

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Гірничо-металургійний факультет  
Кафедра металургії та інноваційних технологій

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП

Христина МАЛІЙ

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Металургія чорних металів»  
за спеціальністю 136 Металургія

**на тему «Аналіз технологічних параметрів розливання сталі на  
блюмовій МБЛЗ»**

Керівник роботи

Євген СИНЕГІН

Наставник від бази  
практики

Микита КРЮКОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають  
посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Крістіна ЧИТАЄВА

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	<u>гірничо-металургійний</u>
Кафедра	<u>металургії та інноваційних технологій</u>
Ступінь вищої освіти	<u>бакалавр</u>
Спеціальність	<u>136 Металургія</u>
ОПП	<u>Металургія чорних металів</u>

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант освітньої програми

Христина МАЛІЙ

«10» квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Читаєва Крістіна Іванівна

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Аналіз технологічних параметрів розливання сталі на блюмовій МБЛЗ

керівник роботи Синегін Євген Володимирович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету від № 41/23.02.2026 від 23.02.2026

2. Термін подання роботи 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Навчальна, наукова та методична література зі спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики сталеплавильного виробництва, науково-технічні літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ» м. Кам'янське.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. Розділ 1. Аналітичні дослідження технології розливання на МБЛЗ блюмової заготовки, продуктивність розливання сталі на МБЛЗ. Розділ 2. Основна частина. Статистичний аналіз паспортів розливання сталі на блюмовій МБЛЗ. Визначення взаємозв'язків між параметрами розливки сталі на блюмовій МБЛЗ та техніко-економічними параметрами процесу. Розробка пропозицій щодо покращення технології розливання на МБЛЗ блюмової заготовки в кисневому конвертері. Розділ 3. Охорона праці у відділенні МБЛЗ. Розділ 4. Розрахунки економічної доцільності запропонованих рішень. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): \_\_\_\_\_

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Розділ 1	Синегін Є.В., доцент
Розділ 2	Синегін Є.В., доцент
Розділ 3	Синегін Є.В., доцент
Розділ 4	Синегін Є.В., доцент

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Технологічна частина	11.05 – 13.06.2026
2	Спеціальна частина	11.05 – 13.06.2026
3	Охорона праці та екологія	06 – 13.06.2026
4	Економічно-організаційна частина	06 – 13.06.2026
5	Оформлення пояснювальної записки	13 – 20.06.2026
6	Захист	за графіком

Здобувач

Крістіна ЧИТАЄВА

Керівник роботи

Євген СИНЕГІН

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Теоретичний розділ .....	7
1.1 Теоретичні аспекти позапічної обробки сталі .....	7
1.2 Методи рафінування сталі в процесі розливання на МБЛЗ.....	11
1.2.1 Механічні методи.....	12
1.2.2 Фізико-хімічні методи .....	23
Висновки за розділом.....	26
2 Технологічний розділ .....	27
Висновки за розділом.....	45
3 Охорона праці та захист навколишнього середовища .....	46
3.1 Аналіз умов праці та пожежної безпеки .....	46
3.2 Вимоги охорони праці під час розливання металу та заливання форм .....	48
3.3 Заходи поліпшення умов праці.....	50
3.2 Захист навколишнього середовища.....	55
4 Оцінка економічної ефективності запропонованих заходів .....	57
Висновки до розділу.....	60
Висновки.....	61
Перелік посилань.....	62

## АНОТАЦІЯ

*Читаєва Крістіна Іванівна.* Аналіз технологічних параметрів розливання сталі на блюмовій МБЛЗ.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 136 «Металургія», ОПП «Металургія чорних металів» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

*Об'єктом дослідження* процес безперервного розливання сталі на машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

*Предметом дослідження* є вплив технологічних параметрів розливання сталі та металургійних факторів на формування дефектів безперервнолитої блюмової заготовки, техніко-економічні показники процесу та якість металу.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану технології безперервного розливання сталі та позапічної обробки. Розглянуто основні види дефектів безперервнолитої заготовки, причини їх виникнення, механізми формування тріщин, осьової пористості та хімічної неоднорідності, а також вплив методів рафінування, шлакоутворюючих сумішей і електромагнітного перемішування на якість металу.

У другому розділі виконано статистичний аналіз паспортів плавок сталі, що дозволило встановити залежності між параметрами розливання та виходом придатної заготовки. Визначено основні впливові фактори (вміст S, P, Cu, співвідношення Mn/S, перегрів металу) та проаналізовано дефекти (подовжні, поперечні, осьові, кутові тріщини). Розроблено рекомендації щодо оптимізації процесу з метою підвищення якості заготовки.

У третьому розділі розглянуто питання охорони праці та захисту навколишнього середовища у відділенні МБЛЗ. Проаналізовано шкідливі та небезпечні виробничі фактори (висока температура, інфрачервоне випромінювання, запыленість, шум), запропоновано заходи щодо підвищення безпеки праці, пожежної профілактики та зменшення негативного впливу виробництва на довкілля.

У четвертому розділі виконано оцінку економічної ефективності запропонованих технологічних рішень. Встановлено, що підвищення серійності розливання та оптимізація технологічних параметрів забезпечують зростання виходу придатної заготовки, підвищення продуктивності МБЛЗ та отримання значного економічного ефекту.

БЕЗПЕРЕРВНЕ РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ, МБЛЗ, БЛЮМОВА ЗАГОТОВКА, ТРІЩИНИ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ, МЕТАЛУРГІЙНА ЧИСТОТА, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПЕРЕМІШУВАННЯ, ЯКІСТЬ МЕТАЛУ.

## ВСТУП

Сучасна металургія висуває підвищені вимоги до якості сталевих продукції, що обумовлено необхідністю забезпечення надійності та довговічності виробів у різних галузях машинобудування, будівництва та енергетики. Одним із ключових етапів формування високих експлуатаційних властивостей сталі є її підготовка перед безперервним розливанням. Особливого значення набуває позапічна обробка, яка дозволяє цілеспрямовано коригувати хімічний склад, температуру та структурний стан металу, забезпечуючи його однорідність і високу чистоту.

На завершальних стадіях виробництва сталі важливу роль відіграє процес рафінування, спрямований на видалення неметалевих включень, розчинених газів і шкідливих домішок. Наявність неметалевих включень у сталі суттєво погіршує її механічні властивості, знижує пластичність, ударну в'язкість та сприяє утворенню внутрішніх дефектів. Особливо критичним це є при розливанні сталі на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), де формування структури та якість поверхні заготовки безпосередньо залежать від ступеня очищення металу. Недостатній рівень рафінування може призводити до підвищеного відбракування продукції, утворення тріщин, підповерхневих дефектів та неоднорідностей.

В умовах безперервного розливання блюмових заготовок значна увага приділяється стабільності технологічних параметрів процесу, зокрема температурного режиму, швидкості витягування заготовки, умов кристалізації та гідродинаміки металу в кристалізаторі. Взаємодія цих факторів із рівнем чистоти сталі визначає якість кінцевої продукції. Тому комплексний підхід, який поєднує ефективні методи позапічної

обробки та оптимізацію параметрів розливання, є основою підвищення виходу придатної заготовки.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення якості блюмової заготовки за рахунок вдосконалення технологічних режимів розливання та поглибленого аналізу впливу параметрів процесу на виникнення дефектів. Вивчення закономірностей формування браку та визначення оптимальних умов розливання дозволяє підвищити ефективність роботи металургійних підприємств, зменшити втрати металу та покращити конкурентоспроможність продукції на світовому ринку.

## 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Теоретичні аспекти позапічної обробки сталі

Теперішній період розвитку металургії характеризується корінною зміною масштабів виробництва якісної сталі. Зростаючі вимоги нових галузей техніки до службових характеристик металу призвели до того, що виробництво сталі та сплавів, які вміщують дуже малу кількість газів, неметалевих включень та інших небажаних домішок, дуже однорідних по властивостям, помітно збільшилось. При цьому були розроблені та опробувані нові засоби обробки металу.

Виявилось, що здійснювати операції рафінування металу у багатьох випадках легше, якщо перенести їх із печі або конвертера у допоміжні ємності (до ковша). Проведення технологічних операцій поза плавильного агрегату отримало назву позапічної обробки (або “позаагрегатної” обробки, “ковшової” металургії, ковшового рафінування, “вторинної” металургії тощо).

Вдосконалення методів такої обробки в свою чергу склало реальні умови виробляти у масових масштабах сталь із гарантовано низьким вмістом шкідливих домішок при одночасній можливості використовувати менш чисті (значно доступніші і дешевші) шихтові та додані матеріали. Отримання якісної сталі забезпечує, в свою чергу, зростання промислового виробництва без збільшення кількості металу, що виплавляється. Виникла нова ситуація у промисловості, при якій масштаби виплавки сталі вже не характеризують промислову міць. Головним стає висока якість, чистота та надійність металопродукції. Але ускладнення технології при цьому виправдовується отриманими результатами. Наприклад, при роботі по традиційній технології,

існуючої 30-40 тому, з кожної 100 млн. т виплавленої та розливої у зливки сталі отримують приблизно 75 млн. т прокату, з якого, в свою чергу, отримують ще біля 60 млн. т виробів. Конструктор, який не впевнений у високій якості металу, відсутності в ньому шкідливих домішок, відсутності порушень суцільності металу з-за бульбашок, включень, тріщин, передбачає запас міцності від 1,5 до 3,0. Якщо прийняти цей коефіцієнт, рівним 2, то виявляється, що корисну службу несуть 30 млн. т сталі (із 100 млн. т). Заміна звичайної розливки на безперервну збільшує вихід прокату.

Отримання сталі з гарантовано малою кількістю шкідливих домішок усуває основну причину ліквідації, газових пухирів, тріщин, розшарування та інших дефектів і дозволяє наблизити коефіцієнт запасу до 1. В результаті виявляється, що корисну службу з кожних 100 млн.т несуть не 30 млн.т, а 60-70.

У багатьох цехах через установки позапічної обробки пропускається уся виплавлена сталь.

Основна ціль позапічної обробки – здійснення ряду технологічних операцій швидше та ефективніше, ніж в звичайних сталеплавильних агрегатах.

До числа задач, які стоять перед позапічною обробкою, відносяться такі:

- 1) вирівнювання і регулювання температури металу;
- 2) вирівнювання хімічного складу металу;
- 3) легування і доведення хімічного складу металу до заданого;
- 4) глибоке зневуглицювання металу;
- 5) кінцеве розкислення;
- 6) видалення і модифікування неметалевих включень;
- 7) десульфуріація та дегазація металу;
- 8) зниження вмісту небажаних домішок кольорових металів.

Швидке розповсюдження та широкі масштаби використання позапічної обробки пояснюються в значній мірі наступним :

1. Можливістю заміни при використанні методів позапічної обробки звичайної двошлакової технології плавки у електропечах одношлаковим процесом без скачування шлаку, при цьому скорочуються тривалість плавки, розхід електроенергії тощо.

2. Спрощенням технології конвертерної або мартенівської плавки, контролю за її ходом, так як з'являється можливість продувати метал киснем до низького вмісту вуглецю з наступним науглецюванням і коригуванням температури в ковші.

3. Розповсюдженням методу безперервної розливки сталі, так як для високовиробничої роботи установок необхідні точне (і стандартна відплавки до плавки) регулювання температури та хімічний склад металу, а також метал стандартно високої якості. В результаті практично уся сталь, яка розливається на МБЛЗ, підлягає позапічній обробці.

4. Безперервно зростаючими масштабами виробництва таких марок сталі найважливішого призначення (наприклад, для магістральних газопроводів), котрі звичайно важко отримати при звичайній технології плавки.

5. Зростаючими масштабами виробництва нержавіючих та інших сталей і сплавів з особливим вмістом вуглецю.

6. Можливістю отримувати в конвертерних і мартенівських цехах сталь "електропічного сортаменту".

7. Перевагами нових процесів, які дозволяють корінним чином змінювати структуру і тип споживаних феросплавів та розкислювачів в бік значного зниження вимог до їх складу і відповідного їх здешевлення.

Покращення чистоти металу є однією з важливих проблем металургії сталі. Важливість її пояснюється тим, що експлуатаційні властивості сталі залежать від вмісту, характеру розподілу, форми, розміру і природи утворення включень. Пошуком раціональних

способів розкислення, рафінування та інших методів обробки сталі вчені займаються багато років.

Неметалеві включення можуть бути трьох видів: сульфіди, оксиди, нітриди. Найбільш великі включення утворюються із оксидів та оксисульфідів, які різко знижують властивості сталі. Включення можуть розділятися на ендогенні та екзогенні. Включення першого типу зазвичай мають невеликі розміри і є результатом реакцій та масопереносу розчинних домішок, що відбуваються в рідкій сталі. Екзогенні включення є продуктами взаємодії рідкої сталі з вогнетривами печі, жолоба, ковша.

Ендогенні включення формуються в результаті взаємодії кисню, розчиненого в сталі з розкислювачами, десульфуратами або зниження розчинності елементів при переході з рідкого в твердий стан. Основним джерелом включень є продукти розкислення сталі. Ефективність зародження включень залежить від елемента розкислювача, що застосовується.

В процесі розкислення сталі різними розкислювачами утворюються оксидні неметалеві включення типу  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$ .

Екзогенні включення . Початком таких включень є продукти агресивного впливу рідкої сталі на вогнеупори печі, жолоба та ковша, а також частки шлаку і різних продуктів вторинного окислення сталі. Згідно досліджень, руйнування футеровки ковша за одну розливку відповідає частка неметалевих включень в рідкій сталі 0,2...0,5% маси плавки. Більша частина цих включень впливає на поверхню металу в ковші, але ж частина все ж таки попадає в кристалізатор та сприяють утворенню грубої корки на дзеркалі металу [1].

Наявність неметалевих включень в сталі призводить до погіршення механічних характеристик сталі, а в деяких випадках може посилювати вплив корозії на метал. На сьогодні відомо багато методів видалення неметалевих включень зі сталі, недолікам яких є

використання складного обладнання, дорогих додаткових матеріалів для обробки сталі тощо. Тому розробка недорогих і водночас ефективних методів видалення НВ зі сталі є актуальною задачею.

## 1.2 Методи рафінування сталі в процесі розливання на МБЛЗ

На підставі проведеного огляду методів видалення неметалевих включень зі сталі в процесі позапічної обробки й безперервного розливання сталі запропонована їхня класифікація на дві групи: механічні й фізико-хімічні. До першої групи запропоновано віднести методи, що передбачають зміну картини циркуляційних потоків у ковші таким чином, щоб прискорити спливання неметалевих включень у шлакову фазу або їх вловлювання спеціальними керамічними фільтрами. До цієї групи належать продувка інертним газом, електромагнітне перемішування (ЕМП), фільтрація й установка в промковші перегородок і порогів. Методи другої групи, на відміну від першої, передбачають вплив на хімічний і фазовий склад, а також агрегатний стан включень. Підвищення ефективності видалення НВ у цьому випадку досягається за рахунок зниження їхньої температури плавлення й переведення їх у рідкий агрегатний стан, що полегшує їхню агрегацію та за рахунок укрупнення прискорює спливання. До цієї групи методів належать модифікування, обробка шлаковими сумішами і методи раціонального розкислення й легування. Додатковий ефект модифікування полягає в наданні неметалевим включенням глобулярної форми, що знижує напруги в об'ємі твердого металу[2]. Розглянемо детальніше особливості та ефективність застосування цих методів при розливанні на МБЛЗ (у промковші і в кристалізаторі) відповідно до запропонованої класифікації.

## 1.2.1 Механічні методи

### 1.2.1.1 Продувка інертним газом

Утворення неметалевих включень, що відбувається в ході позапічної обробки та безперервного розливання сталі, безпосередньо пов'язане з поведінкою кисню, який знаходиться в металі, шлаку і футеровці сталерозливного та проміжного ковшів, а також з емульгуванням часток шлаку при примусовому перемішуванні і технологічних переливах металу [3,4].

Видалення неметалевих частинок зі сталі при продуванні інертними газами відбувається завдяки їх прикріпленню до бульбашки на межі метал-газ [5]. За даними [6] час, необхідний для переходу неметалевих включень через міжфазний кордон метал – газ, може оцінюватися як  $10^{-4} - 10^{-6}$  с. Це свідчить про те, що практично будь-яке зіткнення неметалевої частки з бульбашкою газу незалежно від її хімічного складу та гідродинамічних умов має призводити до прикріплення неметалевої фази до бульбашки. Тим не менш, на практиці настільки значного зниження вмісту неметалевих включень при звичайних режимах продувки не досягається, що слід розглядати як підтвердження того факту, що далеко не всі зіткнення бульбашок з включеннями призводять до їх зчеплення. Крім того, деяка частина неметалевих включень затягується в металеву ванну в області бурління та виходу бульбашок з металу в шлак.

Сприятливі умови для спливання та видалення неметалевих включень створюються під час перебування сталі у промковші МБЛЗ. Сучасний промковш, як правило, оснащений спеціальними пристроями, що забезпечують спливання та відділення неметалевих включень в результаті правильної організації потоків руху металу, його фільтрації та продувки інертним газом [7]. Разом з тим вибір

раціональної конструкції промковша та оптимальних параметрів продувки залежить від певної сукупності критеріїв та технологічних параметрів, що обумовлює необхідність проведення досліджень стосовно конкретної МБЛЗ.

Під час інтенсивної продувки, що охоплює весь об'єм рідкої ванни, в ній встановлюється режим розвиненої однорідної та ізотропної турбулентності, при якій укрупнення зважених частинок за рахунок пульсацій конвективних потоків відбувається швидше.

Найважливішим результатом продувки металеві ванни інертним газом є швидке видалення неметалевих включень за рахунок інтенсивного їх укрупнення в потоках, що обтікають спливаючі бульбашки. Видалення неметалевих включень зі сталі в шлак може здійснюватися за рахунок флотації взвесі спливаючими бульбашками і прискореного укрупнення їх в потоках що утворюються. Час швидкого градієнтного укрупнення монодисперсної взвесі  $t_{gp}$  можна визначити із співвідношення [5]:

$$t_{gp} = \frac{2,44 \times 10^{-4}}{n_0 r_3} \times Q \frac{R}{\sqrt[3]{1 + \frac{U}{Q}}}$$

де  $n_0$  – кількість частин неметалевих включень;  $r$  – радіус частин, мкм;  $R$  – радіус впливаючих бульбашок, мм;  $Q$  – витрата газу, лхв;  $U$  – швидкість руху металу, мхв.

З цього виразу випливає, що  $t_{gp}$  лінійно зменшується зі зменшенням розміру бульбашок і дещо меншою мірою – зі збільшенням витрати газу. Відповідно рафінуючу продувку доцільно здійснювати в режимі дрібних бульбашок, рівномірно розподілених по об'єму розплаву.

Тим часом, різний ступінь видалення із сталі неметалевих включень різного хімічного складу при ідентичних гідродинамічних

умовах свідчить про різну ефективність зустрічей частинок одна з одною і міжфазною поверхнею. Стійкість дисперсної системи, якою є розплав сталі, за умов, коли виправдано процес укрупнення, визначається поведінкою тонких прошарків середовища, що розділяють частинки [8]. Якщо прийняти, що агрегація неметалевих включень між собою та їх перехід на поверхню газової бульбашки відбувається після зменшення та розриву розділового шару, то фактором, що визначає стійкість плівок металу, за даними Б.В. Дерягіна, є розклинювальний тиск [9]:

За даними Ю.А. Мінаєва [8] можливість здійснення процесу виходу на міжфазний кордон оцінюється наближеним критерієм  $Z$ :

$$Z = 0,5\sigma^{\Gamma-M} + \Pi \times l$$

де  $\sigma^{\Gamma-M}$  – поверхневий натяг на межі фаз газ – метал, Дж/м<sup>2</sup>.

Отже, рівноважне існування плівки можливе при кінцевому негативному значенні тиску, що розклинює, під дією якого рідина з об'ємної фази затікає в плівку. Можливість укрупнення включень, агрегації їх із газовими бульбашками та переходу в шлакову фазу визначається кінетикою витончення та прориву шарів металу. Висока стійкість при малих тисках (великих розмірах часток) є причиною того, що зі сталі в ряді випадків дуже важко видаляються великі глобулі.

Іншою важливою умовою швидкого видалення із сталі твердих частинок (продуктів розкислення) є зустрічі з рідкими включеннями. При зустрічі твердої частинки з рідкою перша створює підвищений тиск на шар розділення металу і забезпечує його швидкий прорив, а друга швидко розтікається після утворення периметра змочування.

Ефективність видалення неметалевих включень може бути визначена з наступного виразу:

$$\varepsilon = (1 - e^{-Kt}) \times 100$$

де  $t$  – час перебування рідкої сталі в області рідкої ванни промківша, що продувається ;  $K$  – константа, яка визначається за формулою

$$K = \frac{3U_2 P_{\text{прикріплення}} T_c}{2d_n T_0}$$

де  $U_2$  - швидкість закінчення газу на одиницю площі  $32 \text{ м}^3/\text{см}^2$ ;  $T_c$  и  $T_0$  - відповідно температура сталі і температура газу в газорідкому потоці, К ;  $d_n$  - діаметр бульбашки, м.

Результати розрахунків для неметалевих включень діаметром 40 мкм показують, що висока ефективність видалення неметалевих включень для бульбашок газу діаметром  $d_n < \text{або} = 3 \text{ мм}$  практично не залежить від протяжності області, що продувається газом та часом перебування металу в промковші в діапазоні  $t_r = 240 - 720 \text{ С}$ . В той же час для бульбашок газу розміром більше 5 мм об'єм продувальної області і час перебування в ній рідкого металу істотно впливають на ефективність видалення включень.

В результаті теоретичних, лабораторних та промислових досліджень показано, що продування рідкої ванни металу в промковші аргонном забезпечує рафінуючий ефект у частині видалення великих неметалевих включень. Найбільший ефект може бути досягнутий при використанні пористих продувних блоків, що забезпечують продування в бульбашковому режимі з діаметром бульбашок менше 3 мм. При цьому продувальні блоки необхідно розташовувати в днищі промківша в поперечному положенні щодо руху циркуляційних потоків.

У промислових умовах встановлено, що при продувці сталі аргонном у промківші кількість великих одиночних неметалевих включень (1,5 бала і вище) на 10-25% нижче, ніж у порівняльних слябах (без продувки). Найкращі результати були досягнуті при витраті газу, що

вдується, 10-12 л/хв на один продувний блок. При більш високих витратах аргону (наприклад, 15-16 л/хв) спостерігається інтенсивне вирування металу та шлаку в зоні виходу бульбашок аргону, що зумовлює додаткове забруднення сталі в промковші.

#### 1.2.1.2 Застосування електромагнітних перемішування у проміжному ковші машини безперервного розливання заготовки

Електромагнітне перемішування рідкої сталі є одним з ефективних методів підвищення якості безперервнолитої заготовки. Механізм електромагнітного впливу є результатом складної взаємодії електродинамічних магнітогідродинамічних та металургійних факторів. Магнітне поле, яке створюється системою електромагнітного перемішування, проникає крізь затверділу оболонку злитку, створює вихрові струми під дією яких метал починає обертатися. Електромагнітне перемішування покращує якість підповерхневої та осьової зони безперервнолитої заготовки, оскільки впливає на формування кристалічної структури, переміщення неметалевих включень, хімічну сегрегацію та розподіл газів [7].

На МБЛЗ застосування ЕМП можливо у промковші і на струмках (у кристалізаторі, та зоні остаточного тверднення). З точки зору глибини проникнення електромагнітного поля, вплив індукторів перемішувачих пристроїв на злиток, який кристалізується можна поділити на такі групи:

- для обробки поверхневих та підповерхневих шарів безперервнолитої заготовки ;
- для ущільнення внутрішніх об'ємів.

В першому випадку застосовують вертикальне перемішування металу в кристалізаторі, а в другому використовують обертальне перемішування розплаву в горизонтальній площині.

За сукупністю отриманих ефектів та використаних прийомів впливу на всій технологічній довжині безперервнолитої заготовки можна умовно виділити найбільш характерні зони :

- зона кристалізатора (*MEMS – mold electromagnetic stirrer*) або безпосередньо розташована під кристалізатором;
- зона вторинного охолодження (*SEMS – strand electromagnetic stirrer*) віддалена від нижнього торця кристалізатора на відстані декількох метрів ( зона формування стовпчастих кристалів);
- зона об'ємної кристалізації або зумпфова зона (*FEMS – final electromagnetic stirrer*) [7]:

Для інтенсифікації видалення неметалевих включень з рідкої лунки заготовки у кристалізаторі застосовують технологію MEMS (*mold electromagnetic stirring*) – різновид індуктивного перемішування спрямований на створення обертального руху рідкого металу у кристалізаторі, що може застосовуватися за розливання усіх типів заготовок, звичайно низьколегованих, пружинних, холоднокатаних та середньовуглецевих марок сталі.

За рахунок обертання сталі неметалеві включення та гази із меншою у порівнянні з металом густиною спрямовуються до центральної частини безперервнолитої заготовки, звідки конвекційними потоками переносяться до дзеркала металу і асимілюються шлаком [10, 11]. Згідно з даними комп'ютерного моделювання [12] електромагнітна мішалка MEMS, яка працює із силою струму 200 А та частотою 4 Гц, генерує в рідкому ядрі заготовки горизонтальний вихор із максимальною швидкістю обертання 0,27 м/с та глибиною близько 1,3 м. У роботі [13] шляхом промислового експерименту визначено оптимальне розташування ЕМП, необхідне для видалення НВ та зменшення сегрегації, що складає 510 мм від верхньої краю гільзи кристалізатора. Основний ефект електромагнітного перемішування в кристалізаторі слід пов'язувати із змінами гідродинамічної обстановки в

рідкій ванні кристалізатора під впливом примусових конвективних потоків. В цій частині МБЛЗ застосовують прилади які забезпечують формування східних потоків вздовж фронту затвердіння або обертання сталі в горизонтальній площині.

Магнітне поле, що обертається в кристалізаторі при виливці сортових заготовок відкритим струменем створює глибокий мениск металу, на дні якого збираються неметалеві включення, що обертаються з меншою швидкістю, ніж рідка сталь. В результаті цього ефекту концентрація неметалевих включень в твердій оболонці зливка знижується.

Позитивний ефект електромагнітного перемішування на процеси формування безперервнолитої заготовки при допомозі примусових конвективних потоків слід пов'язувати з такими явищами:

- покращення умов виносу з металу газових пухирців, макро- та мікро- неметалевих включень;
- пригнічення негативних явищ, пов'язаних з використанням в рідкій ванні струменю металу за рахунок змін характеру руху потоків металу в кристалізаторі ( електромагнітне гальмування);
- покращення умов теплопередачі від «гарячої» рідкої серцевини до меж розділу фаз ;
- пригнічення хвильових процесів, що розвиваються на поверхні металу в кристалізаторі через динамічний вплив, пов'язаний з рухом струменю металу.

Перераховані ефекти забезпечують покращення якості поверхні та коркової зони безперервнолитої заготовки, запобігає можливному прориву металу під кристалізатором.

Найбільш негативними проявами електромагнітного впливу в кристалізаторі прийнято рахувати :

- утворення смуг негативної ліквідації, які зменшують хімічну однорідність заготовки та можуть призводити до утворення тріщин;
- збільшення тривалості використання занурювальних стаканів, які знаходяться в межах впливу електромагнітного перемішування[7].

За рахунок використання MEMS зменшується кількість неметалевих включень, особливо малих розмірів, та збільшується глибина їх розташування під кіркою заготовки [2]. До того ж MEMS пригнічує занурення струменя у рідку лунку заготовки, що позитивно впливає на видалення неметалевих включень та умови формування кірки [11,12]. Проте за даними роботи [12] надмірно інтенсивне перемішування може призвести до утворення зони негативної ліквідації вуглецю під кіркою заготовки. Крім того, застосування MEMS на слябових кристалізаторах призводить до неоднорідності товщини кірки по перерізу заготовки (утворення порівняно тонких областей на периферії широкої сторони) та збільшення кількості неметалевих включень на глибині 0-20 мм під поверхнею широкої грані (у той же час на глибині 20-40 мм ситуація кардинально змінюється) [11].

Порівняно із попередніми методами, використання ЕМП для коригування потоків у промковші є доволі обмеженим. За результатами аналітичного огляду знайдено лише один метод використання, що має назву CF-Tundish (Centrifugal Tundish), винайдений японськими вченими [14,15]. Промківш при цьому розділено на дві камери: ротаційну, у яку зі сталерозливного ковша витікає метал та у якій відбувається утворення горизонтального вихору за рахунок електромагнітного поля, та розливну, в якій метал розподіляється по струмках МБЛЗ. Використання електромагнітного перемішування за технологією CF Tundish дозволяє генерувати горизонтальний вихор зі швидкістю до 45 об./хв., що дозволяє ефективно видаляти майже 50 % неметалевих включень [15].

Очевидними недоліками цієї технології є необхідність у певному вдосконаленні проміжного ковша МБЛЗ, що ускладнює її впровадження на діючих МБЛЗ, встановлення додаткового складного і вартісного обладнання, а також додаткові експлуатаційні витрати (електричний струм, вода та інше).

До механічних методів видалення неметалевих включень можна віднести метод **центрифугування**.

До цієї групи методів можна віднести розглянуте вище ЕМП, що створює горизонтальні вихри, у середину яких за рахунок відцентрової сили затягуються НВ, а також методи, утворення вихрів за рахунок коригування гідродинамічної картини потоків як в промковші, так і в кристалізаторі. Методи центрифугування, реалізуються у процесах позапічної обробки й безперервного розливання можлива за допомогою електромагнітного перемішування й за рахунок тангенціального підведення металу в ротаційну камеру. Обертний рух металу методом індукційного перемішування реалізовується в сталерозливних ковшах (ASEA-SKF) [15], промковшах (CF-Tundish) [15] і кристалізаторах (MEMS).

Очевидно, що зі збільшенням об'єму металу зростають витрати енергії на його перемішування. До того ж, для ефективного переносу дрібних НВ до осі сталерозливного ковша необхідні або більші швидкості обертання вихору, або досить тривалий час обробки. Натомість, вихровий рух металу в кристалізаторі навіть із невеликими швидкостями сприяє швидкому руху НВ у напрямку осі заготовки при порівняно менших витратах енергії. Складність видалення НВ центрифугуванням у кристалізаторах полягає у відсутності можливості його застосування в слябових і тонколистових кристалізаторах. До того ж, внаслідок складної гідродинамічної картини потоків у кристалізаторі можливо повторне затягування НВ у глиб металу.

### 1.2.1.3 Метод фільтрації

При отриманні виливків велика увага приділяється очищенню металу від різних сторонніх включень.

Найбільш ефективним методом очищення є фільтрація.

Важливим резервом підвищення якості лиття є фільтраційне рафінування розплавів, при якому вони пропускаються через шар вогнетривкої кераміки з розвиненою поверхнею для очищення їх від неметалевих включень та газів. На ринку ливарного виробництва можна зіткнутися з великою кількістю фільтрів, що мають різне застосування та ефективність очищення.

Найважливіша властивість фільтрів – це його ефективність. Він повинен не допускати проникнення неметалевих включень всередину ливарної форми. Найбільш ефективними при видаленні різних домішок вважаються пінокерамічні фільтри. Під час випробувань під час використання автоматичних ліній видалення мікровключень призвело до позитивного результату – термін служби робочих механізмів збільшився, підвищився опір виливків, і як наслідок їхня фінішна обробка стала набагато простішою.

Ливарні фільтри мають різні механізми видалення включень. Не всі вони досить ефективні в порівнянні з іншими.

Частинки шлаку і великі включення збираються на поверхні фільтра, тому що через свій розмір вони не можуть пройти в порожнину ливарної форми. Вони набагато більше отворів фільтра або розмірів пір, що знаходяться на шляху потоку металу.

Зібрані на поверхні фільтра частинки шлаку і великі включення утворюють так звану «фільтруючу корку», яка так само виступає в ролі фільтра. Вона збирає на своїй поверхні дрібніші частинки включень.

Навіть дрібні зміни у проходженні потоку металу через фільтр можуть вплинути на його очищення. Внутрішні стінки отворів фільтра здатні вловлювати дрібні частинки при зіткненні з ними.

Під фільтрацією мається на увазі осадження неметалевих включень на стінках каналів керамічних фільтрів за рахунок поверхневих сил. Окрім цього, позитивний ефект від їх використання обумовлений також збільшенням резидентного часу перебування металу в промковші, зменшенням об'єму застійних зон та спрямуванням потоків металу у напрямку шлаку для асиміляції ним неметалевих включень.

Зокрема відома робота польських вчених [16]. Проєкт був спрямований на тестування нової технології рафінування сталі шляхом застосування керамічних фільтрів. Проєкт включав ряд базових (модельних) і технологічних випробувань, лабораторні, так і масштабні промислові випробування.

Багатоотвірні каналні (ситові) фільтри, фільтруючим елементом яких є внутрішня поверхня фільтруючих каналів були обрані для випробувань на фільтрування сталі.

Для ефективного видалення мікромасштабних включень у промківші було розроблено пристрій Multi-Hole-Double-Baffles (MHDB) – новий пристрій регулювання потоку у промківші для безперервного розливання. Режим масиву отворів MHDB безпосередньо впливатиме на траєкторії включень. Методом чисельного моделювання досліджено вплив та механізм видалення включень розміром від 1 до 50 мкм у промківші з MHDB. Режим масиву отворів MHDB може впливати на траєкторії та розподіл включень, а механізм, що лежить в основі ефекту MHDB, був досліджений з використанням дискретної моделі фази (DPM). Для перевірки точності чисельного моделювання було побудовано фізичну модель. Результати показали, що мікрровключення в першу чергу приводилися в рух силою опору, що надається потоком

розплавленої сталі. Траєкторії мікрровключень майже точно слідували лініям струму розплавленої сталі, але плавучість, як і раніше, грала роль у видаленні мікрровключень поблизу розплавленої сталі. Режим масиву отворів впливав на траєкторії мікрровключень і контролював і сповільнював потік розплавленої сталі, збільшуючи час перебування потоку розплавленої сталі на величину, що у 15 разів перевищував теоретичне значення.

На основі фактичної конструкції пристрою MHDB на сталеливарному заводі була створена тривимірною модель, яка використовується в цій роботі; модель включає першу і другу перегородки, отвори в обох перегородках, залишкові сталеві отвори в обох перегородках і область порожнини між перегородками. Промківш з пристроєм MHDB може не тільки ефективно обмежувати зону розливу і стабілізувати поле потоку промківшу, але також формувати стабільні висхідні потоки і поверхневі потоки у внутрішній зоні MHDB і в зоні після промківша, сприяючи тим самим видалення включень [17]. Ефективність використання перегородок суттєво залежить від їх розташування та конструкції промківша. Досить часто перегородки використовуються разом з продувочними пристроями та керамічними.

### 1.2.2 Фізико-хімічні методи

Методи другої групи, на відміну від першої, передбачають вплив на хімічний і фазовий склад, а також агрегатний стан включень. Підвищення ефективності видалення НВ у цьому випадку досягається за рахунок зниження їхньої температури плавлення й переведення їх у рідкий агрегатний стан, що полегшує їхню агрегацію та за рахунок укрупнення прискорює спливання. До цієї групи методів належать

модифікування [6,15], обробка шлаковими сумішами [12] і методи раціонального розкислення й легування [14]. Додатковий ефект модифікування полягає в наданні неметалевим включенням глобулярної форми, що знижує напруги в об'ємі твердого металу.

Виробництво якісних виливків із сталі в даний час засноване не тільки на рафінуванні металу від шкідливих домішок під час проведення плавки. Значний внесок у формування необхідної структури та експлуатаційних властивостей сталі можуть вносити й інші, більш економічні методи, до яких відноситься модифікування. В результаті процесів модифікування відбувається зміна ступеня дисперсності та морфології фазових складових сталі, у тому числі кількості, розміру та форми неметалевих включень при введенні в її розплав невеликих кількостей активних добавок. При цьому суттєво змінюються механічні та технологічні властивості. Ефективність проведення модифікування залежить від якості модифікатора, його хімічного складу, технології введення в сталь, а також ступеня її розкислення та технологічних особливостей плавки.

Найбільш розповсюдженими модифікаторами є лужноземельні (Ca, Mg, Ba) та рідкоземельні метали (Ce, La, Pr, Nd, Y). Однак низькі температури кипіння лужноземельних і висока пружність пари при температурі рідкої сталі ускладнюють їхнє ефективне використання. Значна частина кальцію та інших лужноземельних при введенні в сталь випаровується та окислюється, видаляються з металу. Посилення дії кальцію забезпечується шляхом спільної присадки з ним барію, а також стронцію. При їх комплексному введенні в рідку сталь пружність парів буде нижчою за пружність пари кожного окремо взятого елемента, що веде до повільнішого випаровування і збільшення тривалості взаємодії з киснем та сіркою і, як наслідок, до більш ефективного результату модифікації. Використання силікобарію з матеріалами, що містять кальцій знайдено в роботі [18].

### 1.2.2.1 Видалення неметалевих включень обробкою шлаковими сумішами

Видалення неметалевих частинок відбувається у три стадії: флотація, сепарація та розчинення. Кроки управління, найвпливовіші фактори та різні способи оптимізації цього процесу можна визначити лише шляхом спостереження за цими явищами у реальному часі. Таким чином, було проведено кілька досліджень для з'ясування взаємодії включення зі шлаком. Це стало можливим з появою технології конфокального лазерного скануючого мікроскопа (CSLM). Це обладнання дозволяє адекватно візуалізувати поглинання шлаком включень при температурах виплавки сталі.

Більшість сталей, що випускаються в даний час, є повністю розкисленими. Розкислення проводиться під час випуску плавки і рафінування. Al широко використовується як окислювач. Більшість проблем сталі можна віднести до окисів алюмінію при утворенні оксидних поєднань з високим вмістом оксиду алюмінію. Для того, щоб полегшити або усунути їх шкідливий вплив на властивості сталі часто використовують Са для модифікування сталей, розкислених алюмінієм. У практиці виробництва сталі використання комплексних розкислювачів має ряд переваг. При їх застосуванні суттєво покращуються термодинамічні умови розкислення. Відомо, що марганець покращує розкислювальну здатність кремнія. Марганець і кремній окремо та спільно підвищують розкислювальну здатність алюмінію. Це пов'язано зі зменшенням термодинамічної активності утвореного оксиду в складних продуктах розкислення, що відрізняються від складу продуктів при роздільному розкисленні. При використанні силікокальцію для модифікування сталі, кремній, що входить до складу силікокальцію, може мати розкислювальну дію[19].

Найкращій результат показала технологія, що передбачає введення 2 кг/т феросиліцію, 256 г/т алюмінію та 1,2 кг/т силікокальцію. Для зв'язування розчиненого в сталі кисню під час випуску давали алюміній. За рахунок цього міст кисню в металі зменшувався до 0,004 % і повністю зникали крихкі силікати. [20].

Під час фінішного етапу виробництва сталі алюміній і кальцій ефективно знижують вміст активного кисню, зменшуючи ймовірність утворення включень. Використання кальційвмісних матеріалів пояснюється їх комплексним впливом на розплав і властивості сталі, однак у процесі розливання та кристалізації, через зниження розчинності кисню і сірки та повторне окиснення, відбувається формування вторинних включень і нівелювання ефекту рафінування.

Після проведення позапічної обробки сталі в розчиненому вигляді знаходиться кисень, алюміній та кальцій. Інтенсивність утворення продуктів розкислення та інших утворень буде визначатися ступенем віддалення від рівноваги між алюмінієм, кальцієм та активним киснем.

### Висновки за розділом

У першому розділі розглянуто теоретичні аспекти безперервного розливання сталі, методи рафінування та причини утворення дефектів безперервнолитих заготовок. Отримані теоретичні положення зумовлюють необхідність статистичного аналізу параметрів розливання та їх впливу на якість заготовки, що реалізовано у другому розділі роботи.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

Якість безперервнолитої заготовки формується під впливом комплексу металургійних і технологічних факторів, серед яких визначальне місце займають ступінь очищення сталі на етапах позапічної обробки та стабільність параметрів процесу розливання на МБЛЗ. Недостатній рівень рафінування, зокрема від неметалевих включень і газів, у поєднанні з відхиленнями температурно-швидкісного режиму розливання, сприяє виникненню внутрішніх і поверхневих дефектів у заготовці.

Незважаючи на застосування сучасних методів обробки металу в ковші та промковші, остаточна якість продукції значною мірою визначається умовами кристалізації та характером тепло- і масообміну під час формування заготовки. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу причин виникнення дефектів, зокрема різних типів тріщин, які є одним із найбільш поширених видів браку при безперервному розливанні сталі. Встановлення взаємозв'язків між рівнем металургійної чистоти сталі, параметрами розливання та показниками відбракування дозволяє обґрунтувати шляхи підвищення якості блюмової заготовки та ефективності роботи МБЛЗ.

### 2.1 Подовжні поверхневі тріщини

Тріщини є дефектами, що характеризуються порушенням суцільності металу у вигляді локальних розривів. Їх утворення у безперервнолитої заготовці пов'язане з виникненням внутрішніх термомеханічних напружень у процесі кристалізації та подальшого

формування металу, а також зниженням його міцності та пластичності в окремих температурних інтервалах [1].

Поверхневі подовжні тріщини, зумовлені викривленням геометричного профілю заготовки, є наслідком підвищеної ромбічності перерізу, наявності ужимин або випинань граней БЛЗ. Тріщини цього типу, як правило, поширюються з внутрішніх зон заготовки вздовж діагоналі між тупими кутами перерізу. Перед виходом на поверхню їх напрямок змінюється, і вони проявляються поблизу кута, де товщина затверділої оболонки є найменшою (рисунок 2.1).

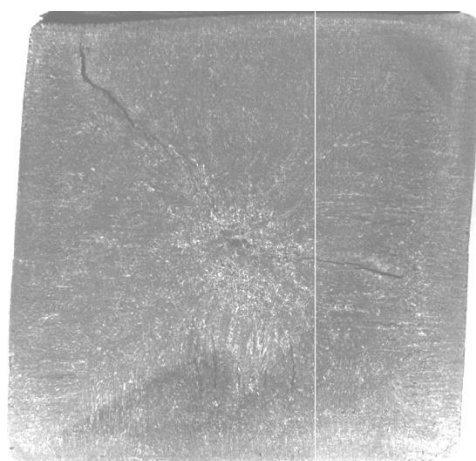


Рисунок 2.1 — БЛЗ с підвищеною ромбічністю

За значного розвитку цього дефекту безперервнолитої заготовки можливе виникнення аварійної ситуації, зокрема прориву рідкого металу під час проходження заготовки через зону вторинного охолодження (ЗВО).

Подовжні тріщини, що не пов'язані з викривленням профілю БЛЗ, характеризуються широким діапазоном прояву — від дрібних ниткоподібних дефектів (які інколи виявляються лише після зачистки поверхні) до глибоких тріщин зі значною шириною розкриття. Вони можуть локалізуватися безпосередньо у куткових зонах, з певним відступом від кутів або на гранях заготовки (рисунок 2.2).

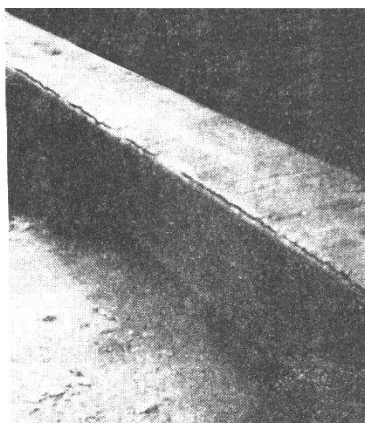


Рисунок 2.2 — Подовжня білякутова тріщина на поверхні БЛЗ

Основною причиною виникнення поздовжніх тріщин є зношування або деформація профілю гільз кристалізатора. У процесі експлуатації відбувається поступове спрацювання та викривлення робочих поверхонь гільз як по гранях, так і в кутових зонах, що призводить до зниження інтенсивності та рівномірності первинного охолодження заготовки. Унаслідок цього формуються локальні ділянки зменшеної товщини твердої оболонки, які є осередками зародження поздовжніх тріщин.

За значного розкриття тріщин можливий витік рідкого металу з внутрішньої частини заготовки на поверхню. У випадку, коли це явище відбувається безпосередньо в кристалізаторі, формуються напливи металу, що погіршують якість поверхні. Розвинені тріщини також можуть спричинити руйнування твердої оболонки нижче кристалізатора, що призводить до прориву металу. У зв'язку з цим необхідним є постійний контроль стану гільз кристалізаторів з метою своєчасного виявлення їх граничного зносу та заміни.

Схильність сталі до тріщиноутворення значною мірою визначається її хімічним складом. Практичний досвід показує, що інтенсивність утворення тріщин зростає при вмісті вуглецю понад 0,15 % і досягає максимуму поблизу 0,40 %. У цьому інтервалі спостерігається підвищена усадка, зниження міцності та недостатній

рівень пластичності металу. Для вуглецевих сталей із вмістом вуглецю близько 0,17–0,24 % характерна мінімальна пластичність, що зумовлює їх підвищену тріщиночутливість. Наявність шкідливих і залишкових домішок (P, S, Cu, Sb, Sn, As), особливо при вмісті вуглецю 0,30–0,50 %, додатково знижує міцність твердої оболонки заготовки.

З метою зменшення схильності до тріщиноутворення важливим є підтримання оптимального співвідношення Mn/S у сталі, яке повинно становити не менше 25. Температура металу при розливанні також має суттєвий вплив і повинна бути максимально наближеною до температури ліквідусу. Значну роль відіграє і геометрія гільз кристалізатора, зокрема величина кутового радіуса: при його перевищенні можливе утворення тріщин у вершинах кутів, а при зменшенні — по білякутових зонах. Використання шлакоутворювальних сумішей (ШОС) у кристалізаторі сприяє формуванню шлакового гарнісажу, що забезпечує більш рівномірний тепловідвід і знижує ймовірність розвитку ромбічності та утворення тріщин у безперервнолитій заготовці.

Серед інших факторів, що можуть підсилювати розвиток подовжніх тріщин на поверхні БЛЗ, можна виділити наступні:

- неточне центрування струменя металу з проковша в кристалізатор;
- циклічне вторинне охолодження БЛЗ;
- підвищена швидкість розливання сталі;
- неточна виставка підтримувальних роликів під кристалізатором;
- механічні дефекти на робочій поверхні гільз кристалізаторів (особливо у верхній частині).

При виявленні подовжніх тріщин необхідно:

- провести перевірку схоронності профілю гільзи кристалізатора, оцінку якості поверхні (при необхідності кристалізатор замінити);

- перевірити виставку кристалізатора щодо технологічної осі струмка МБЛЗ;
- перевірити рівномірність і чистоту зазору для потоку охолоджуючої води між гільзою й обичайкою кристалізатора;
- перевірити виставку підтримувальних роликів під кристалізатором;
- по можливості оптимізувати хімічний склад сталі, що розливається, для зниження її тріщиночутливості.

## 2.2 Поперечні поверхневі тріщини

Поперечні поверхневі тріщини локалізуються на гранях і в кутових зонах безперервнолитої заготовки та орієнтовані перпендикулярно до напрямку розливання металу. Їх поява пов'язана з дією термічних і механічних напружень у твердій оболонці заготовки в процесі її охолодження та деформації під час витягування.

Розвиток грубих поперечних тріщин становить особливу небезпеку, оскільки вони можуть спричинити руйнування суцільності оболонки та, як наслідок, обрив заготовки як у зоні під кристалізатором, так і в зоні вторинного охолодження (рисунок 2.3).

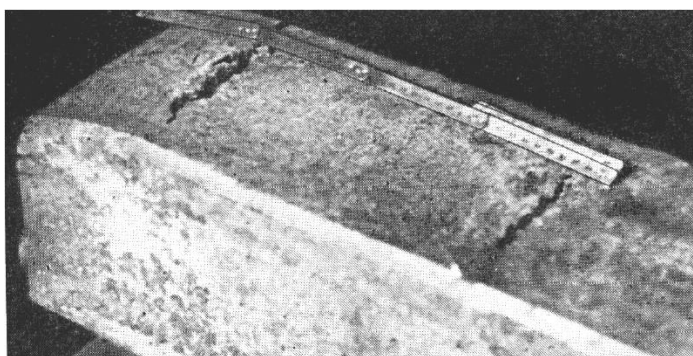


Рисунок 2.3 – Поперечні тріщини на поверхні БЛЗ

Виділяють низку факторів, що істотно впливають на утворення поперечних тріщин у безперервнолитих заготовках. Підвищений вміст у сталі таких домішок, як фосфор, сірка, мідь, олово, сурма та миш'як, знижує міцність твердої оболонки заготовки. За вмісту вуглецю понад 0,2 % присутність хрому, ванадію та ніобію додатково підвищує схильність до розтріскування, особливо у поєднанні з іншими несприятливими чинниками. Водночас зниження відношення Mn/S призводить до зростання гарячої крихкості металу.

Суттєвий вплив на формування дефектів мають конструктивні та експлуатаційні параметри кристалізатора. Надмірна конусність гільзи, її деформація, недостатня кількість мастила або шлакоутворювальної суміші, а також порушення центрування відносно технологічної осі струмка можуть спричинити зростання сил тертя між заготовкою та стінками кристалізатора. Це, у свою чергу, призводить до появи поперечних тріщин на гранях і в кутових зонах. Важливим є забезпечення рівномірної конусності по всій довжині гільзи, оскільки локальні відхилення навіть на незначних ділянках можуть стати осередками розвитку дефектів. Крім того, необхідно враховувати можливість термічної деформації гільзи та забезпечувати умови для її вільного температурного розширення.

Одним із визначальних чинників є режим хитання кристалізатора. Частота та амплітуда коливань повинні забезпечувати стабільну величину випередження кристалізатора відносно руху заготовки. Порушення в роботі механізму хитання, зокрема люфти або вібрації, можуть призводити до зменшення часу випередження, що підвищує ймовірність утворення тріщин і навіть обривів заготовки. Додатковим негативним фактором є випрямлення переохолодженої заготовки, що потребує оптимізації режимів вторинного охолодження.

З метою запобігання появі поперечних тріщин необхідно забезпечити належний технічний стан гільз кристалізатора, правильне

налаштування режимів його хитання, рівномірну та достатню подачу мастильних матеріалів або шлакоутворювальних сумішей, а також стабільні умови вторинного охолодження відповідно до швидкості розливання сталі. Такий комплексний підхід дозволяє суттєво знизити рівень браку безперервнолитих заготовок.

### 2.3 Тріщини по перерізу БЛЗ перпендикулярні граням

Внутрішні тріщини являють собою дефекти у вигляді мікро- та макророзривів, що локалізуються переважно по міжосьових просторах кристалічної структури, збагаченої ліквіційними неоднорідностями. За своєю природою вони є кристалізаційними та формуються на межі твердої і рідкої фаз у температурному інтервалі, що характеризується мінімальними значеннями пластичності та міцності металу. Їх утворення зумовлено виникненням розтягувальних напружень, величина яких перевищує допустимий рівень для даного стану металу.

Внутрішні тріщини можуть розташовуватись у декілька рядів по поперечному перерізу заготовки, утворюючи характерні зони пошкодження (рисунок 2.4).

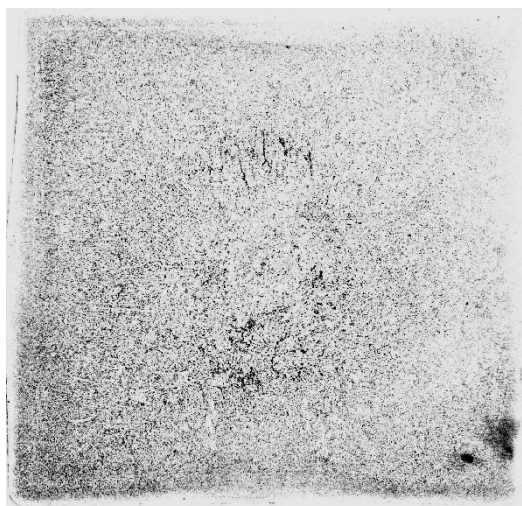


Рисунок 2.4 – Тріщини по перетину БЛЗ

Однією з основних причин утворення внутрішніх тріщин є термічні напруження, що виникають через порушення режиму охолодження заготовки. Нерівномірне охолодження, зокрема повторний розігрів після інтенсивного охолодження, викликає розтягувальні напруження у твердій оболонці та може призводити до її руйнування.

Додатково тріщиноутворенню сприяють підвищена температура розливання, висока швидкість процесу та надмірне вторинне охолодження, що обмежує усадку внутрішніх зон і накопичення напружень. Схильність сталі до дефектів зростає при наявності домішок, особливо сірки, вміст якої рекомендується обмежувати до рівня менше 0,020 %.

Для зменшення ймовірності виникнення внутрішніх тріщин необхідно забезпечити комплекс технологічних заходів, зокрема обмеження вмісту шкідливих домішок, мінімізацію перегріву сталі відносно температури ліквідусу, а також підтримання рівномірного та узгодженого зі швидкістю розливання режиму вторинного охолодження заготовки.

## 2.4 Кутові тріщини

Кутові внутрішні тріщини (рисунок 2.5), так само як і поверхневі, визначаються відхиленнями геометричної форми БЛЗ (ромбічність, опуклість граней). Дані тріщини розташовуються по стиках кристалів заготовки проти її тупих кутів.

Ці тріщини з'являються в результаті нерівномірного охолодження заготовки в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження.

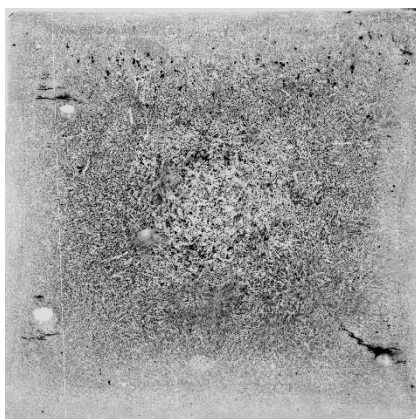


Рисунок 2.5 — Внутрішня кутова тріщина БЛЗ

Основні причини даного дефекту і контрзаходи по його попередженню аналогічні означеним для кутових поверхневих тріщин.

#### 2.5 Осьові тріщини

Осьові тріщини (рисунок 2.6) утворюються під дією напружень, що розтягують, які виникають наприкінці твердіння заготовки. Напруження в даній зоні, здебільшого, обумовлені швидкістю розливання металу, режимом і роботою системи вторинного охолодження.

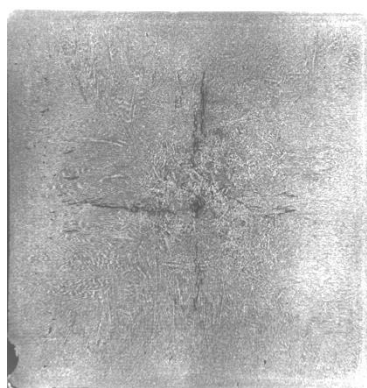


Рисунок 2.6 — Осьова тріщина БЛЗ

До розвитку осьових тріщин може привести підвищене обтиснення заготовок у ТПМ.

Осьові тріщини залежать також від процесу кристалізації осьової зони заготовки. Метал в осьовій зоні заготовки в ході кристалізації збагачується лікватами і неметалічними включеннями, тут найбільш розвинена пористість.

З означених причин метал осьової зони має більш низькі механічні властивості, ніж інші ділянки перерізу БЛЗ.

## 2.2 Методика проведення експерименту і підготовка масивів даних до аналізу

З метою підвищення виходу придатної заготовки з тріщиночутливих сталей проаналізовано 684 паспорта плавки киснево конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ». З цих паспортів було відібрано 300 паспортів безперервного розливання тріщиночутливих марок сталі: 60, 70, 20Х, Е, К, 12ХН, 19ХГС, 10ХСНД, 15ХСНД, 30Г2, 32Г2, 35Г2Ф, 36Г2С, J, J55, 15CrMoG, 16MnCrS5G4, 20MnCrS5. Причиною зменшення виходу придатної БЛЗ у всіх відібраних паспортах були тріщини, рідше – «пояс», тому його вплив не враховуємо.

З викладених у попередньому підрозділі причин утворення тріщин на поверхні і в тілі безперервнолитої заготовки відібрано ті з них, вплив яких на якість БЛЗ можна проаналізувати за даними паспортів плавки.

Ними є:

- підвищений вміст шкідливих домішок S, P, Cu;
- низьке відношення Mn/S (менше за 25);
- висока температура розливання.

У якості цільової функції вибрано вихід придатної БЛЗ, який розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{M_{\text{БЛЗ}}}{M_{\text{УКДС}}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де  $M_{\text{БЛЗ}}$  – маса БЛЗ, що відлито, т;  $M_{\text{УКДС}}$  – маса металу металу у сталерозливному ковші після позапічної обробки, т.

Оскільки означені вище марки сталі мають різну температуру ліквідус, то не можна робити оцінку безпосереднього впливу температури розливання на вихід придатного. Тому для оцінки впливу температури було обрано ступінь перегріву металу у проміжному ковші, який розраховувався за формулою:

$$\Delta T = T_{\text{пр.к.}} - T_{\text{лікв}}, \quad (2.2)$$

де  $T_{\text{пр.к.}}$  – температура металу у проміжному ковші, °С;  $T_{\text{лікв}}$  – температура ліквідус, яка розраховується виходячи з хімічного складу марок сталі за формулою:

$$T_{\text{лікв}} = 1537 - (88 \cdot C + 5 \cdot Mn + 8 \cdot Si + 25 \cdot S + 30 \cdot P + 1,5 \cdot Cr + 4 \cdot Ni + 5 \cdot Cu + 2 \cdot V + 2 \cdot Mo), \quad (2.3)$$

Для перевірки статистичної достовірності обраної цільової функції необхідно визначити діапазон її варіювання, розбити цей діапазон на рівні по величині інтервали (звичайно 5÷7) так, щоб кількість випадків у крайніх інтервалах було не менше 2÷3%, розрахувати частку випадків у кожному інтервалі у відсотках і побудувати частотну характеристику: по осі абсцис – оцінки відповідних інтервалів, по осі ординат – відсоток випадків.

## 2.3 Перевірка статистичної достовірності цільової функції і факторів

Спочатку проаналізуємо достовірність цільової функції –  $\eta$ . З паспортів плавок отримуємо інтервал варіювання  $96,0 < \eta < 98,5$  %. Розбиваємо інтервал на п'ять підінтервалів і розраховуємо кількість значень цільової функції у кожному підінтервалі. За отриманими даними будемо графік розподілу частот (рисунок 2.7). Числа біля точок показують кількість випадків потрапляння функції у кожен підінтервал.

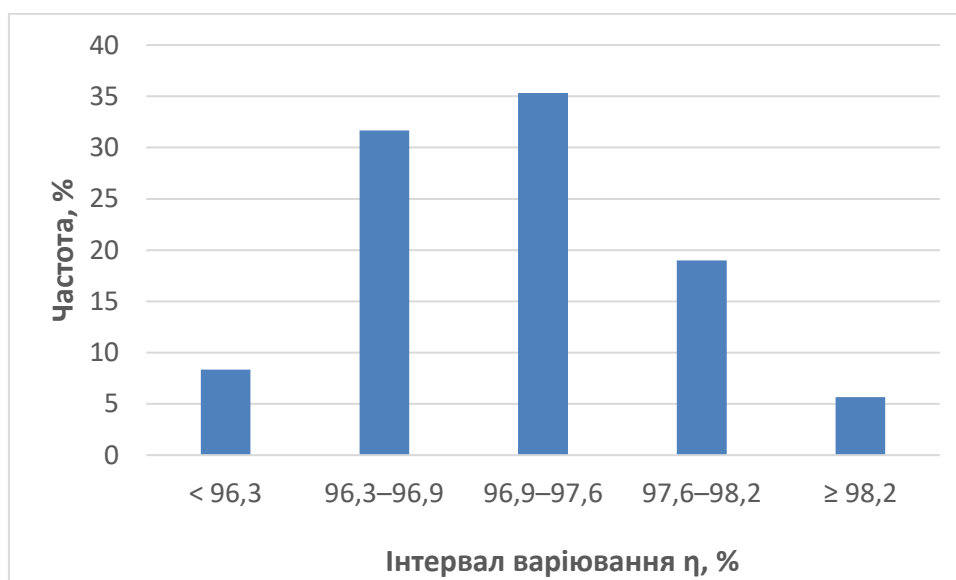


Рисунок 2.7 – Частотний розподіл цільової функції  $\eta$

Отже, цільова функція відповідає висунутим до неї вимогам: є статистично достовірною величиною оскільки крива нагадує криву Гауса.

Аналогічно перевіряємо достовірність обраних факторів. Отримані графіки частотних розподілів факторів зображено на рисунках 2.8 – 2.12.

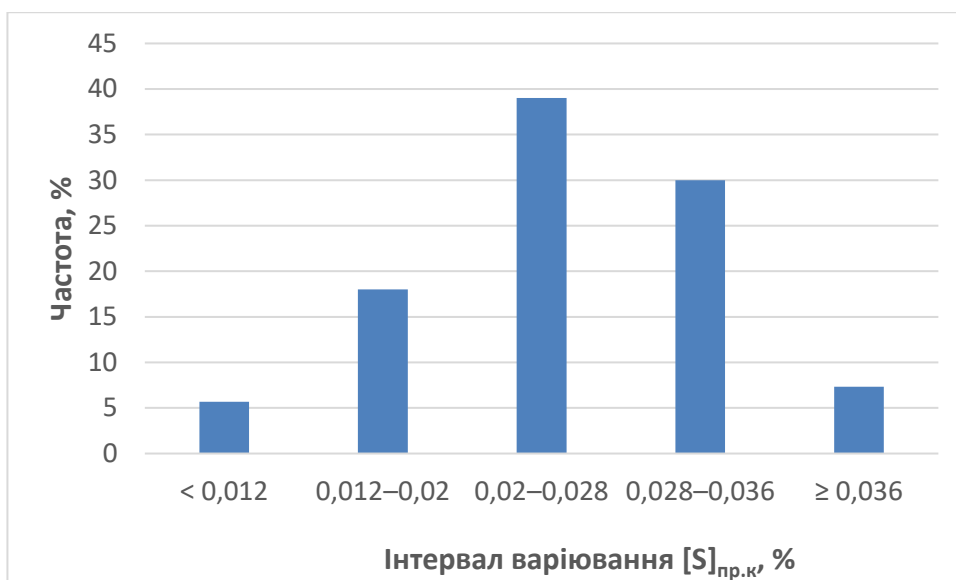


Рисунок 2.8 – Частотний розподіл вмісту сірки у сталі перед розливанням



Рисунок 2.9 – Частотний розподіл вмісту фосфору у сталі перед розливанням

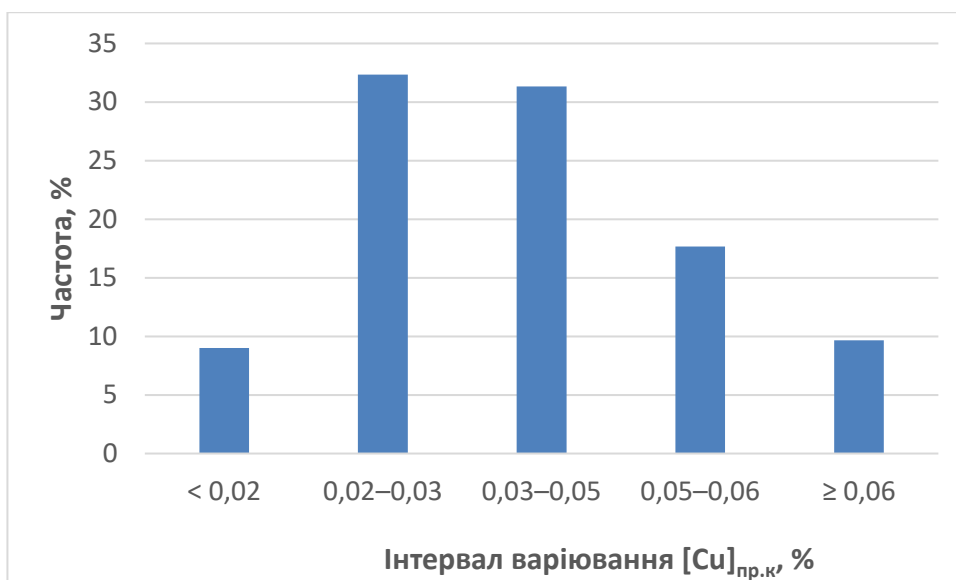


Рисунок 2.10 – Частотний розподіл вмісту міді у сталі перед розливанням

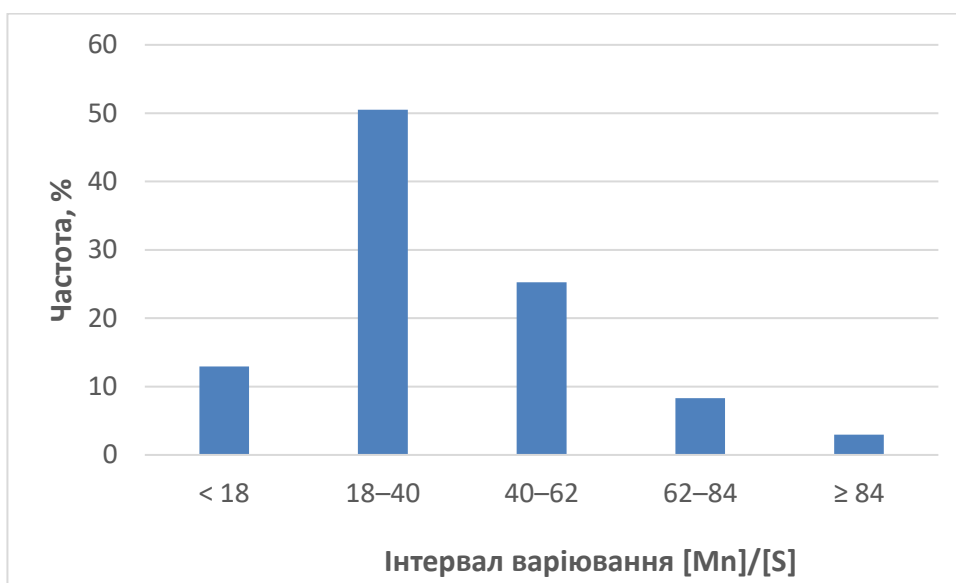


Рисунок 2.11 – Частотний розподіл відношення [Mn]/[S] у сталі перед розливанням

Графіки на рисунках 2.8 – 2.12 подібні до кривої Гауса. Це свідчить про те, що обрані фактори є статистично достовірними, а отже можуть бути використані для аналізу.

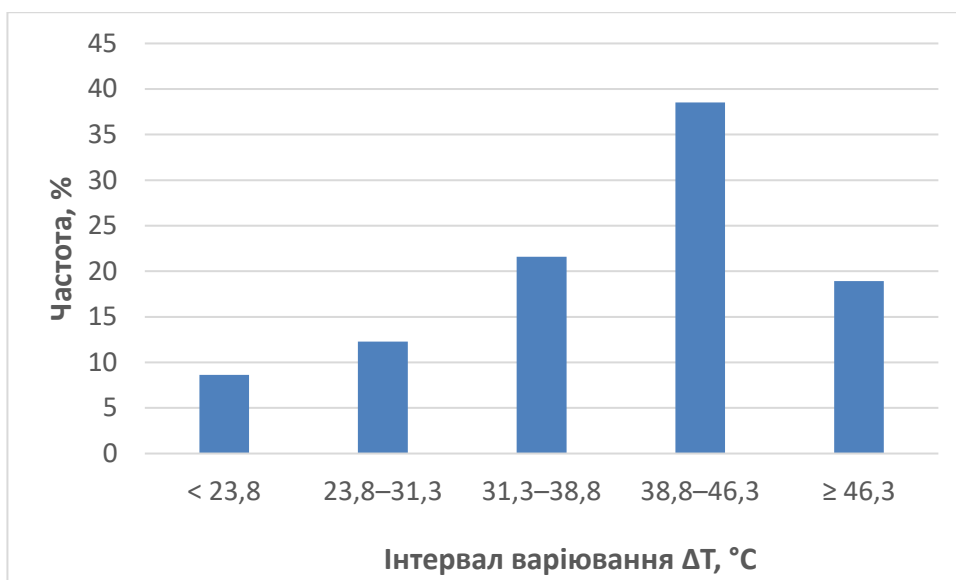


Рисунок 2.12 – Частотний розподіл ступеня перегріву металу  $\Delta T$  у пром.ковші

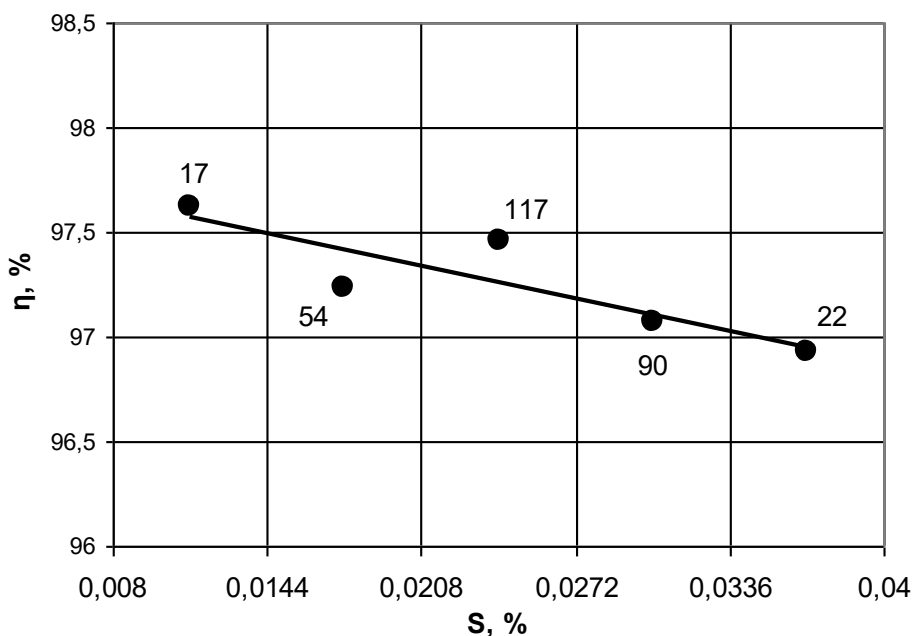
#### 2.4 Аналіз масивів даних і їх теоретичне обґрунтування

Графіки залежності цільової функції від обраних факторів представлені на рисунках 2.13 – 2.17. Отримані залежності збігаються з теоретичними відомостями про вплив обраних факторів на механізм утворення тріщин, які було викладено у попередньому підрозділі.

Коефіцієнти апроксимації  $R^2$  на всіх графіках більші за  $R_{кр}^2 = 0,20$  (для металургійних систем). Це свідчить про достатньо високу достовірність отриманих залежностей і можливість їх використання на практиці, при проведенні досліджень, тощо.

Графік на рисунку 2.13 демонструє залежність цільової функції  $\eta$  від вмісту сірки S у сталі. Сірка має негативний вплив на якість сталі через утворення легкоплавких сульфідів (переважно FeS), які знижують міцність і пластичність металу, особливо при високих температурах. Ці включення концентруються по межах зерен і в міждендритних зонах,

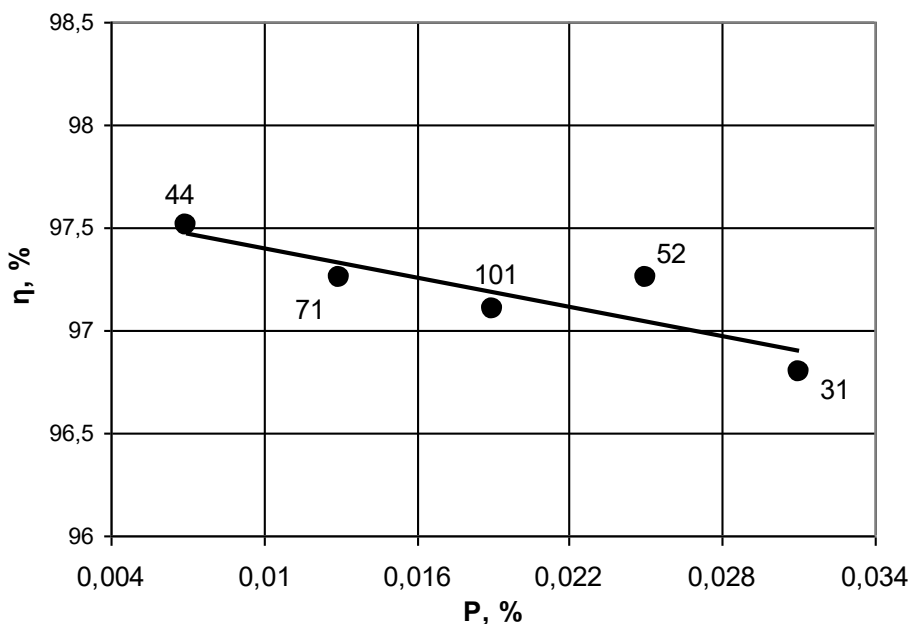
створюючи ослаблені ділянки, де легко виникають тріщини під дією термічних і механічних напружень. Крім того, сірка підвищує схильність сталі до гарячої крихкості, що особливо небезпечно в процесі кристалізації та охолодження безперервнолитої заготовки.



$$\eta = -24,328 \cdot S + 97,847, \quad R^2 = 0,7642$$

Рисунок 2.13 – Залежність виходу придатного від вмісту сірки у сталі

Графік на рисунку 2.14 ілюструє залежність цільової функції  $\eta$  від вмісту фосфору (P) у сталі. Зниження значення  $\eta$  зі збільшенням вмісту фосфору пояснюється його негативним впливом на механічні властивості сталі, особливо в процесі кристалізації. Фосфор має високу схильність до ліквідації та концентрується по межах зерен, утворюючи крихкі прошарки, які знижують пластичність і міцність металу. У результаті під дією термічних і механічних напружень зростає ймовірність утворення тріщин, що призводить до погіршення якості безперервнолитої заготовки та відповідно до зменшення показника  $\eta$ .



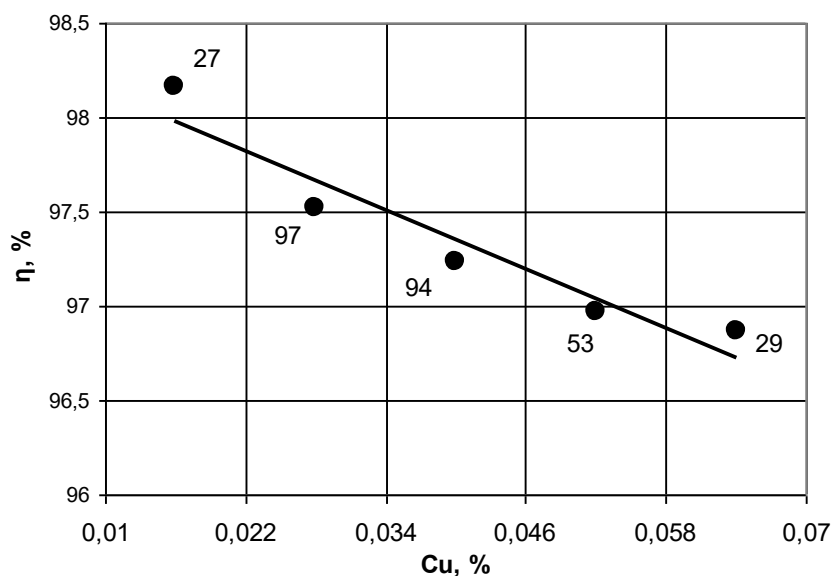
$$\eta = -23,681 \cdot P + 97,635, \quad R^2 = 0,7396$$

Рисунок 2.14 – Залежність виходу придатного від вмісту фосфору у сталі

Графік на рисунку 2.15 ілюструє залежність цільової функції  $\eta$  від вмісту фосфору у сталі. Зниження значення  $\eta$  зі збільшенням вмісту міді пов'язане з її несприятливим впливом на пластичні властивості сталі, особливо в умовах високих температур. Мідь має низьку розчинність у твердій фазі та схильність до збагачення у приповерхневих шарах, що сприяє виникненню явища гарячої крихкості та утворенню тріщин під час деформації або кристалізації. У результаті зростає ймовірність дефектоутворення у безперервнолитій заготовці, що призводить до зниження показника  $\eta$ .

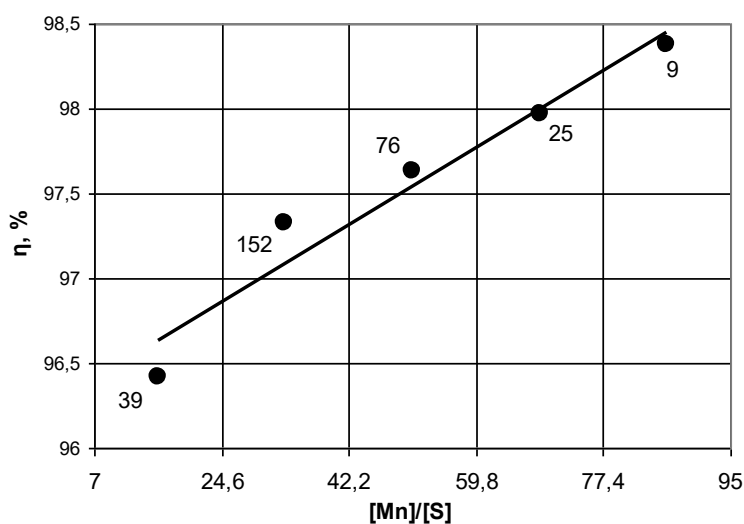
Графік на рисунку 2.16 ілюструє залежність цільової функції  $\eta$  від співвідношення  $[Mn]/[S]$  у сталі. Зростання показника  $\eta$  зі збільшенням співвідношення  $[Mn]/[S]$  пояснюється позитивною роллю марганцю у нейтралізації шкідливого впливу сірки. Марганець зв'язує сірку у тугоплавкі сульфідні  $MnS$  замість легкоплавких  $FeS$ , що запобігає утворенню гарячої крихкості та підвищує пластичність і міцність твердої

оболонки заготовки. У результаті зменшується ймовірність утворення тріщин і дефектів, що сприяє підвищенню якості продукції та зростанню значення  $\eta$ .



$$\eta = -26,176 \cdot \text{Cu} + 98,396, \quad R^2 = 0,9134$$

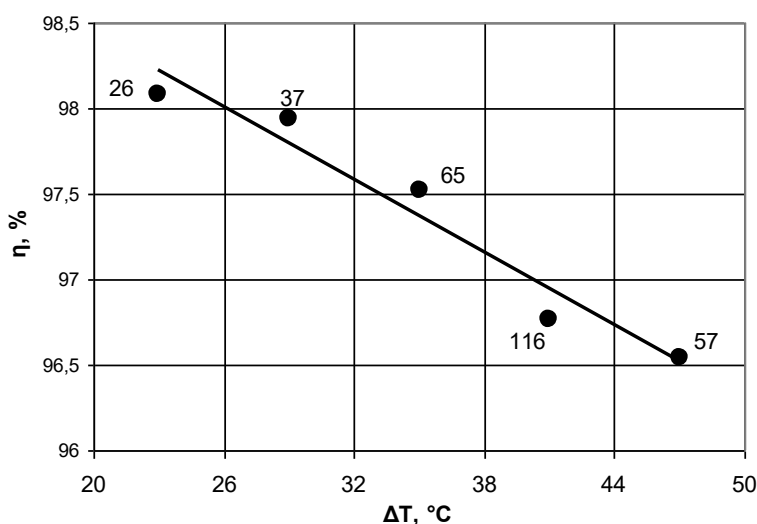
Рисунок 2.15 – Залежність виходу придатного від вмісту фосфору у сталі



$$\eta = 0,0258 \cdot [\text{Mn}]/[\text{S}] + 96,229, \quad R^2 = 0,9457$$

Рисунок 2.16 – Залежність виходу придатного від співвідношення [Mn]/[S] сталі

Графік на рисунку 2.17 ілюструє залежність цільової функції  $\eta$  від перегріву сталі над температурою ліквідус у промковші МБЛЗ. Зниження значення  $\eta$  зі збільшенням перегріву сталі над температурою ліквідусу пояснюється погіршенням умов кристалізації та формування структури безперервнолитої заготовки. Підвищений перегрів сприяє розвитку грубозернистої та стовпчастої структури, збільшенню ліквациї та нерівномірності затвердіння, що підвищує ймовірність утворення внутрішніх і поверхневих тріщин. Унаслідок цього зростає відбракування заготовок, що і призводить до зниження показника  $\eta$ .



$$\eta = -0,0709 \cdot \Delta T + 99,851, \quad R^2 = 0,9515$$

Рисунок 2.17 – Залежність виходу придатного від ступеня перегріву сталі у промковші

### Висновки за розділом

У другому розділі встановлено залежності між технологічними параметрами розливання сталі та якістю безперервнолитої заготовки, визначено основні фактори впливу та причини утворення дефектів. Отримані результати стали основою для розробки рекомендацій щодо оптимізації процесу та підвищення виходу придатної продукції.

## 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 3.1 Аналіз умов праці та пожежної безпеки

У даному розділі дана загальна характеристика безпечних умов праці, техніки безпеки та пожежної профілактики на ділянці розливання сталі.

Всі виробничі процеси, які відбуваються на МБЛЗ, починаючи з розливки металу і до видачі заготовок мають бути механізовані та по можливості автоматизовані. Однак в конструкції МБЛЗ передбачається можливість ручного ( аварійного) керування роботою всіх механізмів. Більшу частину технологічних операцій персонал виконує безпосередньо з розплавленим металом і шлаком. Невірне виконання процесів може привести до викидів металу, сплесків . Особливо небезпечним є дотик рідкого металу з вологими пористими матеріалами. Тому від працівників та інженерно – технічних працівників вимагається ретельно виконувати правила техніки безпеки, особливо при транспортуванні наповнених металом ковшів від сталеплавильного агрегату до МБЛЗ.

Застосовуючи термічну обробку металів слід пам'ятати про можливий вплив на працівників небезпечних і шкідливих для здоров'я виробничих факторів, у тому числі:

- незахищені рухливі елементи виробничого обладнання;
- заготовки, готові вироби або деталі;
- рухомі транспортні засоби;
- несприятливий мікроклімат робочої зони;
- підвищена температура поверхонь устаткування і матеріалів;
- небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі;

- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- знижена освітленість робочого місця;
- пожежонебезпечність і вибухонебезпечність;
- хімічні фактори загальнотоксичного, подразнюючого, канцерогенного впливу на організм працівника;
- важкість і напруженість праці .

Безпеку виконання виробничих процесів необхідно забезпечувати:

- вибором найбільш досконалої технології виробництва;
- раціональним розташуванням, режимом роботи та порядком обслуговування виробничого устаткування;
- якістю вихідних матеріалів;
- механізацією та автоматизацією важких і небезпечних робіт;
- запровадженням дистанційного керування механізмами у небезпечних зонах,
- професійним добором та навчанням персоналу;
- дотриманням вимог безпеки, нормативно-технічної та технологічної документації.

В якості спеціальних вимог правил техніки безпеки безперервної розливки сталі можна виділити наступні основні моменти:

- кожух промковша має відповідати вимогам технічної документації виробника;
- перед прийомом рідкого металу футеровка промковша повинна бути прогріта до температури 1000-1100° С та не мати ушкоджень;
- промковші та аварійні ємності, наповнені рідкою сталлю, в аварійних ситуаціях не повинні підніматися краном до аварійні ємності, жолоба, внутрішня поверхня кристалізатора та інші деталі обладнання, що контактують з рідким металом, мають знаходитися в сухому стані;
- достатнього його затвердіння;

- всі деталі, обладнання, які можуть контактувати з киснем, повинні бути чистими від масел;
- радіозотопне джерело системи контролю рівня металу в кристалізаторі( сортові МБЛЗ) дозволяється відкривати тільки перед розливкою, а закривати відразу після завершення розливки.

### 3.2 Вимоги охорони праці під час розливання металу та заливання форм

На дільницях плавки металу і заливання форм неприпустимі:

1. Вогкість підлог, приямків, потрапляння в них атмосферних опадів через дах, світлові і аераційні ліхтарі, підтікання трубопроводів води, шлангів, проливання води в питних точках, поява ґрунтових вод.

2. Транспортування розплавленого металу до місця заливання і повернення спорожнених ковшів і тиглів повинно проводитися за заздалегідь установленими напрямками.

3. Перед випуском металу і шлаку з печі футерівка жолоба повинна бути відремонтованою і добре просушеною.

4. Експлуатація вантажопідіймальних механізмів у розливальному прольоті (дільниці) здійснюється відповідно до вимог НПАОП 0.00-1.01-07.

5. На заливальних дільницях кабіни мостових кранів і тельферів, що керуються з кабін, повинні бути закритого типу з облаштуванням вентиляції.

6. Ливарні ковші і тиглі незалежно від їх ємності повинні наповнюватися металом не більше ніж на 0,85 їх внутрішньої висоти.

7. Справний стан всіх частин ливарних ковшів і носилок повинен перевірятися майстром перед початком зміни, працівниками - щоразу перед наповненням ковша металом.

8. При переміщенні ковшів і тиглів з розплавленим металом на візках повинні бути вжиті відповідні заходи, що виключають їх перекидання.

9. Зливання шлаків і залишків металу з ковшів після закінчення заливання повинно проводитися в сухі виливниці або шлаковні. Зливання на землю або в ями не дозволяється.

10. Дільниця розливання металу повинна бути облаштована шлаковнею на випадок аварійного витікання металу з ковша [22].

Все обладнання та інструменти для пожежотушіння повинні бути відповідного класу та знаходитися у доступних місцях, мати розпізнавальні знаки та регулярно перевірятися. На розливному майданчику не мають бути легкозаймисті матеріали, якщо в них немає потреби на даний момент. Не припустимий витік масел в зоні роботи з киснем, а також в зоні можливого прориву рідкого металу.

Для гасіння пожеж в цехах передбачені первинні засоби пожежогасіння, згідно ДСТУ 4297:2004 [Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників] [24]. Для гасіння пожежу в цехах застосовують вуглекислотні та порошкові вогнегасники (таблиця 3.3). Для гасіння речовин, що горять у кисневому середовищі, вогнегасячі речовини слід подавати з підвищеною інтенсивністю.

Для розміщення засобів пожежогасіння у цеху передбачається установка пожежного щита з набором інструментів. Пожежні щити встановлюються на території з розрахунку: один щит на 500 м<sup>2</sup>. Ручні вогнегасники повинні розміщуватися методами: навішування на вертикальні конструкції на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього краю вогнегасника і на відстані від дверей, достатній для їх

відкривання; встановлення в пожежні шафі разом з пожежними кранами, у спеціальні тумби або пожежні щити та стенди.

Таблиця 3.3 – Типи вогнегасників та перелік об'єктів для яких вони призначені

Тип вогнегасника	Позначення	Найменування об'єктів для яких вони призначені	Придатність до гасіння пожеж класів
Вуглекислотний	ВВК-1,4; ВВК-2	Громадські будинки та приміщення з наявністю ПЕОМ, приміщення обчислювальних центрів, споруди промислових підприємств	В, (Е)
	ВВК-3,5; ВВК-5		
Порошковий	ВП-5, ВП-6, ВП-9, ВП-12	Виробничі, сільськогосподарські, складські та лабораторні будинки і приміщення, адміністративні та побутові будинки і приміщення та споруди промислових підприємств, громадські будинки та споруди, гаражі та автомайстерні	А, В, С, (Е)

### 3.3 Заходи поліпшення умов праці

Створення сприятливих умов праці має бути одним із головних завдань суспільства, невід'ємною частиною державної соціальної і економічної політики, важливою складовою управління персоналом.

На організм людини великий вплив робить мікроклімат приміщення. У цеху повинні бути сприятливі метеорологічні умови праці відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 , значення температури, відносної

вологості і швидкості руху повітря встановлюються для робочої зони виробничих приміщень залежно від категорії тяжкості виконуваної роботи, величини надлишків явного, що виділяється в приміщенні, тепла і періоду року. Мікроклімат у виробничих приміщеннях повинен відповідати вимогам [Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99, затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01 грудня 1999 року № 42 (ДСН 3.3.6.042-99) ] [25].

Повітря у робочій зоні виробничих приміщень у цехах металургійних підприємств повинно відповідати вимогам Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень, затверджених постановою головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 N 42 (ДСН 3.3.6.042-99) [25].

Зі збільшенням об'ємів сталеплавильних печей, гарячого агломерату, нагрітих металевих конструкцій, потужних джерел тепловиділень, збільшується і надходження тепла в приміщення цехів. Для приміщень з надлишком тепловиділення характерна висока температура повітря, що перевищує гранично допустимі рівні за ДСН 3.3.6.042-99, і низька відносна вологість повітря у теплий період року (таблиця 3.1)

У теплу пору року температура повітря на багатьох робочих місцях значно перевищує гранично допустимі показники по санітарним нормам. В ранкові часи на більшості робочих місць киснево-конверторного цеху температура знаходиться в межах від  $24,24 \pm 1,35$  °С до  $29,21 \pm 9,53$  °С, при зовнішній  $24,00 \pm 2,57$  °С, тобто перевищує нормативні значення за ДСН 3.3.6.042-99 [25] на 2-14 °С. В обідню пору (13-14 годин), у зв'язку з підвищенням температури зовнішнього повітря на 6-8 °С температура повітря в приміщеннях цехів також значно підвищується і на усіх робочих місцях зазвичай вище гранично допустимої. В шихтовому відділенні конверторного цеху мікрокліматичні

умови цілком залежать від зовнішніх, а температура зазвичай перевищує зовнішню на 2,0-6,0 °С. В сталеплавильних цехах температура досягає своїх максимальних значень при змішуванні рідкого чавуну та розлитті сталі у виливниці до 31,93±5,56 °С.

Таблиця 3.1 – Мікрокліматичні умови киснево-конвертерного цеху

Робоче місце	Температура повітря, °С		Відносна вологість повітря, %		Швидкість руху повітря, м/с	Інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>
Шихтове відділення конверторного цеху	27,4±30	3,5±0,25	55,5 ±5,4	45.00 ±9.3	0.6 ±0,1	5200 ±100
Конвертор (власне плавка сталі)	30,25 ±5.2	6.04 ±4,24	36,0 ±4,26	53.44 ±9.4	1.75 ±0.29	2673.15 ±157,36
Міксерне відділення (змішування рідкого чавуну)	33,43 ±2,22	8.55 ±0,85	54.06 ±2,66	53.44 ±9.4	1.75 ±0,29	2673,15 ±157,36
Розливальний майданчик	31,93 ±5,56	9.93 ±3,02	45.12 ±13,86	58.49 ±2.6	0.41 ±0.05	2951.00 ±326.25

Відносна вологість повітря на робочих місцях залежить від віддаленості робочого місця та часу доби. При вологості зовнішнього повітря 45,30±11,53 %, відносна вологість на робочих місцях металургійних цехів складає у теплу пору року від 33,63±5,64 % до 55,5±5,4 %.

В холодну пору року мікрокліматичні умови в приміщеннях металургійних цехів значною мірою залежать від зовнішньої температури і, незважаючи на наявність інтенсивних джерел випромінювання, в приміщеннях з великими розкритими отворами та відсутністю опалення температура становить від 3,25 до 17,90 °С, що значно нижче допустимої за ДСН 3.3.6.042-99 [25] і тільки у прокатних

цехах вона зазвичай знаходиться в межах допустимої і навіть перевищує її (15,64-30,36 °C).

Відносна вологість повітря в приміщеннях цехів в холодну пору року знаходиться в межах від  $39,6 \pm 2,4$  до  $77,42 \pm 11,31$  %, при швидкості руху повітря  $2,45 \pm 1,55$  м/с [22].

Інтенсивність інфрачервоного випромінювання на основних робочих місцях в залежності від відстані, виду операцій та джерела випромінювання змінюється від 400 до 8000 Вт/м<sup>2</sup>. Найбільше теплове випромінювання реєструється біля конверторів при плавці сталі  $5200 \pm 100$  Вт/м<sup>2</sup>, що призводить до перегріву оточуючих металевих конструкцій, підлоги, стін до 50-100 °C. Значно нижча інтенсивність випромінювання у шихтових відділеннях, там вона не перевищує  $400,00 \pm 22,00$  Вт/м<sup>2</sup>. Згідно з «Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища. важкості та напруженості трудового процесу» [26] інтенсивність інфрачервоного випромінювання відносяться до 4 класу 3 ступеня шкідливості (небезпечного).

Шкідливі речовини (пил, пари металоорганічних з'єднань, шкідливі речовини) проникають в організм людини через дихальні шляхи, через шкіру і надають подразнюючу дію на слизову оболонку очей, дихальні шляхи, шкіру.

Запиленість повітряного середовища в металургійних цехах зустрічається на різних етапах технологічного процесу незалежно від його періоду і, як правило, перевищує граничнодопустимі концентрації за ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002 [22] (таблиця 3.2).

В організмі людини пил викликає подразнення дихальних шляхів, призводить до появи специфічних захворювань. Концентрація пилу та інших шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинна перевищувати значень, встановлених ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002

Таблиця 3.2 – Запиленість і загазованість повітряного середовища сталеплавильних цехів

Робоче місце	Пил, мг/м <sup>3</sup>	Окис вуглецю (II),	Сірчистий газ, мг/м <sup>3</sup>
Шихтове відділення	10,52±0,52	4,88±1,29	12,7±0,63
Конвертор (власне плавка	7,99± 1,03	5,72±1,11	2,7±0,17
Міксерне відділення (змішування рідкого чавуну)	15,19±4,29	7,12±1,34	2,7±0,11
Розливальний майданчик	23,97±12,2	1,33±0,09	3,49±0,62

В усіх виробничих приміщеннях, де можливе виділення пожежонебезпечних або токсичних речовин під час виробничого процесу, припливно-витяжна вентиляція повинна працювати постійно та забезпечувати зниження вмісту шкідливих речовин у цих приміщеннях згідно з вимогами. "Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони" ДСН 3.3.6.042-99 [22].

На різних етапах виплавки сталі робота технологічного обладнання призводить до виникнення шуму, що має місце на робочих місцях працівників основних цехів. В сталеплавильних цехах в результаті інтенсивного випуску газів, повітря з відповідних пристроїв, руху різних механізмів утворюється шум інтенсивністю 96-99 дБА.

Нормативне значення шуму за ДСН 3.3.6.037-99 [22] на робочих місцях конвертерного цеху складає 80 дБА.

Величезне значення має освітленість приміщення. При недостатній освітленості і поганій якості освітлення стан зорових функцій людини знаходиться на низькому вихідному рівні, підвищується стомлення зору в процесі виконання роботи, зростає ризик виробничого травматизму [22].

Природне та штучне освітлення металургійних підприємств необхідно виконувати відповідно до вимог ДБН В.2.5-28-2006 "Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне

освітлення". Робота у цехах відноситься до VII категорії зорового навантаження згідно ДБН В.2.5-28-2006 [27]. Нормативна величина освітленості робочих місць для категорії VII - 200 лк. Фактична освітленість зазвичай не відповідає нормативній через специфіку технологічних процесів у цехах.

### 3.2 Захист навколишнього середовища

Промисловість або індустрія – одна з основних галузей виробництва, без якої неможливе існування сучасної цивілізації.

Найбільш небезпечні для навколишнього середовища гірничо – металургійні підприємства. Великої шкоди ці підприємства завдають повітряному басейну, спричиняючи появу кислотних дощів, земельним ресурсам, утворюючи кар'єри, а також зумовлюють значне теплове забруднення середовища. Разом з доменним газом ці об'єкти промисловості викидають в атмосферу сполуки фосфору, свинцю, сполука марганцю, ваннадію, хрому. Важливим документом в галузі природоохоронної діяльності металургійних підприємств повинен бути екологічний стандарт, розроблений на базі міжнародної системи стандартів ISO14000, яким користуються країни Європейського союзу, Японія, США та інші. Особливостями даної системи стандартів є орієнтування не на конкретні технології, а на систему екологічного менеджменту (СЕМ) або СУОС – система управління охороною оточуючого середовища [7].

Основна кількість шкідливих речовин на МБЛЗ виділяється на розливній площадці зі струменя та дзеркала металу в кристалізаторі, в проміжних розливних пристроях при розігріві перед заливкою сталі. Промковші, як правило опалюються природним або коксовим газами.

При цьому паливо згорає не повністю, тому в атмосферу цеху виділяється оксид вуглецю та метан.

Крім викидів в атмосферу, металургійні підприємства використовують до 20—25% води від загального її споживання промисловими підприємствами та істотно забруднюють поверхневі води.

Металургійний комплекс є одним з найбільш потужних споживачів води та джерел забруднення водних об'єктів України. Виробництво 1 т сталевих прокатів потребує споживання 180—200 м<sup>3</sup> води. При цьому 30—40% стічних вод металургійних підприємств забруднені шкідливими речовинами, серед яких присутні, зокрема, феноли, ціаніди, роданіди, марганець, залізо, хром, миш'як, ванадій та ін.

З точки зору забруднення земель, зона впливу металургійного підприємства на навколишнє середовище може мати радіус 1—5 км. У межах вищезгаданої зони впливу у ґрунті спостерігається значний вміст шкідливих речовин [23].

Екологічна ефективність виробництва в значній мірі залежить від ступеня використання природних ресурсів. Кожна тонна сталі, що розлита безперервним способом, забезпечує зниження питомої витрати металу на прокат в середньому на 120 – 200 кг, і крім того, економію енергоресурсів: 150 кг умовного палива і 160 кВт год електроенергії.

Тому, основним завданням розвитку технології розливу і конструкцій МБЛЗ є проведення комплексу заходів по експлуатаційно – технологічному удосконаленню та модернізації елементів обладнання, що дозволить якісно підвищити їх продуктивність з метою використання резервів енерго – та ресурсозбереження сталеплавильного виробництва.

#### 4 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

Широке впровадження безперервного розливання сталі в практику чорної металургії висуває підвищені вимоги до якості безперервнолитих заготовок. Особливе місце займають проблеми підвищення їх фізичної та хімічної однорідності, які можуть бути вирішені шляхом інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів при формування злитка на машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Заходи, що були запропоновані за результатами статистичного аналізу у основній частині випускної кваліфікаційній роботі спрямовані на зменшення кількості дефектів безперервнолитої заготовки зі сталі марки 5СП, при її розливанні на шестирумковій сортовій МБЛЗ у круглу заготовку діаметром 210 мм, що дозволяє підвищити серійність розливки у два рази та за рахунок усунення втрат металу з браком збільшити вихід придатної сталі на 0,1%.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунків економічної ефективності роботи цеху

Найменування статей	Одиниці виміру	Значення	
		Базовий	Проектний
Маса сталі, що розливається	т	160	160
Серійність	шт.	12	24
Коефіцієнт виходу придатних злитків	-	0,95	0,951

Визначимо річну продуктивність МБЛЗ по виробництву сталі марки 5СП у відповідності до рівняння

$$\Pi_{\text{МБЛЗ}} = M \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot Z \cdot \left(\tau_{\text{м}} + \frac{\tau_{\text{пс}}}{S}\right) + 1,15 \cdot (100 - Z) \cdot (\tau_{\text{м}} + \tau_{\text{п}})} \cdot g_{\text{r}} \cdot D \cdot x_{\text{ст}}, \quad (4.1)$$

де:  $\Pi_{\text{МБЛЗ}}$  – річна продуктивність МБЛЗ, т/рік; 1440 – кількість хвилин на добу;  $Z$  – частка плавок, що розливаються серіями методом «плавка на плавку, %»;  $\tau_{\text{м}}$  – тривалість розливання однієї плавки, хв;  $\tau_{\text{пс}}$  – тривалість паузи між серіями, хв;  $S$  – середня кількість плавок в одній серії, шт;  $\tau_{\text{п}}$  – тривалість паузи між розливанням двох одиночних плавок, хв; 1,15 - коефіцієнт, що враховує втрату часу через неузгоджену роботи у плавильних агрегатів та МБЛЗ;  $g_{\text{r}}$  – вихід придатних заготовок, %;  $D$  - кількість робочої доби на рік, добу/  $x_{\text{ст}}$  – частка відповідної марки сталі у загальнорічному обсягу сталі розливої на МБЛЗ, долі од.

Частка плавок, що розливаються серіями методом "плавка на плавку" ( $Z$ ), у сучасних сталеплавильних цехах досягає 90% і більше. Для розрахунку річної продуктивності МБЛЗ можна приймати  $Z = 70 - 90\%$ . Прийmemo  $Z = 70\%$ .

Фактичний час розливання ( $D$ ) слід вибирати відповідно до чинних нормативів: 291 діб. для слябових МБЛЗ та 300 діб. для сортових. Прийmemo  $D = 300$  діб.

Тривалість паузи під час роботи МБЛЗ методом «плавка на плавку» ( $\tau_{\text{пс}}$ ) для слябових машин становить 150...180 хв, а сортових 80...110 хв. Час підготовки машин до розливання ( $\tau_{\text{пс}}$ ) визначається її конструктивними особливостями. Прийmemo  $\tau_{\text{пс}} = 100$  хв.

Підготовка машини після розливання одиночними плавками ( $\tau_{\text{п}}$ ) не повинна перевищувати 60 хв., тому при розливанні одиночних плавок тривалість паузи як для слябових, так і для сортових МБЛЗ рекомендується приймати 50 – 60 хв. Прийmemo  $\tau_{\text{п}} = 60$  хв.

Тривалість розливання однієї плавки на шестиструмкової сортової МБЛЗ для умов ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» прийmemo  $\tau_{\text{м}} = 80$  хв.

Частка сталі марки 5СП сталі у загальнорічному обсягу сталі розлитої на МБЛЗ №2 у середньому складає 12%. Прийmemo  $x_{ст} = 0,12$ .

Тоді базова продуктивність шестиструмкової сортової МБЛЗ для умов ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» буде складати

$$\begin{aligned} \Pi_{МБЛЗ}^б &= 160 \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot 70 \cdot \left(80 + \frac{100}{12}\right) + 1,15 \cdot (100 - 70) \cdot (80 + 60)} \cdot 95 \cdot 300 \cdot 0,12 = \\ &= 66211,2 \text{ т/рік.} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Проектна продуктивність шестиструмкової сортової МБЛЗ для умов ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» буде складати

$$\begin{aligned} \Pi_{МБЛЗ}^{пр} &= 160 \cdot \frac{1440}{1,15 \cdot 70 \cdot \left(80 + \frac{100}{24}\right) + 1,15 \cdot (100 - 70) \cdot (80 + 60)} \cdot \\ &\cdot 95,1 \cdot 300 \cdot 0,12 = 67924,22 \text{ т/рік.} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Зростання продуктивності МБЛЗ за рахунок запропонованих заходів

$$\Delta \Pi_{МБЛЗ} = \Pi_{МБЛЗ}^{пр} - \Pi_{МБЛЗ}^б = 67924,22 - 66211,2 = 1713,02 \text{ т/рік} \quad (4.4)$$

Економічний ефект від збільшення продуктивності МБЛЗ складе:

$$\Delta E = \Delta \Pi_{МБЛЗ} \cdot Ц = 1713,02 \cdot 24589,6 = 42122476,592 \text{ грн.} \quad (4.5)$$

де  $\Delta \Pi_{МБЛЗ}$  – об'єм зростання продуктивності МБЛЗ за рахунок запропонованих заходів за рік, т/рік;  $Ц_{баз}$  – базова собівартість сталі марки 5СП, грн/т.

Узагальнені показники витрат для проектного та базового варіанту розливання сталі марки 5СП наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Економічна ефективність запропонованих заходів

Найменування	Ціна, грн/т	Базовий варіант		Проектний варіант		Відхилення	
		маса, т	вартість, грн.	маса, т	вартість, грн	маса, т	вартість, грн.
Серійність розливання	-	12		24		12	
Вихід придатного, %	-	0,95		0,951		0,001	
Розлито на МБЛЗ, тис.	24,589	66,211	1628106,9	67,924	1670229,4	1,713	42122,5
Річний економічний ефект від запропонованих заходів, тис. грн.							42122,5

### Висновки до розділу

Запропоновані технологічні заходи щодо вдосконалення процесу розливання сталі на МБЛЗ забезпечують підвищення серійності розливання та незначне зростання виходу придатної заготовки, що позитивно впливає на загальну продуктивність агрегату. Розрахунки показали збільшення річної продуктивності на 1713,02 т та отримання річного економічного ефекту понад 42 млн. грн., що підтверджує доцільність їх впровадження у виробництво. Таким чином, удосконалення технологічних параметрів розливання є економічно обґрунтованим та сприяє підвищенню ефективності роботи підприємства.

## ВИСНОВКИ

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану технології безперервного розливання сталі та методів підвищення її якості. Розглянуто механізми утворення дефектів безперервнолитих заготовок і вплив технологічних та металургійних факторів на їх формування. Показано важливість забезпечення металургійної чистоти та стабільності процесу розливання.

У другому розділі на основі статистичного аналізу виробничих даних встановлено залежності між технологічними параметрами розливання та виходом придатної заготовки. Визначено основні фактори впливу та причини утворення дефектів. Розроблено рекомендації щодо оптимізації режимів розливання для підвищення якості продукції.

У третьому розділі проаналізовано умови праці у відділенні МБЛЗ та визначено основні небезпечні і шкідливі виробничі фактори. Запропоновано заходи щодо підвищення рівня безпеки праці, покращення санітарно-гігієнічних умов та зменшення впливу виробництва на навколишнє середовище. Це сприяє підвищенню ефективності та безпеки виробничого процесу.

У четвертому розділі виконано оцінку економічної ефективності запропонованих технологічних заходів. Встановлено, що їх впровадження забезпечує підвищення виходу придатної заготовки, зростання продуктивності та отримання значного економічного ефекту. Отримані результати підтверджують доцільність удосконалення технології розливання сталі на МБЛЗ.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ефімов В. А., Ельдарханов А. С. Технології сучасної металургії. К.: Вища школа, 2004 – 784 с.
2. Синегін Є.В. к.т.н., Суховецький С.В., Молчанов Л.С. к.т.н., Журавльова С.В. к.т.н. Видалення неметалевих включень за рахунок використання відцентрових сил у промковші МБЛЗ. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.007.
3. Губенко С.І, Парусов В.В., Дерев'янченко І.В. Неметалічні включення до сталі. – Дніпропетровськ: АРТ-ПРЕС, 2005. – 536 с.
4. Явойський В.І., Рубеньчик Ю.І., Окенко А.П. Неметалічні включення та властивості сталі. - К: Вища школа. 1990. - 176 с.
5. Попель С.І. Поверхневі явища у розплавах. - К.: Вища школа, 1994. – 440 с.
6. Tassot P., Reichert N. Ways of Improving Steel Quality in the Tundish // Revue de Metallurgie.
7. Смирнов А. Н., Куберський С. В., Штепан Є. В. Безперервне розливання сталі: Підручник. - Донецьк: Дон НТУ, 2011. - 482 с.
8. Мінаєв Ю.А., Яковлєв В.В. Фізико-хімія у металургії. - К.: Вища школа, 2001. – 320 с.
9. Дерягін Б.В., Н.В. Чураєв, Муляр В.М. Поверхневі сили. - К.: Вища школа, 1986. - 398 с.
10. Lei, H., Jiang, J., Yang, B., Zhao, Y., Zhang, H., Wang, W., & Dong, G. (February 2018). Mathematical Model for Collision–Coalescence Among Inclusions in the Bloom Continuous Caster with M-EMS. Metallurgical and Materials Transactions B. DOI: 10.1007/s11663-018-1186-y
11. Yanbin Yin, Jiongming Zhang, Qipeng Dong & Qinghai Zhou (2018). Mathematical modelling of inclusion motion and entrapment in billet

mould with effect of electromagnetic stirring. *Ironmaking&Steelmaking*. DOI: 10.1080/03019233.2018.1540519

12. Wenjie Zhang, Sen Luo, Yao Chen, Weiling Wang & Miaoyong Zhu (January 2019). Numerical Simulation of Fluid Flow, Heat Transfer, Species Transfer, and Solidification in Billet Continuous Casting Mold with M-EMS. *Metals*, 9(66). DOI: 10.3390/met9010066

13. Guifang Zhang, Yuehua Ding & Zhe Shi (2013). Effect of Position of Electromagnetic Stirring on Inclusion Behaviors in Billet. *Advanced Materials Research*, 805-806, pp. 1716-1719. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.1716

14. Ogura S., Onishi M., Kitaoka H., Sakurai M., Sakuraya T., Tanino Y., Terashima T., Tomiyama Y., Nabeshima Y., Miki Y., Moriwaki S., Yasukawa N. (1995). System for removing non-metallic foreign matter in molten metal. United States Patent No. 5,429,655

15. Sahai, Y. (2016). Tundish Technology for Casting Clean Steel: A Review. *Metallurgical and Materials Transactions B*. DOI: 10.1007/s11663-016-0648-3

16. Bulkowski L., Galisz U., Kania H., Kudliński Z., Pieprzyca J., Barański J. (2012). Industrial Tests of Steel Filtering Process. *Archives of Metallurgy and Material*, Vol. 57, Is. 1, pp. 363-369. DOI: 10.2478/v10172-012-0035-2

17. Jin Y., Dong X., Yang F., Cheng C., Li Y., Wang W. (2018). Removal Mechanism of Microscale NonMetallic Inclusions in a Tundish with Multi-Hole-Do

18. Про механізм освіти та модифікування неметалевих включень при ковшової обробки стали сплавами силікобарію / Б.Ф.Бєлов, А.І. Троцан, Я.П. Карликова, І.В. Рябчиков, І.В. Паренчук // Нові матеріали та технології у металургії та машинобудуванні. - 2018. - №1. - С. 41-48

19. Камкіна Л. В., Безшкуренко О. Г., Камкін В. Ю., Проїдак С. В. Розкислення сталі та проблема видалення неметалевих включень.- Сучасні проблеми металургії.-2016. - Т. 19 (1). – С. 176-186.
20. Є.В. Синегін, С.В. Суховецький Аналітичні дослідження і характеристика методів рафінування сталі у промковші МБЛЗ – Теорія і практика металургії . – 2022. - №4, с. 25 - ISSN 1028-2335.
21. Дюдкін Д. А., Кисиленко В. В. Сучасна технологія виробництва сталі. – К.: Теплотехнік, 2007 – 529 с.
22. Нормативно-правовий акт України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1476-14#Text> (дата звернення: 19.06.2026).
23. Фещенко, Каменева, 2016; Офіційний сайт Державної служби статистики України (<http://www.ukrstat.gov.ua>); Новиков та ін., 2014; Корач, Чилиї., 2012.
24. Нормативно-правовий акт України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text> (дата звернення: 19.06.2026).
25. Нормативно-правовий акт України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text> (дата звернення: 19.06.2026).
26. Нормативно-правовий акт України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text> (дата звернення: 19.06.2026).
27. Нормативно-правовий акт України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vra77858-11#Text> (дата звернення: 19.06.2026).