

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 «Оцінка впливу параметрів безперервного розливання
сталі на техніко-економічні показники процесу та якість
заготовки»**

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

Ольга КУЛІШОВА

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**

Кулішова Ольга Анатоліївна

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Оцінка впливу параметрів безперервного розливання сталі на техніко-економічні показники процесу та якість заготовки

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 сталі на МБЛЗ, продуктивність розливання сталі та дефекти безперервнолитої заготовки. Розділ 2. Основна частина. Статистичний аналіз паспортів розливання сталі на МБЛЗ. Визначення взаємозв'язків між параметрами розливання сталі на МБЛЗ та продуктивністю розливання та відбракуванням заготовки. Розробка пропозицій щодо покращення технології розливання сталі на МБЛЗ. 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

Ольга КУЛІШОВА

Керівник роботи

Євген СИНЕГІН

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Теоретичний розділ	6
1.1 Аналіз дефектів безперервнолитих заготовок та причин їх появи	7
1.2 Аналіз поведінки шлакоутворюючої суміші в кристалізаторі МБЛЗ та її вплив на утворення неметалевих включень в заготовці	12
1.3 Механізм утворення осьової пористості при твердненні заготовки	16
1.4 Вплив електромагнітного перемішування.....	20
Висновки за розділом.....	21
2 Технологічний розділ	22
2.1 Визначення механізму та причин утворення осьової пористості і хімічної неоднорідності	22
2.2 Методика аналізу	23
2.3 Результати аналізу.....	26
Висновки за розділом.....	38
3 Охорона праці та захист навколишнього середовища	39
3.1 Загальна характеристика умови праці	39
3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика	41
3.3 Захист навколишнього середовища.....	44
4 Оцінка економічної ефективності запропонованих заходів	46
4.1 Характеристика вихідних даних для розрахунку	47
4.2 Розрахунок економії витрат електроенергії	49
4.3 Розрахунок ефекту від оптимізації витрат феросплавів	51
4.4 Вплив на витрати через обмеження вмісту фосфору та азоту... ..	53
4.5 Розрахунок економічного ефекту від покращення якості та сортності	53
4.6 Загальний річний економічний ефект.....	55
Висновки до розділу.....	56
Висновки.....	57
Перелік посилань.....	58

АНОТАЦІЯ

Кулішова Ольга Анатоліївна. Оцінка впливу параметрів безперервного розливання сталі на техніко-економічні показники процесу та якість заготовки.

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 є процес безперервного розливання сталі на машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Предметом дослідження є вплив технологічних параметрів розливання сталі на формування дефектів безперервнолитих заготовок, техніко-економічні показники процесу та якість металу.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану технології безперервного розливання сталі. Розглянуто основні види дефектів безперервнолитих заготовок, причини їх виникнення, механізми формування осьової пористості та хімічної неоднорідності. Проаналізовано вплив шлакоутворюючих сумішей і електромагнітного перемішування на якість заготовок.

У другому розділі виконано статистичний аналіз паспортів плавки сталі марки С80D2, що дозволило встановити залежності між параметрами розливання сталі та утворенням дефектів. Визначено найбільш впливові фактори (хімічний склад сталі, температурно-швидкісний режим, інтенсивність вторинного охолодження) та розроблено рекомендації щодо оптимізації технологічних параметрів з метою зниження осьової пористості й хімічної неоднорідності.

У третьому розділі розглянуто питання охорони праці та захисту навколишнього середовища у конвертерному цеху. Проаналізовано шкідливі та небезпечні виробничі фактори, розроблено заходи з підвищення безпеки праці, пожежної профілактики та зменшення негативного впливу виробництва на довкілля.

У четвертому розділі виконано оцінку економічної ефективності впровадження запропонованих технологічних рішень. Встановлено, що реалізація запропонованих заходів забезпечує підвищення якості продукції та дозволяє отримати значний економічний ефект.

БЕЗПЕРЕРВНЕ РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ, МБЛЗ, ОСЬОВА ПОРИСТІСТЬ, ХІМІЧНА НЕОДНОРІДНІСТЬ, ДЕФЕКТИ ЗАГОТОВОК, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПЕРЕМІШУВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ

ВСТУП

Вуглецева сталь є однією з найпопулярніших сталей завдяки своїм чудовим механічним властивостям. Однак його високий вміст вуглецю й широкий інтервал кристалізації призводять до сильної макросегрегації в центральній зоні безперервнолитої заготовки в порівнянні з низьковуглецевими сталями. Таку сегрегацію важко усунути наступними процесами гарячої обробки, і вона погіршує механічні властивості сталей. В останні кілька десятиліть була запропонована безліч методів для мінімізації макросегрегації, таких як розливка з низьким перегрівом, розливка під флюсом, інтенсивне вторинне охолодження, м'яке обтискання й електромагнітне перемішування (EMS).

Як один з ефективних способів усунення сегрегації по центрі безперервнолитої заготовки, фінальне електромагнітне перемішування (FEMS) виконує безліч корисних металургійних функцій, таких як подрібнювання зерен, поліпшення текучості і гомогенізація хімічного складу сталі. Проте, FEMS також дуже залежить від властивосте сталі при затвердінні і співвідношення товщини оболонки й рідкого ядра в області перемішування. Таким чином, ключовим моментом для керування сегрегацією є те, чи можна знайти оптимальний параметр процесу для різних сталей й умов затвердіння, таких як положення мішалки (ширина ванни з рідиною), сила й частота струму перемішування. І навпаки, необґрунтовані параметри процесу можуть призвести до зниження якості безперервнолитої заготовки.

З огляду на це актуальною задачею для розливання вуглецевої сталі є визначення раціональних параметрів технології її розливання на МБЛЗ.

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

Основними етапами формування якісних та вартісних показників продукції є виплавка та безперервне розливання металу.

Тільки за умови отримання безперервнолитої заготовки з мінімальною кількістю шкідливих домішок та неметалевих включень, бездефектною макро- та мікроструктурою металу можна зробити металопрокат, здатний конкурувати з виробами провідних металургійних підприємств світу.

Аналіз заводських даних по браку безперервнолитих заготовок показує, що технологія не дозволяє повністю виключити утворення поверхневих тріщин, рванин і лікваційних смужок.

Ефективність безперервного розливання значною мірою залежить від стабільності фізико-хімічного стану розплаву, який формується при русі металу від випуску рідкої сталі в ківш через агрегат позапічної обробки, далі проміжний ківш та кристалізатор. Не зупиняючись на відомих технологічних прийомах позапічної обробки розплаву, доцільно приділити увагу питанням, пов'язаним з МБЛЗ.

Істотні зміни за останні роки відбулися у конструкції та функціональних можливостях основного технологічного обладнання МБЛЗ, починаючи з проміжного ковша.

Аналіз і врахування особливостей гідродинаміки руху розплаву, тепломасопереносу і фізико-хімічних процесів, що відбуваються на стадії затвердіння, дозволяє розробити відповідні заходи щодо вдосконалення технології розливання, конструкції машини і кристалізатора. Однак існує низка дефектів макроструктури БЛЗ, пов'язаних з процесом кристалізації, усадковими і лікваційними явищами, які не можуть бути повністю усунені навіть при оптимальних конструктивних особливостях обладнання МБЛЗ і раціональних технологічних параметрах процесу безперервного лиття.

Якість безперервнолитих заготовок значною мірою визначається оптимальними умовами кристалізації заготовки, а також хімічним складом сталі, що розливається. Нерівномірне охолодження металу в кристалізаторі, непостійна швидкість розливання, розмиття скоринки, що твердіє, потоками розплаву, нерівномірний розподіл струменів металу в об'ємі рідкої лунки і низка інших причин технологічного характеру спричиняють виникнення дефектів заготовок у вигляді осьових, міжкристалітних та поверхневих тріщин.

1.1 Аналіз дефектів безперервнолитих заготовок та причин їх появи

Проблема забезпечення конкурентоспроможності довгомірної продукції є однією з найважливіших для вітчизняних виробників. Відсутність повної гармонізації технічних умов і міжнародних стандартів призводить у більшості випадків до зниження експортного потенціалу металургійних підприємств і, як наслідок, до помітного зменшення ціни на сортову заготовку.

Під дефектом розуміють порушення суцільності металу. Дефекти формуються в процесі твердіння і можуть розвиватися як усередині литої заготівлі, так і на зовнішній поверхні. У більшості випадків дефекти чинять негативний вплив на виробництво, викликаючи відбракування або збільшення собівартості виробництва в результаті необхідності приведення заготовок у відповідність з необхідними технічними умовами перед їх прокатом.

Залежно від причин утворення дефекти можна розділити на дві групи:

- дефекти, специфічні для певного струмка (зустрічаються тільки на одному струмку через проблеми устаткування або його налаштувань, наприклад, через дефекти кристалізатора, порушень

вторинного охолодження, неправильної настройки тягуче-правлячих валків та ін.);

- дефекти, специфічні для певної плавки (пов'язані з властивостями рідкої сталі і викликані перегрівом, наявністю домішок, розкисненням на етапі позапічної обробки сталі).

Усі дефекти, що зустрічаються в безперервнолитих заготовках, можна умовно розділити на наступні групи:

- дефекти геометричної форми (профілю) заготовки;
- поверхневі та підповерхневі дефекти;
- внутрішні дефекти, які розташовуються усередині тіла заготовки.

Деякі хімічні елементи, часто небажані і присутні в металі у вигляді домішок, можуть бути причиною утворення дефектів [1]:

- Cu, Sn, Sb, As: поверхневі тріщини;
- O, S, Al: неметалеві включення;
- S, P: внутрішні або підкіркові тріщини, внутрішня ізоляція;
- O, N, H: поверхнева пористість, газові міхури, газові та усадочні раковини.

До числа основних дефектів безперервнолитих заготовок слід віднести: дефекти геометричної форми, поверхневі поздовжні, поперечні і павукоподібні тріщини, внутрішні тріщини, дефекти в серцевині заготовки, пори і ділянки шлакових включень та ін.

Утворення тріщин в безперервнолитій заготовці може бути викликано різними причинами: низькими пластичністю і міцністю твердого каркаса при високих температурах, металургійними особливостями процесу кристалізації, феростатичним тиском, яке відчуває тверда оболонка злитка, температурними напругами, механічними навантаженнями і деформаціями та ін. Якщо сумарне навантаження створює в твердому каркасі напруги, що перевищують критичні, то в процесі затвердіння утворюються тріщини.

При цьому для затвердіння поверхневих шарів заготовки характерні сильні перепади температур і інтенсивний масо-і теплоперенос. У місцях спотворення температурних полів, як правило, також утворюються поверхневі дефекти у вигляді тріщин.

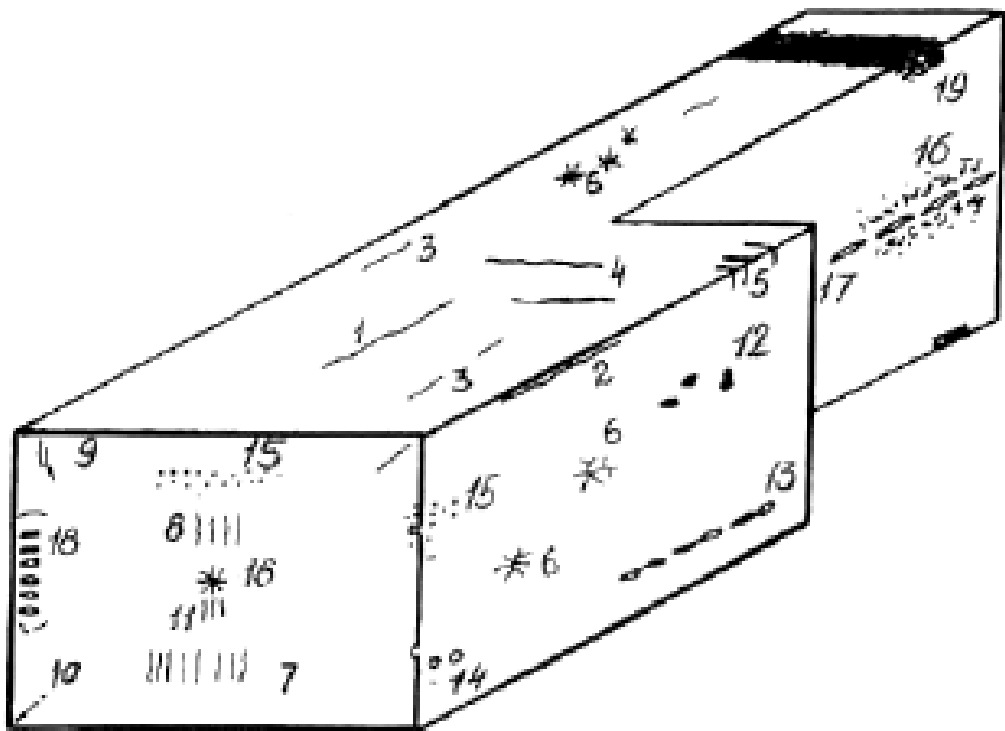


Рисунок 1.1 – Схематичне представлення основних видів дефектів безперервнолитої заготовки: 1 – глибокі поздовжні тріщини на поверхні; 2 – поздовжні тріщини в зоні кромки; 3 – короткі поздовжні тріщини; 4 – поперечні тріщини по межі; 5 – поперечні тріщини в кромках; 6 – павукоподібні (зіркоподібні) тріщини; 7, 8 – внутрішні тріщини в поздовжньому напрямку; 9 – кутові внутрішні тріщини; 10 – кутові тріщини; 11 – осьові тріщини; 12 – пори і ділянки шлакових включень на поверхні; 13 – пори і шлакові включення у вигляді гнізд, розташованих в поздовжніх доріжках; 14 – пори по всій поверхні слябів; 15 – неметалеві включення на поверхні і підповерхневі; 16 – осьова ізоляція; 17 – осьова пористість; 18 – підповерхневі дефекти; 19 – пояса і завороту

Поверхневі дефекти в значній мірі визначаються механічними характеристиками сталеві оболонки, що формується. Оскільки тверда скоринка складається з рідко-твердої фази і повністю твердого каркаса (рисунок 1.2), його механіка досить складна.

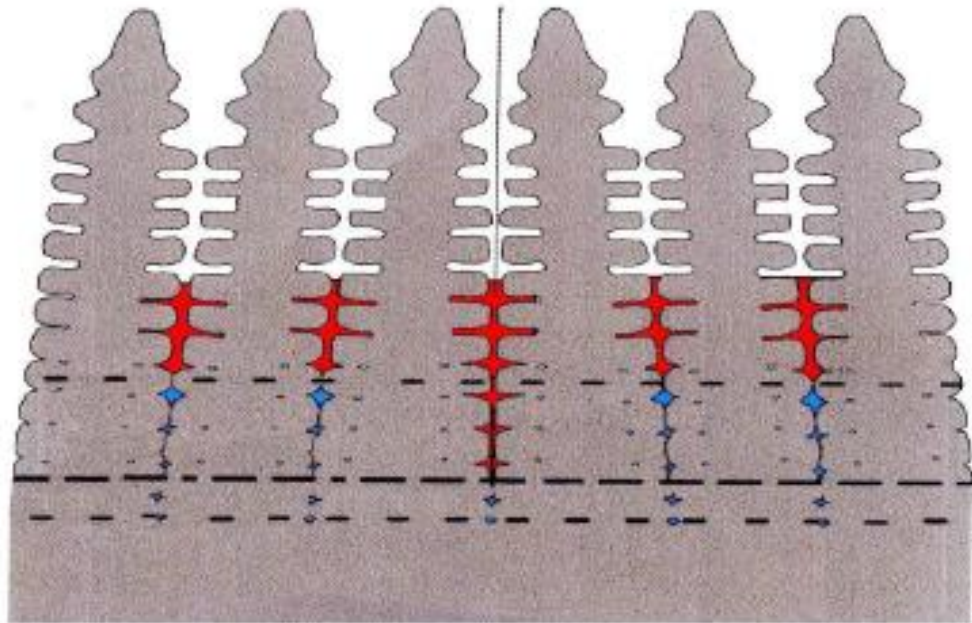


Рисунок 1.2 – Схема мікроструктури оболонки твердого каркаса з дендритними зернами

Вивчення тріщин в литих заготовках показало [6], що зовнішні і внутрішні тріщини мають однакову природу. Вони відносяться до гарячих (кристалізаційних) тріщин, розташовуються в междендрітних ділянках і виникають в «ефективному» інтервалі кристалізації, коли механічні властивості виливки низькі і неоднорідні по перетину [7, 8].

Цей найбільш поширений дефект литої заготовки з'являється при відхиленнях від встановленого технологічного режиму розливання сталі, зокрема при недостатньо обґрунтованих режимах інтенсифікації розливання в виливниці, а також при відпрацюванні нових технологічних процесів. Безперервне розливання сталі відрізняється від розливання в

виливної більш інтенсивним охолодженням затвердіваючого злитка, що в поєднанні зі специфічними вимогами до його профілю і розмірам (наприклад, необхідністю вилити злитків з 10-кратним відношенням широких граней до вузьких) зробили гарячі тріщини таким небезпечним дефектом.

Тріщиностійкість сталі залежить від технології виплавки, розливання і механізму кристалізації. Основними факторами, що викликають утворення гарячих тріщин в БЛЗ є: швидкість і температура лиття; конструкція (конусність) кристалізатора; режими вторинного охолодження; хімічний склад сталі (% C, S, Mn) [9]. Кожен з них в певній мірі викликає появу різного роду напруг: усадочних, термічних, а також напружень, що виникають при механічному впливі на повному обсязі затверділий злиток і в результаті фазових перетворень. У загальному випадку тріщина може утворитися, коли діючі напруги виявляться вище міцності і пластичних характеристик металу.

Для запобігання утворенню гарячих тріщин швидкість і температура лиття, конусність кристалізатора і режими вторинного охолодження повинні вибиратися в певній відповідності з урахуванням технологічних особливостей машини безперервного лиття, хімічного складу сталі, величини усадки заготовки і т.п., щоб при затвердінні заготовки створити умови, які забезпечать формування рівномірної зростаючої оболонки по периметру злитка і зведуть до мінімуму утворення напруг, що розтягують по його перетину (застосування м'якого режиму вторинного охолодження в кінці затвердіння і виключення можливості розігріву поверхні злитка; використання жорсткої системи підтримуючих пристроїв).

Для зниження ймовірності виникнення поверхневих дефектів та запобігання аварійним ситуаціям при випробуваннях нових складів сумішей необхідно мати критерії оцінки їх застосовності, які б дозволили до проведення випробувань та з перших хвилин розливання оцінювати

доцільність застосування тієї чи іншої шлакоутворюючої суміші (ШУС). В якості критеріїв можуть виступати як певні фізико-хімічні характеристики сумішей, так і результати обробки даних інформаційно-вимірювальної системи, встановленої в кристалізаторі МБЛЗ. Багато вітчизняних підприємств оснащені таким обладнанням. Для розробки такої критеріальної оцінки необхідно провести комплексну роботу з вивчення взаємозв'язку фізико-хімічних властивостей ШУС, дефектності металу безперервнолитих заготовок та показань інформаційно-вимірювальної системи роботи кристалізатора.

Незважаючи на багаторічний досвід застосування ШУС у безперервному розливанні сталі, їх вивчення залишається актуальним і затребуваним в наші дні. Основним напрямом досліджень є вивчення впливу хімічного та компонентного складу на фізико-хімічні та теплофізичні властивості ШУС.

Безліч досліджень присвячено вивченню мінералів, фаз та структури шлакового гарнісажу. Однак аналіз численних досліджень показав, що до цього часу відсутня достовірна модель, що пов'язує перелічені вище параметри з процесами теплообміну в кристалізаторі, тобто математичне моделювання процесу кристалізації, що враховує зміну властивостей шлакового гарнісажу в залежності від його складу та градієнта температур у кристалізаторі, що дозволяє прогнозувати формування поверхневих дефектів.

1.2 Аналіз поведінки шлакоутворюючої суміші в кристалізаторі МБЛЗ та її вплив на утворення неметалевих включень в заготовці

Для поліпшення процесу ковзання твердої скоринки уздовж поверхні кристалізатора, а також захисту дзеркала металу від контакту з атмосферою і від втрат тепла випромінюванням, в практиці безперервного розливання застосовують спеціальні шлакоутворюючі

суміші (ШУС), що подаються в певній кількості на поверхню металу в кристалізаторі (рис. 1.3). При цьому деяка частина ШУС, яка розташована безпосередньо на дзеркалі металу, розплавляється і затікає в зазор між кристалізатором і твердою оболонкою сталі, виконуючи роль мастила.

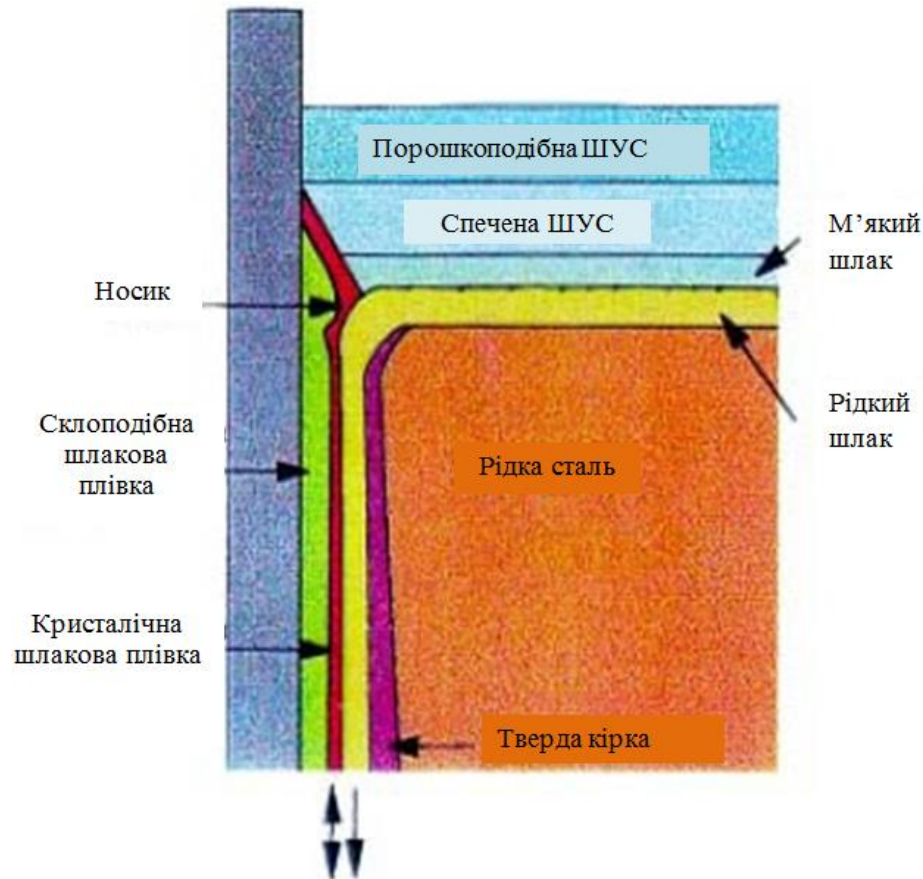


Рисунок 1.3 – Схема розливання сталі на МБЛЗ з використанням ШУС

Розташована на дзеркалі металу ШУС, під впливом тепла рідкої сталі утворює три яскраво виражених шару: рідкий шар, розташований безпосередньо на дзеркалі сталі; розм'якшений (спечений) шар, розташований над рідким шаром, який у міру витрачання рідкого шару підживлює його; порошкоподібний шар, розташований над розм'якшеним шаром, який зменшує відведення тепла через дзеркало металу.

Рідкий шар ШУС виконує наступні основні технологічні функції:

- запобігає вторинному окислюванню сталі при контакті дзеркала металу з атмосферою;
- асимілює в шлак неметалеві включення, що впливають;
- зменшує сили тертя між заготовкою і стінкою кристалізатора за рахунок наявності рідкого прошарку шлаку;
- підвищує рівномірність і дозволяє регулювати інтенсивність тепловідведення від твердої скоринки до стінки кристалізатора;
- підвищує якість поверхні безперервнолитої заготовки.

При затіканні рідкої ШУС в зазор між поверхнею заготовки та кристалізатора утворюється тонка плівка, що складається з:

- шару склоподібної плівки, яка намерзає на стінки кристалізатора;
- шару кристалічної шлакової плівки, розташованої на склоподібній плівці;
- рідкого шару, який прилягає до поверхні заготовки.

При цьому в області дзеркала металу біля поверхні кристалізатора з ШУС формується (намерзає) так званий шлаковий «носик», який багато в чому і визначає первинну геометричну форму твердої скоринки в області дзеркала.

Проаналізовано вплив збільшення вмісту різних компонентів на властивості ШУС (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Вплив збільшення вмісту різних компонентів на властивості ШУС

Компоненти	В'язкість	Температура	
		твердіння	плавки
CaO/SiO ₂	↓↓↓	↑↑↑	↑↑
Al ₂ O ₃	↑↑↑	↓↓	Залежить від форми
Na ₂ O	↓	↓	↓↓
F	↓↓↓	↓	↓
MnO	↓↓	↓↓	↓↓
MgO	↓	↓	↓
BaO	↓	↓↓	↓
Li ₂ O	↓↓↓	↓↓	↓↓↓↓
ZrO ₂	↑↑↑	↓↓	↑↑↑

У технологічному плані спроби зменшити кількість шлакового розплаву в кристалізаторі шляхом скорочення витрат ШУС на тонну сталі розливається, як правило, безуспішні. При зменшенні подачі свіжих порцій порошку або гранул розплав поступово оголюється, що сприяє тепловіддачі з меніска і його окислення. Обсяг шлаку, що накопичується, має більш високу температуру плавлення (порівняно з вихідною ШУС), охолоджується інтенсивніше і починає тверднути на початку в кутах кристалізатора, а потім, утворюючи поверхневі корочки грубого ранта, на стінках кристалізатора, плавно охоплює весь його периметр. В таких умовах шлак потрапляє в зазор нерівномірно, товщина його при цьому не зменшується, але скорочується кількість рідкого шлаку проникаючого в зазор і можливе утворення ділянок кристалізатора не покритих шлаком. За відсутності рівномірного змащення можливі підвисання скоринки, що формується, заготовки на

плиті кристалізатора. При ізоляції поверхні розплаву свіжої ШУС, скоринки і рант при невисоких коливаннях в кристалізаторі розплавляються, але кількість шлаку також залишається колишньою. Одним з технологічних прийомів в подібних випадках може бути так зване оновлення шлаку (вичерпування старого і наведення нового) або перехід на іншу ШУС.

Досягнення граничного значення товщини шлаку, при якій погіршується процес проникнення рідкого шлаку в зазор між оболонкою заготовки, що формується і плитою кристалізатора, викликає погіршення якості заготовки і збільшує ймовірність аварійності процесу - підвисання або прориву внаслідок підвищення тертя або вторинного розігріву локальної зони формується оболонки безперервнолитої заготовки при фрагментарному заміщенні шлакового гарнісажу газовим зазором.

У свою чергу прорив може бути обумовлений підвисанням або недостатньою товщиною скоринки заготовки в результаті вторинного розігріву окремих її ділянок. Теплопередача на цих локальних ділянках може бути порушена виникненням газового зазору під час відсутності шлакового прошарку.

1.3 Механізм утворення осьової пористості при твердненні заготовки

Можливість утворення дефектів усадочного походження можна попередити організацією раціонального живлення безперервнолитої заготовки в зоні твердо-рідкого стану, що послідовно переміщається, починаючи з моменту взаємного схоплювання кристалів. У цей період вона являє собою спочатку пористе (коли проміжки між гілками дендритів ще великі), а потім капілярно-пористе середовище [1].

З огляду на це при твердненні заготовки мають місце два наступних основних види масопереносу рідини:

1) гідродинамічний масоперенос у досить великих проміжках між гілками дендритів при наявності швидкісного профілю по їхньому перерізі;

2) наступний фільтраційний масоперенос у дрібних осередках міжгілкового простору дендритів, при якому переміщення рідкого металу обумовлено дією капілярних сил.

Для того щоб охарактеризувати умови живлення в обох випадках, необхідно визначити напрямок і величину сил, що змушують рідкий метал переміщуватися у твердо-рідкій зоні безперервно литої заготовки.

У першому випадку переміщення рідини відбувається повільно під дією градієнта тиску Δp , що діє в напрямку переносу. Середня швидкість переміщення рідини визначається по формулі Пуазейля [1]. Перепад тиску по довжині цього потоку Δp , який входить у цю формулу, виникає внаслідок того, що метал у твердо-рідкій зоні на стороні, пов'язаній з твердою фазою, твердне швидше, ніж на границі з рідким металом, і внаслідок усадки створює порожнини негативного тиску, у які може надходити рідкий метал із серцевини заготовки. Переміщення металу в ці порожнини утруднено внаслідок сил тертя потоку об виступаючі гілки дендритів.

Якщо уявити, що простір між дендритами являє собою горизонтальну трубочку, то з боку рідкого металу на неї діє феростатичний тиск $p = \rho H$ або п'езометричний напір $H = p/\rho$. Частина цього напору втрачається на подолання сил тертя рідини об виступи гілок дендритів. Втрата напору у випадку ламінарного руху рідини дорівнює

$$h_{\text{тер}} = \frac{32}{\rho} \eta \frac{L}{d^2} v, \text{ м}, \quad (1.1)$$

де v – швидкість руху рідкої сталі в трубці діаметром d .

Швидкість руху сталі визначається швидкістю усадки ділянки труби, що кристалізується, в часі з боку твердої фази. Приймаючи усадку $\sim 4\%$, одержуємо наступну залежність для наближеного визначення швидкості переміщення рідкого металу в часі:

$$v = 0,04v_{\text{кр}} = 0,04 \frac{K}{2\sqrt{\tau}}, \text{ м/с}, \quad (1.2)$$

де τ – тривалість кристалізації сталі, с.

Відкладаючи в масштабі п'єзометричні напори H і $h_{\text{тер}}$, одержуємо розташування п'єзометричної лінії. Одержаний при цьому градієнт напору $j = h_{\text{тер}}/L = \Delta p$ може бути використаний для визначення сили тертя.

Для визначення умов живлення заготовки необхідно визначити зусилля, які «запресовують» рідку фазу у двофазну зону заготовки. Їх можна знайти з умов динамічної рівноваги певного об'єму металу, що перебуває під дією сили, що виникає під дією градієнта напору $p = \rho H$, сили тертя, спрямованої убік, протилежний вектору швидкості $f_{\text{тер}}$, і сили ваги рідкого металу G . Оскільки дія сили, викликаного градієнтом напору, спрямована перпендикулярно п'єзометричній лінії, то її середня величина дорівнює

$$p = \left(H - \frac{h_{\text{тер}}}{2} \right) \rho, \text{ Па}. \quad (1.3)$$

Приклавши всі діючі сили до елемента рідини й побудувавши замкнутий багатокутник, визначаємо значення й напрямок рівнодіючої R переважного тиску, під яким відбувається живлення двофазної зони

рідким металом. Розкладаючи рівнодіючу на вертикальну й горизонтальну складові, легко визначити вертикальні й радіальні зусилля, що переміщують рідкий метал у пористому середовищі.

За нахилу п'єзометричної лінії рівного тиску можна визначити середню швидкість потоку рідкого металу v і витрата його через поперечний переріз міждендритного простору Q :

$$v = \frac{\rho}{32\eta} j d^2, \text{ м/с}, \quad (1.4)$$

$$Q = \frac{\pi \rho j d^4}{128\eta}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (1.5)$$

Як видно з останніх формул, живлення заготовки рідким металом в перший період прогресивно підвищується зі збільшенням діаметра міжгілкових проміжків дендритів і зниженням в'язкості сталі.

Якщо припустити, що весь феростатичний тиск витрачається на подолання сил тертя, то, підставляючи в залежність $h_{\text{тер}} = R$ можна визначити глибину проникнення рідкої фази в двофазну зону злитка:

$$R = \frac{32\eta L v}{\rho d^2}, \text{ м}, \quad (1.6)$$

$$L = \frac{\rho R d^2}{32\eta v}, \text{ м}. \quad (1.7)$$

Якщо ця величина більша за ширину зони твердо-рідкого стану, то злиток вийде щільним, без усадкових дефектів. Якщо ж в горизонтальному R_z або вертикальному R_e напрямках вона менше, то утворення зазначених дефектів неминуче. Для грубих розрахунків замість R можна підставляти H :

$$L = \frac{\rho H d^2}{32\eta v}, \text{ м}. \quad (1.8)$$

З цієї залежності випливає, що у вищих горизонтах заготовки глибина проникнення рідкої фази зменшується.

Слід зазначити, що в реальних умовах кристалізації сталеві заготовки швидкість переміщення рідкої фази в міждендритних проміжках і $h_{мер}$ не досягають великих значень. Втрати напору на тертя створюються за рахунок звивистої форми міждендритних проміжків.

1.4 Вплив електромагнітного перемішування

Про позитивний вплив електромагнітного перемішування на структуру сталі та пригнічення формування дефектів наголошувалося у численних роботах присвячених цій технології. Зокрема авторами роботи [2] експериментально підтверджено ефективність використання електромагнітного перемішування з оптимальними параметрами в кристалізаторі сортової МБЛЗ (MEMS) на пригнічення поверхневих і внутрішніх дефектів, сегрегації (хімічної неоднорідності) вуглецю в осьовій частині заготовки та центральної пористості у заготовках з високо вуглецевих марок сталі. За оптимальні параметри обробки автори роботи прийняли силу струму 260 А та частоту 8 Гц.

Не менш важливим є і електромагнітне перемішування при остаточному твердненні заготовки (FEMS). Авторами роботи [3] методом фізичного моделювання було досліджено вплив фінального електромагнітного перемішування на кристалізаційну структуру, хімічну сегрегацію та утворення карбідів в високовуглецевій шарикопідшипниковій сталі марки GCr1 5. Експеримент проводився з використанням моделі МБЛЗ, обладнаної пристроєм для електромагнітного перемішування. Профіль рідкого ядра заготовки досліджували методом «виливання» в процесі тверднення сталі. Для порівняння було відлито 8 зразків отриманих за різних режимів електромагнітного перемішування. Результати експерименту

показують, що інтенсивне фінальне електромагнітне перемішування загострює центральну сегрегацію вуглецю, призводячи до більшого заглиблення первинних карбідів. Було також визначено, що карбіди у зоні сегрегації є переважно типу M_3C поряд із незначною кількістю M_7C_3 та M_3C_2 . Загалом за результатами проведеного фізичного моделювання було визначено, що для отримання дрібної однорідної структури металу необхідно здійснювати фінальне електромагнітне перемішування на рівні заготовки, де товщина рідкого ядра складає 15 мм. Сила і частота струму при цьому мають становити відповідно 150 А і 5 Гц.

Висновки за розділом

За результатами огляду літератури визначені основні параметри розливання сталі, що впливають на утворення осьової пористості. Встановлено, що електромагнітне перемішування з оптимальними параметрами має позитивний вплив на подрібнення структури сталі та пригнічення утворення таких дефектів, як хімічна неоднорідність та осьова пористість. У наступному розділі методом статистичного аналізу будуть визначені раціональні параметри розливання на МБЛЗ вуглецевої сталі.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Визначення механізму та причин утворення осьової пористості і хімічної неоднорідності

Процес утворення осьової неоднорідності реалізується на межі твердої й рідкої частин злитка в умовах, коли рівень рідини в середній його частині безупинно опускається. У міру зближення фронтів горизонтального затвердіння в осі заготовки усадочне переміщення зростає. Потік рідкого металу, що рухається, захоплює за собою скупчення лікватів, екстрагуючи їх з міжосьових просторів дендритів. Скупчення лікватів описують траєкторії, зумовлені, з одного боку, рухом меж затвердіння, а з іншого боку – усадочними переміщеннями рідкого металу. Відомо, що за вмісту у двофазній рідко-твердій ділянці близько 20% твердої фази в'язкість її значно зростає, що призводить до втрати рідкорухомості, й живлення усадочних порожнин рідким металом з верхніх горизонтів ускладнюється. Саме тому осьова неоднорідність характеризується пористістю, що проявляється у вигляді тріщин [4].

Ліквація в осьовій зоні заготовки вкрай небезпечна, оскільки подібні дефекти практично не усуваються під час наступної пластичної деформації [4].

Це зумовлено, насамперед, зниженням ефективності прокатки (пророблення металу) у міру наближення до центра заготовки. Особливу небезпеку осьова пористість являє для великих перерізів безперервнолитих заготовок (наприклад, блюмів і товстих слябів) [4].

Згідно з літературними даними [4,5] на формування осьової (центральної) пористості й хімічної неоднорідності (осьової ліквації) впливають наступні фактори.

Осьова пористість:

- хімічний склад сталі;

- позапічна обробка;
- температурно-швидкісний режим розливання;
- вторинне охолодження;
- подача металу в кристалізатор;
- стан підтримуючої системи.

Хімічна неоднорідність:

- хімічний склад сталі;
- температурно-швидкісний режим розливання;
- вторинне охолодження;
- подача металу в кристалізатор;
- стан підтримуючої системи.

За даними роботи [4] центральна пористість є розповсюдженим дефектом при розливання вуглецевистих марок сталі особливо при високих швидкостях розливання, що призводить до подовження рідкого ядра заготовки. По даним тієї ж роботи вплив швидкості розливання й інтенсивності вторинного охолодження на хімічну неоднорідність обмежений. При цьому набагато більший вплив на утворення цього дефекту носить вміст у сталі сірки й фосфору, а також перегрів металу в промковші над температурою ліквідус.

2.2 Методика аналізу

Для аналізу використовували 111 паспортів плавок сталі марок C80D2 (за EN 10016-4:1999), які незначно відрізняються вмістом вуглецю (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі марок C80D2

Марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N
C80D2	0,78- 0,82	0,1- 0,3	0,5- 0,7	< 0,02	< 0,025	< 0,1	< 0,02	< 0,1	< 0,01	< 0,15	< 0,007

Проаналізувати вплив на утворення дефектів подачі металу в кристалізатор і стану підтримуючої системи по паспортах плавки не представляється можливим.

Попередньо для оцінки значимості параметрів був проведений множинний кореляційний аналіз хімічного складу, перегріву металу й швидкості розливання.

При множинній регресії вивчають залежність результативного признаку (цільової функції) від двох та більше незалежних факторів. Аналіз здійснюють за такою ж процедурою, як і при аналізі парних зв'язків. Суть кореляційного аналізу полягає у визначенні ступеня зв'язку (коефіцієнта кореляції) між двома випадковими величинами. Існує декілька типів коефіцієнта кореляції (критерії Спірмена, Кокс-Стюарта, Олмстеда-Тьюкі та ін.), застосування яких залежить від припущень стосовно спільного розподілу величин цих факторів. Найширше застосування має коефіцієнт r лінійної кореляції (Пірсона) [6,7], величина якого змінюється в межах від -1 (повна зворотна залежність) до 1 (повна пряма залежність). При величині $r = 0$ лінійна залежність між факторами повністю відсутня.

В ідеальному випадку всі фактори повинні бути повністю незалежними один від одного. За високої міжфакторної кореляції виникає мультиколінеарність, що призводить до викривлення коефіцієнтів регресії та ускладнення їх інтерпретації. Задля уникнення цього ефекту проводять відсіювання факторів шляхом складання таблиці парних коефіцієнтів кореляції (кореляційної матриці). Якщо два фактори тісніше пов'язані між собою ніж кожен з них з результативним показником, один з них виключають з подальшого аналізу. Значущість розрахованих коефіцієнтів кореляції визначають шляхом їх порівняння з критичною величиною α , що є табличною величиною [7] або може бути розрахована за формулою

$$r_{\alpha} = \sqrt{\frac{(k-1)F_{\alpha}(f_1, f_2)}{n-k + (k-1)F_{\alpha}(f_1, f_2)}}, \quad (2.1)$$

де α – рівень значущості; k – кількість факторів; n – об'єм вибірки; $F_{\alpha}(f_1, f_2)$ – критерій Фішера-Снедекора (F-критерій) також є табличної величиною [7,8], у якому $f_1 = k-1$, $f_2 = n-k$.

Простішим методом визначення достовірності коефіцієнта кореляції наведено у роботах [9,10]. При малій кількості парних вимірювань ($n < 50$) достовірність зв'язку оцінюють розрахунком дисперсії коефіцієнта кореляції

$$\sigma_r^2 = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (2.2)$$

Зв'язок вважають достовірним з імовірністю $p=0,95$ за умови

$$\frac{r}{\sigma_r} \geq 3. \quad (2.3)$$

Кореляційний аналіз доцільно здійснювати у програмі *Microsoft Excel* за допомогою функції *Кореляція* пакету *Аналіз даних*, з подальшим аналізом адекватності за описаною вище методикою.

Для аналізу впливу описаних вище факторів на формування осьової пористості й хімічної неоднорідності були побудовані графіки залежності. Для цього область визначення кожного фактора розбивалася на 7 рівних інтервалів в області від $\bar{x}-3\sigma$ до $\bar{x}+3\sigma$ із кроком $0,5\sigma$. Значення, які не ввійшли в зазначену область, повинні бути відкинуті відповідно до правила «3 σ ». В аналізованому масиві таких значень не було. У кожному інтервалі розраховували середнє значення аргументу, середнє значення функції, її незміщене

середньоквадратичне відхилення й кількість значень, що потрапили в цей інтервал. Приймаючи, що розподіл випадкової величини в кожному інтервалі носить нормальний характер, по формулі (2.4) був розрахований довірчий інтервал для цільової функції в кожному інтервалі.

$$x \pm t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.4)$$

де t – величина t-критерію або коефіцієнта Стьюдента;

σ – середньоквадратичне відхилення цільової функції в кожному інтервалі;

n – кількість спостережень в інтервалі.

2.3 Результати аналізу

Величини кореляційних коефіцієнтів для досліджуваних факторів наведені на рисунках 2.1-2.2.

З порівняння рисунків 2.1 й 2.2 видно, що хімічний склад сталі й температурно-швидкісний режим розливання мають набагато більший вплив на утворення хімічної неоднорідності, у той час як їхній вплив на осьову пористість вкрай незначний.

Як видно на рис. 2.1 найбільший вплив на бал осьової пористості має вміст у сталі бора й нікелю, а також перегрів сталі над температурою ліквідус. Вплив інших параметрів є незначним.

З рис. 2.2 видно, що найбільший вплив на бал хімічної неоднорідності мають вміст у металі титану, марганцю, хрому, сірки, азоту, фосфору й вуглецю, а також відношення вмісту марганцю до кремнію, перегрів сталі над температурою ліквідус, відношення вмісту марганцю до сірки й швидкість розливання.

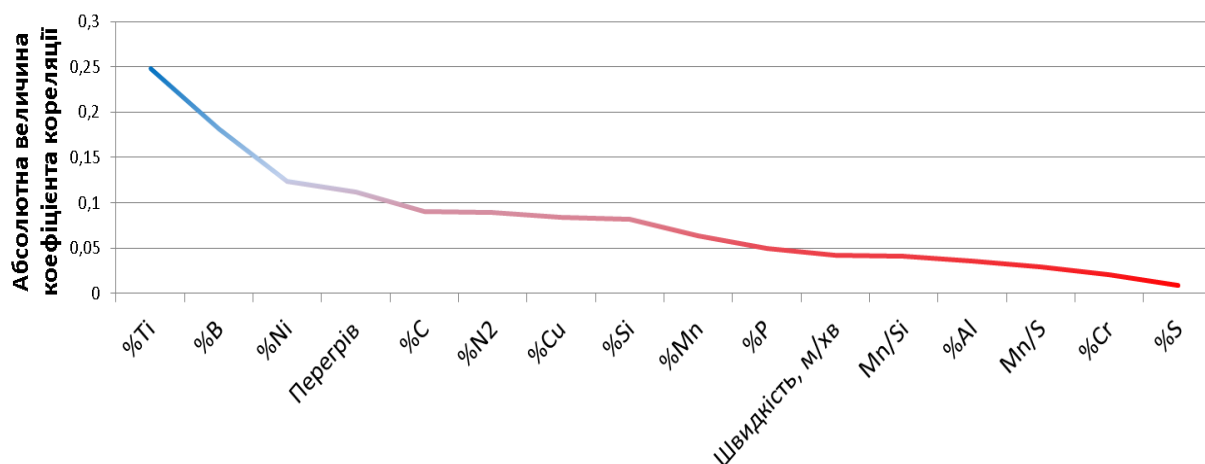


Рисунок 2.1 – Абсолютна величина коефіцієнта кореляції для осьової пористості

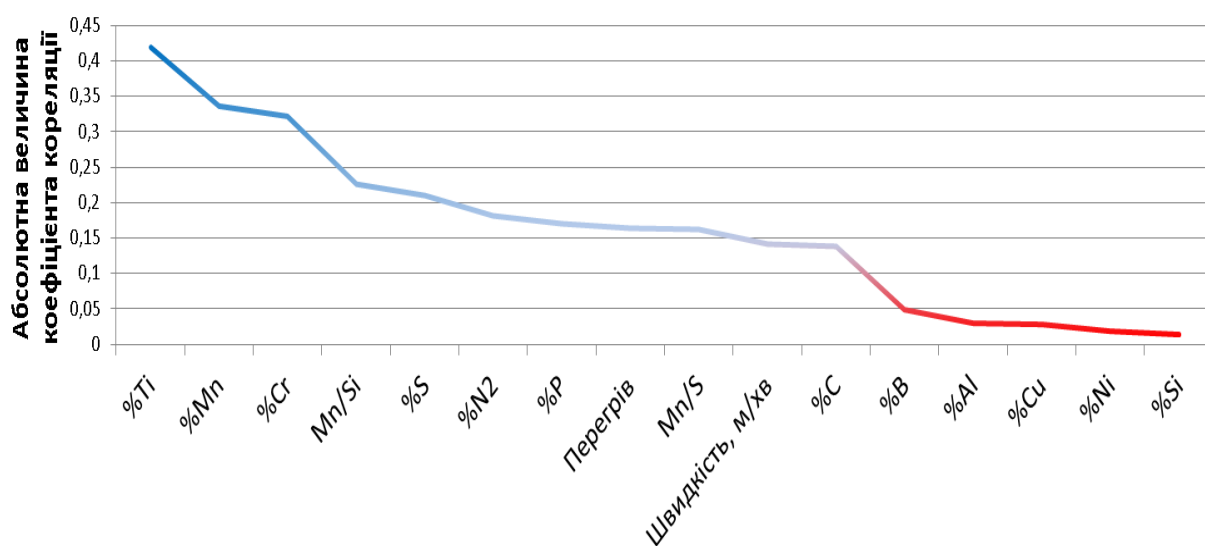
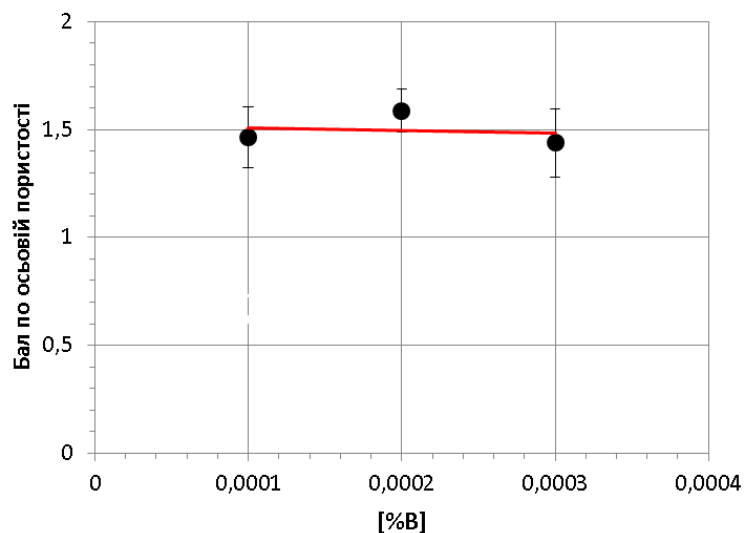


Рисунок 2.2 – Абсолютна величина коефіцієнта кореляції для хімічної неоднорідності

Впливом вмісту титану в сталі на формування осьової пористості й хімічної неоднорідності також можна знехтувати, оскільки в паспортах його вміст відмінний від нуля зустрічається лише у двох плавках.

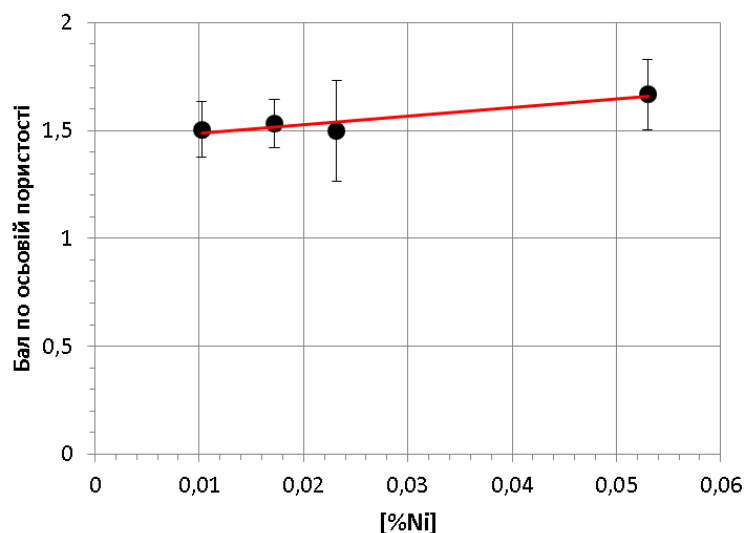
На рисунку 2.3 представлені графіки залежності бала осьової пористості від хімічного складу готової сталі. Вплив перегріву сталі буде проаналізовано нижче в прив'язці до швидкості розливання. Як видно із

графіків збільшення вмісту нікелю в сталі може сприяти розвитку осьової пористості. При цьому вміст бора не має жодного впливу на розвиток осьової пористості.



$$\text{ОП} = -123,11[\%B] + 1,52 \quad R^2 = 0,0238$$

а)



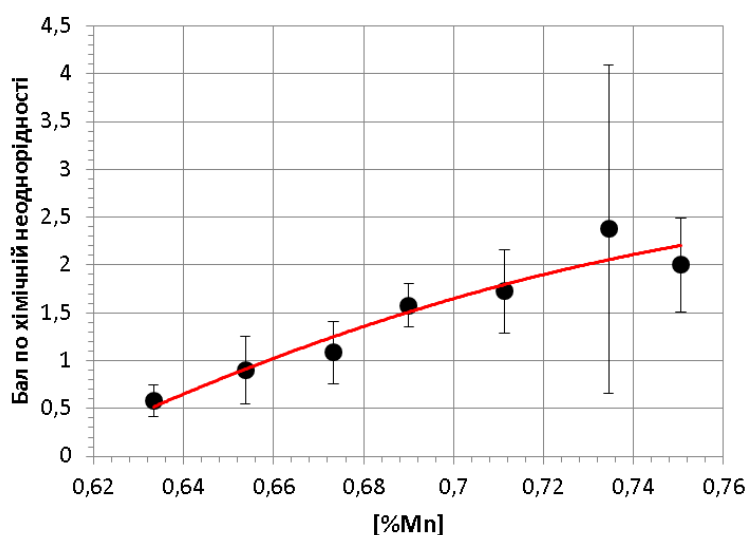
$$\text{ОП} = 3,924[\%Ni] + 1,4491 \quad R^2 = 0,8837$$

б)

Рисунок 2.3 – Вплив хімічного складу сталі на ураженість заготовок дефектом осьова пористість

На рисунку 2.4 наведені графіки, що ілюструють вплив обраних параметрів на розвиток хімічної неоднорідності. Рисунки 2.4 а,б ілюструють сильний вплив вмісту марганцю і хрому в сталі на розвиток хімічної неоднорідності. Збільшення ураженості заготовки при збільшенні марганцю можна пояснити збільшенням коефіцієнту ліквідації марганцю [11]. Вплив хрому на ураження заготовки хімічною неоднорідністю підтверджується літературними джерелами [11].

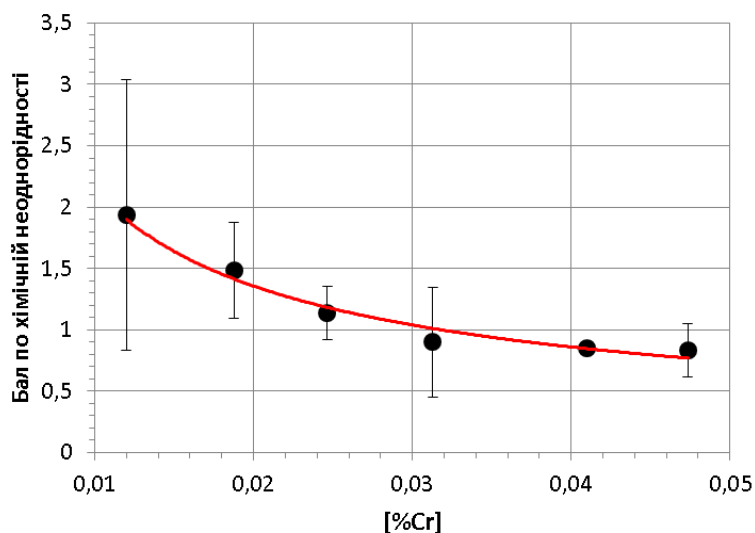
Відомо, що для покращення видалення продуктів розкислення зі сталі співвідношення $[Mn]/[Si]$ має становити не менше 4 одиниць [4,12]. Однак за результатами статистичного аналізу для пригнічення розвитку хімічної неоднорідності його величина має складати 2,8-3,0.



$$XН = -50,877[\%Mn]^2 + 84,785[\%Mn] - 32,771 \quad R^2 = 0,9238$$

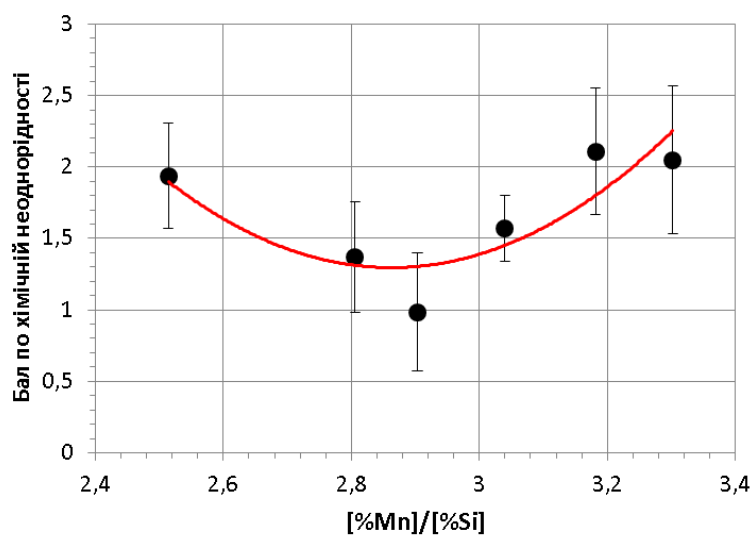
а)

Рисунок 2.4 – Вплив хімічного складу сталі на ураженість заготовок дефектом хімічна неоднорідність, аркуш 1



$$XН = 0,1036[\%Cr]^{-0,658} R^2 = 0,9583$$

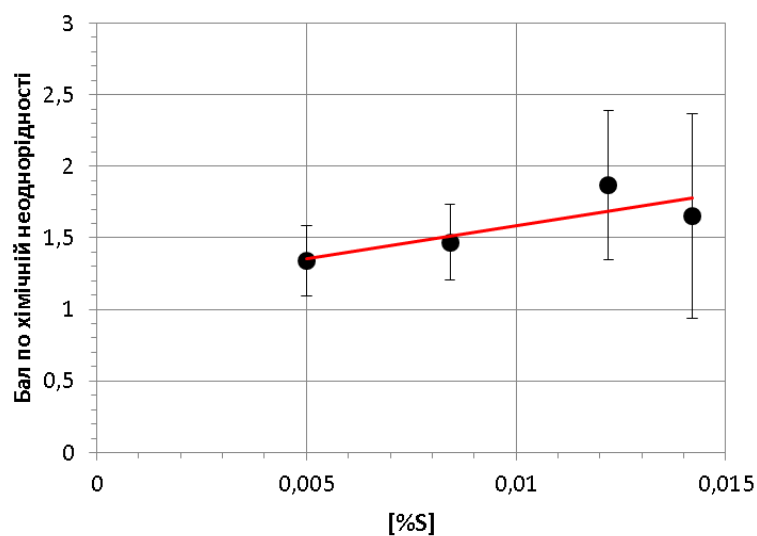
б)



$$XН = 4,959([\%Mn]/[\%Si])^2 - 28,392([\%Mn]/[\%Si]) + 41,933 \quad R^2 = 0,7372$$

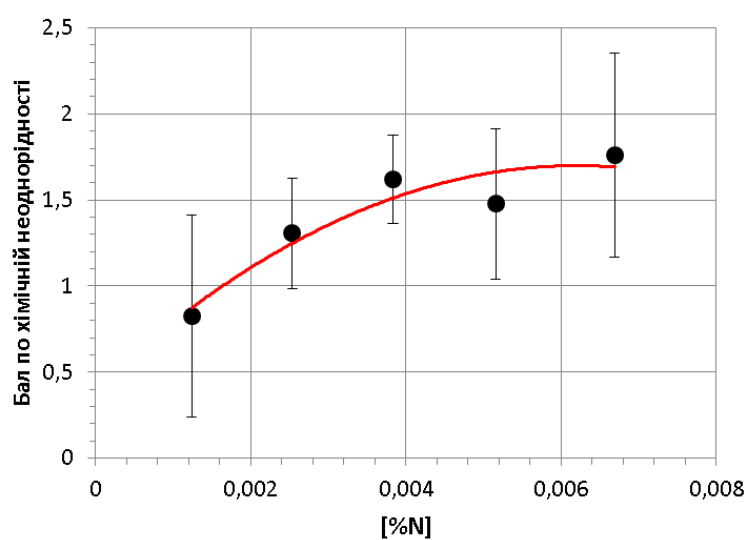
в)

Рисунок 2.4 – Вплив хімічного складу сталі на ураженість заготовок дефектом хімічна неоднорідність, аркуш 2



$$XН = 45,966[\%S] + 1,124 \quad R^2 = 0,6738$$

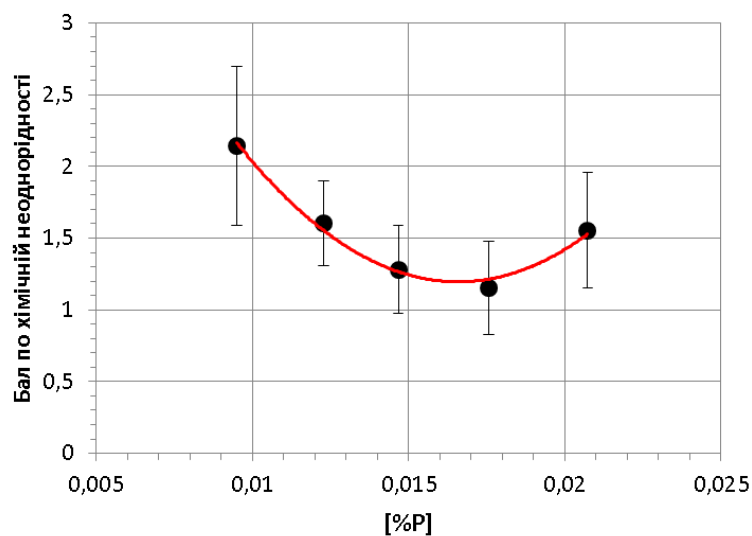
г)



$$XН = -33520[\%N]^2 + 415,93[\%N] + 0,4089 \quad R^2 = 0,8917$$

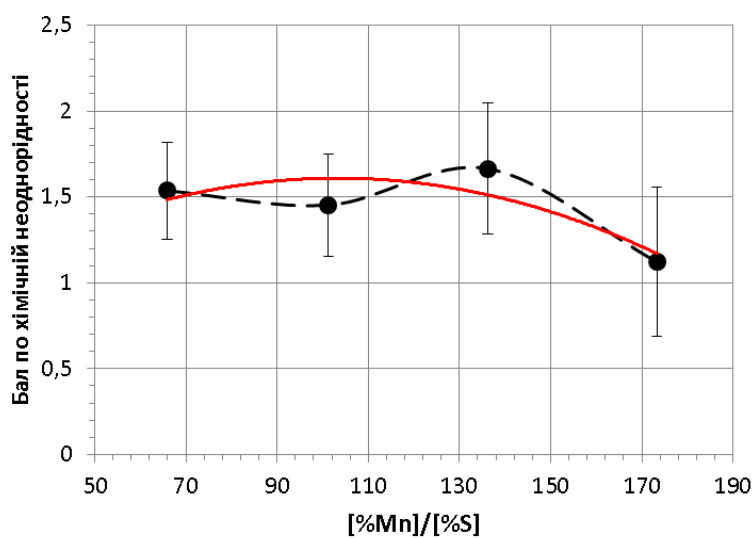
д)

Рисунок 2.4 – Вплив хімічного складу сталі на ураженість заготовок дефектом хімічна неоднорідність, аркуш 3



$$y = 19368[\%P]^2 - 642,43[\%P] + 6,5227 \quad R^2 = 0,9874$$

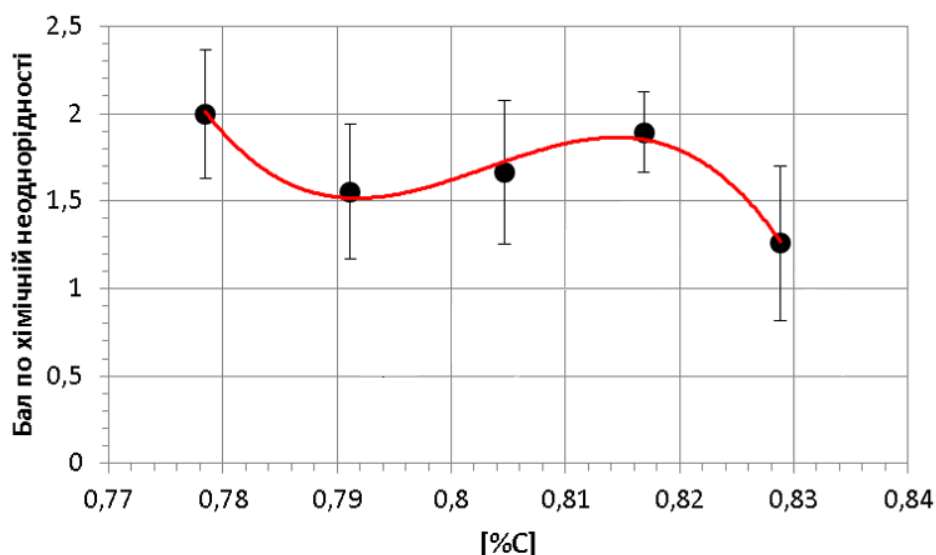
e)



$$XH = -9E-05([\%Mn]/[\%S])^2 + 0,0185([\%Mn]/[\%S]) + 0,6555 \quad R^2 = 0,6725$$

ж)

Рисунок 2.4 – Вплив хімічного складу сталі на ураженість заготовок дефектом хімічна неоднорідність, аркуш 4



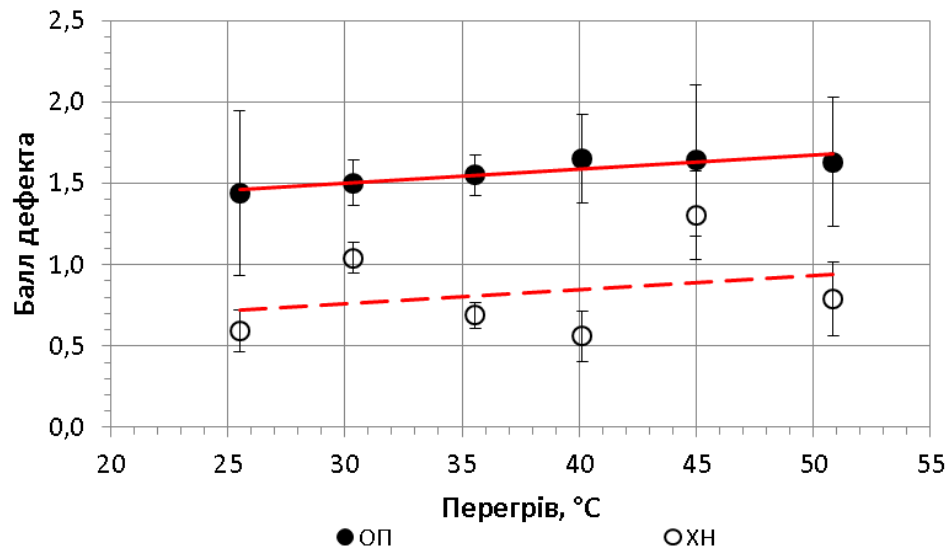
$$XН = -59521[\%C]^3 + 143402[\%C]^2 - 115142[\%C] + 30812 \quad R^2 = 0,9794$$

з)

Рисунок 2.4 – Вплив хімічного складу сталі на ураженість заготовок дефектом хімічна неоднорідність, аркуш 5

Співвідношення $[Mn]/[S]$ за тими ж літературними даними має становити щонайменше 40 одиниць, що сприятиме видалення НВ зі сталі. З метою зменшення ураженості заготовок сталі марок С80D2 хімічною неоднорідністю ця величина збільшується до 150 одиниць, що сприяє зменшенню балу в середньому на пів одиниці.

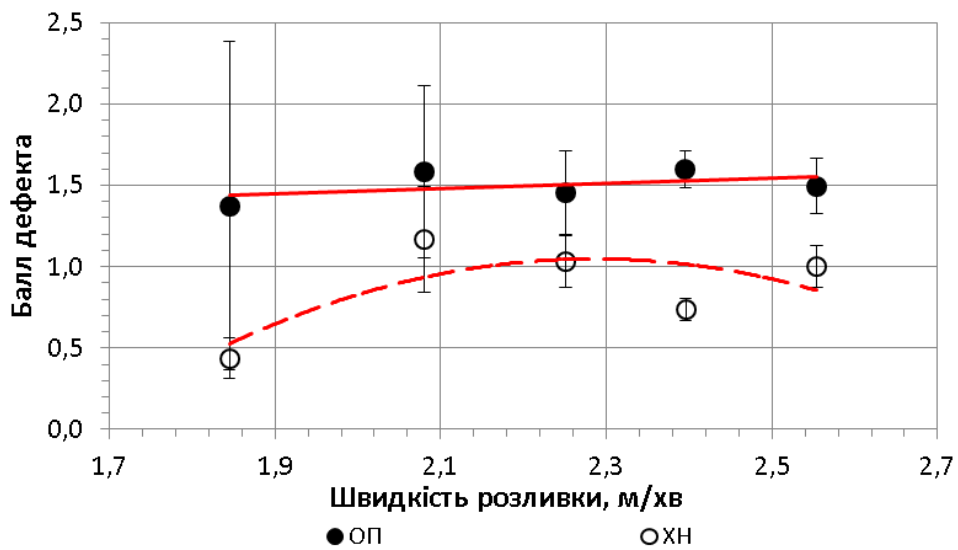
Оскільки швидкість розливання однієї плавки на різних струмках могла відрізнятися, аналіз температурно-швидкісного режиму розливання виконували по кожному струмку, а не за середніми показниками з усієї плавки. Результати аналізу температурно-швидкісного режиму розливання представлені на рисунку 2.5.



$$\text{ОП} = 0,0084\Delta t + 1,2508 \quad R^2 = 0,813$$

$$\text{ХН} = 0,0088\Delta t + 0,4943 \quad R^2 = 0,0819$$

а)



$$\text{ОП} = 0,1616V_p + 1,1414 \quad R^2 = 0,2322$$

$$\text{ХН} = -2,6925 V_p^2 + 12,308 V_p - 13,018 \quad R^2 = 0,52$$

б)

Рисунок 2.5 – Вплив перегріву сталі (а) та швидкості розливання (б) на ураженість заготовок дефектами

Як видно з графіків вплив перегріву на розвиток обох дефектів носить практично однаковий характер і повністю відповідає відомим літературним даним. Швидкість розливання, при цьому практично не впливає на розвиток осьової пористості, у той же час її зниження дещо пригнічує розвиток хімічної неоднорідності.

Спроби спільного аналізу двох цих факторів не увінчалися успіхом. Для цього область визначення швидкості розливання й перегріву була розбита на інтервали, і в кожному інтервалі було визначено середнє значення бала дефекту. У результаті була отримана таблиця 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати аналізу спільного впливу перегріву сталі й швидкості розливання на утворення дефекту осьова пористість

Швидкість розливання, м/хв	Перегрів, °C					
	25,5	30,6	35,7	39,9	45,0	50,8
1,8						1,4
2,1			1,6			
2,2		1,3	1,6	2,0	1,5	1,3
2,4	1,1	1,5	1,6	1,8	1,8	2,2
2,6	1,8	1,5	1,5	1,0		

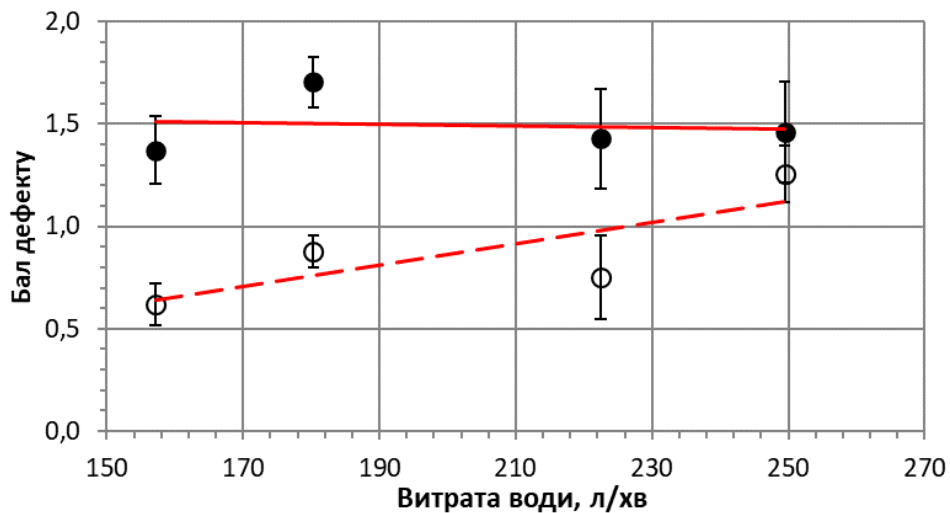
Також була почата спроба регресійного аналізу, у результаті якої були отримані неадекватні математичні моделі з величиною коефіцієнта апроксимації не вище 0,23 для осьової пористості й 0,46 для хімічної неоднорідності. Величина критерію Фішера нижче 0,05 була досягнута лише в математичній моделі (2.5) третього ступеня, що описує вплив швидкості розливання і співвідношення перегріву до швидкості розливання на бал хімічної неоднорідності:

$$XH = 25,87V^3 - 175,52V^2 + 394,44V + 0,022 \frac{\Delta t}{V} - 292,91. \quad (2.5)$$

де V – швидкість розливання, м/хв; Δt – перегрів сталі над температурою ліквідусу у промковші, °C.

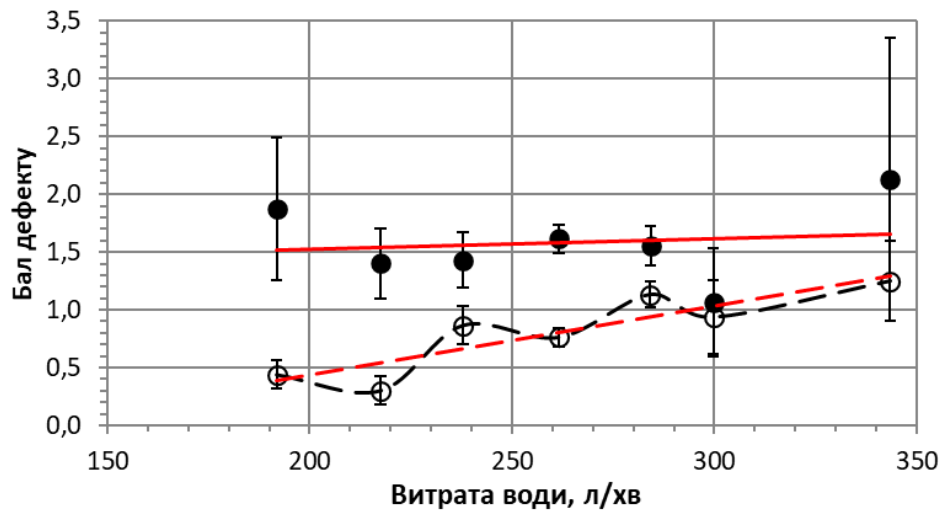
Однак у моделі (2.5) величина критерію Стюдента для співвідношення перегріву до швидкості розливання була нижче критичної, що вказує на низький ступінь впливу цього фактора.

Аналіз впливу інтенсивності охолодження на утворення дефектів представлений на рисунку 2.6.



\bullet ОП \circ ХН
 ОП = $-0,0004Q + 1,5698$ $R^2 = 0,0117$
 ХН = $0,0052 Q - 0,1807$ $R^2 = 0,6278$

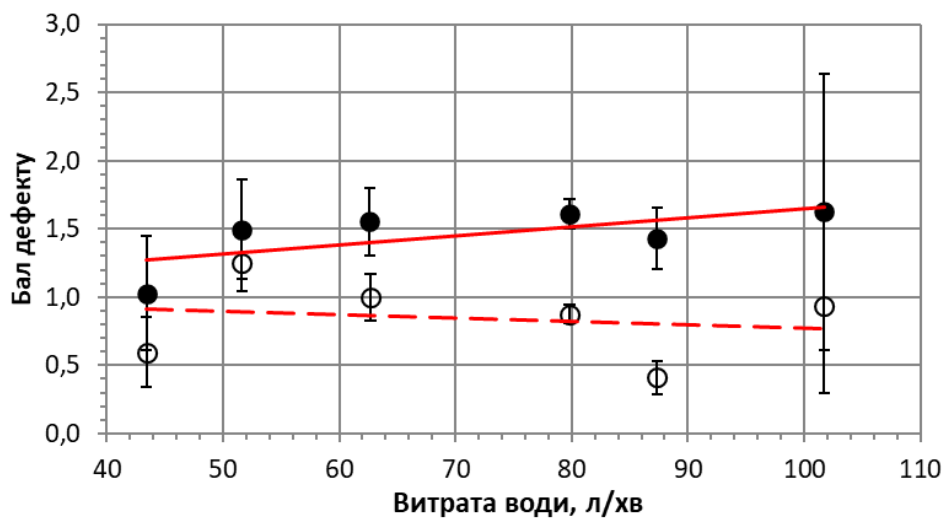
а)



\bullet ОП \circ ХН
 ОП = $0,0009Q + 1,334$ $R^2 = 0,0201$
 ХН = $0,006Q - 0,7499$ $R^2 = 0,789$

б)

Рисунок 2.6 – Вплив інтенсивності охолодження у ЗВО на розвиток дефектів: а) I секція, б) II секція, в) III секція, г) IV секція, аркуш 1



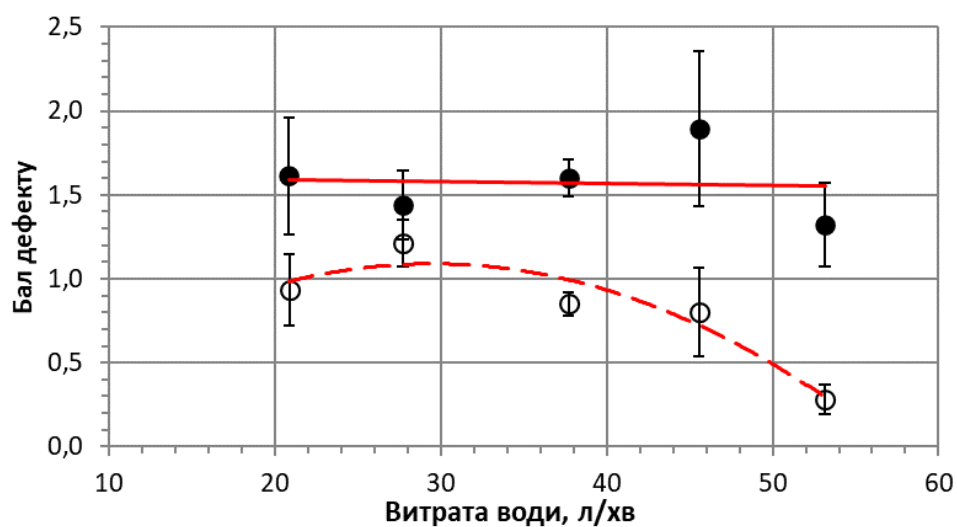
● ОП

○ ХН

$$\text{ОП} = 0,0066Q + 0,9896 \quad R^2 = 0,4359$$

$$\text{ХН} = -0,0026Q + 1,0271 \quad R^2 = 0,0359$$

в)



● ОП

○ ХН

$$\text{ОП} = -0,0011Q + 1,6129 \quad R^2 = 0,0043$$

$$\text{ХН} = -0,0014Q^2 + 0,0836Q - 0,1439 \quad R^2 = 0,8999$$

г)

Рисунок 2.6 – Вплив інтенсивності охолодження у ЗВО на розвиток дефектів: а) I секція, б) II секція, в) III секція, г) IV секція, аркуш 2

З рисунка 2.6 видно, що найбільший вплив на розвиток осьової пористості робить охолодження в III секції ЗВО. Це говорить про те, що формування цього дефекту відбувається саме в цій зоні. У той же час на формування хімічної неоднорідності інтенсивність вторинного охолодження має вкрай незначний вплив, характер якого, до того ж змінюється в різних секціях ЗВО. У I і II зонах збільшення вторинного охолодження сприяє незначному розвитку хімічної неоднорідності, у IV зоні навпаки – інтенсивне охолодження пригнічує розвиток хімічної неоднорідності у середньому більш ніж на пів бали.

Висновки за розділом

За результатами проведеного статистичного аналізу було встановлено, що на розвиток дефектів осьова пористість і хімічна неоднорідність мають вплив хімічний склад сталі та її температура, а також параметри розливання сталі на МБЛЗ. Для зменшення ураженості безперервнолитих заготовок наведеними вище дефектами доцільно рекомендувати наступні заходи:

- легування сталі з отриманням вмісту марганцю якомога ближче до нижнього його межі згідно зі стандартом;
- вміст хрому не нижче 0,03 %, але не вище 0,1 % (відповідно до стандарту);
- дотримання співвідношення в сталі вмісту марганцю і кремнію $[Mn]/[Si]$ в межах 2,8-3,0, а $[Mn]/[S]$ – щонайменше 150;
- вміст у сталі азоту не більше 0,003 %, а фосфору 0,015-0,02 %;
- зменшення перегріву сталі;
- зменшення інтенсивності охолодження у перших трьох секціях ЗВО та збільшення у четвертій.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Тема випускної кваліфікаційної роботи «Оцінка впливу параметрів безперервного розливання сталі на техніко-економічні показники процесу та якість заготовки», тому в розділі охорони праці розглянуті загальні умови праці в конвертерному цеху ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ», а також проаналізована техніка безпека, пожежна профілактика та захист навколишнього середовища.

3.1 Загальна характеристика умови праці

Згідно ДСП 173-96 [21] цех придатний до експлуатації. Для використання в холодну пору року приміщення обладнано опаленням згідно ДБН В.2.5-67:2013 [22].

На самопочуття і працездатність великий вплив роблять температура, вологість і швидкість руху повітря, тому мікроклімат у виробничих приміщеннях повинен відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99 [23]. Було встановлено, що дослідники в лабораторії виконують роботи категорія 2б, тому що енерговитрати організму людини становить до 170 Вт. Відповідно до цієї категорій допустимі норми мікроклімату в приміщенні на непостійних робочих місцях в залежності від пори року наведені в таблиці 3.1.

Джерелом інфрачервоних теплових виділень є кожух та розпечена горловина конвертера, газу, що відходять, розплавлений чавун, рідка сталь та шлак. Інтенсивність інфрачервоних теплових виділень працюючих від джерел випромінювання допускається інтенсивність опромінення до 140,0 Вт/м² по ДСН 3.3.6.042-99, а площа опромінення не повинна перевищувати 25 % поверхні тіла. Наслідком перевищення теплового навантаження є комплекс негативних ефектів для здоров'я і працездатності. Один з яких гострий тепловий стрес проявляється

перегріванням тіла (гіпертермією), зневодненням та порушенням водно-електролітного балансу, що може призводити до теплового виснаження й удару.

Таблиця 3.1 – Допустимі параметри мікроклімату

Період року	Температура, °С				Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/сек.
	Верхня межа		Нижня межа			
	На постійних робочих місцях	На непостійних робочих місцях	На постійних робочих місцях	На непостійних робочих місцях	На робочих місцях постійних і непостійних	На робочих місцях постійних і непостійних
Холодний	21	23	15	13	75	0,3
Теплий	27	29	15	15	70 при 25 °С	0,5-0,2

Фактори, що знижують продуктивність праці та створюють підвищений ризик травматизму і захворюваності, це фактори виробничого середовища к яким відноситься пил та газу. Наявність цих речовин в повітрі робочої зони обумовлено технологічними процесами та обладнанням. Для речовин, які можуть знаходитися в робочій зоні постійного або тимчасового перебування працівника встановлені ГДК, які наведені в «Державні медико-санітарні нормативи допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони» [24]. Так для агломераційного пилу ГДКр.з. = 4 мг/м³, ангідрида сірчаного ГДКр.з. = 1 мг/м³. У багатьох старих сталеплавильних цехах відсутня механічна вентиляція – видалення надлишкового тепла і забруднень здійснюється шляхом природної аерації.

Рівень шуму згідно ДСН 3.3.6.037-99 [25] не повинен перевищувати 80 дБа.

У цехах джерелами загальної вібрації є струси підлоги та інших конструктивних елементів будівлі внаслідок роботи обладнання, а

джерелами локальної вібрації - пневматичні обрубні молотки, трамбівки та ін. По способі передачі на людину вібрація підрозділяється на загальну і локальну. Загальна – діє через опорні поверхні ніг на весь організм у цілому. Локальна – на окремі ділянки тіла. Параметри загальної і локальної вібрації визначаються згідно ДСН 3.3.6.039-99 [26].

Найважливішим джерелом інформації, що поступає в мозок людини, є зір. Зі всієї інформації за рахунок зору людина одержує близько 95%. Разом з тим вплив на зір і загальний стан людини надає освітленість. По ДБН В 2.5-28-2018 [27] систему освітлення в приміщенні у світлий і темний час доби визначають на підставі характеристик і зорової роботи. На робочих поверхнях при штучному освітленні нормована освітленість повинна складати 200 лк для 7 характеристики зорової роботи, а КПО для приміщень з боковим освітленням 1,0%ен.

3.2 Техніка безпеки та пожежна профілактика

Працівники, під час прийняття на роботу та періодично, повинні проходити на підприємстві інструктажі з питань охорони праці, надання домедичної допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих згідно НПАОП 0.00-4.12-05 [27].

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці (далі - інструктажі) поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий.

Повторний інструктаж проводиться на робочому місці індивідуально з окремим працівником або групою працівників, які виконують однотипні роботи, за обсягом і змістом переліку питань первинного інструктажу.

Повторний інструктаж проводиться в терміни, визначені нормативно правовими актами з охорони праці, які діють у галузі, або роботодавцем (фізичною особою, яка використовує найману працю) з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах підвищеної небезпеки - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативно-правових актів з охорони праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативно-правових актів з охорони праці, що призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт підвищеної небезпеки, а для решти робіт - понад 60 днів.

Перелік професій та посад працівників, які звільняються від повторного інструктажу, затверджується роботодавцем. До цього переліку можуть бути зараховані працівники, участь у виробничому процесі яких не пов'язана з безпосереднім обслуговуванням об'єктів, машин, механізмів, устаткування; застосуванням приладів та інструментів, збереженням або переробкою сировини, матеріалів тощо.

Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі проводить безпосередній керівник робіт (начальник структурного підрозділу, майстер) або фізична особа, яка використовує найману працю.

Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі завершуються перевіркою знань у вигляді усного опитування або за допомогою технічних засобів, а також перевіркою набутих навичок безпечних методів праці, особою, яка проводила інструктаж.

При незадовільних результатах перевірки знань, умінь і навичок щодо безпечного виконання робіт після первинного, повторного чи позапланового інструктажів протягом 10 днів додатково проводяться інструктаж і повторна перевірка знань.

Устаткування лабораторії працює на напрузі до 1000В, згідно ПУЕ [28] по небезпеки поразки електричним струмом відносяться до небезпечних, тому в приміщенні є струмопровідна підлога, підвищена температура повітря, можливість одночасного дотику людини до тих, що мають з'єднання із землею корпусам технологічного устаткування з одного боку і до металевих корпусів електроустаткування або струмоведучим частин – з іншою.

Виробничий процес в конв'єртерному цеху з вибухопожежної та пожежної небезпеки, згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 відноситься до категорії "Г", тому що обробці піддаються негорючі матеріали в розпеченому стані [29].

Будівля побудовано з негорючих матеріалів (металоконструкцій, цегли, залізобетону, скла і т.д.) і, згідно з ДБН В.1.1-7-2016, має II ступінь вогнестійкості [30].

Пожежі в конв'єртерному цеху можуть виникати в результаті:

- спалахи електроустаткування при перевантаженнях, перегрівих або замиканнях (клас пожежі Е).

Для гасіння можливих пожеж в конв'єртерному цеху передбачені первинні засоби пожежогасіння в таблиці 3.2 згідно з НАПБ А.01.001-2014, НАПБ Б.01.008-2018 [31, 32].

Таблиця 3.2 – Засоби пожежогасіння в конв'єртерному цеху

№ з/п	Гранична захищена площа, м ²	Клас можливої пожежі	Мінімальна кількість порошкових вогнегасників								
			Переносний вогнегасник із зарядом вогнегасної речовини, кг					Пересувний вогнегасник із зарядом вогнегасної речовини, кг			
			5	6	8	9	12	20	50	100	150
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3.2	більше 50 до 100 включно	E	3	3	2	2	2	-	-	-	-

3.3 Захист навколишнього середовища

Забруднення повітря створює серйозну загрозу для здоров'я населення. Це викиди з вентиляційних, аспіраційних і димових систем металургійних виробництв, які забруднюють довкілля аерозолями і газами, що містять такі компоненти, як CO, SO₂, NO, NO₂. Виробництво чорної металургії має в викидах переважно оксид карбону CO, а кольорової металургії – оксид сульфур SO₂.

Навколо металургійних заводів формуються своєрідні техногенні зони, де повітря, вода, сніг, ґрунт, рослинність містять в собі широкий набір шкідливих речовин, включаючи і такі надзвичайно небезпечні, як свинець та ртуть. Переважно викиди складаються з оксидів карбону (67,5 % сумарного викиду в атмосферу), твердих речовин (15,5 %), діоксиду сульфур (10,8 %) та оксидів нітрогену (5,4 %).

Нарівні з газоподібним забрудненням велику проблему при очищенні газів і охороні повітряного басейну створюють дрібні частинки твердих речовин та краплини туману. Дими, які утворюються при виробництві та рафінуванні низькоплавких металів, таких як свинець, миш'як, берилій, кадмій і цинк, надзвичайно отруйні, тому їх очищення

необхідно проводити особливо старанно. Вміст кислотних туманів, наприклад, що утворюються при виробництві сірчаної чи фосфорної кислоти, дуже часто обмежується законодавством.

Чорна металургія країни споживає 13-15 % кількості води від загальних витрат усіх галузей промисловості. Нині питома витрата води на виготовлення однієї тони сталі, включаючи всі технологічні операції добування й підготовки руди, коксу та подальшої переробки чавуну на сталь, перевищує 260 м. Незважаючи на існуючі заходи з ефективного використання оборотної води, понад 4 % використаної води із природних джерел приходиться на чорну металургію.

Загальне водоспоживання в чорній металургії складає 1,7 млрд м/рік. Заміна в охолоджувальних системах холодної води на кип'ячу дозволить зменшити витрати води на охолодження більше, ніж у 60 разів за рахунок використання процесу пароутворення.

4 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

У даному розділі проведено техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження розроблених технологічних рішень у виробничий цикл конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Метою запропонованих удосконалень є мінімізація утворення внутрішніх дефектів у безперервнолитій сортовій заготовці з високовуглецевих марок сталі С80D2.

Запропонований комплекс заходів базується на результатах статистичного аналізу та математичного моделювання і включає:

- Оптимізацію хімічного складу: суворе дотримання співвідношень $[Mn]/[Si]$ (2,8–3,0) та $[Mn]/[S]$ (понад 150), а також зниження вмісту шкідливих домішок — азоту (до 0,003%) та фосфору (0,015–0,020%).
- Коригування температурного режиму: зниження температури перегріву сталі в промковші над ліквідусом з 50°C до 25°C.
- Модернізацію режимів вторинного охолодження: зменшення інтенсивності подачі води у перших трьох секціях ЗВО на 60, 50 та 50 л/хв. відповідно.

Очікуваний металургійний ефект полягає у суттєвому покращенні внутрішньої структури заготовки: зниженні бала осьової пористості з 1,6 до 1,4 та хімічної неоднорідності з 1,0 до 0,5. Економічна доцільність проєкту визначається двома основними напрямками:

1. Пряме зниження собівартості за рахунок скорочення витрат електроенергії на агрегаті піч-ковш та енерговитрат на насосних агрегатах МБЛЗ.
2. Збільшення чистого прибутку за рахунок підвищення виходу кондиційної заготовки першого сорту та зменшення втрат від внутрішнього браку.

Розрахунок базується на порівнянні базових показників роботи підприємства за 2024–2025 рр. [33] із прогностичними показниками після впровадження рекомендацій.

4.1 Характеристика вихідних даних для розрахунку

Економічне обґрунтування запропонованих заходів базується на фактичних виробничих показниках конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ». Об'єктом впровадження є технологічний цикл виплавки сталі в конвертері з подальшою позапічною обробкою на агрегаті «під-ковш» (АПК) та розливанням на МБЛЗ.

Вихідні дані для розрахунку сформовані на основі архівної звітності підприємства з урахуванням поточних цін на енергоносії та феросплави в Україні.

Таблиця 4.1 — Основні техніко-економічні показники виробництва заготовки (базовий варіант)

Показник	Одиниця виміру	Значення	Примітка
Річний обсяг виробництва сталей С80D2	т/рік	120 000	Умовно для однієї МБЛЗ
Собівартість 1 тонни рідкої сталі	грн/т	19 200	(орієнтовно)
Ціна реалізації заготовки (1 сорт)	грн/т	25 800	Преміальний сегмент (High Carbon)
Дисконт за пониження сортності (2 сорт)	%	12	Від ціни 1-го сорту
Питома витрата електроенергії на АПК	кВт·год/т	45	Базовий режим (перегрів 50°C)
Вартість електроенергії для промисловості	грн/кВт·год	7,4	З урахуванням тарифів 2025 р.

Технологічні параметри, що змінюються згідно з випускною роботою, та їх вплив на якісні показники металу наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 — Зміна технологічних та якісних параметрів

Параметр	Одиниця виміру	До впровадженн я	Після впровадженн я
Співвідношення [Mn]/[Si]	—	2,2 – 2,5	2,8 – 3,0
Вміст азоту [N]	%	0	≤ 0,003
Температура перегріву в промковші	°C	50	25
Витрата води в секціях 1, 2, 3 ЗВО	л/хв	240 / 200 / 180	180 / 150 / 130
Бал осьової пористості	бал	1,6	1,4
Бал хім. неоднорідності	бал	1	0,5

Обґрунтування економічних припущень:

1. Зменшення перегріву на 25°C: На умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» це дозволяє скоротити цикл обробки на АПК приблизно на 6–8 хвилин, що дає пряму економію електроенергії та графітованих електродів.

2. Коригування хімічного складу: Витримування вужчого діапазону [Mn]/[Si] та [Mn]/[S] потребує більш точного дозування феросплавів на АПК, проте не призводить до суттєвого подорожчання шихти, оскільки загальний обсяг легуючих залишається в межах стандарту EN 10016-4.

3. Ефект від якості: Зниження бала осьової ліквації та пористості є критичним для ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», оскільки це зменшує кількість розривів катанки при подальшому волочінні на

заводах клієнтів (Beckaert тощо). Це мінімізує витрати на рекламації та дозволяє уникнути переведення продукції в категорію «Commercial Quality».

4. Зниження витрати води: Окрім прямої економії електроенергії на насосах (сумарне зменшення на 160 л/хв. на один струмись), це покращує температурний профіль заготовки, зменшуючи поверхневі мікротріщини.

4.2 Розрахунок економії витрат електроенергії

1. Вихідні дані для розрахунку:

- Річний обсяг виробництва ($Q_{\text{рік}}$): 120 000 т/рік.
- Зниження температури перегріву (ΔT): 25 °C (з 50 до 25°C).
- Питома теплоємність рідкої сталі (c): 0,82 кДж/(кг·°C).
- ККД нагріву сталі на АПК (η): 0,35 (враховує теплові втрати, ККД трансформатора та випромінювання дуги).
- Вартість електроенергії для промислових підприємств ($C_{\text{ел}}$): 7,40 грн/кВт·год.

2. Визначення кількості теплової енергії, яку не потрібно витратити на нагрів 1 тонни сталі:

$$q = c \cdot \Delta T$$

$$q = 0,82 \cdot 25 = 20,5 \text{ МДж/т}$$

3. Переведення теплової енергії в електричну (з урахуванням ККД нагріву):

Оскільки 1кВт·год = 3,6МДж, питома економія електроенергії ($W_{\text{пит}}$) складе:

$$W_{\text{пит}} = \frac{q}{3,6 \cdot \eta}$$

$$W_{\text{пит}} = \frac{20,5}{3,6 \cdot 0,35} \approx 16,27 \text{кВт} \cdot \text{год/т}$$

4. Розрахунок річної економії електроенергії в натуральних показниках:

$$\Delta W_{\text{рік}} = W_{\text{пит}} \cdot Q_{\text{рік}}$$

$$\Delta W_{\text{рік}} = 16,27 \cdot 120000 = 1952400 \text{кВт} \cdot \text{год/рік}$$

5. Розрахунок річного економічного ефекту у грошовому еквіваленті:

$$E_{\text{рік}} = \Delta W_{\text{рік}} \cdot C_{\text{ел}}$$

$$E_{\text{рік}} = 1952400 \cdot 7,40 = 14447760 \text{грн/рік}$$

Окрім прямої економії електроенергії, зниження перегріву на 25°C дає наступні переваги для ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»:

- Економія графітованих електродів: Зниження часу нагріву на АПК (приблизно на 6–8 хвилин на плавку) зменшує питому витрату електродів. При ціні електродів близько 150 000 грн/т, це додасть ще близько 1,2–1,5 млн грн економії на рік.
- Збільшення стійкості футеровки: Менш інтенсивний нагрів і нижча температура металу в стальковші сповільнюють розмивання вогнетривів. Це дозволяє збільшити кампанію ковша на 2–3 плавки.
- Підвищення продуктивності МБРЗ: Зниження температури дозволяє розливати сталь на вищих швидкостях без ризику прориву скоринки заготовки в кристалізаторі.

- **Металургійний ефект:** Це головна мета вашої роботи. Нижча температура перегріву сприяє розширенню зони рівноосних кристалів, що безпосередньо призводить до зафіксованого вами зниження бала осьової пористості з 1,6 до 1,4.

Впровадження режиму «низького перегріву» дозволяє отримати прямий економічний ефект лише за статтею «Електроенергія» у розмірі 14,45 млн грн на рік. Сумарний ефект з урахуванням економії електродів та зниження браку (покращення сортності) перевищить 20 млн грн/рік.

4.3 Розрахунок ефекту від оптимізації витрат феросплавів

Для розрахунку економічного ефекту від оптимізації легування сталей С80D2 на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» важливо врахувати, що дотримання вузького діапазону $[Mn]/[Si]$ (2,8–3,0) та $[Mn]/[S]$ (≥ 150) дозволяє не лише покращити якість, а й стабілізувати витрату феросплавів, уникаючи перелегування «про запас».

Найбільш вагомий грошовий ефект тут дає підвищення точності попадання в заданий хімічний склад та оптимізація використання силікомарганцю замість дорогого високовуглецевого феромарганцю.

1. Вихідні дані та припущення:

- Річний обсяг виробництва ($Q_{\text{рік}}$): 120 000 т/рік.
- Основні феросплави: Силікомарганець (МnC17) та Феромарганець (ФМn78).
 - Середня ринкова ціна силікомарганцю (SiMn): ~42 000 грн/т.
 - Середня ринкова ціна феромарганцю (FeMn): ~56 000 грн/т.
 - Прийнято, що вдосконалення технології дозволяє знизити середній вміст марганцю в сталі на 0,05% (з 0,70% до 0,65%) при збереженні оптимального співвідношення $[Mn]/[Si]$ за рахунок зменшення «технологічного запасу» на угар.

2. Розрахунок економії марганцю на 1 тону сталі:

Зниження вмісту марганцю на 0,05% означає економію:

$$\Delta m_{Mn} = 1000 \text{ кг} \cdot 0,0005 = 0,5 \text{ кг Mn / т сталі.}$$

3. Перерахунок на масу феросплаву (на прикладі ФМн78 з вмістом Mn 78%):

Питома економія феросплаву (g_{ϕ}):

$$g_{\phi} = \frac{\Delta m_{Mn}}{0,78 \cdot \eta_{Mn}}$$

де $\eta_{Mn} = 0,95$ — коефіцієнт засвоєння марганцю на агрегаті піч-ковш.

$$g_{\phi} = \frac{0,5}{0,78 \cdot 0,95} \approx 0,675 \text{ кг/т.}$$

4. Економія на заміні дорогої шихти (оптимізація [Mn]/[Si]):

Завдяки стабілізації співвідношення [Mn]/[Si] на рівні 2,8–3,0, частина дорогого феромарганцю замінюється дешевшим силікомарганцем, який одночасно вводить і кремній, і марганець. Припустимо, що за рахунок цього питома вартість суміші феросплавів на 1 тону сталі знижується на 28 грн/т.

5. Розрахунок загального річного ефекту від економії феросплавів ($E_{\text{фер}}$):

$$E_{\text{фер}} = (g_{\phi} \cdot P_{\phi} + \Delta P_{\text{оптиміз}}) \cdot Q_{\text{рік}}$$

де P_{ϕ} — ціна феромарганцю (56 грн/кг); $\Delta P_{\text{оптиміз}}$ — економія від оптимізації суміші (28 грн/т).

$$E_{\text{фер}} = (0,675 \cdot 56 + 28) \cdot 120000$$

$$E_{\text{фер}} = (37,8 + 28) \cdot 120000 = 65,8 \cdot 120000 = 7896000 \text{ грн/рік.}$$

4.4 Вплив на витрати через обмеження вмісту фосфору та азоту

Важливо зазначити у роботі, що жорсткі вимоги до фосфору ($\leq 0,015 - 0,02\%$) та азоту ($\leq 0,003\%$) можуть призвести до деякого подорожчання рідкої сталі:

- Фосфор: Потребує використання більш чистих за фосфором шихтових матеріалів та інтенсивного дефосфорації у конвертері (що збільшує витрату вапна).
- Азот: Потребує більш ретельного захисту струменя аргоном та використання якісних (з низьким вмістом азоту) феросплавів.

Оцінка додаткових витрат:

Припустимо, що забезпечення низького вмісту [P] та [N] підвищує собівартість тонни сталі на 45 грн/т.

$$\text{Додаткові витрати} = 45 \cdot 120000 = 5400000 \text{ грн/рік.}$$

З таблиці 4.3 видно, що навіть з урахуванням витрат на отримання металу високої чистоти (за P та N), оптимізація температурного режиму та точне керування [Mn]/[Si] дає чистої економії понад 16,9 млн грн на рік для однієї МБРЗ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

4.5 Розрахунок економічного ефекту від покращення якості та сортності

Зниження бала осьової пористості з 1,6 до 1,4 та хімічної неоднорідності з 1,0 до 0,5 дозволяє значно зменшити частку заготовки,

яка переводиться у нижчий сорт або йде на переплав (брак) через невідповідність суворим вимогам стандартів (наприклад, EN 10016-4).

Таблиця 4.3 – Підсумкова таблиця економічної ефективності

Стаття економії / витрат	Сума, грн/рік
Економія електроенергії (зниження температури)	14 447 760
Оптимізація легування (Mn, Si)	7 896 000
Разом технологічна економія	22 343 760
Додаткові витрати на дефосфорацію та захист від [N]	-5 400 000
Чистий операційний ефект	16 943 760

1. Вихідні дані для розрахунку:

- Річний обсяг виробництва ($Q_{\text{рік}}$): 120 000 т/рік.
- Ціна кондиційної заготовки 1-го сорту (P_1): 25 800 грн/т.
- Ціна заготовки 2-го сорту (P_2): 22 704 грн/т (дисконт 12% за нижчу якість).
- Вартість внутрішнього браку (ціна брухту, $P_{\text{бр}}$): 10 500 грн/т.
- Покращення показників:
 - Зменшення переведення у 2-й сорт: на 2,5% від загального обсягу.
 - Зменшення остаточного браку (відсіву): на 0,5% від загального обсягу.

2. Ефект від зменшення переведення у нижчий сорт:

Цей ефект виникає за рахунок того, що заготовки, які раніше мали граничні показники ліквіації (1,0 бал), тепер гарантовано потрапляють у категорію 1-го сорту (0,5 бала).

$$\Delta E_{\text{сорт}} = Q_{\text{рік}} \cdot \Delta \%_{\text{сорт}} \cdot (P_1 - P_2)$$

$$\Delta E_{\text{сорт}} = 120000 \cdot 0,025 \cdot (25800 - 22704) = 3000 \cdot 3096 = 9288000 \text{ грн/рік.}$$

3. Ефект від зменшення внутрішнього браку:

Зниження бала осьової пористості зменшує ризик виявлення критичних пустот при ультразвуковому контролі або при подальшій прокатці катанки.

$$\Delta E_{\text{брак}} = Q_{\text{рік}} \cdot \Delta \%_{\text{брак}} \cdot (P_1 - P_{\text{бр}})$$

$$\Delta E_{\text{брак}} = 120000 \cdot 0,005 \cdot (25800 - 10500) = 600 \cdot 15300 = 9180000 \text{ грн/рік.}$$

4.6 Загальний річний економічний ефект

Підсумуємо всі розраховані складові (електроенергія, феросплави, якість та витрати на очищення сталі).

Таблиця 4.3 — Зведені техніко-економічні показники проекту

Стаття ефекту	Розрахункова сума, грн/рік
Економія електроенергії (зниження температури на 25°C)	14 447 760
Оптимізація легування $[Mn]/[Si]$ та $[Mn]/[S]$	7 896 000
Ефект від покращення якості (сортність + брак)	18 468 000
Додаткові витрати на азот та фосфор (дефосфорація)	-5 400 000
ЗАГАЛЬНИЙ РІЧНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ	35 411 760

Висновки до розділу

1. Впровадження запропонованих заходів на МБЛЗ №1 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» при виробництві високовуглецевих сталей С80D2 є економічно доцільним.
2. Головним джерелом економії є покращення якісних характеристик заготовки (18,47 млн грн), що підкреслює високу значущість металургійних досліджень, проведених у роботі.
3. Сумарний річний економічний ефект становить 35,41 млн грн.
4. Враховуючи, що запропоновані заходи мають переважно технологічний характер (зміна режимів охолодження, температур та хімічного складу) і не потребують капітального будівництва, термін окупності проєкту становить менше 2 місяців (витрати лише на коригування технологічних інструкцій та навчання персоналу).

ВИСНОВКИ

За результатами огляду літератури визначені основні параметри розливання сталі, що впливають на утворення осьової пористості. Встановлено, що електромагнітне перемішування з оптимальними параметрами має позитивний вплив на подрібнення структури сталі та пригнічення утворення таких дефектів, як хімічна неоднорідність та осьова пористість.

За результатами проведеного статистичного аналізу було встановлено, що на розвиток дефектів осьова пористість і хімічна неоднорідність мають вплив хімічний склад сталі та її температура, а також параметри розливання сталі на МБЛЗ. Для зменшення ураженості безперервнолитих заготовок наведеними вище дефектами доцільно рекомендувати наступні заходи:

- легування сталі з отриманням вмісту марганцю якомога ближче до нижнього його межі згідно зі стандартом;
- вміст хрому не нижче 0,03 %, але не вище 0,1 % (відповідно до стандарту);
- дотримання співвідношення в сталі вмісту марганцю і кремнію $[Mn]/[Si]$ в межах 2,8-3,0, а $[Mn]/[S]$ – щонайменше 150;
- вміст у сталі азоту не більше 0,003 %, а фосфору 0,015-0,02 %;
- зменшення перегріву сталі;
- зменшення інтенсивності охолодження у перших трьох секціях ЗВО та збільшення у четвертій.

Проаналізовані шкідливі і небезпечні чинники на ділянці безперервного розливання сталі та приділено увагу питанням захисту навколишнього середовища.

Головним джерелом економії є покращення якісних характеристик заготовки (18,47 млн грн), що підкреслює високу значущість металургійних досліджень, проведених у роботі. Сумарний річний економічний ефект становить 35,41 млн грн.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Єфімов В.А. Розливання та кристалізація сталі / В.А. Єфімов. - К.: Вища школа, 1976. - 552 с.
2. Swain, A.N.S.S., Ganguly, S., Sengupta, A. et al. Investigation of Corner Cracks in Continuous Casting Billet Using Thermomechanical Model and Plant Measurements. *Met. Mater. Int.* 28, 2434–2447 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01135-y>
3. Zhang, Qy., Wang, Lt., Wang, Xh. et al. Non-Metallic Inclusion Distribution in Surface Layer of IF Steel Slabs. *J. Iron Steel Res. Int.* 15, 70–74 (2008). [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60015-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60015-1)
4. Wang, Q., Zhang, L., Seetharaman, S. et al. Detection of Non-metallic Inclusions in Centrifugal Continuous Casting Steel Billets. *Metall Mater Trans B* 47, 1594–1612 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0625-x>
5. Masana Imagumbai, Tetsuo Takeda. Influence of calcium-treatment on sulfide- and oxide-inclusions in continuous-cast slab of clean steel-dendrite structure and inclusions. *ISIJ International*, 1994, 34(7): 574–583. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.574>
6. Kenney, M.P. An improved metal protective atmosphere casting technique for continuous casting inclusion control. *JOM* 20, 88–95 (1968). <https://doi.org/10.1007/BF03378687>
7. Yin, Sk., Luo, S., Zhang, Wj. et al. Numerical simulation of macrosegregation in continuously cast gear steel 20CrMnTi with final electromagnetic stirring. *J. Iron Steel Res. Int.* 28, 424–436 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42243-020-00490-1>
8. Adepu, M.K., Sahoo, P.P., Rout, B.K. et al. Prevention of Scum Formation and Entrapment in High Carbon Steel Billets. *J Fail. Anal. and Preven.* 17, 513–521 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0270-y>

9. B. Santillana, M. Dziuba, J. Madias, M. Oropeza, E. Fernandez, Minimisation of slag entrapment and cold drops in sidetur billets. *Ironmak. Steelmak.* 30(6), 511–515 (2003)
<https://doi.org/10.1179/030192303225004114>
10. Zeng, J., Chen, W., Yang, Y. et al. A Review of Permanent Magnet Stirring During Metal Solidification. *Metall Mater Trans B* 48, 3083–3100 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1077-7>
11. Hou, Z., Wen, G., Tang, P. et al. Periodicity of Carbon Element Distribution Along Casting Direction in Continuous-Casting Billet by Using Singular Spectrum Analysis. *Metall Mater Trans B* 45, 1817–1826 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0103-2>
12. H. Q. Yu, M. Y. Zhu (2012). Influence of electromagnetic stirring on transport phenomena in round billet continuous casting mould and macrostructure of high carbon steel billet. *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 39, No. 8, P. 574-584.
13. Dan-qing Jiang, Rui Wang, Qiong Zhang, Zhen-qiang Zhang, Ting-sheng Tu, Jiang Wang, Zhong-ming Ren (2019). Effect of final electromagnetic stirring on solidification microstructure of GCr15 bearing steel in simulated continuous casting. *Journal of Iron and Steel Research International*, DOI: 10.1007/s42243-019-00257-3
14. Смірнов О.М. Безперервне розливання сталі [Підручник] / О.М. Смірнов, С.В. Куберський, Є.В. Штепан. – Алчевськ: ДонДТУ, 2011. – 518 с.
15. Ботніков С.А. Сучасний атлас дефектів безперервнолитої заготовки і причини виникнення проривів скоринки металу, що кристалізується / С.А. Ботніков. – К.: Вища школа, 2011. - 97 с.
16. Борздова Т.В. Основи статистичного аналізу та обробка даних із застосуванням Microsoft Excel / Т.В. Борздова. – К.: Вища школа, 2011. - 75 с.

17. Кобзар А.І. Прикладна математична статистика. Для інженерів та науковців / А.І. Кобзар. - К.: Вища школа, 2006. - 816 с. Барковський В.В. Теорія ймовірностей та математична статистика / В.В. Барковський, Н.В. Барковська, О.К. Лопатін. – К.: ЦУЛ, 2002. – 448 с.
18. Організація експерименту [Учеб. посібник]/В.І. Баптизманський, Ю.М. Яковлев, Ю.С. Паніотів [та ін]. - К.: УМК ВО, 1992. - 244 с.
19. Яковлев В.Б. Статистика. Розрахунки в Microsoft Excel/В.Б. Яковлев. - М.: КолоС, 2005. - 352 с. Баптизманський В.І. Розливання та кристалізація сталі [Навч. посібник] / В.І. Баптизманський, Л.С. Рудой, Є.І. Ісаєв та ін. – К.: Вища школа, 1993. – 267 с.
20. Технології підвищення якості сталі [Підручник] / О.Г. Величко, О.М. Стоянов, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв. – Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 2016. – 196 с.
21. ДСП 173-96 Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів. – К.: Міністерство охорони здоров'я України, 1996. – 44 с.
22. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 141 с.
23. ДСН 3.3.6.042-99. "Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень". – К.: Держстандарт, 1999. – 13 с.
24. Державні медико-санітарні нормативи допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони. Наказ № 1192 від 09.07.2024. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 24 липня 2024 р. за № 1107/42452 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/134/f537873n32.docx>
25. ДСН 3.3.6.037-99. "Санітарні норми виробничого шуму, ультразвучу та інфразвучу". – К.: Держстандарт, 1999. – 23 с.

26. ДСН 3.3.6.039-99. "Санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації". – К.: Держстандарт, 1999. – 39 с.
27. ДБН В.25-28-2018. "Природне і штучне освітлення". – К.: Мінбуд. України, 2018. – 137 с.
28. Правила улаштування електроустановок. К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
29. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установ за вибухопожежної та пожежної безпеки.- К.: Міненергобуд України, 2016. – 34 с.
30. ДБН В.1.1.7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. –К.: УкНДІЦЗ України, 2016. – 31 с.
31. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні.- К.: Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій, 2014. – 126 с.
32. НАПБ Б.01.008-2018. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників.-К.: МНС України, 2018. – 30 с.
33. Металургійний завод «Каметсталь» освоєє виплавку заготовки підвищеної якості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://metallurgprom.org/en/news/ukraine/15042-metallurgicheskij-zavod-kametstal-osvaivaet-vyplavku-zagotovki-povyshennogo-kachestva.html> – Дата звернення: 11.06.2026.