниз у результаті обламування кристалів другої та третьої зон, а також осідання кристалів при кристалізації осьової частині зливка. Перетин кристалів другої зони, зростаючих в горизонтальному напрямленні, і кристалів п'ятої зони, зростаючих у вертикальному напрямленні, дає на розрізі зливка рисунок конуса без чітко позначеної вершини. Донна частина зливка випадків характеризується негативною сегрегацією таких домішок, як вуглець, фосфор, сірка; проте в разі введення в метал сильних розкислювачів і десульфураторів, утворюючих

тугоплавкі оксиди і сульфіді, здатних служити центрами кристалізації, в зоні конуса осадження виявляється підвищений вміст таких тугоплавких включень.

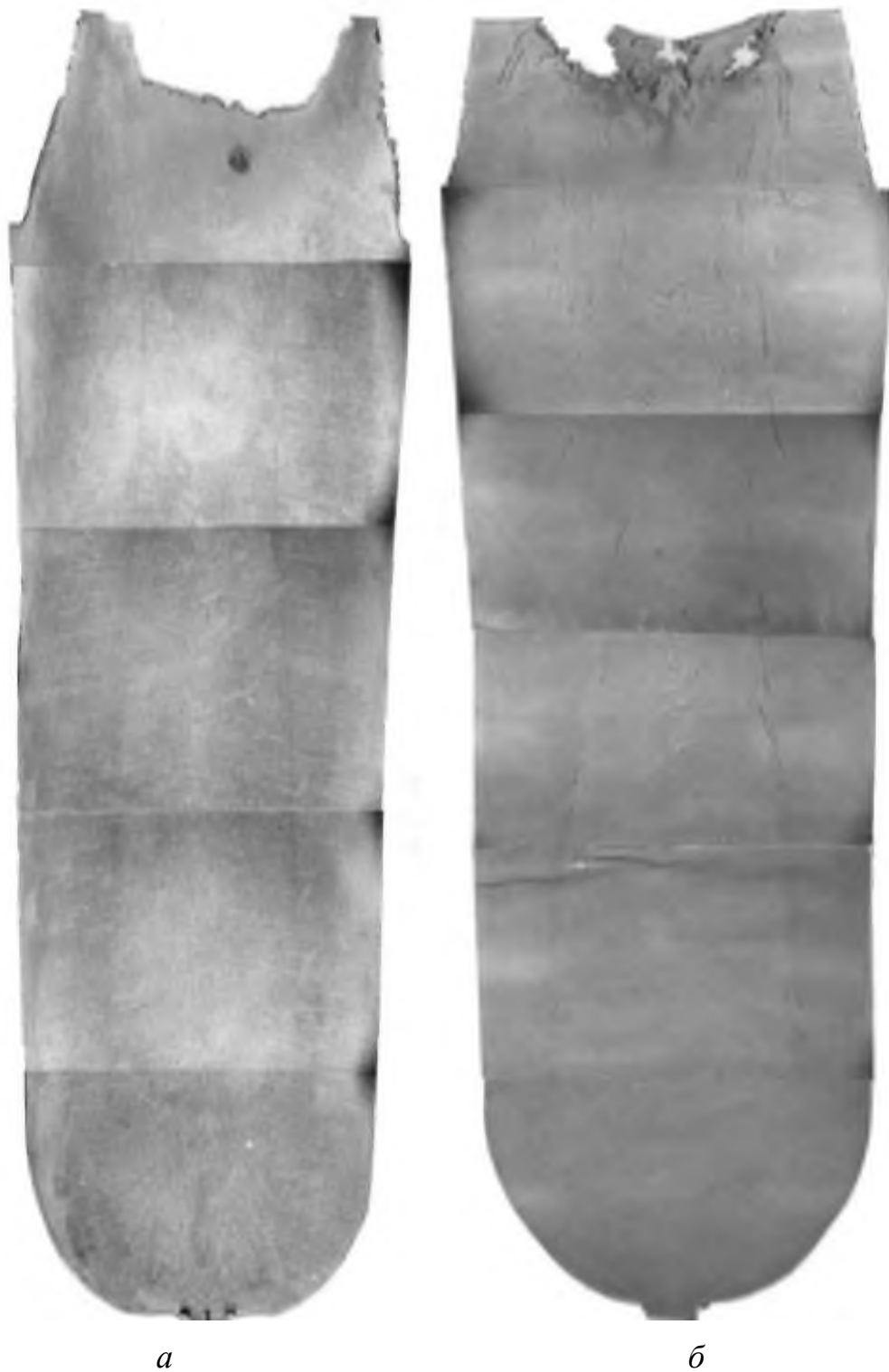


Рисунок 1.7 – Макроструктура зливка масою 6,2 т зі сталі 10 (дефект:  $\Lambda$ -подібна ліквация) (а) та зливка масою 6 т зі осьової сталі (дефект:  $\Lambda$ -подібна ліквация) (б) [16]

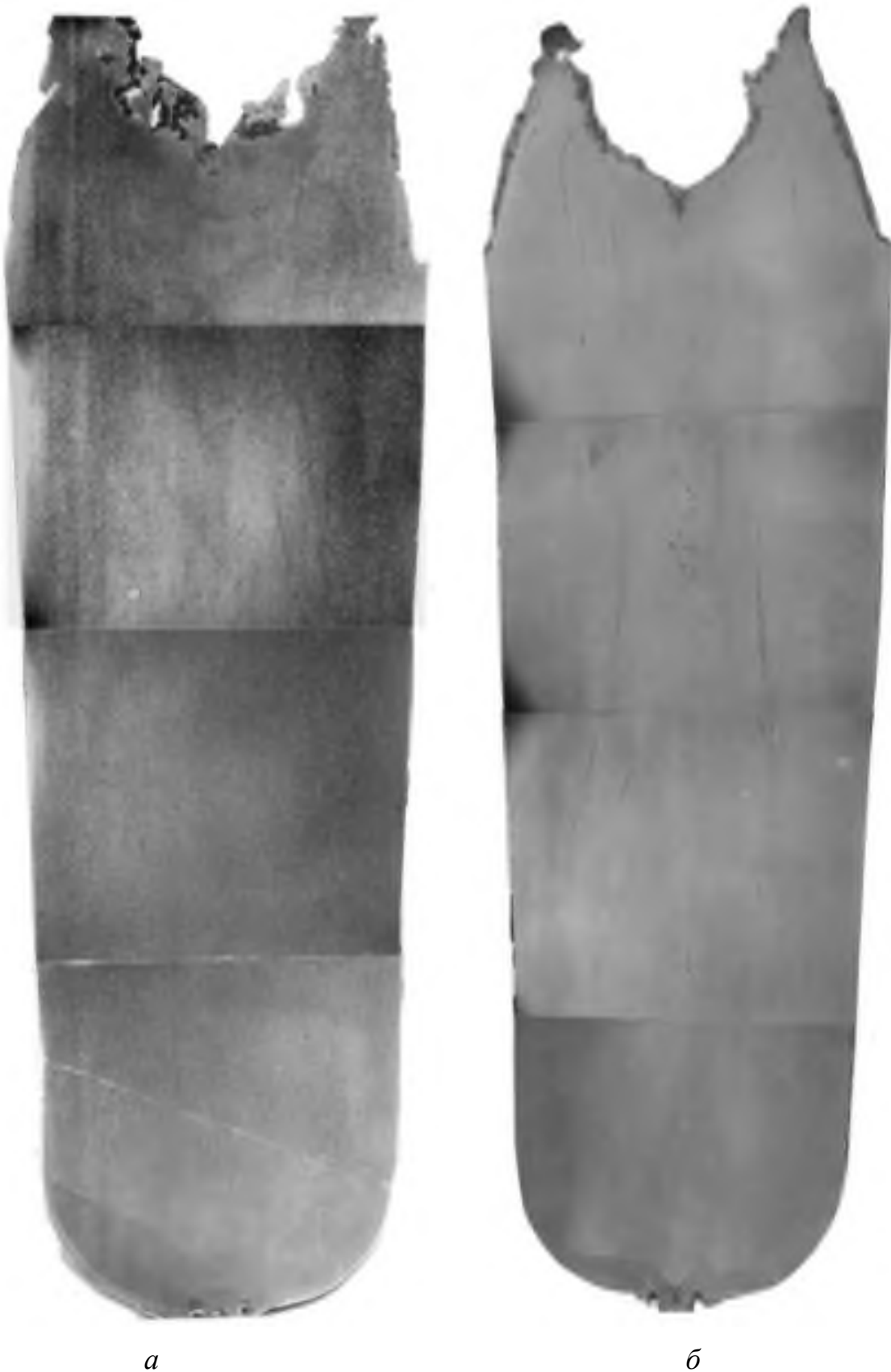


Рисунок 1.8 – Макроструктура зливка масою 5,0 т зі сталі У8ГА (дефект:  $\Lambda$ -подібна ліквация) (а) та зливка масою 6,2 т зі сталі 20Х (дефект:  $\Lambda$ -подібна ліквация та осьова пухкість) (б) [16]





Рисунок 1.9 – Макроструктура зливка масою 4,6 т зі сталі 18ХГТ (дефект: осьова пухкість, V-подібна ліквация, заворот кірки,  $\Lambda$ -подібна ліквация) (а) та зливка масою 6,0 т зі сталі 18ХГТ (дефект:  $\Lambda$ -подібна ліквация, осьова пухкість, заворот кірки) (б) [16]

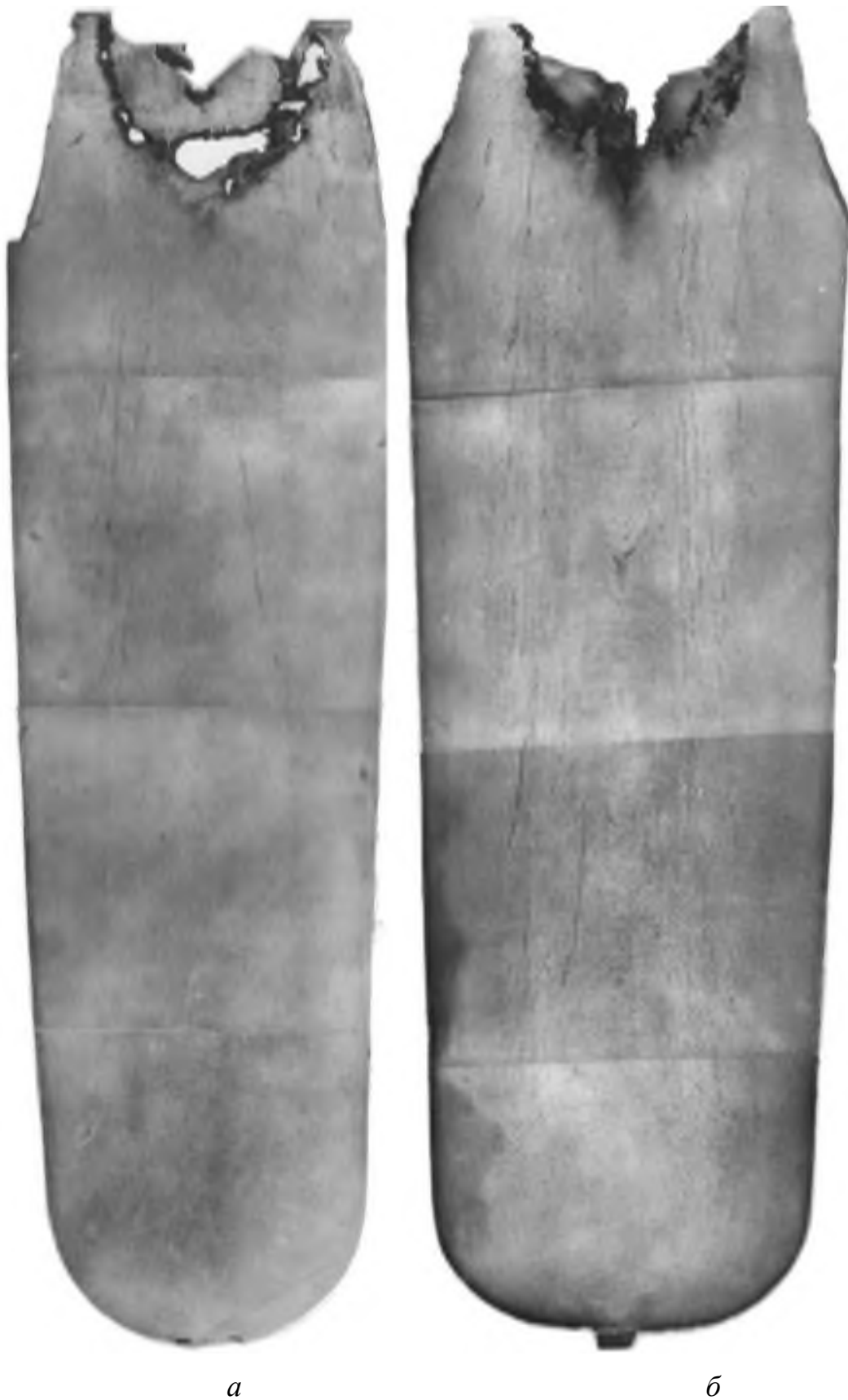


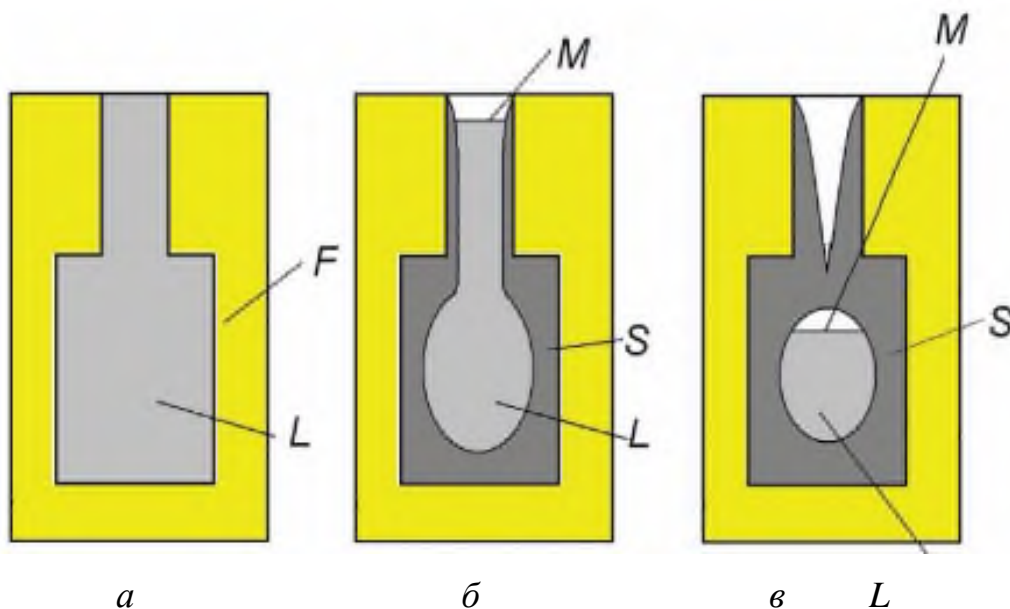
Рисунок 1.10 – Макроструктура зливка масою 4,6 т зі сталі 45Х (дефект:  $\Lambda$ -подібна ліквация) (*а*) та зливка масою 4,6 т зі сталі 45Г2 (дефект:  $\Lambda$ -подібна ліквация, осьова пухкість) (*б*) [16]

### 6. Зона усадкової раковини.

Усадка сталевих зливок супроводиться окрім підвищення щільності металу ще і протіканням процесу газовиділення при переході з рідкого в твердий стан. Одночасно в процесі усадки змінюються розміри та форма зливка.

Сумарний обсяг усадкових раковин і розсіяної пористості має закономірність зміни в залежності від складу, дещо відмінну від характеру зміни загальної усадки від складу сплаву. Розташування та характер усадкових раковин у зливках залежно від умов лиття, конструкції виливниці властивостей сплаву можуть бути різні. За місцем розташування усадкові раковини можуть бути: верхні, нижні, а крім того, і ті та інші можуть бути внутрішні та зовнішні [15, 18].

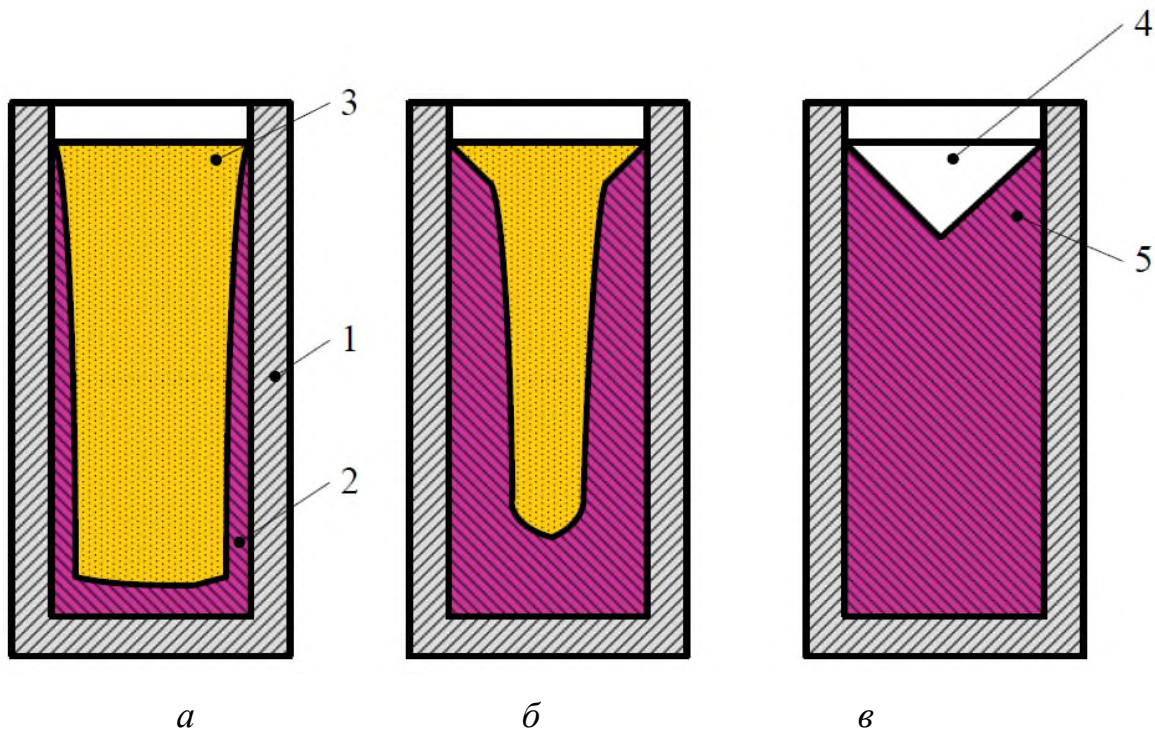
Схематичне зображення етапів затвердіння зливка представлено на рис. 1.11, а формування усадкової раковини на різних стадіях затвердіння зливка представлено на рис. 1.12 [19].



*M* – дзеркало розплаву; *L* – розплав; *S* – тверда фаза; *F* – форма;

*а* – вихідний стан; *б* – утворення усадкової раковини; *в* – кристалізація замкнутого обсягу розплаву в тепловому вузлі з утворенням внутрішньої усадкової раковини або розсіяної пористості

Рисунок 1.11 – Схематичне зображення етапів затвердіння зливка [19]



1 – виливниця; 2 – усадкова раковина; 3 – рідкий метал;

4 – усадкова раковина; 5 – метал, що витрачається зі головним обрізом

Рисунок 1.12 – Схема формування усадкової раковини на початковій (а), проміжній (б) та кінцевій (в) стадіях затвердіння зливка

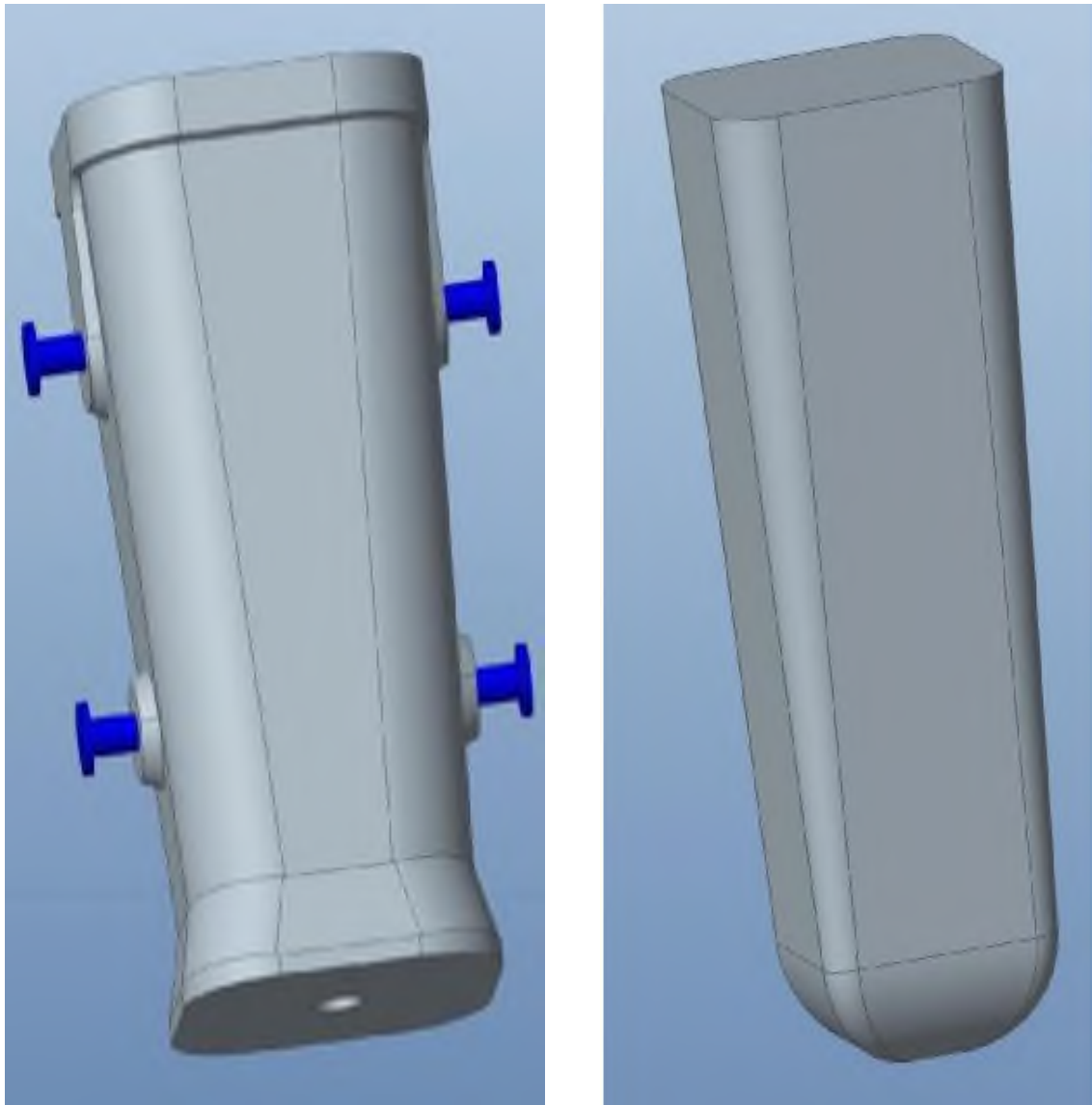
3D-моделі виливниці, зливка, прибуткової надставки та піддону для зливак спокійної сталі представлені на рис. 1.13 [20].

## 1.2.2 Структура зливка напівспокійної сталі

Структура зливка напівспокійної сталі формується за умов його розкислення, що наближається до спокійного металу. Ступінь розкислення напівспокійної сталі впливає на якість зливка. На сьогодні розрізняють чотири групи напівспокійної сталі за ступенем розкислення (рис. 1.14): недорозкислена; злинок із вмістом кисню, близьким до верхньої межі; нормально розкислена; перерозкислена.

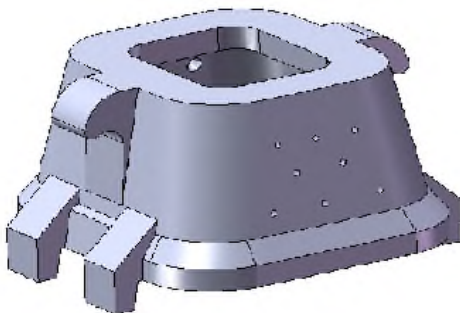
Напівспокійна сталь порівняно з киплячою сталлю має більшу однорідність, кращі механічні властивості, підвищену холодноламкість та стійкість проти

старіння, а містить меншу кількість неметалічних включень.



*a*

*б*



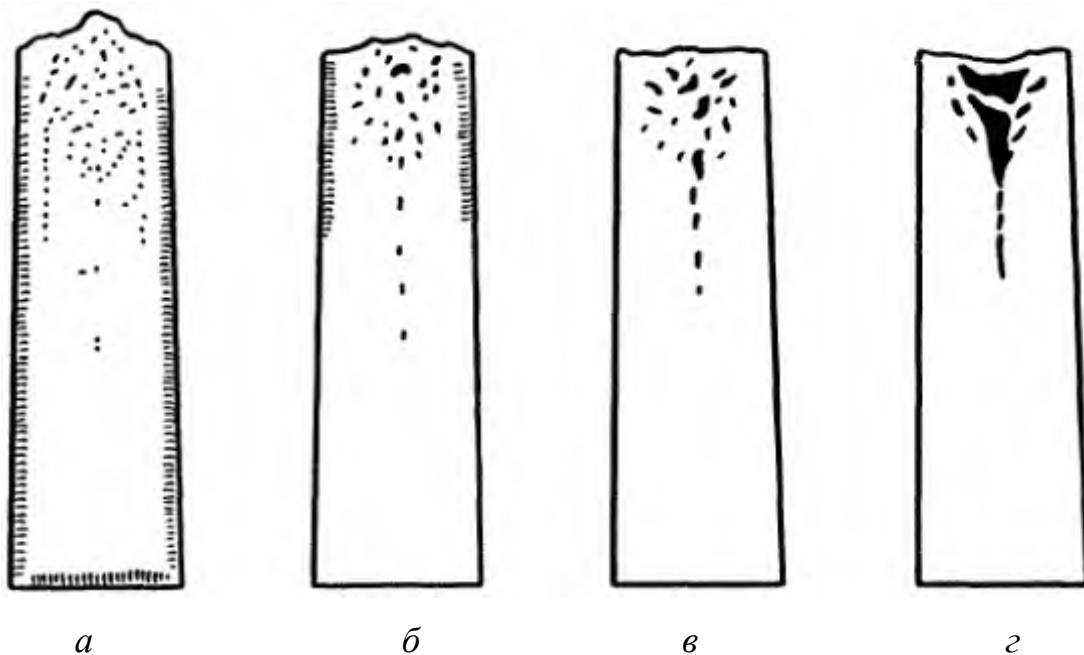
*в*



*г*

Рисунок 1.13 – 3D-моделі виливниці (*a*), зливка (*б*), прибуткової надставки (*в*) та піддону для зливка (*г*) спокійної сталі [20]

Якість зливка напівспокійної сталі збільшується разом з зростанням його маси та швидкості розливки металу. Порівняно з спокійною сталлю зберігається високий вихід придатного металу, вдвічі зменшується витрата феросплавів та розкислювачів, зменшуються також трудові затрати при підготовці до розливки виливниць та при розливці сталі. Напівспокійна сталь – це найбільш економічна сталь, яка в багатьох випадках може використовуватись як заміник спокійної сталі (листова, арматурна, періодичний та сортовий прокат), а в ряді випадків також і киплячої сталі [15, 18].



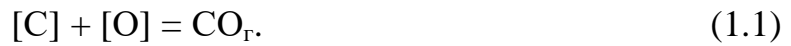
*a* – недорозкислений зливок; *б* – зливок із вмістом кисню, близьким до верхньої межі; *в* – нормально розкислений зливок із вмістом кисню, близьким до нижньої межі; *г* – перерозкислений зливок

Рисунок 1.14 – Типи структур зливків напівспокійної сталі

### 1.2.3 Структура зливка киплячої сталі

На відміну від спокійної сталі, що повністю розкислена, кипляча сталь при кристалізації «кипить». Ефект кипіння викликається реакцією між розчиненими в металі вуглецем і киснем:





Навіть у зливку спокійної сталі, що повністю розкислена, у момент кристалізації виділяється деяка кількість газів. У зливку киплячої сталі рясне газовиділення не лише накладає певний відбиток на будову зливка, але і значною мірою визначає його якість. У зливку киплячої сталі, що кристалізується, формуються наступні основні зони (рис. 1.15). Поперечний розріз зливка киплячої сталі приведено на рис. 1.16.

В структурі злиwkів киплячої сталі розрізняють наступні зони:

#### 1. Зона стільникових пухирців.

Так само, як і при кристалізації зливка спокійної сталі, при кристалізації киплячої сталі зачинається зростання стовбчастих кристалів. Осі зростаючих кристалів збігаються з направленням відведення тепла. Оскільки кристалізація відбувається вибірково, осі кристалів чистіші за матковий розчин, між осями зростаючих кристалів знаходиться збагачений лікватами матковий розчин.

#### 2. Зона щільного зовнішнього шару («скориночка»).

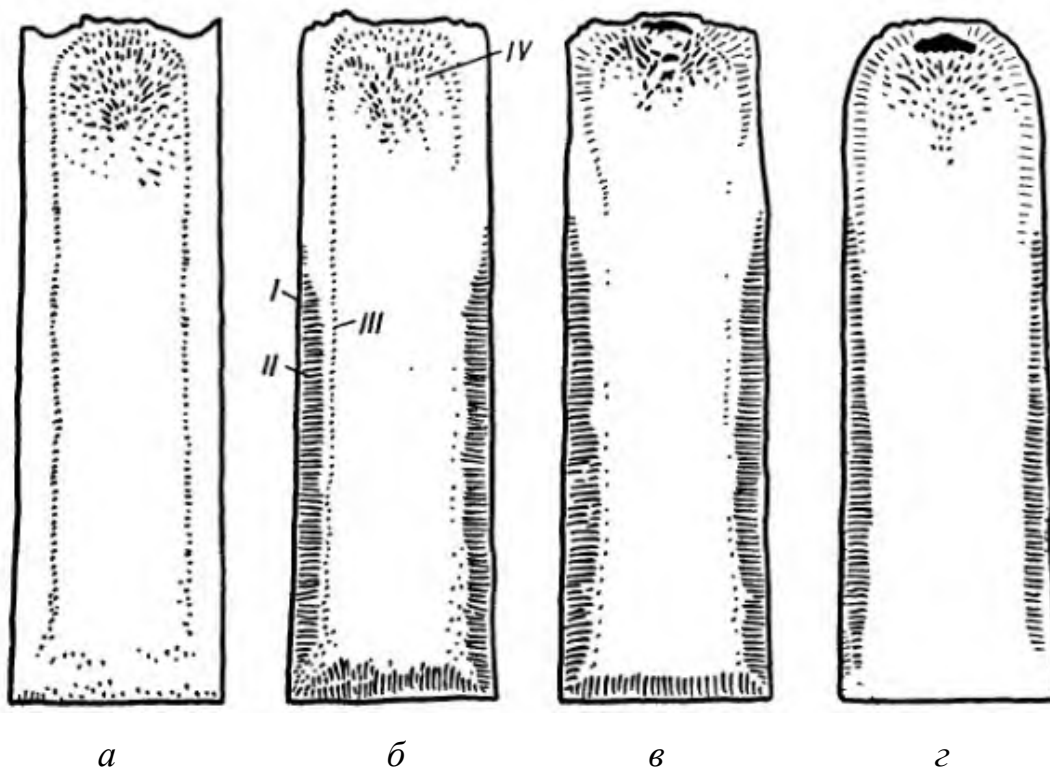
Вона утворюється у момент зіткнення рідкої сталі з холодними стінками виливниці. Метал цієї зони складається з дрібних, безладно орієнтованих кристалів, за хімічним складом близьким до складу рідкого металу в ковші. Товщина зони (товщина скориночки) залежить від ряду чинників і, перш за все, від швидкості розливки (швидкості наповнення виливниці). При швидкому наповненні виливниці товщина скориночки менша, при повільній розливці товщина скориночки більша.

#### 3. Зона відносно щільного і чистого металу.

При твердінні металу в цій зоні лікваційні процеси продовжуються, проте концентрація лікватів ще недостатня для газовиділення (значна частка розчинених у металі газів, раніше всього водню, вже виділилася при утворенні стільникових пухирців).

#### 4. Зона вторинних пухирців.

В мить, коли концентрація лікватів стає достатньою для початку газовиділення, в зливку утворюються пухирці, які прийнято називати вторинними. Швидкість росту кристалів у цей момент вже невелика і пухирці мають округлу форму. До моменту утворення вторинних пухирців наповнення виливниці закінчене і на поверхні зливка, що формується, утворюється кірка застиглого металу, тобто умови видалення пухирців стають несприятливими і велика частка вторинних пухирців залишається в зливку у вигляді стовпа округлих пухирців, зафіксованих в металі на деякій відстані від стільникових пухирців. Вторинні пухирці також заварюються при прокатці.



*a* – 0,02 % С; *б* – 0,08–0,1 % С; *в* – 0,13–0,15 % С; *г* – 0,17–0,19 % С;

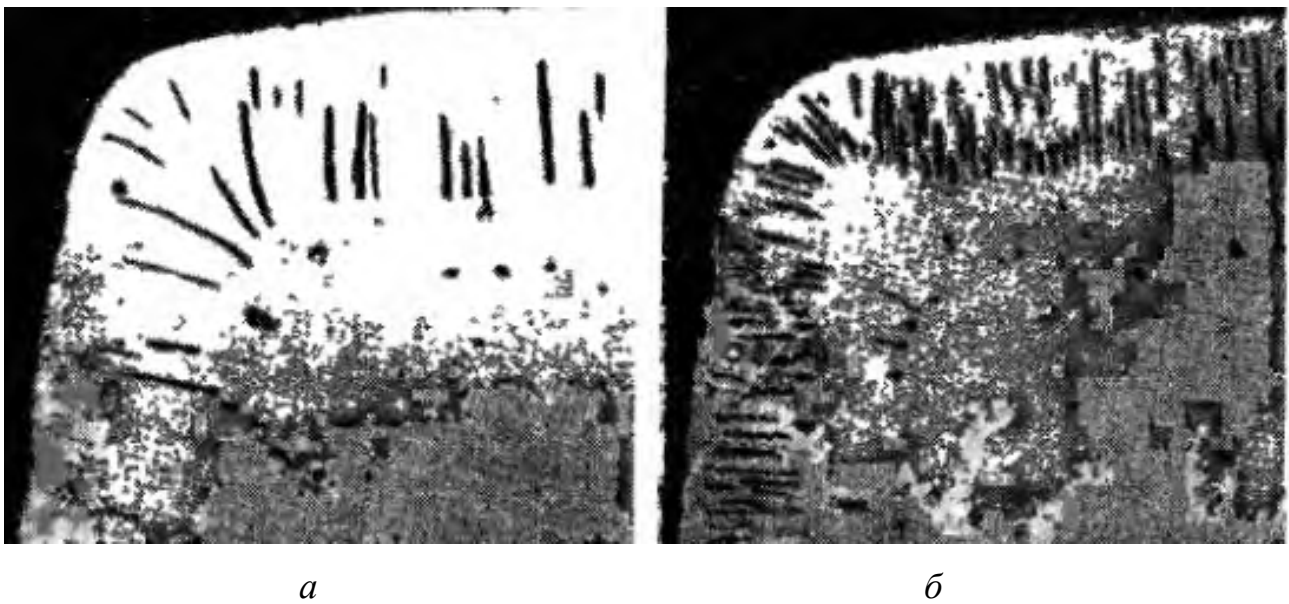
*I* – скориночка зливка; *II* – стільникові пухирці; *III* – глибинні пухирці;  
*IV* – скопчення округлих газових пухирців в головній частині зливка

Рисунок 1.15 – Типи структур злиwkів киплячої сталі

### 3. Осьова зона зливка.

Ця зона кристалізується в останню чергу і подібно до осьової зони зливка

спокійної сталі складається з безладно орієнтованих кристалів, що твердіють в матковому розчині, збагаченому лікватами. У цій зоні також є пухирці, особливо в головній частині зливка, що твердіє в останню чергу, проте це пухирці усадкового походження. Довкола них концентруються ліквати. Ці пухирці погано зварюються при плющенні, а крупні пухирці в головній частині зливка з скупченнями лікватів (зокрема сірки і фосфору) на внутрішній поверхні взагалі не зварюються. Головну частину зливка киплячої сталі (5–10 %, що становлять приблизно удвічі менше, ніж у зливку спокійної сталі) також відрізують і відправляють в переплав [15, 18].



*a* – на рівні 0,8 висоти від низу; *б* – на рівні 0,5 висоти від низу

Рисунок 1.16 – Поперечний розріз зливка киплячої сталі,  $\times 1/10$

### 1.3 Висновки

1. Розглянуто основні закономірності кристалізації сталевого зливка, а, зокрема, макроструктура сталей різного ступеня розкислення. Розглянуто процес формування усадкової раковини, як одного з найбільших за обсягом зливка дефекту, на початковій, проміжній та кінцевій стадіях затвердіння зливка.

## 2 ДЕФЕКТИ СТАЛЕВОГО ЗЛИВКА: ОСНОВНІ ВИДИ ТА МЕТОДИ БОРОТЬБИ З НИМИ

### 2.1 Основні дефекти сталевих зливок

Відомо, що дефекти сталевих зливок поділяють на:

- природні або неминучі, які виникають при затвердінні і охолодженні зливка;
- технологічні, які виникають через недосконалість технології виплавки та розливки металу.

До природних дефектів відносяться: усадкова раковина, осьова рихлість, хімічна і структурна неоднорідність, стільникові бульбашки, ендогенні неметалеві включення (табл. 2.1)

До технологічних дефектів відносяться: тріщини, плени, заворот кірки, підкіркові бульбашки в зливках спокійної сталі, «халяви» або рослість зливка в киплячій сталі, мала товщина щільної кірки зливка та інше (табл. 2.1) [21].

Слід зазначити, що якість поверхні зливка, отриманого при розливці сталі у виливниці, в значній мірі залежить від стану внутрішньої поверхні виливниці. Крім того, незадовільно очищені та змащені виливниці служать причиною виникнення на поверхні зливок підкіркових міхурів та місцевих тріщин, що в свою чергу призводить до зменшення стійкості виливниць [22].

Утворення усадкової раковини (рис. 2.1 та 2.2) можна попередити, дотримуючись технологічного процесу лиття металу і застосовуючи обігрів прибуткової частини зливок. Використання переплавної технології виплавки дозволяє виводити усадкову раковину у верхню частину зливка, регулюючи режим плавки. У литій сталі дефект не піддається виправленню. Закрита та неокислена садибна раковина може заварюватися при гарячій обробці.

Розрізняють відкриту усадкову раковину – порожнину неправильної форми, що сполучається з атмосферою, і закриту усадкову раковину – порожнину, що лежить усередині зливка.

Таблиця 2.1– Основні види дефектів сталевого зливка, їх характеристика та можливі причини виникнення [18]

| № п/п | Дефект   |                      | Характеристика дефекту   | Можливі причини утворення дефектів  |
|-------|--|----------------------|--|---|
| 1     | 2  |                      | 3  | 4   |
| 1     | Відхилення хімічного складу від прийнятих норм |                      | Невідповідність даних хімічного аналізу нормам ДСТУ або ТУ для заданої марки сталі                                       | Порушення технології ведення плавки; вживання неякісних або невідомого хімічного складу феросплавів та розкислювачів; помилка в розрахунках шихти; неточне дозування шихти або феросплавів  |
| 2     | Неметале-ві включення (НВ)                     | Ендоген-ні           | Неметалеві речовини, що утворюються в результаті хіміко-фізичних процесів при плавці, розливці та кристалізації сталі    | Переокислення ванни; підвищений вміст сірки; недостатня температура металу при випуску плавки; наявність в'язкого шлаку при випуску плавки; тривалий випуск плавки в сталерозливний ківш і тривала розливка, що збільшує контакт рідкої сталі з повітрям і вогнетривами; вторинне окислення |
|       |  | Екзоген-ні (шлакові) | Частки вогнетривів шлаку, піску та інших речовин, які потрапили в сталь ззовні при виплавці та розливці                  | Недостатня чистота жолоба, сталерозливного ковшу, сифонних провідок і виливниць; «підкачування» зливків при розливці  |
| 3     | Усадкова раковина                              |                      | Порожнина, не заповнена металом, розташовується переважно в центрі верхньої (прибутковою) частини зливка спокійної сталі | Певний склад сталі; конусність зливка; температура розливки сталі; склад засипки; підливка та «підкачування» зливків  |

Продовження табл. 2.1

| 1 | 2                        | 3   | 4  |
|---|--------------------------|---|--|
| 4 | Усадкова рихлість        | Нещільна будова у вигляді дрібних пір, розташованих в центральній частині (по перетину) зливка нижче за усадкову раковину; виявляється на нетравлених і слаботравлених макротемплетях           | Низька температура сталі, сприяюча збільшенню в'язкості металу і збагаченню неметалевими включеннями; неправильно вибраний спосіб розливки сталі                                     |
| 5 | Пористість               | Нещільна будова у вигляді дрібних пір, розташованих по всьому перетину. Виявляються при макроконтролі на нетравлених та слаботравлених макротемплетях   | Перегрів плавки; не розкисленість металу; газонасиченість  |
| 6 | Пухирці внутрішні газові | Порожнини, не заповнені металом у зливку спокійної сталі. Виявляються при макроконтролі по всьому перетину темплета або в зламі   | Підвищена газонасиченість плавки; густе жирне мастило виливниць; нерозкисленість плавки; мастило виливниць недостатньо знежирене смолою або лаком; низька температура розливки сталі |
| 7 | Стільникові пухирці      | Газові пухирці, розташовані у вигляді стільників на дуже малій відстані від поверхні зливка киплячої або напівспокійної сталей  | Велика швидкість наповнення виливниць при розливанні; підвищена газонасиченість переокисленість плавки   |
| 8 | Рослість зливка          | Збільшення висоти зливка проти рівня сталі у виливниці або прибуткової надставки після розливки; для спокійних сталей – це брак, для киплячих – це допустима при висоті її не більше 300–350 мм | Для спокійної сталі – це метал, що не розкислений, перегрів плавки, газонасиченість. Для киплячій сталі – це газонасиченість, недорозкисленість                                      |

Продовження табл. 2.1

| 1  | 2                                  | 3  | 4  |
|----|------------------------------------|--|--|
| 9  | «Халява»                           | Порожниста верхня частина зливка киплячій сталі, що має тонку зовнішню оболонку і відкрита зверху                  | Перерозкисленість киплячою сталі; надлишкова швидкість розливки сталі; висока газонасиченість (особливо азотом); бурхливе виділення газів перед початком кристалізації злиwkів; висока температура сталі                                 |
| 10 | «Пояс»                             | Спай двох шарів металу зливка; на гарячому зливку виявляється у вигляді більш темнішої, ніж основний метал, смужки | Перерва струменя при розливці сталі  |
| 11 | Тріщини гарячі подовжні, поперечні | Розрив металу, орієнтованих у подовж або впоперек осі зливка і який проникає в його глибину                        | Висока швидкість наповнення виливниць; висока температура розливки сталі; незадовільна мастило виливниць (привар зливка); недбала установка прибуткових надставок та в результаті утворення комірків і зависання злиwkів при охолодженні |



Рисунок 2.1 – Усадкова раковина на зламі



Рисунок 2.2 – Порожнини від усадкової раковини [23]

Поверхня відкритої усадкової раковини нерівна, окислена, на ній виявляються дендритні кристали. Закрита садибна раковина має світлу неокислену поверхню із кристалічною будовою. Характерна відмінність зламу із закритою усадковою раковиною від кристалічних ділянок на тлі волокнистого зламу полягає в тому, що кристалічність будови поверхні усадкової раковини не змінюється при термічній обробці будь-якого виду.

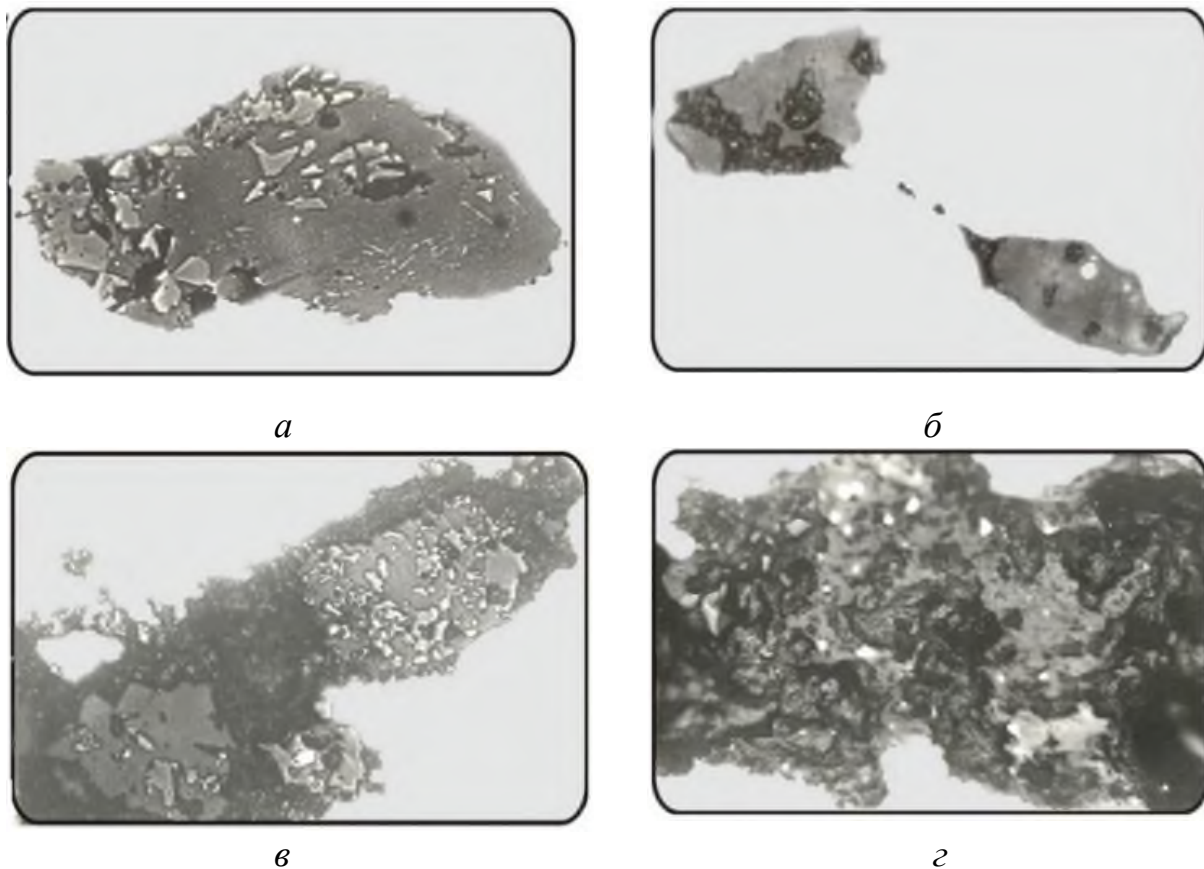
Усадкова раковина може бути ниткоподібною форми і проникати глибоко всередину зливка (осьова садинна раковина) або виникати нижче головної усадкової раковини, не маючи з нею контакту (вторинна садинна раковина). Усадкові раковини виникають внаслідок недостатньої кількості рідкого металу до кінця затвердіння зливка або виливки через усадку металу. Також утворенню усадкових раковин сприяють підвищений вміст газів у рідкій сталі;



несприятлива геометрична форма виливка або зливка; широкий температурний інтервал кристалізації сталі; незадовільна робота прибуткової надставки; порушення режиму кристалізації металу.

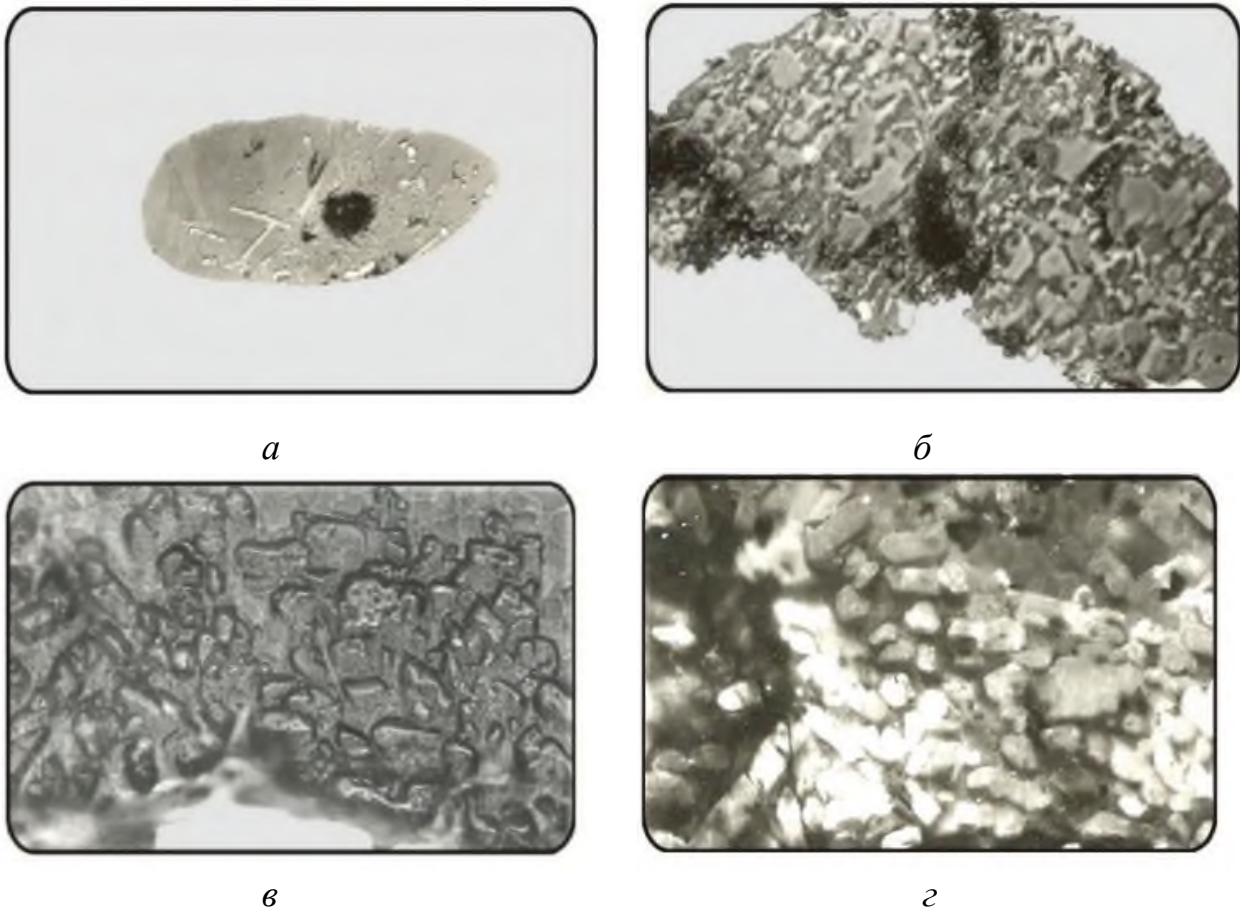
Усадкова раковина, що розповсюджується в тіло виливку, знижує механічні властивості пропорційно площі поверхні руйнування, зайнятої цим дефектом. Потрапляючи в деформований метал, садибна раковина викликає утворення великих розшарування. Усадкова раковина, що заварилася при гарячій деформації, впливу на механічні властивості металу не надає.

Важливо пам'ятати, що при аналізі макроструктури окремі неметалеві включення (рис. 2.3 та 2.4) не можуть виявлятися. Про наявність судять по зонам підвищеної переслідувані на поверхні макрошліфов.



*a* – сталь 30ХГСА , х 300; *б* – сталь 25ХГСА , х 250; *в, з*– сталь 45Г17ЮЗ,  
х 200

Рисунок 2.3 – Шлакові включення в нещільності макроструктури конструкційних марок сталей [17]



*a* – сталь 12Х1М1Ф, х 300; *б* – сталь 30ХГСА , х 250;

*в, з* – сталь 30ХГСНА, х 400 (*в* – світле поле, *з* – поляризоване світло)

Рисунок 2.4 – Шлакові включення в забракованих заготовках з конструкційних марок сталей [17]

Приклад ліквіації представлено на рис.2.5, яка виникає в результаті того, що сплави, на відміну від чистих металів, кристалізуються ні до однієї температури, а в інтервалі температур [16]. Осьова пухкість зображена на рис. 1.9 та 1.10 [17].

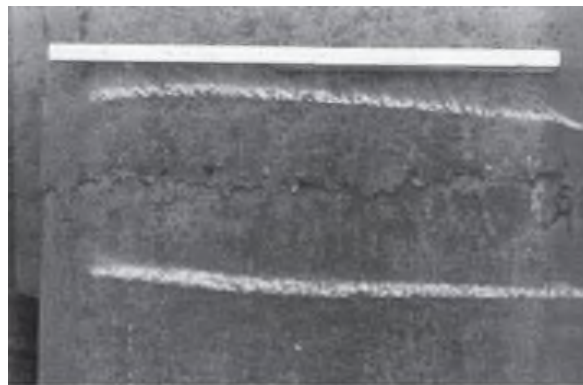
Утворенню плен (рис. 2.6) сприяє недбале складання канави: зміщення осі проміжного ковша щодо осі виливниці, коса установка стакану для розливки та інше.

Гарячі тріщини (поздовжні, кутові, поперечні та інші) виникають при температурі, близькій до температури кристалізації (тобто тоді, коли тверда скоринка зливка, що формується, не має достатньої міцності) та відносяться до

поверхневих дефектів.



Рисунок 2.5 – Зональна ліквация [16]



*a*



*б*

Рисунок 2.6 – Плини на поверхні багатогранного (а) та круглого (б) зливків [24]

Тріщини цього виду виникають як у процесі заповнення виливниці, і відразу після його завершення. Вони проникають на глибину до 50–60 мм, а їх довжина може досягати одного метра і більше. В окремих випадках поздовжні тріщини поширюються по всій довжині зливка та проникають на значну глибину. Особливо схильні до гарячих тріщин марки сталі з низьким вмістом вуглецю. На рис. 2.7 показано загальний вигляд поздовжніх тріщини в листовому зливку масою 30 т.

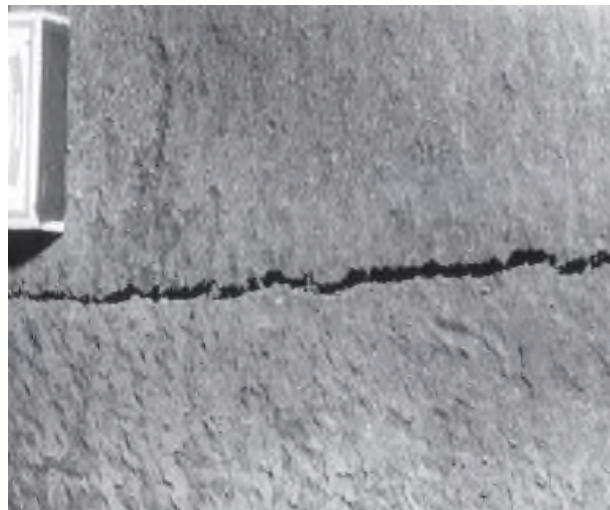


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд поздовжніх тріщини в листовому зливку масою 30 т [24]

Поперечні тріщини виникають у разі так званого «підвисання» зливків при утворенні заливин (рис. 2.8), пригару футеровки прибуткової надставки до головної частини зливка, а також за наявності у виливниці виступів, заглиблень і шорсткостей, що перешкоджають природному усадку зливка. Внаслідок перешкоди вільному усадці в цьому випадку виникають значні розтягувальні напруги, міцність скоринки стає недостатньою і на поверхні зливка утворюються поперечні тріщини (рис. 2.9).

У разі тимчасового припинення закінчення сталі в процесі наповнення виливниці на зливку по периметру утворюється так званий «пояс» (рис. 2.10). При розливці холодного металу з малою швидкістю поблизу поверхні зливка



можуть накопичуватися бульбашки та неметалеві включення, що також є причиною виникнення поясів. Для запобігання утворенню цього дефекту швидкість розливу повинна суворо відповідати температурі сталі, що розливається.

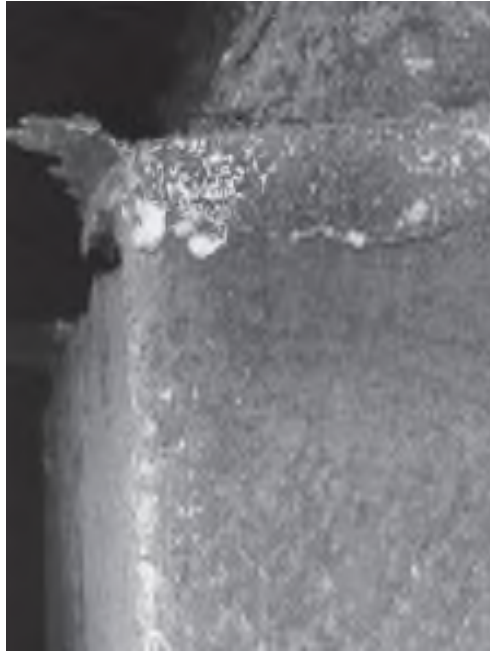


Рисунок 2.8 – Заливини, що утворилася на великому листовому зливку в результаті затікання металу під прибуткову надставку [24]



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд поперечної тріщини, що утворилася при зависанні зливка у виливниці [24]



Рисунок 2.10 – «Пояси» на поверхні нижньої частини блюмінгового зливка [24]

Підкіркові бульбашки (рис. 2.11) розташовуються між рівноосними дрібнодендритними кристалами поверхневої зони та зоною стовпчастих кристалів на глибині до 15 мм. Газові міхури в підкірковій зоні зливка викликають, як правило, виникнення рванин при осаді заготовок під пресом.

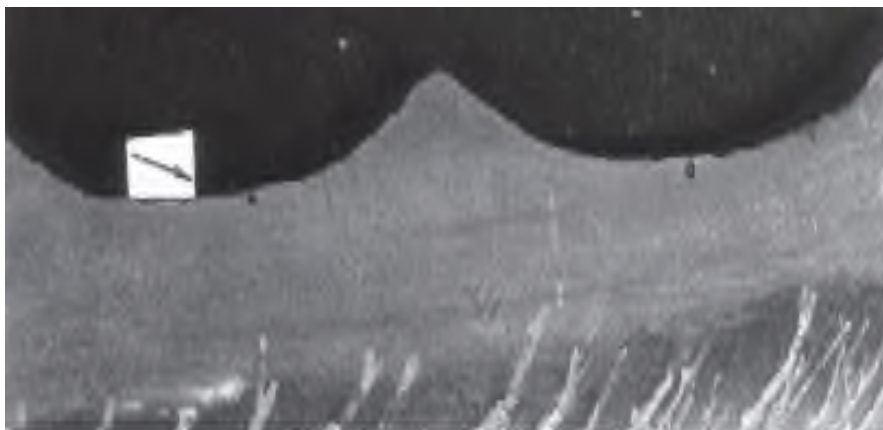


Рисунок 2.11 – Підкіркові бульбашки біля поверхні листового зливка масою 27 т (поперечний розріз зливка) [24]

Відбиток сітки розпалу (рис. 2.12) є наслідком часткового руйнування внутрішньої поверхні виливниці. Таке руйнування виливниці призводить до зміни її внутрішньої конфігурації в поперечному перерізі та призводить до порушень геометричної форми зливка. Можливими наслідками цього є технологічні труднощі у вилученні зливка з виливниці, і навіть його

«підвисання» у процесі охолодження. У разі виявлення такого дефекту внутрішня поверхня виливниці піддається ремонту або виливниця замінюється на нову [24].

*a**б*

Рисунок 2.12 – Сітка розпалу на внутрішній поверхні виливниці (*a*) і викликані нею дефекти поверхні зливка (*б*) [24]

## **2.2 Методи боротьби з дефектами сталевого зливка**

У той же час геометрична форма і довжина по висоті усадкової раковини,

яка характерна для зливка спокійної сталі, визначаються конфігурацією прибутку, конструкцією прибутковою надставки, умовами тепловідводу через футеровку надставки, утепленням дзеркала металу та іншими факторами [25]. Боротьба з усадковою раковиною може бути в напрямку створення таких умов кристалізації, щоб раковина була найвигіднішої форми з розташуванням в головній частині зливка [26]. Тобто концентровані усадкові раковини можна перевести в прибуткову частину зливка або усунути шляхом доливання гарячого металу. Боротьба з міжкристалічною усадковою пористістю ускладнена тим, що навіть значних розмірів прибуток часто не в змозі усунути такого роду пористість [27]. У прокатному цеху шляхом обрізки або вирубки дефектних місць позбавляються порожнин від усадкової раковини (рис. 2.2) [23].

Основними способами боротьби з корочками є збільшення температури дзеркала металу при розливці. Для кожної марки сталі існує мінімальна температура розливки, вище якої скоринки малоймовірні. Для зменшення плен на поверхні злиwkів застосовують виливниці з кюмпельним дном, використовують різні манжети та воронки, ведуть розливку зі зниженням кінетичної енергії струменя. Основними способами боротьби зі флокенами є зменшення вмісту водню в сталі, наприклад шляхом вакуумування струменя при розливці, і забезпечення умов для вільного виділення водню з металу при його охолодженні. Після прокатки флокеночутливі сталі піддаються спеціальній антифлокенній обробці [28].

У великих зливках лінійні розміри дефектів можуть становити як кілька метрів (лікваційні дефекти та тріщини), так і кілька десятків мікрометрів (скупчення неметалевих включень). Ряд дефектів досить важко ідентифікувати безпосередньо в зливку (методами неруйнівного контролю). Це власне призводить до того, що прояв цих дефектів відбувається або в поковці, або в готовому виробі. На металургійних підприємствах для отримання якісних злиwkів прагнуть оптимізувати систему параметрів виплавки, ківшевої обробки та розливки сталі з урахуванням конкретних вимог до металопродукції [29].



Серед методів боротьби з хімічною неоднорідністю зливка (зокрема, запобігання ліквідації) киплячої сталі слід виділити:

- підвищення швидкості наповнення виливниці (до 0,3–0,4 м/хв. при сифонній розливці сталі та до 0,2–0,5 м/хв. при розливці сталі зверху);
- скорочення тривалості періоду кипіння у виливниці шляхом збільшення швидкості розливки, застосування виливниць з великим отвором вгорі, накриття злиwkів чавунними кришками ті інші;
- хімічне та механічне закупорювання злиwkів, тобто значне підвищення зовнішнього тиску і розкислення рідкої частини зливка, що ще не затвердів.

При розливці у виливниці зручно використовувати порошкоподібні суміші, які до початку розливки розташовують на дно виливниці. При зіткненні порошоків з металом, що розливається, формується рідкий шлак, який ізолює метал від атмосфери і стінок виливниці в процесі розливки. Шлак повинен відповідати наступним вимогам:

- швидко формуватися, бути однорідним і рідкорухливим, здатним протягом всього періоду розливання ізолювати метал;
- з одного боку, добре відділятися від металу, з іншої - легко асимілювати спливаючі неметалічні включення;
- не повинен вступати із сталлю у взаємодію, яке може привести до небажаної зміни складу металу або його забруднення.

Склад шлакоутворюючих сумішей на підприємствах різні (залежать від місцевих умов, співвідношення цін на матеріали та інші). На металургійних підприємствах використовують, наприклад, суміш, що складається з 3–20 % алюмінієвого порошку, 15–20 % силікатної глиби, 10–30 % плавикового шпату, 20–25 % вермикуліту, 10–20 % марганцевої руди. У таких сумішах алюміній виконує роль джерела тепла, а марганцева руда - окислювача. Інколи до складу суміші вводять деревну тирсу. На ряді заводів Японії для захисту дзеркала металу широко використовують такі матеріали, як рисова соломка, рисове лушпиння та інші.

Слід пам'ятати, що висока якість поверхні прокату найбільш ефективно

забезпечується заходами попереджувального характеру, а не застосуванням різних способів виправлення дефектів [30].

### **2.3 Висновки**

1. Розглянуто основні дефекти структури сталевих зливок та можливі причини їх виникнення.

2. Приведено сучасні методи боротьби з дефектами сталевих зливок та зазначено, що висока якість поверхні прокату найбільш ефективно забезпечується заходами попереджувального характеру, а не застосуванням різних способів виправлення дефектів.

### 3 МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ВИХОДУ ПРИДАТНОГО МЕТАЛУ ПРИ РОЗЛИВЦІ СТАЛІ У ВИЛИВНИЦІ

#### 3.1 Основні шляхи збільшення виходу придатного металу при розливці сталі у виливниці

Для запобігання утворення та завороту кірки при сифонній розливці спокійної сталі, а іноді і при розливці сталі зверху застосовують способи захисту поверхні металу у виливниці від окислення та охолодження (табл. 3.1):

Таблиця 3.1 – Методи збільшення виходу придатного металу при розливці сталі у виливниці

| Методи збільшення виходу придатного металу при розливці сталі у виливниці  |  |
|--|--|
| Захист металу у виливниці від окислення  |  |
| 1  | Розливка сталі під шаром рідкого шлаку   |
| 2  | Розливка сталі під теплоізолюючими сумішами та матеріалами   |
| 3  | Захист струменя металу аргоном   |
| 4  | Розливка сталі з використанням матеріалів, що створюють у виливниці відновлювальну атмосферу (розливки з дерев'яними рамками та розливка з петролатумом) |
| Застосування спеціальних методів теплоізоляції та обігріву верху зливка: застосування теплоізоляційних вкладишів |  |
| 1  | Застосування екзотермічних вкладишів   |
| 2  | Застосування теплоізоляційних вкладишів  |
| 3  | Електродуговий обігрів   |
| 4  | Газовий обігрів  |
| 5  | Електрошлакове підживлення   |

#### 1. Розливка сталі під шаром рідкого шлаку.

На поверхні металу, що піднімається у виливниці, створюють шар рідкого шлаку, який захищає сталь від окислення та охолодження, що виключає утворення окисленої скоринки. Шлак також поглинає частинки оксидів, що випливають з металу. Крім цього, в результаті прилипання шлаку до стінок виливниці між ними і металом, що піднімається, залишається тонкий (1–3 мм)

шлаковий прошарок, що забезпечує отримання дуже чистої поверхні зливка. Надалі шлакова сорочка легко відокремлюється від зливка, що затвердіває. Поліпшення поверхні зливка суттєво знижує відходи металу при зачищенні поверхні зливка. При розливці під шаром рідкого шлаку виливниці зазвичай не змащують.

## 2. Розливка сталі під теплоізолюючими сумішами та матеріалами.

При розливці вуглецевих та низьколегованих сталей, що не містять легкоокислюваних елементів, застосовують більш дешеві, ніж екзотермічні суміші матеріали – мало теплопровідні матеріали, що не плавляться і частково плавляться.

## 3. Захист струменя металу аргонном.

На центрову встановлюють спеціальний кільцевий пристрій, що з'єднується з днищем сталерозливного ковша і струмінь металу, що охоплює під час розливки. У кільцеву порожнину подають аргон, що оберігає метал від окиснення. Готова сталь при цьому містить знижену кількість кисню та неметалевих включень. З-за складності спосіб застосовується тільки при розливці сталей, що містять елементи, що легко окислюються.

## 4. Розливка сталі з використанням матеріалів, що створюють у виливниці відновлювальну атмосферу.

До цього методу відносять ряд способів, з яких найбільше застосування знаходять:

- розливка сталі з дерев'яними рамками (дерев'яні рамки або диски опускають у виливницю до початку розливки. Надалі вони згоряють, плаваючи на поверхні металу, що піднімається. Продукти згорання дерева створюють у виливниці відновлювальну атмосферу, що сприяє отриманню чистішої поверхні зливка. Недолік способу – швидке згорання дерева, що закінчується раніше закінчення заповнення зливка);

- розливка сталі з петролатумом (петролатум (побічний продукт переробки нафти) завантажують у кількості 0,2—1,0 кг/т у незмащену виливницю на початок розливу, а виливницю щільно закривають кришкою.

При зіткненні з рідким металом петролатум частково виганяється, частково згорає, що створює у виливниці відновлювальну атмосферу та оберігає метал від окислення. Вогнища осідають на стінках виливниці, створюючи шар мастила, це забезпечує поліпшення поверхні зливка. Хороші результати отримані при спільному використанні петролатуму та вермикуліту, які завантажують у виливниці до початку розливки.

Серед спеціальних методів теплоізоляції та обігріву верху зливка слід виділити:

#### 1. Застосування теплоізоляційних вкладишів.

Вкладиші у вигляді пластин закріплюють у стін прибуткової надставки або у верхній частині виливниці вздовж її стін. У разі виливниці застосовують без прибуткових надставок. Найчастіше вкладиші виготовляють з піску з добавкою паперу, відходів целюлозного виробництва, глини та ряду сполучних, іноді з азбеститу зі сполучними та інші.

Завдяки низькій теплопровідності вкладишів охолодження металу у прибутковій частині виливниці відбувається повільніше, ніж при використанні звичайних прибуткових надставок; це зменшує глибину усадкової раковини в зливку і обріз металу при прокатці. Останніми роками вкладиші застосовують дедалі ширше, оскільки за відносної дешевизні їх використання знижує величину головного обрізу на 2–5 %.

#### 2. Застосування екзотермічних вкладишів.

Вкладиші виконують із екзотермічних сумішей у вигляді пластин. Їх зміцнюють біля стін верхньої частини виливниці або у прибутковій надставці; іноді прибуткову надставку обмазують із середини екзотермічною масою.

Екзотермічні суміші, з яких на зв'язці (рідке скло) готують вкладиші, містять паливо (алюміній), окислювач (окаліну) і нейтральні наповнювачі (шамот, глину, вермикуліт). При контакті з гарячим металом алюміній окислюється за рахунок кисню окислювача і виділяється тепло. В результаті обігріву зменшується глибина проникнення в зливку усадкової раковини і знижується головний обріз на 5–8 %.

Вартість екзотермічних вкладишів порівняно висока та їх застосовують лише при виробництві дорогих високоякісних та легованих сталей.

### 3. Електродуговий обігрів.

У прибуткову надставку вводять графітовий електрод, встановлюючи над поверхнею металу. Електрод з'єднують з одним з кінців обмотки живильного трансформатора, інший кінець обмотки з'єднують з піддоном. Після запалення дуги на поверхню металу у надставці засипають шлакоутворювальну суміш (наприклад, з шамоту, вапна та плавикового шпату). Шлак, що утворюється, підвищує стійкість горіння дуги і оберігає метал від науглерожування матеріалом електрода. Тривалість обігріву зливок від 0,5 до 8 т змінюється в межах 0,5–2,2 год. Спосіб дозволяє підвищити вихід придатного на 5–8 % при витраті електроенергії 15–40 кВт·год на 1 т сталі.

### 4. Газовий обігрів.

Після наповнення зливка в прибуткову надставку засипають шлакову суміш і над поверхнею металу встановлюють газо-кисневий пальник. Обігрів протягом 15–20 хв. за рахунок спалювання природного або коксового газу в кисні дозволяє підвищити вихід придатного металу на 6–8 %. Шлак, що виходить при розплавленні шлакової суміші у надставці, захищає метал від окиснення.

### 5. Електрошлакове підживлення.

Поверхню металу в прибутку покривають шлаком, що складається з  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , який має електропровідність, і в той же час великий електроопір. У шлак зверху занурюють електрод зі сталі того ж складу, що і зливок, що відливається. При проходженні електричного струму від електрода до металу через шлак, останній сильно нагрівається, електрод плавиться і краплі металу через шлак надходять головну частину зливка. Таким чином відбувається не тільки обігрів головної частини зливка, але і живлення усадки злитка металом електрода, що плавиться. Спосіб дозволяє отримувати зливки без усадкової раковини та збільшити вихід придатного металу на 15% і більше.

Здійснити газовий та електродуговий обігрів, а також електрошлакове

підживлення в умовах масового виробництва складно та важко. Тому їх частіше застосовують при виробництві дорогих високолегованих сталей, коли це є економічно доцільним [31].

### 3.2 Вставки теплоізоляційні типу МКРВ-340

Вставки теплоізоляційні типу МКРВ-340 для виливниць (рис. 3.1 та 3.2) виготовляються з вогнетривкого волокна муліто-кремнеземистого складу, яке отримують при в електросталеплавильних печах чистих оксидів алюмінію та кремнію з наступним утворенням волокна методом роздування. При цьому для надання виробів міцності у волокна добавляють органічний матеріал-скріплювач, вироби формуються методом вакуумного пресування [31]. Основні вимоги до матеріалів та виробів вогнетривких теплоізоляційних муліто-кремнеземистих скловолокнистих повинні відповідати ГОСТ 23619-79 [33].



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд листа для вставки теплоізоляційної МКРВ-340 [31, 32]

У матеріалах вогнетривких теплоізоляційних муліто-кремнеземистих скловолокнистих волокна хімічно стійкі до дії кислот і лугів. При використанні при високих температур необхідний захист від дії концентрованих лугів, плавикової і фосфорної кислот. Волокна більш стійкі до впливу температури в

кислотному та нейтральному середовищах, при чому у відновному середовищі теплоізоляційні властивості знижуються.

Вставки МКРВ-340 застосовуються для теплоізоляції головної частини зливків круглого, квадратного, прямокутного та багатогранного перетинів. Вироби мають конструкцію для простої установки у виливниці або розливні форми, прибуткові надставки в розпір або закріплюються на клей та (або) механічними кріпленнями, скобами. При установці враховуються можливі лінійні або об'ємні усадки за умов нагріву.

Серед основних фізико-технологічних характеристик вставок МКРВ-340 слід виділити (табл. 3.2): високу термостійкість, незначну густину, низьку теплопровідність, малу теплоємність, конструктивну міцність, стійкість до термоудару, вібрацій та деформацій. Також слід зауважити, що вставка МКРВ-340 гнучка та щільно прилягає до конструкцій.



Рисунок 3.2 – Вставка теплоізоляційна МКРВ-340 у чавунній виливниці [34]

До основних переваг застосування вставок типу МКРВ-340 слід віднести:  
– зниження витратного коефіцієнта металу, що витрачається, при



переробці зливків у заготовки та прокату різного поперечного перетину;

- простота установки;
- зниження металоємності конструкції виливниць і прибуткових надставок;
- скорочення витрат керамічних вогнетривів;
- скорочення витрат сумішей, що скріплюють;
- не містить добавки, що вигоряють, та азбест [31, 33].

Таблиця 3.2 – Фізико-технологічні характеристики вставки МКРВ-340

| Характеристика  | Значення   |
|---|------------|
| Густина, кг/м <sup>3</sup>  | н.б. 340   |
| Максимальна температура застосування, °С                              | 1150       |
| Температура плавлення, °С   | 1800       |
| Втрата маси при 1000 °С, %  | н.б. 6,0   |
| Зміна маси при прожарюванні, %  | н.б. 10-12 |
| Масова частка на прожарену речовину, % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | н.м. 50,0  |
| Масова частка Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub> , %    | н.м. 97,0  |
| Теплопровідність, Вт/К·м  |            |
| при 200 °С  | 0,15       |
| при 400 °С  | 0,19       |
| при 600 °С  | 0,23       |
| при 800 °С  | 0,29       |
| при 1000 °С   | 0,40       |
| при 1200 °С   | 0,53       |
| Теплоємність при 1000 °С, кДж/кг·К                                    | 1,047      |

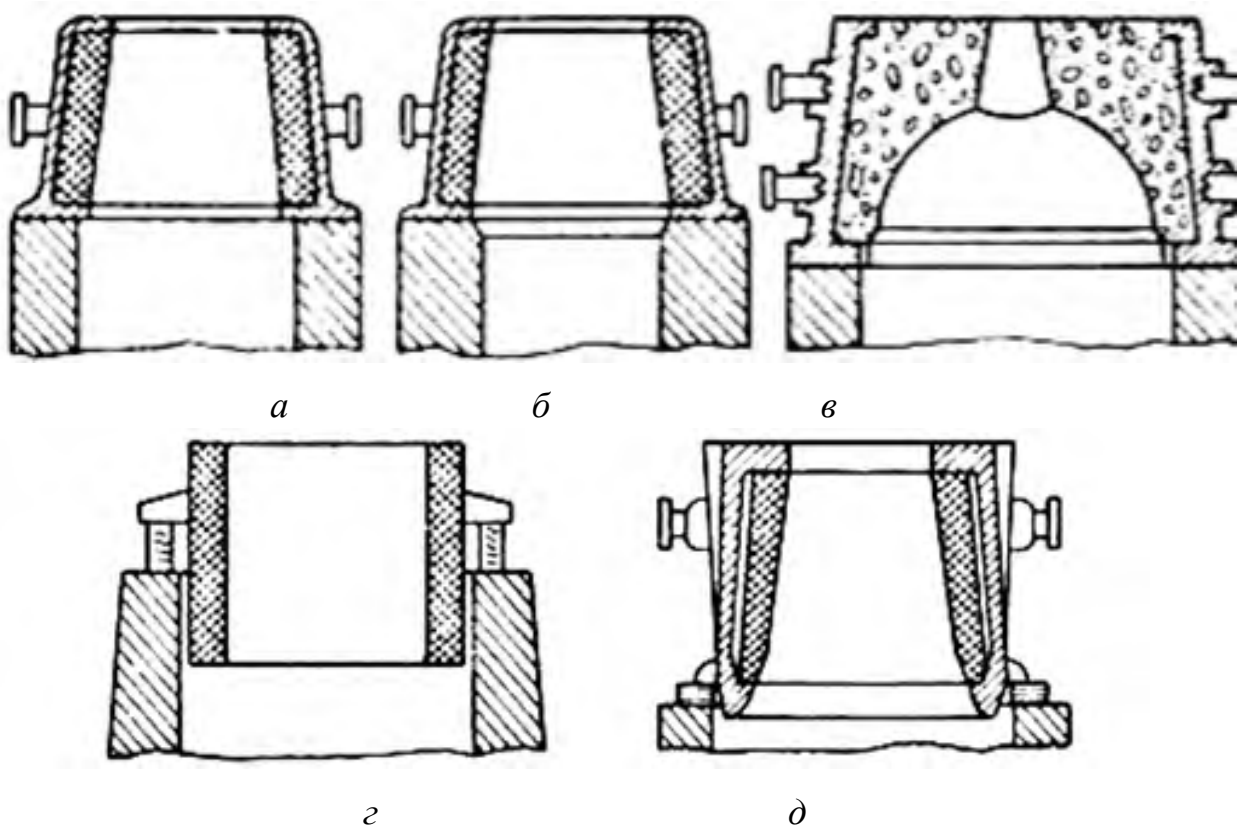
### 3.3 Прибуткові надставки

#### 3.3.1 Основні уявлення про прибуткові надставки

Для збільшення виходу придатного за рахунок кращого формування зливків спокійної сталі застосовують утеплення головної частини зливків в виливницях, розширених догори, стаціонарними та плаваючими прибутковими надставками різної конструкції (рис. 3.3).

Стаціонарні прибуткові надставки (рис. 3.3, б) встановлюють на верхній

торець виливниці. Для виливниць, які стоять на візках, використовують прибуткові надставки з обмежувальними припливами – замками, які допомагають правильно встановлювати надставки на виливниці та запобігають зсуву надставок під час пересування составів. Дотичні поверхні виливниці й надставки варто піддавати струганню для отримання між ними мінімального зазору (до 1,5 мм). Плаваючі прибуткові надставки виготовляють або керамічними (зазвичай із шамоту) без каркаса (рис. 3.3з), або металевими з футерівкою цеглою (рис. 3.3д). Надставки можуть бути сферичної (рис. 3.3в), конічної або пірамідальної форм. На більшості металургійних підприємств застосовують прибуткові надставки, футеровані усередині вогнетривкою цеглою.

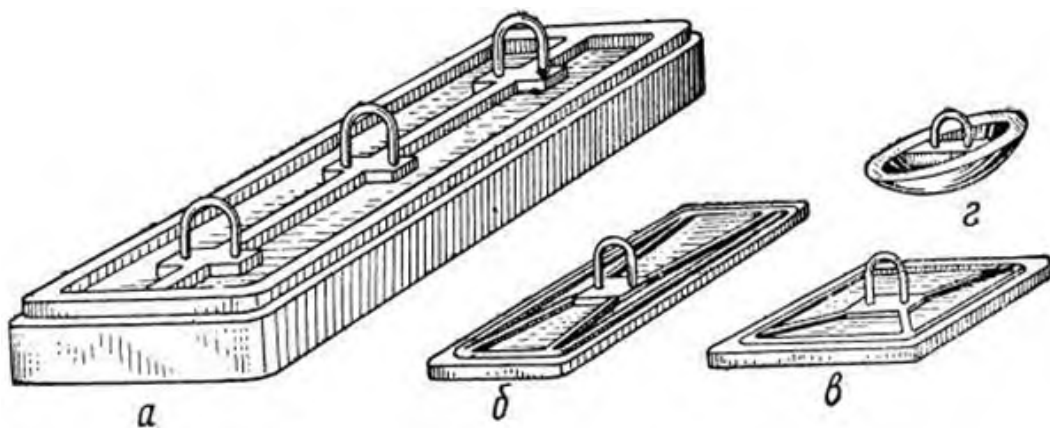


*а* – стаціонарна з підставою, що трохи виступає усередину виливниці;  
*б* – стаціонарна з підставою, що трохи відступає від внутрішньої поверхні виливниці та зі спеціальною фаскою; *в* – стаціонарна сферичної форми;  
*г* – плаваюча керамічна; *д* – плаваюча металева футерована

Рисунок 3.3 – Схема прибуткової надставки для виливниць, розширених догори

Після процесу футерування прибуткові надставки усередині обмазують масою з 80 % шамотного порошку та 20 % меленої вогнетривкої глини, фарбують сумішшю зі графіту, замішаного на розчині сульфідного лугу, і сушать або теплом, акумульованим надставкою від попередньої плавки, або на спеціальних пальниках.

При кристалізації зливків киплячої сталі верхня грань зливка повинна повністю затвердіти задовго до затвердіння всього його обсягу. Для цього зливки накривають спеціальними чавунними кришками (рис. 3.4), розміри та маса яких залежать від поперечного перерізу зливка та від прийнятої тривалості кипіння металу в виливниці. Маса звичайних кришок для малих зливків коливається в межах від 10 до 15 кг і для середніх зливків – від 80 до 130 кг (рис. 3.4*в*). Великі зливки накривають важкими кришками вагою до 1,5 т (рис. 3.5*а*). Кришки для накривання зливків у виливницях пляшкового типу повинні бути круглими (рис. 3.4*г*) або овальними залежно від форми верху виливниці. Маса таких кришок зазвичай складає 40–55 кг [15, 18].



*a* – листовая; *б* – слябова; *в* – квадратна; *г* – пляшкова

Рисунок 3.4 – Кришки для накривання зливків киплячої сталі

### 3.3.2 Види конструкцій прибуткових надставок

У роботі [35] запропонована конструкція прибуткової надставки, яка завдяки надійному кріпленню утеплювальних плит за рахунок застосування

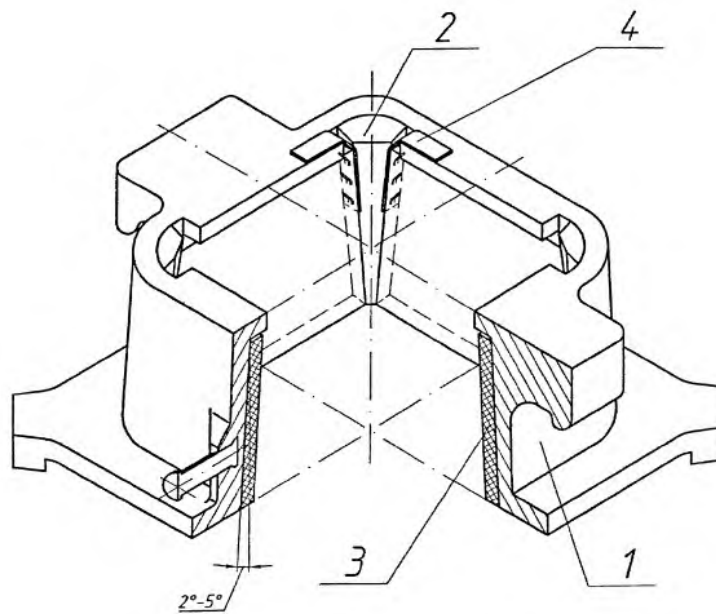
верхньої внутрішньої полиці надставки, оптимальної конусності граней, що дорівнює  $2-5^0$ , та додаткового кріплення утеплювальних плит за допомогою частково перфорованої металевої смужки або за допомогою притискних фіксуєчих скоб забезпечує зниження головного обрізу та шлюбу, пов'язаного з дефектами усадкового характеру (рис. 3.5).

Прибуткова надставка містить корпус *1* з верхньою внутрішньою полицею *2*, теплоізоляційні плити *3*, закріплені враспор за допомогою кутових клинів *4*, і додаткове кріплення плит, наприклад, за допомогою частково перфорованої металевої смужки *5* (рис. 3.5*a*), встановленої в зазор між кутовим клином та боковою стороною теплоізоляційної плити або між стінкою надставки та теплоізоляційною плитою (не показано). При другому варіанті додаткове кріплення теплоізоляційних плит здійснюється за допомогою притискних фіксуєчих скоб *б* (рис. 3.5*б*).

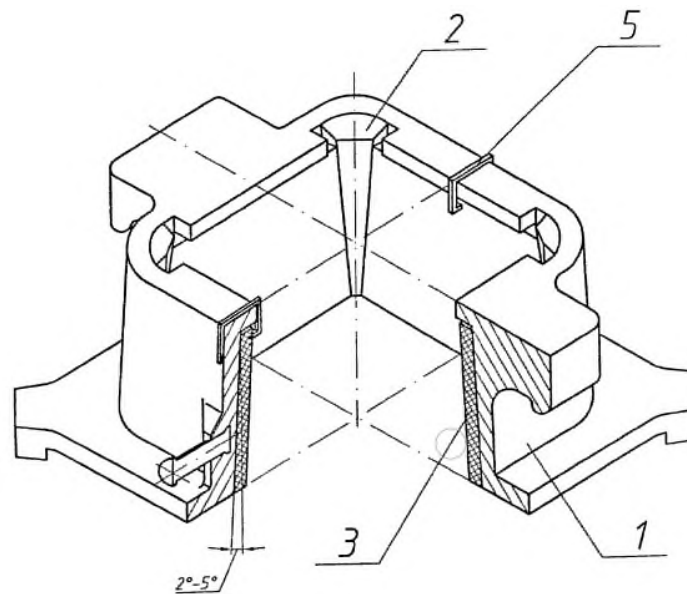
Теплоізоляційні плити *3* заводять під верхню внутрішню полицю *2*, потім вставляють частково перфоровані металеві стрічки з загином їх у бік верхньої полиці при встановленні частково перфорованої стрічки *5* між кутовим клином і боковою стороною теплоізоляційної плити або при встановленні металевої стрічки між теплоізоляційною плитою загином їх у бік зовнішньої поверхні грані виливниці, потім забивають клини *4*. Установку додаткового кріплення за допомогою притискних фіксуєчих скоб *б* (рис. 3.5*б*) виробляють шляхом надягання скоби зверху на верхню внутрішню полицю *2* з підтиском теплоізоляційної плити *3* і заведенням її стіну вигідної надставки.

У роботі [36] запропонована наступна конструкція прибуткової надставки. На верхньому торці корпусу виконані виступи, кожен з яких співвісно розташований з відповідним тонким йому виступом на протилежній стороні, а їх осі проходять через центр прибуткової надставки (рис. 3.6).

Надставка містить корпус *1* з 8-ю симетрично розташованими припливами *2* на верхньому торці корпусу. Припливи виконують заодно з каргтус надставки при його виливку.



*a*



*б*

*a* – прибуткова надставка виливниці з конусністю  $2-5^0$  (нахил граней щодо вертикальної осі) та додатковим кріпленням плит за допомогою частково перфорованої металевої смужки, встановленої в зазор між кутовим клином та плитою, аксонометрична проекція; *б* –прибуткова надставка виливниці з конусністю  $2-5^0$  і додатковим кріпленням плит за допомогою притискних фіксуєчих скоб, аксонометрична проекція

Рисунок 3.5 – Схема прибуткової надставки виливниці з конусністю  $2-5^0$

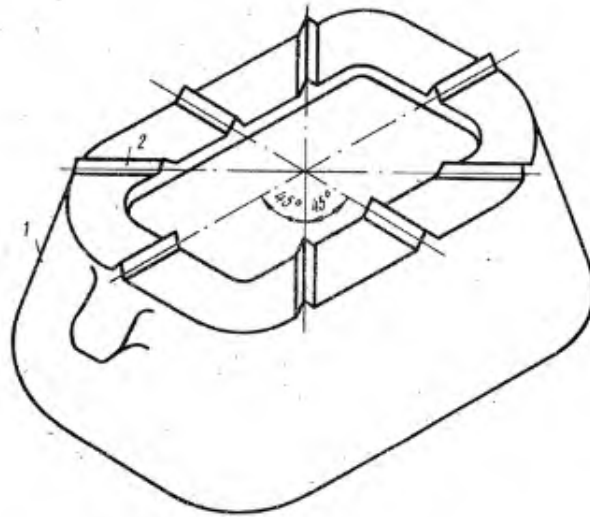


Рисунок 3.6 – Схема прибуткової надставки виливниці з виступом в верхньому торці корпусу

Припливи мають трикутний поперечний переріз із висотою трикутника 15 мм. Гризсжтальные тфодольные осі припливів перетинаються під кутом  $45^{\circ}$  у точці вертикальної осі надставки. Прибуткова надставка використовується таким чином. Футеровану і підігріту надставку встановлюють на підготовлену додаткову догору виливницю і подають у розливний проліт, де над прибутковою надставкою переміщують сталерозливний ківш, використовуючи для візуального центрування струменя стали запропоновані припливи. Зазначене розташування припливів дозволяє візуально досить точно встановити положення струменя сталі по 94 вертикальній осі прибуткової надставки та виливниці [36].

### 3.3.3 Покращення теплової роботи прибутку великих сталевих зливків

За даними роботи [37] для компенсації усадки з прибутку в тіло зливка потрібно передати близько 3% рідкого металу. Інші 15–17 % металу, що залишаються в прибутку на момент затвердіння зливка, забезпечують підтримку цієї кількості сталі в рідкому стані до моменту затвердіння його тіла

під прибутком. Звідси зрозуміло, яке значення має розробка ефективного утеплення зменшення прибутку.

Застосовувані практично способи поліпшення теплової роботи прибутку можна розділити на дві принципово відмінних групи [38]: термостатичні методи, засновані більш раціональному використанні власної теплоти рідкого металу прибуткової частини злитка; екзотермічні методи, що передбачають тим чи іншим способом підведення теплоти ззовні до прибутку зливка.

На практиці також застосовуються комбіновані методи, що поєднують різною мірою елементи перших двох.

Так як поверхня охолодження з боків в 4 рази більше, ніж площа охолодження через верх прибутку, необхідно значно обмежити тепловий потік через її бічну поверхню.

Вивченням теплового балансу прибутку в роботі [38] встановили, що найбільша частина тепла (при закритому дзеркалі металу) витрачається на нагрівання футеровки та корпусу надставки та втрачається з її поверхні у навколишнє середовище. Витрати теплоти за цими статтями становлять 75–85 % всіх теплових втрат. Ця обставина дозволяє припустити, що застосування ізоляційних прошарків, що зменшують втрати в довкілля або малотсплоемкой і низкотсплопроводной футеровки, що знижує витрати теплоти на розігрів кладки, або того й іншого разом, призведе до поліпшення теплової роботи прибутку та можливості зменшити на неї витрату металу.

Відкрите дзеркало металу в прибутковій надставці викликає дуже значні втрати теплоти, головним чином, шляхом променевипускання з поверхні. Через війну спеціально поставлених дослідів у роботі [39] було встановлено, що через вільне дзеркало металу у надставці губиться від 15 до 25 % теплоти металу прибутку. Засипання дзеркала металу теплоізолюючими сумішами дозволяє різко скоротити ці втрати і довести їх до значень 8 %, якщо ізолюючий шар засипки досить великий. Як ізолюючі матеріали зазвичай використовуються малотсплопроводные порошкоподібні матеріали, насипані шаром 30–50 мм. Найчастіше дзеркало металу засипають вермікулітом, перлітографітової

сумішню або більш дешевими сумішами: золи ТЕЦ та вуглецьвмісних матеріалів [40].

Застосування теплоізолюючих сумішей дозволяє зменшити витрату металу на прибуток приблизно на 3% порівняно з варіантом без покриття дзеркала металу. Обсяг прибутку у разі можна довести до 20 % від маси зливка, а менш відповідальних виробів навіть до 16–18%.

У роботах [39, 41] показано застосування при розливці злиwkів спокійної сталі утеплення бічної поверхні прибуткової частини одноразовими теплоізоляційними вкладишами, але такі вкладиші обсипаються при роздяганні злиwkів і створюють високу запиленість у стриперному відділенні. При витраті вкладишів 5 кг/т сталі накопичується значна кількість відходів, які необхідно прибирати та утилізувати.

Отже, застосування розглянутих термостатичних методів Демшевського не дозволяє зменшити обсяг прибуткової частини зливка більш, ніж 3–4 %, тобто не дає можливості досягти її теоретичного об'єму при найкращій нині теплоізоляції металу.

За даними роботи [42] для забезпечення найбільш сприятливих умов формування зливка необхідна доставка теплоти до прибутку ззовні. Ідеальним варіантом є створення прибуткової надставки, яка не виділяє теплоту в злиток, але запобігає виділенню з нього теплоти. Це з тим, що дуже важливо не вводити додаткову теплоту в тіло зливка. Вона переноситься конвективними потоками в нижню частину зливка, де внаслідок цього відбувається затримка його затвердіння та посилення сегрегації домішок у металі.

Екзотермічні методи поліпшення роботи прибутку реалізуються шляхом електродугового, газового чи електрошлакового обігріву, а також застосуванням спеціальних екзотермічних матеріалів [43]. Останній спосіб не вимагає спеціального обладнання та може бути реалізований у будь-яких умовах.

Авторами роботи [44] розглянуті питання зменшення головного обрізу великих сталевих злиwkів за рахунок зменшення обсягу прибуткової частини



при обігріві екзотермічними матеріалами. Показано, що значне скорочення обсягу металу у прибутку великих сталевих зливків можливе лише за рахунок застосування екзотермічних методів, найбільш зручним з яких є використання екзотермічних сумішей та плит. У разі сифонної розливки сталі під теплоізолюючими сумішами застосування додаткових екзотермічних засипок дзеркала металу малоефективне. Застосування екзотермічних плит для додаткового утеплення бічної поверхні надставки дозволяє зменшити відносний обсяг прибутку в листових зливках масою 30 т на 5–6 %.

### **3.4 Висновки**

1. Показано, що для забезпечення найбільш сприятливих умов формування зливка спокійної сталі з мінімально можливою кількістю дефектів структури та відповідно збільшення виходу придатного металу рекомендується проводити захист металу у виливниці від окислення (наприклад, шляхом розливки під шаром рідкого шлаку, розливки під теплоізолюючими сумішами та матеріалами, захисту струменя металу аргоном, розливки з використанням матеріалів, що створюють у виливниці відновлювальну атмосферу, розливки з дерев'яними рамками та розливки з петролатумом), а також з застосуванням спеціальних методів теплоізоляції та обігріву верху зливка (застосування теплоізоляційних та екзотермічних вкладишів, електродуговий та газовий обігрів, електрошлакове підживлення).

## **4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТВ СТАЛЕВОГО ЗЛИВКА ПРИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СТАЛІ**

Для вивчення особливостей процесу формування сталевих зливок доцільно використовувати методи математичного моделювання, перевагами яких є невисокі матеріальні та часові витрати, а також можливість прогнозування теплового стану заготовки, виходячи із заданих умов моделювання виробничих ситуацій [45].

### **4.1 3D-моделювання формування 50-тонного листового зливка зі сталі типу 15Г2СФ**

У роботі [46] розглянуто особливості формування 50-ти тонного листового зливка з конструкційної низьколегованої для зварних конструкцій сталі 15Г2СФ (0,14–0,16 % С; 1,2–1,4 % Мn; 0,3–0,5 % Si; 0,1–0,15 % V; 0,03–0,05 % Nb; 0,1–0,2 % Ni), що йде на виготовлення товстолистового прокату. Авторами з використанням програмного пакету «MagmaSoft» виконано комп'ютерне моделювання розливки та затвердіння металу. Розміри внутрішньої порожнини виливниці та прибуткової надставки зливка, що моделюється, наведені на рис. 4.1.

Розливка сталі відбувалася сифонним способом через один встановлений по центру зливка стакан в чавунну виливницю, підігріту до 100 °С. Використовували стакан діаметром 60 мм при діаметрі сифонної проводки 110 мм (рис. 4.2). Прибуткова надставка по периметру утеплюється теплоізолюючими вкладишами товщиною 60 мм та у процесі заливки на дзеркало металу подається утеплювальна суміш у кількості 120–140 кг.

З бази даних програмного пакету «MagmaSoft» були взяті основні відомості, необхідні для виконання розрахунку гідродинаміки розливки та кристалізації металу, що стосуються теплофізичних властивостей металу, у тому числі їх температурні зміни, особливостей процесів теплопередачі як у

металевій ванні, так і на межі метал-виливниця та виливниця-довкілля в різні періоди формування зливка, теплоізоляційні властивості теплоізолюючих сумішей, що застосовуються для утеплення прибутку, та вогнетривких виробів.

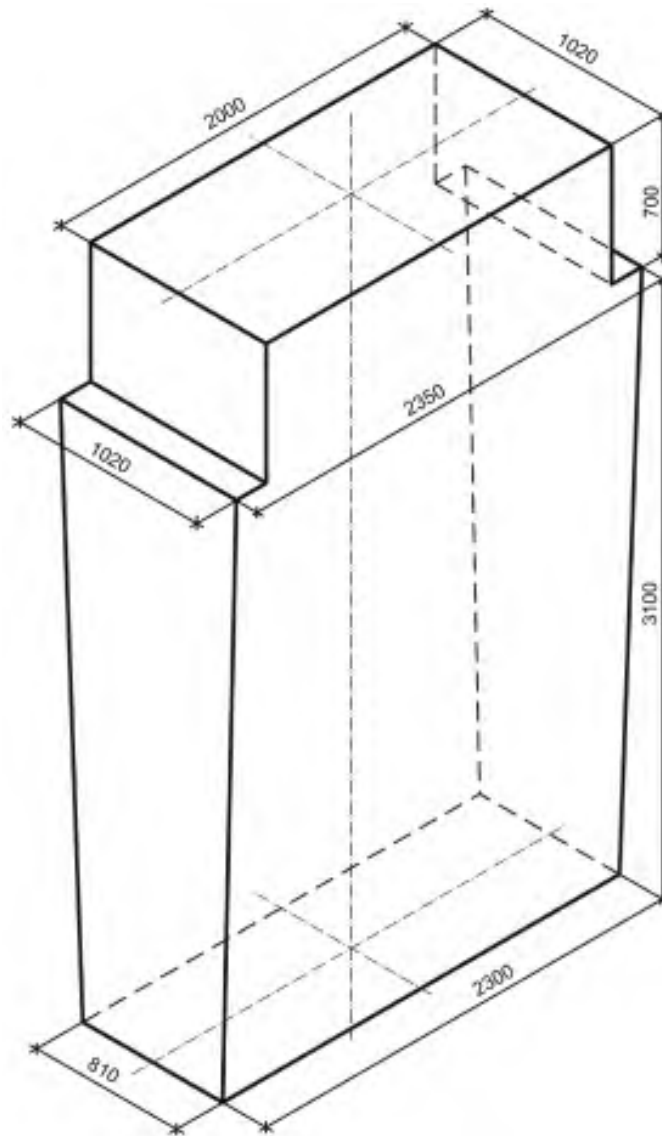


Рисунок 4.1 – Геометричні розміри внутрішньої порожнини виливниці та прибуткової надставки для лиття 50-ти тонного листового зливка

Дослідження формування листового зливка, що розглядається авторами, включало в себе моделювання процесу розливки та моделювання процесу затвердіння металу, що заливається у виливницю. Отримані результати моделювання показують, що час заповнення металом виливниці та прибуткової

надставки становив близько 25 хв., а це відповідало, в свою чергу, часу розливки в реальних умовах.

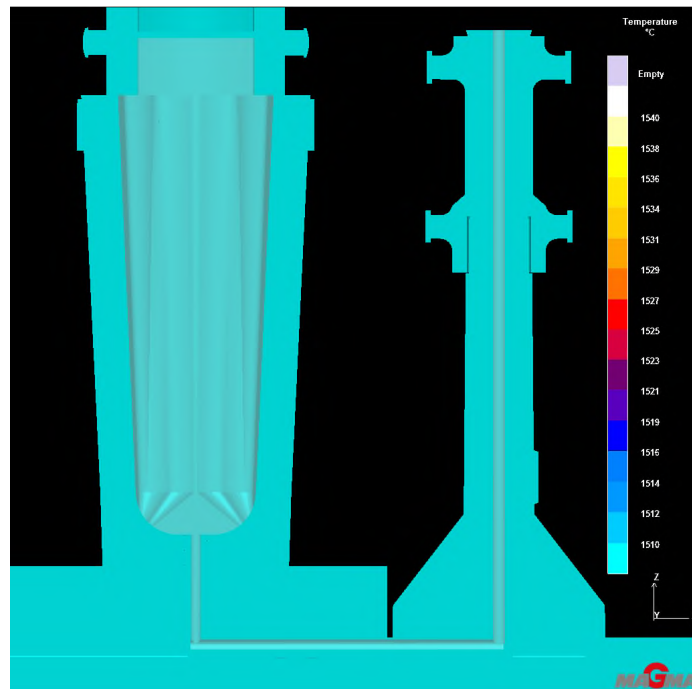


Рисунок 4.2 – 3D-моделювання оснастки та процесу розливки сталі при отриманні листового зливка масою 50 т [46]

Температурне поле тіла зливка після закінчення розливки неоднорідне. Найбільш високу температуру (в межах 1523–1529 °С) має метал у центральній (умовно осьовій) зоні шириною 150–200 мм практично по всій висоті зливка, а також у верхній частині прибуткової надставки (рис. 4.3). Причому цей осьовий «шлейф» найбільш перегрітого металу має невелике відхилення убік, протилежну сифонній проводці.

Слід зазначити, що температура металу в центральній зоні верхньої частини тіла зливка нижче порівняно з нижчими обр'ями, а найвищу температуру має ділянка у донній частині зливка, що безпосередньо примикає до місця надходження металу у виливницю.

Така ситуація розподілу температури обсягом металу, що заливається у виливницю, є наслідком поєднання гідродинамічних процесів, характерних для сифонної розливки сталі в цілому, та особливостями металевих потоків, що

виникають в умовах отримання конкретного зливка.

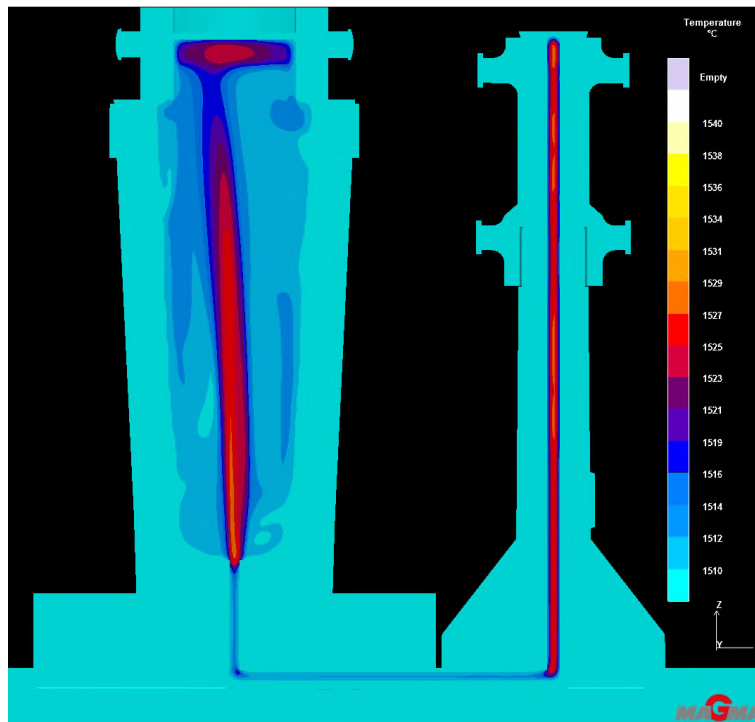


Рисунок 4.3 – 3D-моделювання температурного поля зливка після закінчення розливки [46]

Програмний пакет «MagmaSoft» розраховує при заливці та прогріванні оснастки, яке надає вплив надалі на умови тепловідведення від твердне металу і враховується при оцінці ходу кристалізації. Так згідно з результатами моделювання на час закінчення заливки найбільш прогрітої, до температури 650–700 °C, є центральна за висотою зона виливниці. Донна частина виливниці внаслідок охолоджувальної дії піддону має температуру на 100–150 °C нижче. Також менше порівняно з виливницею прогрів прибуткової надставки, яка ізольована від гарячого металу вогнетривким матеріалом.

Подальше моделювання кристалізації металу здійснювалося з урахуванням теплового стану зливка та оснащення, яке було виявлено на момент закінчення розливки. Зазначені фактори – нерівномірність температури металу і температури оснащення мають дуже важливе значення з погляду формування зливка, тому що надають вплив на умови тепловідведення від

різних по висоті його ділянок. Якби моделювалось затвердіння металу після миттєвого заповнення виливниці, що має однакову температуру по висоті, рідким металом певної температури, однаковою для всього об'єму зливка, результати такого моделювання не відповідали б тому, що відбувається у реальних умовах.

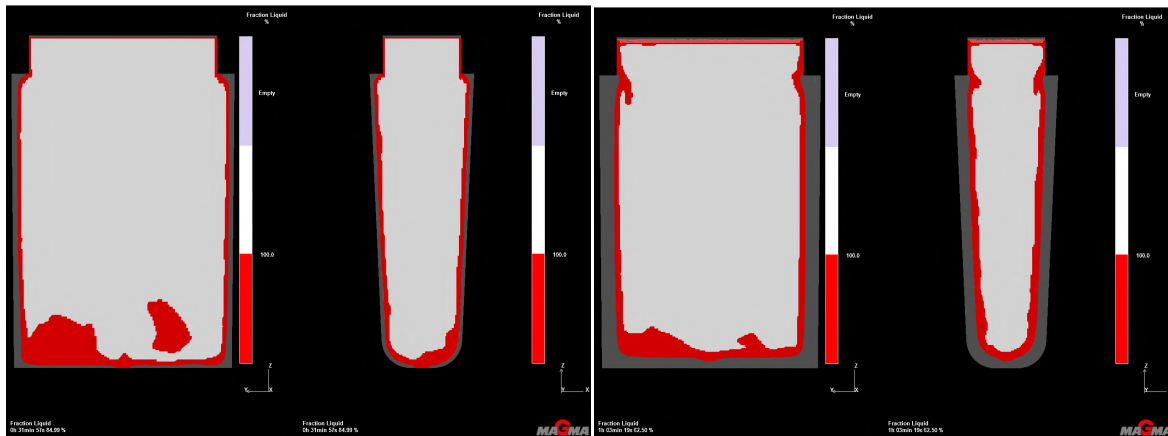
Математичне 3D-моделювання затвердіння з допомогою програмного пакета «MagmaSoft» дозволяє відстежити зміну великої кількості показників, що мають відношення до затвердіння металу, що заливається у виливницю. Крім відомостей про температурне поле зливка і пов'язаного з цим даних про час повного затвердіння, динаміки просування фронту кристалізації, зміні обсягу (маси) рідкого та твердого металу, положення тих або інших ізотерм, моделювання показує наявність і місця зосередження усадкових порожнин і підвищеної пухкості, оцінює щільність металу, зокрема за критерієм Ніяма [47]. А також розраховує ступінь напружено-деформаційного стану як зливка, так і виливниці і навіть ступінь ліквідації розчинених у залізі елементів.

Найбільш інформативними та показовими, з точки зору розуміння умов формування зливка, що розглядається, є дані про положення у часі ізотерм ліквідусу та солідуса. Тобто відомості про просування фронту початку та закінчення кристалізації металу. На рис. 4.4 в якості прикладу показаний вигляд зливка, що затвердіває, по двох осьових перерізів вздовж широкої і вузької його граней з виділенням областей повністю затверділого металу, двофазної області та рідкої фази, що залишилася. Результати 3D-моделювання показують, після закінчення періоду розливки біля стінок виливниці вже є кірка затверділого металу з невеликою зоною двофазного стану.

Тільки в донній частині зливка в прилеглий до однієї з граней виливниці області є досить розвинена двофазна зона. Це результат раніше описаної нерівномірності температурного поля зливка внаслідок сифонної розливки. Кількість рідкої незатверділої фази до цього часу становить близько 90 % всього обсягу металу, що заливається.

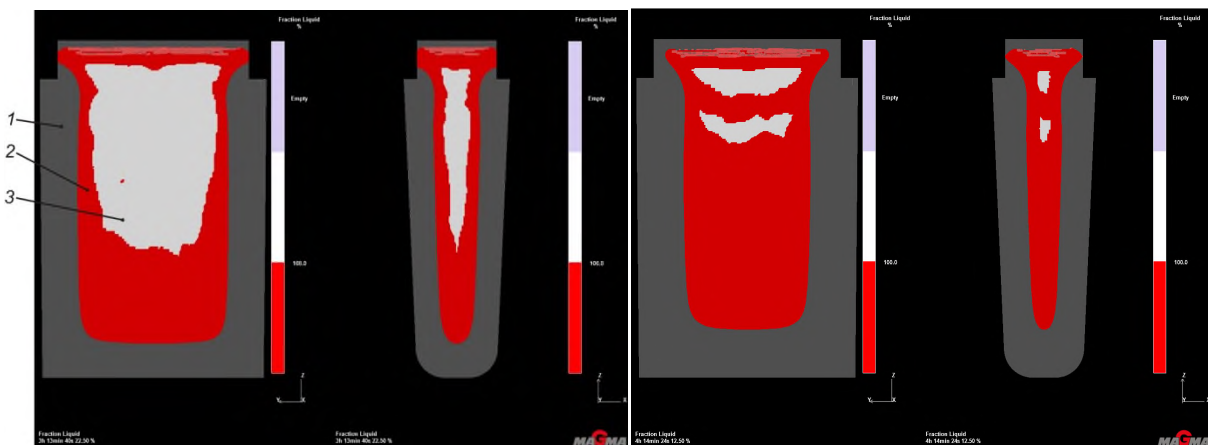
Спочатку в міру перебігу процесу кристалізації кількість металу, що

затвердіває, швидко збільшується, а кількість рідкого, звісно, зменшується. Так всього через 40 хв. після закінчення розливки кількість рідкої фази становить близько 60 %. До цього часу ще зберігається тепло перегріву металу, і область двофазного стану не набуває значного розвитку.



а

б



в

г

а – формування через 6 хв.; б – формування через 38 хв.; в – формування через 2 год. 49 хв.; г – формування через 4 год. 50 хв.

1 – повністю затверділий метал; 2 – двофазна область; 3 – рідкий метал

Рисунок 4.4 – 3D-модельювання зливка, що формується через різний час після закінчення розливки сталі [46]

Надалі темп наростання твердої фази знижується, а обсяг області двофазного стану навпаки збільшується, і до 3 годин з початку періоду

затвердіння довжина твердо-рідкої зони ( $\delta$ ) по осі зливка становить майже 35% від висоти тіла зливка (рис. 4.5).

Привертає увагу той факт, що до цього часу (рис. 4.6), чітко видно наявність звуження металевої ванни на рівні верху виливниці. Швидше всього, це наслідок поєднання кількох чинників. А саме, нижчої температури металу та виливниці в цій галузі на момент закінчення розливу в порівнянні з нижчими рівнями, а також «кутовий ефект» підвищеного тепловідведення з верхньої площини затвердіння, двофазна зона у верхній частині зливка повністю перекриває ще незатверділу рідку частину зливка, що залишається нижче. Добре це видно на рис. 4.2, де зображено положення областей твердої, рідко-твердої та рідкої фаз після 3 год. 50 хв. після закінчення розливки. Тому з цього часу не може надходити рідкого металу з прибутку в тіло зливка і підживлення металу, що затерпає усадку незакристалізувався. В результаті після повного затвердіння всього металу, яке згідно з 3D-моделюванням настає через приблизно 7 год. 50 хв. після закінчення розливки, осьовий верхній зоні зливка утворюється садинна порожнина (рис. 4.6). При цьому вся центральна зона зливка, зважаючи на формування тут протяжної області двофазного стану майже на всю його висоту має підвищену пористість.

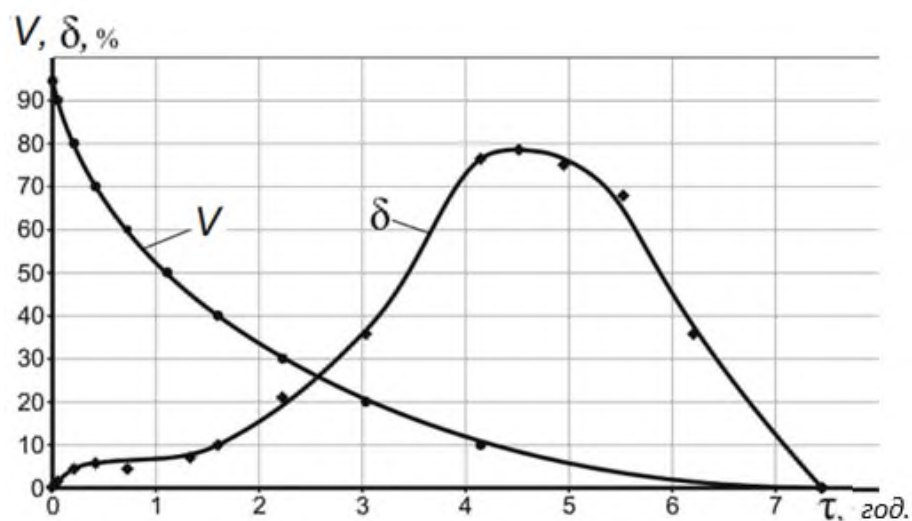


Рисунок 4.5 – Зміна об'єму рідкої фази ( $V$ ) та протяжності двофазної зони по осі зливка ( $\delta$ ) [46]



Таким чином, результати математичного моделювання формування 50-тонного листового зливка свідчать, що за його виробництві він у центральній області має дефекти усадкового походження, які отримують найбільше розвиток у підприбутковій його частині на відстані 300–500 мм від верху тіла зливка. Тому після прокатки таких зливків на плити великої товщини вони виявляються при ультразвуковому контролі.

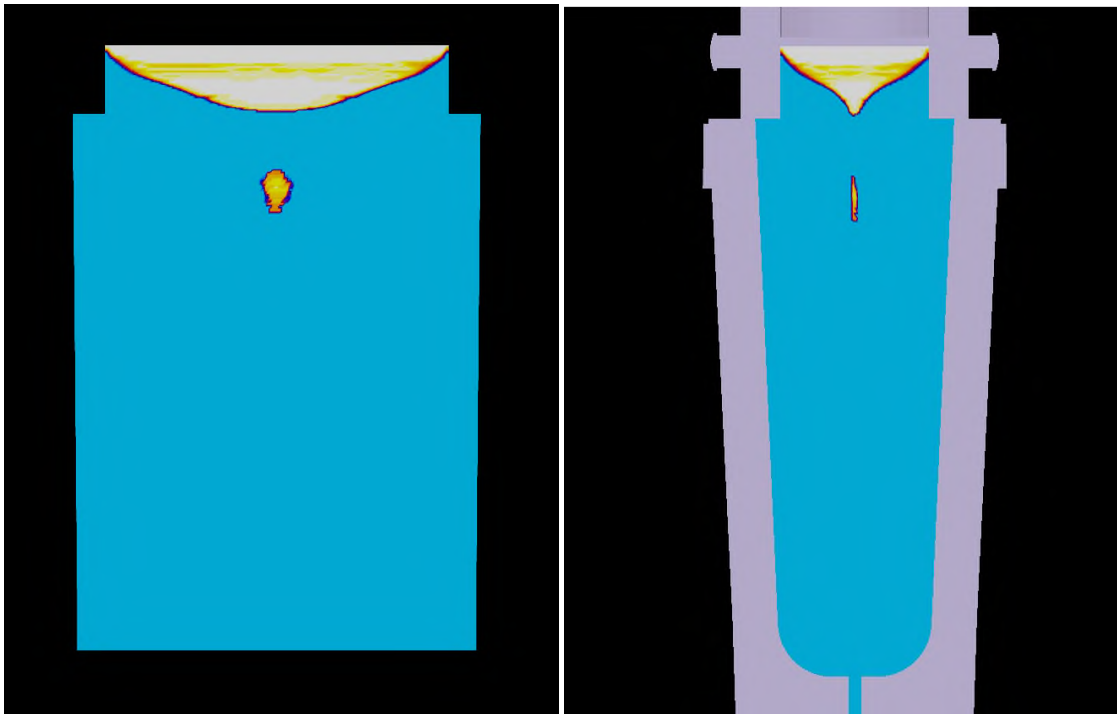


Рисунок 4.6 – 3D-моделювання розташування загальної пористості у листовому зливку масою 50 т [46]

На сьогодні одним із шляхів способів підвищення їх якості сталевих зливків є використання технології електрошлакового переплаву (ЕШП) [48], але при цьому собівартість зливків, отриманих ЕШП, більш ніж удвічі вище, чим отриманих традиційним методом лиття у виливниці.

Результати моделювання показали, що для виключення усадкових дефектів необхідно запобігти утворенню «моста» з металу, що твердне, на рівні верхнього зрізу виливниці на ранніх стадіях формування зливка, що розглядається. Для цього потрібно досить тривалий час забезпечувати

температуру металу в проблемній зоні вище температури нижчих шарів Традиційними методами – збільшенням ступеня теплоізоляції прибутку та його обсягу досягти таких умов, швидше всього, буде складно чи навіть неможливо.

У роботі [49] на прикладі математичного моделювання формування великого ковальського зливка з оцінкою щільності металу за критерієм Ніяма було показано, що тільки при додатковому підігріві металу в прибутку можна повністю зменшити розвиток дефектів усадкового походження.

З відомих методів підведення додаткового тепла до прибутку сталевих зливків в металургійній промисловості знайшли застосування розробки, що базуються на електрошлакових технологіях. Це способи електрошлакового обігріву та електрошлакового підживлення ЕШО, ЕШО(п), БЕСТ І ТРЕСТ – процеси [50–52]. У тому числі стосовно виробництва великих листових зливків [53]. Відсутність твердої кірки на дзеркалі металу при електрошлаковому обігріві прибутку дає можливість крім власне підведення тепла до зливка ще й активно втручатися в процеси його затвердіння, використовуючи при цьому, наприклад, перемішування рідкої серцевини зливка тим чи іншим методом з метою не тільки боротьби з усадковими дефектами, але і зменшення розвитку ліквідаційних процесів.

Таким чином, результати комп'ютерного моделювання лиття 50-ти тонного листового зливка з використанням програмного пакету «MagmaSoft» дозволяють наочно уявити процеси теплообміну, які відбуваються при розливі та затвердінні металу, а також визначають його фізичну та хімічну неоднорідності. Для розробки реалістичних технологій покращення якості зливка необхідно дослідити вплив на процеси теплообміну методів додаткового впливу на умови формування зливка (підведення додаткового тепла, підживлення, зовнішній вплив та інші). Так як можливості моделювання з використанням програмного пакету «MagmaSoft» для цього завдання обмежені, то можуть бути використані методи фізичного моделювання з аналізом наявних та отриманих результатів, а також даних вивчення якості реальних зливків, отриманих з впливом різних факторів про процес затвердіння.

## 4.2 Дослідження кінетики затвердіння зливків на основі фізичного моделювання процесу розливки і кристалізації сталі

У роботі [54] запропоновані дослідження кінетики затвердіння зливків на основі фізичного моделювання процесу розливки і кристалізації сталі.

Дослідження процесів затвердіння рідкого розплаву проводилося на холодних фізичних моделях, розроблених та виготовлених авторами робіт [55–60]. Плоскі водоохолоджувані прозорі моделі виливниць для проведення фізичного (холодного) моделювання дозволяють спостерігати за механізмом затвердіння, структуроутворення та особливостями розвитку дефектних зон у великих зливках з різними теплофізичними умовами затвердіння та геометричними параметрами верхньої та нижньої частини зливка. Лиття розплаву гіпосульфїту ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) в плоску модель виливниці проводили зверху. Маса модельних зливків, що відливаються, становила 4,5 кг.

Після заливання розплаву модель виливниці проводяться спостереження за процесом його затвердіння. Через призначені проміжки часу (5 хв.) на різних горизонтах виливниці, розташованих на однаковій відстані один від одного по висоті зливка (низ, середина та верх), вимірювали товщину шару, що закристалізувався, товщину двофазної області та ливарну конусність. На підставі отриманих даних були побудовані залежності, що відображають зміну товщини затверділого шару, товщини двофазної області та ливарної конусності у час охолодження розплавленого гіпосульфїту моделі виливниці.

За формулами, наведеними у роботі [61], визначали ливарну конусність та розраховували швидкість кристалізації зливків.

У якості речовини, що моделює рідкий метал, використовували тіосульфат натрію  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (кристалічний гіпосульфїт), оскільки його теплофізичні властивості збігаються з умовами затвердіння сталі [62]. Відповідність процесів, що відбуваються на моделі та в реальних умовах лиття промислових зливків, оцінюється за допомогою критеріїв подібності (табл. 4.1). Так критерій Фруда показує співвідношення сил інерції та тяжкості у потоці;

критерій Рейнольдса характеризує гідродинамічний режим течії потоку (ламіна́рний або турбулентний), а критерій Вебера характеризує співвідношення сил інерції потоку та поверхневого натягу рідини. Для повноти дослідження аналізованих процесів було введено критерій Біо, який описує характер відповідності між температурними умовами в навколишньому середовищі та розподілом температури в тіло. Також використовувався критерій затвердіння (фазового переходу), який описує відношення теплоти фазового переходу до теплоті охолодження [62].

Адекватність фізичного моделювання забезпечувалася однаковим порядком чисел подоби, отримані в результаті розрахунків (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Критерії подоби у зразку та моделі [54]

| Критерії подоби                          | Значення критерію     |                      |
|--|-----------------------|----------------------|
|  | Модель зливка         | Реальний зливко      |
| Критерій Біо                             | $1,02 \cdot 10^{-8}$  | $1,73 \cdot 10^{-7}$ |
| Критерій затвердіння (фазового переходу) | 0,52                  | 4,01                 |
| Критерій гомохронності Фур'є             | $1,083 \cdot 10^{-4}$ | $6,34 \cdot 10^{-4}$ |
| Критерій Фруда                           | $2,8 \cdot 10^{-6}$   | $3,67 \cdot 10^{-5}$ |
| Критерій Вебера                          | $7,56 \cdot 10^{-4}$  | $5,83 \cdot 10^{-3}$ |

Розраховані значення критеріїв подоби (табл. 4.1) відрізняються один від одного на моделі та в реальних умовах лиття злиwkів не більше ніж на один порядок, що допускається в дослідженнях та свідчить про сумісність процесів, що досліджуються [62].

У роботі вивчалися процеси, що відбуваються при затвердінні та структуроутворенні модельних злиwkів із введенням інокуляторів. У якості інокуляторів використовували кристали гіпосульфїту, кількість яких становила 1, 3, 6 і 12 % відповідно від кількості розплаву, що використовується для лиття модельного злиwка. Кристали гіпосульфїту при розливці подавалися в струмінь розплаву.

Також для порівняння був відлитий та досліджений модельний зливко без

використання інокуляторів.

В табл. 4.2 представлені результати фізичного моделювання.

Таблиця 4.2 – Технологічні параметри фізичного моделювання [54]

| Технологічний параметр                        | Значення |
|---|----------|
| Температура гіпосульфїта, що розливається, °С | 91±5     |
| Температура рідини, що охолоджує, °С          | 12±1     |
| Час заливання тіла, с                         | 22,5     |
| Час заливання прибутку, с                     | 9,5      |
| Тиск у системі охолодження, кПа               | 196,1    |

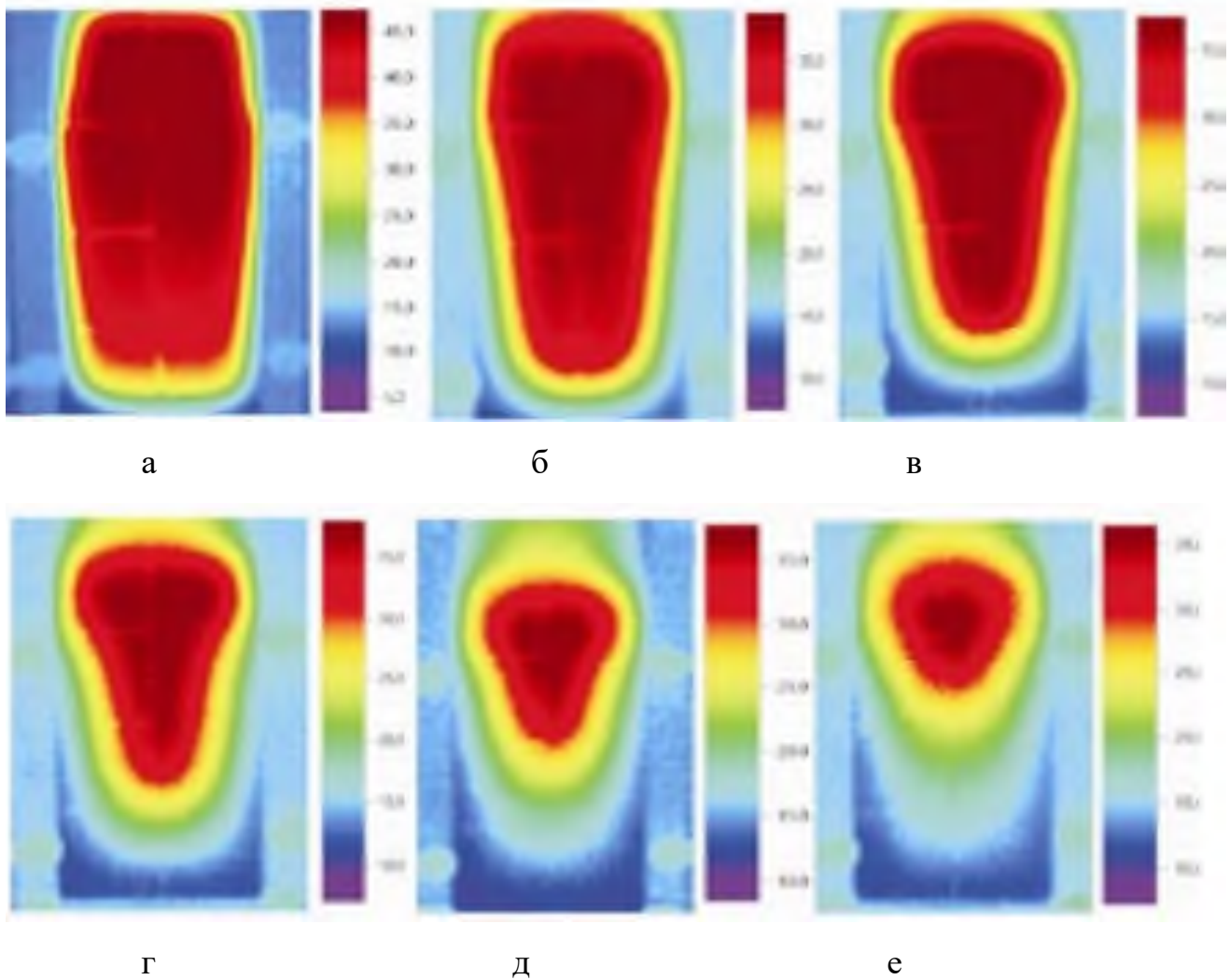
Для оцінки теплових процесів при розливанні та кристалізації зливка під час проведення експерименту проводили термометрування поверхні моделі виливниці протягом усього часу затвердіння. Термометрування проводилося тепловізором Testo 875i. На рис. 4.7 наведено поле розподілу температур поверхні модельного зливка під час затвердіння.

У роботі на моделі виливниці (плоска холодна модель) було проведено серію експериментів з фізичного моделювання процесу розливки, затвердіння та структуроутворення зливків. Дослідження показали вплив твердих частинок, що вводяться на:

- кінетику затвердіння сталевого зливка;
- швидкість кристалізації сталевого зливка;
- розподіл температур за висотою сталевого зливка;
- розвиток осьової зони сталевого зливка;
- динаміку вертикального та горизонтального затвердіння сталевого зливка;
- динаміку зміни товщини двофазної зони під час затвердіння сталевого зливка.

При вивченні процесу затвердіння зливків фронт кристалізації, що просувається розділений на дві частини: горизонтальне затвердіння – це тверда

фаза, що наростає послідовно від стінок до центру виливниці, і вертикальне затвердіння – просування твердої фази у вертикальному напрямку від низу до центру виливниці.



а – за 2 хв.; б – за 40 хв.; в – за 80 хв.; г – за 120 хв.; д – за 160 хв.;  
е – за 190 хв.;

Рисунок 4.7 – Термометрування поверхні 3D-моделі виливниці при різному часі процесу затвердіння [54]

Виявлено, що при твердінні у вертикальному напрямку спостерігаються невеликі стрибки у наростанні твердої фази. Це можна пояснити змиканням з горизонтальним фронтом затвердіння, що просувається. Встановлено, що за введення твердих частинок (інокуляторів) у кількості від 6 до 12 % час затвердіння модельних зливків скорочується.

Скорочення часу затвердіння підтверджує той факт, що введення до розплаву додаткових центрів кристалізації призводить до зняття перегріву розплаву, що у свою чергу сприяє збільшенню темпу кристалізації. Тобто отримані результати підтверджуються експериментами, проведеними у дослідженнях [63, 64].

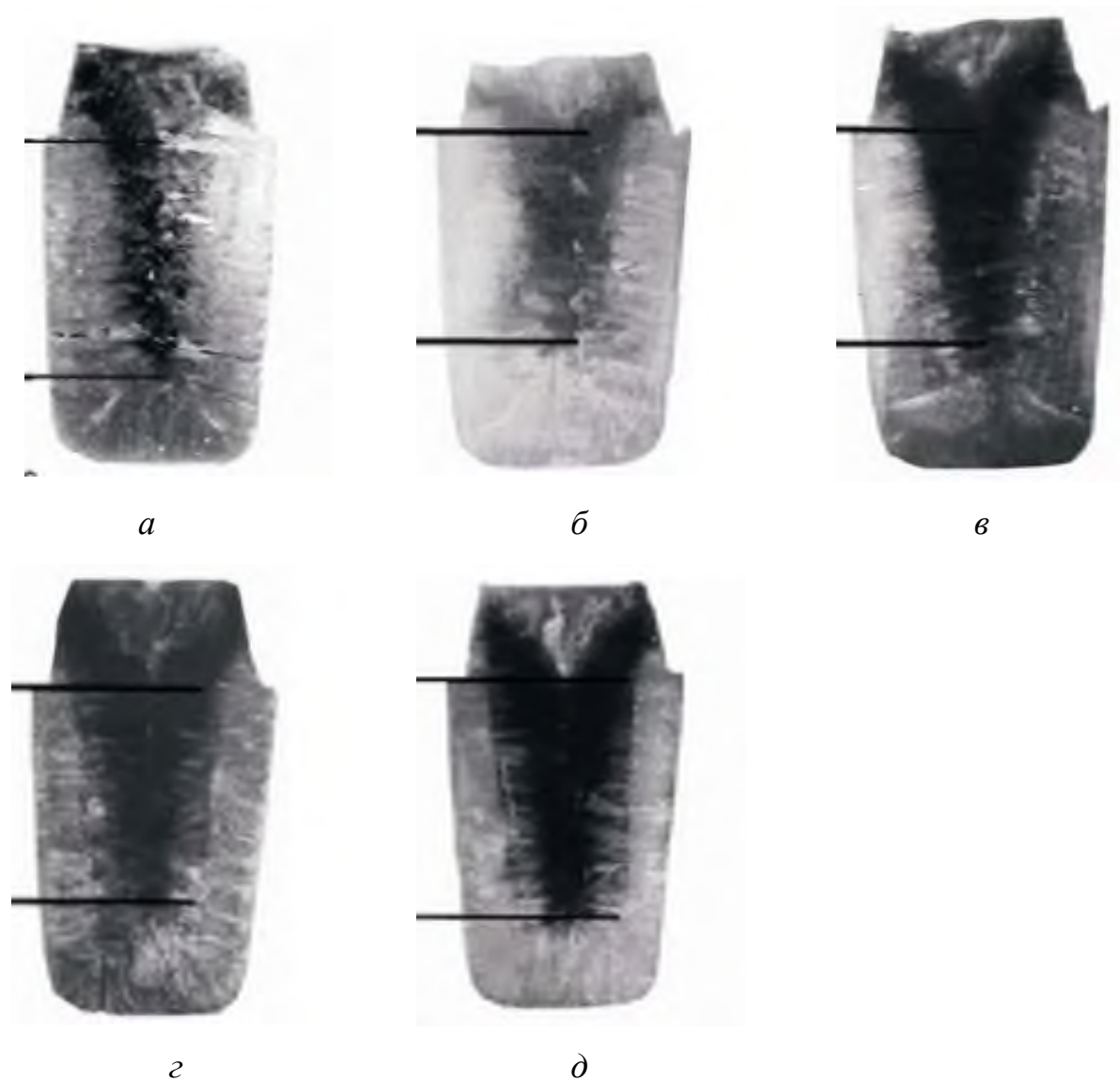
Зіставлення фронтів, що просуваються, затвердіння в модельних зливках у вертикальному і горизонтальному напрямках показало, що введення інокуляторів призводить до скорочення часу затвердіння та зміни інтенсивності просування фронтів затвердіння у двох напрямках. Введення інокуляторів призводить до збільшення відносної відстані між горизонтальним і вертикальним фронтами, що просуваються. Виявлено, що збільшення кількості інокуляторів призводить до переважання вертикальної складової затвердіння над горизонтальною. Однак збільшення кількості інокуляторів з 6 до 12 % призводить до погіршення процесу затвердіння та збільшення інтенсивності просування твердої фази в горизонтальному напрямку (рис. 4.8 д), при цьому різниця між вертикальним та горизонтальним фронтами затвердіння зменшується в 1,5 рази (з 23 до 15 мм). Розрахунок швидкості кристалізації, отриманий на підставі даних динаміки затвердіння модельних злиwkів у вертикальному та горизонтальному напрямках, показав, що з плином часу швидкість кристалізації падає, що пов'язано зі зменшенням тепловідведення через чавунні стінки виливниці. При введенні інокуляторів швидкість кристалізації зростає, що пояснюється зняттям перегріву розплаву.

Введення інокуляторів впливає величину ливарної конусності:

- введення в розплав інокуляторів у кількості 1 та 3 % від кількості розплаву, що використовується для лиття модельного зливка, не впливає на її величину;
- введення 6 % інокуляторів призводить до значного збільшення ливарної конусності;
- введення 12 % інокуляторів, навпаки, призводить до зменшення ливарної конусності та, як наслідок, зниження спрямованості процесу

затвердіння.

Погіршення спрямованості затвердіння зі збільшенням кількості інокуляторів до 12 % спричинене зняттям перегріву та, як наслідок, інтенсифікацією процесу просування твердої фази у вертикальному та горизонтальному напрямках.



1 – горизонтальне направлення; 2 – вертикальна направлення;

*a* – без введення інокуляторів; *б* – введення 1 % інокуляторів; *в* – введення 3 % інокуляторів; *г* – введення 6 % інокуляторів; *д* – введення 12 % інокуляторів

Рисунок 4.8 – Кінетика затвердіння 3D-моделі зливка при введенні інокуляторів [54]



Встановлено, що введення інокуляторів (центрів кристалізації) дозволяє збільшити величину ливарної конусності, що пов'язано зі збільшенням вертикальної складової у процесі затвердіння. Подібний розвиток ливарної конусності сприятливий позначається на процесах підживлення останніх ділянок твердорідкої зони, що твердіють, у останню чергу у несприятливих умовах (нестача рідкої фази для компенсації усадки, уповільнене просування твердої фази).

Результати термометрування поверхні стінки моделі виливниці за допомогою тепловізора Testo 875i (рис. 4.7) дозволили опосередковано визначити вплив введення інокуляторів на значення температур металевого розплаву в процесі затвердіння. Встановлено, що характер зміни температур у модельних зливках ідентичний та на момент закінчення затвердіння тепловий центр у зливках зміщується в осьову підприбуткову частину зливка. Виявлено, що запровадження інокуляторів при рідкотвердій розливці призводить до зміни розташування теплового центру. Введення інокуляторів призводить до «розтягування» теплового центру по осі зливка, що твердне. Воно пов'язано з більш швидким просуванням твердої фази у вертикальному напрямку внаслідок швидшого зняття перегріву розплаву.

Отримані дані показали, що введення інокуляторів впливає на розвиток осьової зони у модельних зливках. Збільшення кількості інокуляторів з 1 до 6 % сприяє скороченню на 5 % протяжності та на 10 % діаметра осьової зони. Введення у розплав інокуляторів у кількості 12 % призводить до збільшення (на 15–20 %) діаметра та протяжності осьової зони, що можна пояснити збільшенням частки горизонтальної складової затвердіння (рис. 4.7 д) та зменшенням спрямованості затвердіння, і як наслідок, змикання фронтів затвердіння, просуваються від стінок до осі модельного зливка, утворення мосту затверділого гіпосульфїту у верхній підприбутковій частині зливка та погіршення підживлення осьових обсягів, твердіють в останню чергу.

Таким чином, введення інокуляторів сприяє зміщенню теплового центру в прибуткову частину зливка, що призводить до покращення підживлення

осьової зони зливка рідким розплавом прибуткової частини. Фізичним моделюванням встановлено, що зі збільшенням кількості введених центрів затвердіння (понад 12 %) відбувається погіршення спрямованості затвердіння та більший розвиток осьової зони [54].

### 4.3 Висновки

1. Проаналізовано особливості формування 50-ти тонного листового зливка з конструкційної сталі типу 15Г2СФ. З використанням програмного пакету «MagmaSoft» виконано 3D-моделювання процесу розливки (сифонним способом) та затвердіння металу. Показано, що після закінчення розливки метал у центральній осьовій зоні зливка має більш високу температуру порівняно з горизонтами, що лежать вище. Показано формування у сталевому зливку дефектів усадкового походження, які можуть виявлятися при ультразвуковому контролі товстолистового прокату. Пропонується для зменшення дефектів усадкового походження застосовувати технологію електрошлакового обігріву та підживлення, яка дозволяє підвищити фізичну та хімічну однорідності.

2. Приведено результати фізичного моделювання процесу затвердіння злиwkів з використанням інокуляторів, що вводяться в розплав в кількості від 1 до 12%, та встановлено, що:

- введення інокуляторів при розливці розплаву призводить до зменшення товщини двофазної області;
- збільшення кількості інокуляторів призводить до переважання вертикальної складової затвердіння над горизонтальною;
- введення інокуляторів дозволяє збільшити спрямованість процесу затвердіння, що характеризується зростанням ливарної конусності та, як наслідок, вертикальної складової затвердіння;
- введення інокуляторів призводить до зміни розташування теплового центру.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто основні закономірності кристалізації сталевих зливків, а, зокрема, макроструктура сталей різного ступеня розкислення. Розглянуто процес формування усадкової раковини, як одного з найбільших за обсягом зливка дефекту, на початковій, проміжній та кінцевій стадіях затвердіння зливка.

2. Розглянуто основні дефекти структури сталевих зливків та можливі причини їх виникнення. Приведено сучасні методи боротьби з дефектами сталевих зливків та зазначено, що висока якість поверхні прокату найбільш ефективно забезпечується заходами попереджувального характеру, а не застосуванням різних способів виправлення дефектів.

3. Показано, що для забезпечення найбільш сприятливих умов формування зливка спокійної сталі з мінімально можливою кількістю дефектів структури та відповідно збільшення виходу придатного металу рекомендується проводити захист металу у виливниці від окислення (наприклад, шляхом розливки під шаром рідкого шлаку, розливки під теплоізолюючими сумішами та матеріалами, захисту струменя металу аргоном, розливки з використанням матеріалів, що створюють у виливниці відновлювальну атмосферу, розливки з дерев'яними рамками та розливки з петролатумом), а також з застосуванням спеціальних методів теплоізоляції та обігріву верха зливка (наприклад, застосуванням теплоізоляційних та екзотермічних вкладишів, електродугового та газового обігріву, електрошлакового підживлення).

4. Проаналізовано особливості формування 50-ти тонного листового зливка з конструкційної сталі типу 15Г2СФ. З використанням програмного пакету «MagmaSoft» виконано 3D-моделювання процесу розливки (сифонним способом) та затвердіння металу. Показано, що після закінчення розливки метал у центральній осевій зоні зливка має більш високу температуру порівняно з горизонтами, що лежать вище. Показано формування у сталевому

зливку дефектів усадкового походження, які можуть виявлятися при ультразвуковому контролі товстолистового прокату. Пропонується для зменшення дефектів усадкового походження застосовувати технологію електрошлакового обігріву та підживлення, яка дозволяє підвищити фізичну та хімічну однорідності.

5. Приведено результати фізичного моделювання процесу затвердіння злиwkів з використанням інокуляторів, що вводяться в розплав в кількості від 1 до 12%, та встановлено, що:

- введення інокуляторів при розливці розплаву призводить до зменшення товщини двофазної області;
- збільшення кількості інокуляторів призводить до переважання вертикальної складової затвердіння над горизонтальною;
- введення інокуляторів дозволяє збільшити спрямованість процесу затвердіння, що характеризується зростанням ливарної конусності та, як наслідок, вертикальної складової затвердіння;
- введення інокуляторів призводить до зміни розташування теплового центру.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Тепловий стан і властивості сталевих зливок за умов ендогенної вібраційної обробки розплаву при кристалізації / В. М. Щеглов, М. І. Тарасевич, С. Є. Кондратюк та ін. *Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів»*. 2020. №26(94). С. 21–28.
2. Жульев С. И., Зюбан Н. А., Руцкий Д. В. Стальные слитки : проблемы качества и новые технологии : монография. Волгоград : ВолгГТУ, 2016. 176 с.
3. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нём / А. Н. Ромашкин, А. Н. Мальгинов, Д. С. Толстых и др. *Электromеталлургия*. 2013. Вып. 7. С. 36–39.
4. Изучение влияния конфигурации кузнечных слитков на распределение химических элементов по их сечению / В. С. Дуб, А. Н. Ромашкин, А. Н. Мальгинов и др. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2014. Вып. 1. С. 5–19.
5. Способ введения модификаторов при разливке стали : пат. 835629 СССР, МПК В 22 D 27/00. / С. В. Климов, В. А. Слаутин, А. А. Алымов, О. Е. Молчанов, Ю. В. Зайцев, Р. М. Мыльников ; заявл. 26.06.1978; опубл. 07.06.1981. Бюл. № 21.
6. Жучков В. И., Шешуков О. Ю., Лозовая Е. Ю., Маршук Л. А. Современные методы ввода модификаторов в расплавы чугуна и стали. *Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей* : сборник докладов Литейного консилиума № 1. Челябинск : Челябинский дом печати, 2006. 81 с.
7. Зубенко Л. Н. Применения модификаторов в металлургии и сварочном производстве (Обзор). *Технологии и материалы*. 2015. Вып. 2. С. 16–20.
8. Устройство для защиты металла от вторичного окисления на выходе из шибера затвора : пат. 2048258 РФ, МПК В 22 D 41/00. / Н. Н. Кулик, И. В. Сидоров, Л. М. Аскерольд, В. П. Мигаль, В. Я. Саккулин, В. А. Можжерин, Г. Н. Салагина, Н. А. Новиков ; заявл. 30.06.1994 ; опубл.

20.11.1995.

9. Способ обработки струи металла при разливке : пат. 1764780 СССР, МПК В 22 D 71/10. / В. В. Лисицкий, В. С. Лучкин, А. Г. Суслов, А. Г. Мянник, В. В. Павлов, В. В. Кулаков, В. Г. Милуц ; заявл. 27.11.1990; опубл. 30.09.1992. Бюл № 36.

10. Сахнов Б. И., Строганов Б. Ф. Разливка стали в изложницы «утопленной» струей. *Металлург*. 2011. Вып. 9. С. 56–58.

11. Зюбан Н. А., Рудкий Д. В., Гаманюк С. Б. Интенсификация процесса дегазации при отливке слитков в вакууме и анализ качества полученных поковок. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. Вып. 12. С. 8–11.

12. Ubukata T., Suzuki T., Murayama A. etc. Rise in Productive Capacity by Increase the Facilities in the Melting Shop. *18<sup>th</sup> International Forgemasters Market and Technical Proceedings* (Pittsburgh, PA, September 12–15, 2011). Pittsburgh, 2011. pp. 154–157.

13. Зюбан Н. А. Создание технологии производства крупных кузнечных слитков с улучшенными свойствами на основе управления параметрами слитка и процессами разливки стали в вакууме: дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 2005. 302 с.

14. Устройство для отливки слитков в вакууме с инокуляторами (варианты) : пат. 42454 РФ, МПК В 22 D 27/15. / С. И. Жульев, Н. А. Зюбан ; заявл. 16.06.2004 ; опубл. 10.12.2004. Бюл. № 34.

15. Воденнікова О. С. Теорія та технологія розливки і кристалізації сталі : конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2021. 117 с.

16. Определение макро-анализа. Макро-дефекты стали на основных этапах производства металлоизделий (после литья). URL : <https://ukrintech.com.ua/opredelenie-makro-analiza-makro-defekty-stali-na-osnovnykh-etapakh-proizvodstva-metalloizdelij-posle-litya> (дата звернення :

08.11.2021).

17. Рощин В. Е., Рощин А. В. Структуры стальных слитков и дефекты деформированного металла в заготовках : учебн. пособ.; 2-е изд., пераб и доп. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 340 с.

18. Воденніков С. А., Падалка В. П., Воденникова О. С. Технологія розливання і кристалізації сталі : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 188 с.

19. Монастырский В., Ершов М. Имитационная модель образования усадочной раковины и макропористости. *CADmaster*. 2014. №1(74). С. 40–46.

20. ООО «Запорожский литейно-механический завод». URL: <https://onv.com.ua/predpriyatiya/foundries/steel-foundry/ooo-zaporozhskij-litejno-mexanicheskij-zavod/> (дата звернення: 15.05.2021).

21. Дефекты стальных слитков. URL: <https://uas.su/books/metstali/195/razdel195.php> (дата звернення: 11.10.2021).

22. Дефекты стальных слитков и проката: справочник/ В. В. Правосудович и др. Москва: Интермет Инжиниринг, 2006. 384 с.

23. Полости от усадочной раковины. URL: <https://markmet.ru/defekty-stalei/polosti-ot-usadochnoi-rakoviny> (дата звернення: 11.10.2021).

24. Основные дефекты крупных стальных слитков. URL: <https://uas.su/books/2011/kslitok/61/razdel61.php> (дата звернення: 11.10.2021).

25. Формирование крупного стального слитка. Усадочные явления в процессе затвердевания и охлаждения слитка. URL: <https://uas.su/books/2011/kslitok/34/razdel34.php> (дата звернення: 11.10.2021).

26. Усадочная раковина и усадочная рыхлость. URL: <https://metallurgist.pro/usadochnaya-rakovina-i-usadochnaya-ryhlost/> (дата звернення: 11.10.2021).

27. Усадочные раковины и усадочная пористость в слитках. URL: <http://metal-archive.ru/lite-slitkov/4172-usadochnye-rakoviny-i-usadochnaya-poristost-v-slitkah.html> (дата звернення: 11.10.2021).

28. Дефекты заготовки и их устранение. Виды дефектов слитков и литой

заготовки. URL: [https://ozlib.com/854775/tehnika/defekty\\_zagotovki\\_ustranenie#618](https://ozlib.com/854775/tehnika/defekty_zagotovki_ustranenie#618) (дата звернення: 11.10.2021).

29. Основные дефекты крупных стальных слитков. URL: <https://uas.su/books/2011/kslitok/61/razdel61.php> (дата звернення: 11.10.2021).

30. Левченко Г. В., Самохвал В. М. Технологія якості і сертифікація : навч. посіб. для студентів спеціальності 7.090404 – Обробка металів тиском / Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2009. 117 с.

31. Вставки теплоизоляционные МКРВ-340. URL: <https://mrc.org.ua/ogneupornie-materialy/67-mkrv-340> (дата звернення: 11.10.2021).

32. Войлок МКРВ-200, МКРВ-340 муллитокремнеземистый. URL: [https://selmo.com.ua/voyluk\\_mkrv-200\\_vstavka\\_mkrv-340/](https://selmo.com.ua/voyluk_mkrv-200_vstavka_mkrv-340/) (дата звернення: 11.10.2021).

33. ГОСТ 23619-79. Материалы и изделия огнеупорные теплоизоляционные муллитокремнеземистые стекловолокнистые [Действительный от 1981-01-01]. Выд. офиц. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2004.

34. Вставки и вкладыши в изложницы. URL: [http://ogneupor.net.ua/mkrv\\_340.html](http://ogneupor.net.ua/mkrv_340.html) (дата звернення: 11.10.2021).

35. Утепляющая надставка для прибыльной части слитка : пат. № 2368455 С2 РФ/ А.Г. Левада, Д.Н. Макаров, В.И. Антонов и др.; заявл. 19.03.2007; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27. 36 с.

36. Прибыльная надставка : пат. № SU772689A1 СССР / В.А. Курганов, В.И. Михайленко, В.И. Козацкий и др.; заявл. 04.01.1979; опубл. 23.10.1980.

37. Скобло С. Я., Казачков Е. А. Слитки для крупных поковок. Москва : Металлургия, 1973. 248 с.

38. Исследование тепловой работы изложниц для кузнечных слитков Скобло С. Я., Казачков Е. А. / С. Я. Скобло, Е. А. Казачков, Ю. И. Кирюшкин и др. *Производство и обработка стали* : сб. науч. трудов. 1960. С. 68–109.

39. Анализ тепловой работы прибыльной части слитков спокойной стали



для различных способов утепления / Л. И. Купман, А. С. Петик, Б. П. Синяговский. *Разливка стали в слитки и их качество* : сб. науч. трудов. 1973. Вып. 2. С. 20–26.

40. Шабловский В. А., Климов Ю. В., Анищенко А. Ф. Смеси для сифонной разливки стали в слитки. *Труды 3-й международной научно-техн. конф.* Донецк : ДонНТУ. 2007. С. 322–326.

41. Шпееров Я. А., Поляков В. Ф. Разработка и внедрение технологии розливки спокойной стали с применением теплоизоляционных вкладышей. *Разливка стали и качество слитка* : сб. науч. трудов. 1971. С. 3–11.

42. Fleming M. C. Principles of control of soundness and homogeneity of large ingots. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 1976. Vol. 5. pp. 1–15.

43. Мостовой А. Б., Выгодпер Л. Ф., Поляков В. Ф. Новые технологические процессы получения качественных кузнечных слитков. Москва : Металлургия, 1983. 112 с.

44. Казачков Е. А., Макуров В. С. Улучшение тепловой работы прибыли крупных стальных слитков. *Вісник Приазовського державного технічного університету* : зб. наук. праць, 2007. Вип. 17. С. 40–45.

45. Математическое моделирование процесса кристаллизации непрерывнолитой сортовой заготовки. URL: <https://steeltimes.ru/books/casting/sortccm/65/65.php> (дата звернення: 11.10.2021).

46. Биктагиров Ф. К., Шаповалов В. А., Гнатушенко А. В., Качан Р. Ю. Компьютерное моделирование формирования 50-тонного листового слитка. *Метал та лите України*. 2019. № 5–6 (312–313). С. 14–20.

47. Коротченко А. Ю. Критерии образования усадочной пористости в отливках. *Литейщик России*. 2010. № 4. С. 43–47.

48. Чжоу-хуа Цзян, Сю Чень, Синь Ген, Цян Ю. Металлургические характеристики крупных слябов, полученных электрошлаковым переплавом. *Современная электросталлургия*. 2018. № 2. С. 19–27.

49. Ефимов М. В., Биктагиров Ф. К., Тарасевич Н. И. и др. Влияние технологических параметров на плотность металла при получении крупных

слитков. *Металл и литье Украины*. 2017. № 8–10. С. 25–30.

50. Повышение качества крупных слитков / Ф. К. Биктагиров, В. А. Шаповалов, М. В. Ефимов и др. *Современная электрометаллургия*. 2011. № 1. С. 7–11.

51. Махнер П. Опыт производства крупных кузнечных слитков с помощью БЭСТ-процесса и состояние технологии электрошлаковой подпитки. *Электрошлаковый переплав*. 1983. Вып. 6. С. 306–316.

52. Базеви С., Скепи М., Репетто Е. Способ ТРЭСТ для производства валов роторов высокого давления из хромомолибденованадиевой стали. *Электрошлаковый переплав*. 1983. Вып. 6. С. 317–321.

53. Плекингер Е., Штраубе, Махнер П., Вайс Ф. Использование БЭСТ-процесса для производства листовых слитков. *Электрошлаковый переплав*. 1979. Вып. 5. С. 267–269.

54. Исследование кинетики затвердевания слитков на основе физического моделирования разливки и кристаллизации расплава / С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н.А. Зюбан и др. *Чёрная металлургия*. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. №75(7). С. 818–827. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-7-818-827>

55. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в модели изложницы : пат. 110667 РФ, МПК В 22 D 7/08. / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, С. Н. Никуйко, А. Н. Галкин; заявл. 31.05.2011; опубл. 27.11.2011. Бюл. № 33.

56. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в изложнице : пат. 114281 РФ, МПК В 22 D 7/06. / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. Б. Гаманюк, С. Н. Никуйко, А. Н. Галкин; заявл. 12.08.2011; опубл. 20.03.2012. Бюл. № 8.

57. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков : пат. 135551 РФ, МПК В22D7/08. / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, А. Н. Галкин, С. Б. Гаманюк, Е.А. Косова, А. Я. Пузииков; заявл 6.05.2013; опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35.

58. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков : пат. 141550 РФ, МПК В 22 D 7/08. / Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, А. Н. Галкин, С. Б. Гаманюк, Е. А. Косова, А. Я. Пузиков; заявл 9.01.2014; опубл. 10.06.2014. Бюл. № 16.

59. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в изложнице : пат. 169360 РФ, МПК В 22 D 7/08. / С. Б. Гаманюк, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. В. Палаткин; заявл. 27.05.2016; опубл. 15.03.2017. Бюл. № 8.

50. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в изложнице : пат. 169365 РФ, МПК В 22 D 7/08. / С. Б. Гаманюк, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий, С. В. Палаткин; заявл. 24.05.2016; опубл. 15.03.2017. Бюл. № 8.

61. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. Москва : Metallurgy, 1976. 552 с.

62. Эльдарханов А. С., Ефимов В. А., Нуратдинов А. С. Процессы формирования отливок и их моделирование. Москва : Машиностроение, 2001. 208 с.

63. Затуловский С. С., Ефимов В. А. Некоторые вопросы теории и технологии суспензионного лиття. *Суспензионное лите* : сб. науч. трудов ИПЛ. 1977. С. 3–29.

64. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. Москва : Машиностроение, 2004. 359 с.

**ДАДАТКИ**

**ДОДАТОК А**

**НАУКОВІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
МАГІСТРА**

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут



**МАТЕРІАЛИ**

**І ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ  
ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ, АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ  
ВЧЕНИХ «АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-  
ТЕХНІЧНОГО ТА СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ  
РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**



м. Запоріжжя

2021

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут  
Дніпропетровський науково-дослідний інститут судових експертиз  
Запорізька міська рада  
Запорізька обласна державна адміністрація  
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Національний університет «Кієво-Могилянська Академія»  
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## **МАТЕРІАЛИ**

**І ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ  
ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ, АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ  
ВЧЕНИХ «АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-  
ТЕХНІЧНОГО ТА СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ  
РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**

**19-21 жовтня 2021 року**

м. Запоріжжя

2021



|  |     |
|--|-----|
| <b>Яблуновська О.С., Ажажа М.А.</b> Методи оцінювання управлінської діяльності на підприємстві.....    | 188 |
| <b>Яценко А.В., Венгер О.М.</b> Сталий розвиток промислового підприємства в умовах нестабільності..... | 190 |

**СЕКЦІЯ «МЕТАЛУРГІЯ, ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ,  
АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ»**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Бабак А.О., Дорошенко П.О., Кириченко О.Г.</b> Використання конвертерного шлаку в конвертерному виробництві та обробці чавуну.....    | 193 |
| <b>Бадулка В.В., Норченко В.В., Кириченко О.Г.</b> Використання гарячих відновлювальних газів в доменному процесі.....                   | 194 |
| <b>Герніченко П.А., Лічконенко Н.В.</b> Про ефективність десульфурації сталі за рахунок використання флюїдизованого вапна.....           | 196 |
| <b>Головков П.В., Воденнікова О.С.</b> Позадоменна десульфурація чавуну: вибір реагент-десульфуратору та методу його введення.....       | 197 |
| <b>Грибок Н.О., Батюк Д.Р., Гулієва Н.М.</b> Прогресивні опозитні поршневі компресори.....   | 199 |
| <b>Гриценко С.В., Соболева О.С., Кириченко О.Г.</b> Використання технічного лігніну у брикетуванні залізовмісних відходів.....           | 200 |
| <b>Жолобка Б.О., Явтушенко А.В.</b> Ковка на молоті.....   | 203 |
| <b>Захарченко В.В., Лічконенко Н.В.</b> Аналіз шляхів зменшення енергоспоживання в чорній металургії України.....                        | 204 |
| <b>Калашник С.М., Сагулякін О.Є., Воденнікова О.С.</b> Енерго- та ресурсозберігаючі технології металургійної промисловості.....          | 206 |
| <b>Калашнік С.М., Кругляк Д.О.</b> Пресування важкотопких матеріалів для отримання керметів високих експлуатаційних характеристик.....   | 208 |
| <b>Клименко М.Д., Бабак А.О., Воденнікова О.С.</b> Стратегічні напрямки розвитку металургійної промисловості України.....                | 210 |
| <b>Козлов Д.П., Явтушенко А.В.</b> Вплив зазору на якість бокової поверхні деталі при розділових операціях.....                          | 212 |
| <b>Крохмаль П.О., Міняйло Н.О.</b> Web-додаток до системи управління процесом екструзії полімерних матеріалів.....                       | 214 |
| <b>Лисенко Є.І., Вінник І.І., Воденнікова О.С.</b> Соляно-кислотне травлення металу.....   | 216 |
| <b>Макаренко О.В., Овчинникова І.А.</b> Вдосконалення системи управління проміжного перемотувального пристрою прокатного стану 1680..... | 218 |
| <b>Мартинішин Д.В., Кругляк Д.О.</b> Розробка режиму деформації на станах гарячої прокатки.....  | 220 |
| <b>Моїсєєв М.М., Лічконенко Н.В.</b> Аналіз джерел викидів CO <sub>2</sub> на металургійних підприємствах.....                           | 221 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Панченко С.О., Воденнікова О.С.</b> Дослідження можливості виготовлення ливарних моделей з відходів модельного виробництва.....            | 223 |
| <b>Омельченко Я.В., Воденнікова О.С.</b> Дефекти сталевого зливу: основні види та методи боротьби з ними.....                                 | 225 |
| <b>Подвойський Ю.О., Костюк С.С., Кириченко О.Г.</b> Нові розробки технології виробництва корозійностійкої сталі.....                         | 227 |
| <b>Подвойський Ю.О., Лічконенко Н.В.</b> Аналіз впливу температури газу-енергоносія на розмір частинок при газовому розпилюванні.....         | 229 |
| <b>Поляков А.І., Кругляк Д.О.</b> Вдосконалення режиму холодної прокатки низьковуглецевих сталей.....   | 231 |
| <b>Рачун Б.П., Єлисеєв О.Є., Кириченко О.Г.</b> Ефективність впровадження підвищення тиску газів на колошнику доменних печей.....             | 233 |
| <b>Фолькіна О.М., Нестеренко Т.М.</b> Напрями підвищення якості титану губчастого і зниження вмісту домішкових елементів.....                 | 235 |
| <b>Харченко А.Ю., Корнієнко В.В., Кириченко О.Г.</b> Використання комбінованої продувки для збільшення частки брухту в металевій шихті...     | 236 |
| <b>Чернишов М.А., Ардаб'єва В.О., Пругцьков Д.В.</b> Дослідження процесу вакуумування сталей типу ШХ.....                                     | 238 |
| <b>Шингур В.В., Ніколаєнко А.М.</b> Дослідження та керування температурним режимом протягом прокатки алюмінієвої катанки.....                 | 240 |
| <b>Якушевич І.В., Міняйло Н.О.</b> Сучасні підходи до побудови комп'ютерних тренажерів для підвищення кваліфікації операторів-технологів..... | 242 |
| <b>Яценко А.В., Калиновський М.С., Кириченко О.Г.</b> Способи видалення настилів в доменній печі.....   | 245 |

#### **СЕКЦІЯ «МІКРОЕЛЕКТРОННІ ТА ЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ»**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Кісельов В.Є., Кісельов Є.М.</b> Візуально-блочна модель системи визначення концентрації озону з джерелами випромінювання постійної інтенсивності..... | 248 |
| <b>Коротич Г.І., Алексієвський Д.Г.</b> Візуально-блочна модель трифазного інвертора напруги.....   | 250 |
| <b>Кулькін Ю.О., Кісельов Є.М.</b> Концепція побудови терміналів контролю електрообладнання на основі байєсовських мереж довіри.....                      | 252 |
| <b>Ласвський М.Д., Кісельов Є.М.</b> Розробка датчика озону у повітрі.....  | 254 |
| <b>Манасєв К.В., Алексієвський Д.Г.</b> Візуально-блочна модель трансформатора з дискретним керуванням коефіцієнта трансформації.....                     | 255 |
| <b>Михайловський Д.Ю., Тупіков В.А., Москаленко А.Ю., Світанько М.В.</b> Резонатори із нелінійним резонансним середовищем.....                            | 257 |
| <b>Панченко Т.П., Шмалій С.Л.</b> Методи запобігання атак для користувачів систем «розумний будинок».....   | 259 |



Показано, що виготовлення моделей з відходів модельного виробництва дає можливість:

- зменшити витрати на виготовлення моделей з первинної деревини;
- зменшити енергозатрати виробництва;
- зменшити трудомісткість виготовлення моделі;
- автоматизувати виробництво ливарних моделей.

#### **Список використаних джерел**

1. Технологія виготовлення моделей і стрижневих ящиків. URL: [https://ferrum.at.ua/publ/tehnologija\\_metaliv/11\\_tehnologija\\_vigotvlennja\\_model\\_ej\\_i\\_strizhnevikh\\_jashhikiv/1-1-0-11](https://ferrum.at.ua/publ/tehnologija_metaliv/11_tehnologija_vigotvlennja_model_ej_i_strizhnevikh_jashhikiv/1-1-0-11) (дата звернення: 11.10.2021).
2. Технологія виготовлення ливарних форм. URL: <http://obrobka.pp.ua/1858-tehnology-vigotvlennya-livarnih-form.html> (дата звернення: 11.10.2021).
3. Ливарний модельний комплект. URL: <http://um.co.ua/8/8-2/8-237978.html> (дата звернення: 11.10.2021).
4. Сутність ливарного виробництва. URL: <https://jak.bono.odessa.ua/articles/sutnist-livarnogo-virobnictva.php> (дата звернення: 11.10.2021).
5. Хричиков В. Е., Меньяло О. В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів : навч. посіб.; 2-ге вид., допр. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2015. 89 с.

УДК 621.744.3

Омельченко Я.В., магістрант 2-го курсу  
Науковий керівник – к.т.н., доцент Воденнікова О.С.

### **ДЕФЕКТИ СТАЛЕВОГО ЗЛИВКУ: ОСНОВНІ ВИДИ ТА МЕТОДИ БОРОТЬБИ З НИМИ**

*Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного  
університету, кафедра металургії*

Відомо, що дефекти сталевих зливків поділяють на природні або неминучі, які виникають при затвердінні і охолодженні зливка, і технологічні, які виникають через недосконалість технології виплавки та розливки металу. До природних дефектів відносяться: усадкова раковина, осьова рихлість, хімічна і структурна неоднорідність, стільникові бульбашки, ендогенні неметалеві включення. До технологічних дефектів відносяться: тріщини, полон, заворот кірки, підкіркові бульбашки в зливках спокійної сталі, «халяви» або рослість зливків киплячої сталі, мала товщина щільної кірки зливка та інше [1].

Слід зазначити, що якість поверхні зливка, отриманого при розливці сталі у виливниці, в значній мірі залежить від стану внутрішньої поверхні виливниці. Крім того, незадовільно очищені та змащені виливниці служать причиною



виникнення на поверхні зливків підіркових міхурів та місцевих тріщин, що в свою чергу призводить до зменшення стійкості виливниць [2].

У той же час геометрична форма і довжина по висоті усадкової раковини, яка характерна для зливку спокійної сталі, визначаються конфігурацією прибутку, конструкцією прибутковою надставки, умовами тепловідводу через футеровку надставки, утепленням дзеркала металу та іншими факторами [3]. Боротьба з усадковою раковиною може бути в напрямку створення таких умов кристалізації, щоб раковина була найвигіднішої форми з розташуванням в головній частині зливка [4]. Тобто концентровані усадкові раковини можна перевести в прибуткову частину зливка або усунути шляхом доливання гарячого металу. Боротьба з міжкристалічною усадковою пористістю утруднена тим, що навіть значних розмірів прибуток часто не в змозі усунути такого роду пористість [5]. У прокатному цеху шляхом обрізки або вирубки дефектних місць позбавляються порожнин від усадкової раковини (рис.) [6].

Основними способами боротьби з корочками є збільшення температури дзеркала металу при розливці. Для кожної марки сталі існує мінімальна температура розливки, вище якої скоринки малоімовірні. Для зменшення полон на поверхні зливків застосовують виливниці з кюмшельним дном, використовують різні манжети та воронки, ведуть розливку зі зниженням кінетичної енергії струменя. Основними способами боротьби зі флокенами є зменшення вмісту водню в сталі, наприклад шляхом вакуумування струменя при розливці, і забезпечення умов для вільного виділення водню з металу при його охолодженні. Після прокатки флокеночутливі сталі піддаються спеціальній антифлокєнній обробці [7].



Рисунок – Порожнини від усадкової раковини [6]

У великих зливках лінійні розміри дефектів можуть становити як кілька метрів (лікваційні дефекти та тріщини), так і кілька десятків мікрометрів (скупчення неметалевих включень). Ряд дефектів досить важко ідентифікувати безпосередньо в зливку (методами неруйнівного контролю). Це власне призводить до того, що прояв цих дефектів відбувається або в поковці, або в готовому виробі. На практичних умовах для отримання якісних зливків прагнуть оптимізувати систему параметрів виплавки, ківшевої обробки та розливки сталі з урахуванням конкретних вимог до металопродукції [8].



Слід пам'ятати, що висока якість поверхні прокату найбільш ефективно забезпечується заходами попереджувального характеру, а не застосуванням різних способів виправлення дефектів [9].

### Список використаних джерел

1. Дефекты стальных слитков. URL: <https://uas.su/books/metstali/195/razdel195.php> (дата звернення: 11.10.2021).
2. Дефекты стальных слитков и проката: справочник/ В. В. Правосудович и др. Москва: Интернет Инжиниринг, 2006. 384 с.
3. Формирование крупного стального слитка. Усадочные явления в процессе затвердевания и охлаждения слитка. URL: <https://uas.su/books/2011/kslitok/34/razdel34.php> (дата звернення: 11.10.2021).
4. Усадочная раковина и усадочная рыхлость. URL: <https://metallurgist.pro/usadochnaya-rakovina-i-usadochnaya-ryhlost/> (дата звернення: 11.10.2021).
5. Усадочные раковины и усадочная пористость в слитках. URL: <http://metal-archiv.ru/lite-slitkov/4172-usadochnye-rakoviny-i-usadochnaya-poristost-v-slitkah.html> (дата звернення: 11.10.2021).
6. Полости от усадочной раковины. URL: <https://markmet.ru/defekty-stalei/polosti-ot-usadochnoi-rakoviny> (дата звернення: 11.10.2021).
7. Дефекты заготовки и их устранение. Виды дефектов слитков и литой заготовки. URL: [https://ozlib.com/854775/tehnika/defekty\\_zagotovki\\_ustranenie#618](https://ozlib.com/854775/tehnika/defekty_zagotovki_ustranenie#618) (дата звернення: 11.10.2021).
8. Основные дефекты крупных стальных слитков. URL: <https://uas.su/books/2011/kslitok/61/razdel61.php> (дата звернення: 11.10.2021).
9. Левченко Г. В., Самохвал В. М. Технологія якості і сертифікація : навч. посіб. для студентів спеціальності 7.090404 – Обробка металів тиском / Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2009. 117 с.

УДК 669.14.018.8

Подвойський Ю.О, магістрант 1 курсу, Костюк С.С., студент 2 курсу  
Науковий керівник – к.т.н., зав. кафедри Кириченко О.Г.

### НОВІ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ

*Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного  
університету, кафедра металургії*

**Актуальність.** Виробництво корозійностійких сталей завжди знаходиться на перших місцях серед усіх інших спеціальних сталей завдяки унікальному набору властивостей та широкому спектру використання.

**Мета.** Проаналізувати нові сучасні технології виробництва корозійностійких сталей.