

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

*«Допущено до захисту»*  
Гарант освітньої програми  
«Металургія чорних металів»

Христина МАЛІЙ

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
за підсумками виконання освітньо-професійної програми  
«Металургія чорних металів»  
за спеціальністю 136 Металургія

**на тему «Оцінка впливу витрати шлакоутворюючих на основні  
показники конвертерної плавки»**

Керівник роботи

Валерій МАМЕШИН

Консультант  
від бази практики

Віталій КРАВЧЕНКО

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

Здобувач

Сергій БАРАХОВ

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**

Барахову Сергію Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Оцінка впливу витрати шлакоутворюючих на основні показники конвертерної плавки

керівник роботи к. т. н., доц. Мамешин Валерій Сергійович  
(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, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики сталеплавильного виробництва, науково-технічні літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПрАТ «Камет-сталь» м. Кам'янське, результати власних досліджень, тощо

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Огляд основних видів шлакоутворюючих матеріалів сталеплавильного виробництва їх основні різновиди призначення та вимоги до їх якості. Аналіз особливостей технологій виготовлення та підготовки цих матеріалів. Аналітичні дослідження застосування основних різновидів шлакоутворюючих матеріалів у сталеплавильному виробництві. 2. Статистичний аналіз впливу витрати та якості шлакоутворюючих матеріалів на основні технологічні показники киснево-конверторного процесу для умов ПрАТ «Камет-сталь» м. Кам'янське. 3. Охорона праці Оцінка небезпечних та шкідливих факторів в умовах киснево-конверторного цеху ПрАТ «Камет-сталь». 4. Розрахунки економічної доцільності запропонованих рішень. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 4 слайди основної частини 1 слайд економічна частина

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

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Розділ 1	Мамешин В.С., доцент
Розділ 2	Мамешин В.С., доцент
Розділ 3	Мамешин В.С., доцент
Розділ 4	Мамешин В.С., доцент

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Аналітична частина	11.05 – 13.06.2026
2	Технологічна 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

Сергій БАРАХОВ

Керівник роботи

Валерій МАМЕШИН

## АНОТАЦІЯ

*Барахов Сергій Іванович.* Оцінка впливу витрати шлакоутворюючих на основні показники конвертерної плавки. - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

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 технологія виплавки сталі в кисневих конверторах, процес шлакоутворення та рафінування металу шлаком під час виплавки сталі.

Предметом дослідження є вплив витрати шлакоутворюючих на показники конвертерної плавки ПрАТ «Камет-Сталь».

У першому розділі було проаналізовано практичні та теоретичні основи шлакоутворення у киснево конверторному процесі. Надана загальна характеристика ролі та функціям шлаку в киснево-конверторному процесі, розглянуті особливості процесів дефосфорації та десульфурзації сталі, визначені вимоги до основних флюсуючих матеріалів. Ґрунтуючись на проведеному аналізі сформульована невирішена частина проблеми, а саме визначення впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на показники киснево-конверторного процесу в умовах ПрАТ КАМЕТ-СТАЛЬ, яку планується досліджувати та вирішувати в рамках кваліфікаційної роботи.

У другому розділі проведено аналіз впливу витрати вапна на основні показники киснево-конверторного процесу в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», визначено статистичні залежності цих показників від питомої витрат вапна та дані загальні рекомендації по його витраті.

У третьому розділі розглянуто економічна ефективність від запропонованих технологічних заходів (скорочення витрати шлакоутворюючих матеріалів).

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** КИСНЕВИЙ КОНВЕРТЕР, ШЛАКОУТВОРЮЮЧІ МАТЕРІАЛИ, ВАПНО, ОСНОВНІСТЬ ШЛАКУ, ВИХІД ПРИДАТНОГО МЕТАЛУ, КАМЕТ-СТАЛЬ

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ПРАКТИЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ШЛАКОУТВОРЕННЯ	8
1.1 Роль і функції шлаку в киснево-конвертерному процесі та теоретичні основи рафінування металу	8
1.2 Теоретичні основи процесу дефосфорації	8
1.3 Теоретичні основи процесу десульфурації	10
1.4 Характеристика та аналіз шлакоутворюючих матеріалів	11
1.4.1 Кальцієвмісні шлакоутворюючі матеріали	12
1.4.2 Магнієвмісні шлакоутворюючі матеріали	12
1.4.3 Розріджувачі шлаку та охолоджувачі	13
1.5 Вплив складу та фізико-хімічних властивостей шлаку на процеси дефосфорації та десульфурації металу	14
1.6 Постановка науково-технічної проблеми та формулювання задач дослідження	17
2. ОЦІНКА ВПЛИВУ ВИТРАТИ ШЛАКОУТВОРЮЮЧИХ НА ПОКАЗНИКИ ПЛАВОК	19
2.1 Основні шлакоутворюючі матеріали киснево- конверторного виробництва ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»	19
2.2 Вплив витрати вапна на показники конвертерної плавки ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»	21
2.2.1 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на вихід придатної сталі	22
2.2.2 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на температуру сталі на повалці	24
2.2.3 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на основність шлаку	26
2.2.4 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на вміст сірки в сталі	28
2.2.5 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на вміст фосфору в сталі	30

3. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД СКОРОЧЕННЯ ВИТРАТИ ШЛАКОУТВОРЮЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ	33
3.1 Економічний ефект запропонованої дії	33
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	36
4.1 Аналіз умов праці та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів у киснево-конвертерному цеху	36
4.1.1 Виробничий мікроклімат	36
4.1.2 Про запиленість повітряного середовища	36
4.1.3 Хімічні фактори (токсичні гази)	37
4.1.4 Технічні та організаційні заходи щодо зниження дії шкідливих виробничих факторів	38
4.1.5 Охорона навколишнього середовища	40
ВИСНОВКИ	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	44

## ВСТУП

Поточний стан чорної металургії України, що працює в умовах жорстких дефіцитів коксівного вугілля, енергетичних ресурсів та обмеженості транспортних систем України, вимагає безперервного поліпшення економічної ефективності технологічних процесів з метою зниження собівартості готової продукції. При цьому мають бути обов'язково збережені її висока якість та відповідність міжнародним стандартам якості.

Одним із найбільш ресурсномістких та відповідальних переділів у ланцюжку виробництва сталі є киснево-конвертерний процес. Його ефективність значною мірою визначається шлаковим режимом плавки, який безпосередньо впливає на рафінування металу від шкідливих домішок (фосфору та сірки), вихід придатного рідкого металу, витрату феросплавів, а також на експлуатаційну стійкість вогнетривкої футеровки конвертера.

Основним інструментом керування шлаковим режимом є регламентація витрати та раціоналізація складу шлакоутворюючих матеріалів (насамперед вапна, доломіту).

Впровадження концепцій ощадного виробництва та ресурсозберігаючих технологій вимагає пошуку оптимального балансу між мінімізацією витрат сировини та досягненням заданих технологічних показників плавки. У зв'язку з цим, оцінка впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на основні показники конвертерної плавки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» є актуальним завданням, що має суттєве практичне та наукове значення для сталого функціонування металургійного підприємства.

Мета дослідження полягає у оцінці впливу сумарної витрати шлакоутворюючих матеріалів на основні показники конвертерної плавки.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Здійснити аналіз науково-технічної літератури та нормативної документації щодо теоретичних основ формування шлаку

та досвіду застосування основних шлакоутворюючих матеріалів у конвертерному виробництві.

2. Проаналізувати поточний стан технології киснево-конвертерної плавки та фактичні витрати флюсів у конвертерному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

3. Оцінити вплив витрати шлакоутворюючих матеріалів на вихід придатного металу, основність шлаку, температуру сталі на випуску та вміст в готовій сталі сірки та фосфору.

4. Розробити практичні рекомендації щодо коригування шлакового режиму з метою зменшення виробничих витрат та оцінити їх потенційну ефективність.

Об'єкт дослідження – технологія виплавки сталі в кисневих конверторах, процес шлакоутворення та рафінування металу шлаком під час виплавки сталі.

Предмет дослідження – вплив витрати шлакоутворюючих на показники конвертерної плавки ПрАТ «Камет-Сталь».

Для вирішення поставлених завдань у роботі використано підхід, що включає:

- Ознайомлення із електронними паспортами плавок, виокремлення масиву паспортів часто виплавляємої марки сталі;
- Статистичну обробку технологічних даних із паспортів плавок та побудову графіків залежності витрат флюсуючих на характеристики шлаку та кінцеві показники плавки для оцінки їх значущості по впливу на них.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці обґрунтованих рекомендацій з раціоналізації витрати шлакоутворюючих матеріалів для умов конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», впровадження яких дозволить знизити витрату сировинних матеріалів на плавку, зменшити втрати заліза зі шлаком та підвищити загальну ресурсоефективність процесу.

## 1. ПРАКТИЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ШЛАКОУТВОРЕННЯ

### 1.1 Роль і функції шлаку в киснево-конвертерному процесі та теоретичні основи рафінування металу

У киснево-конвертерному процесі формування активного гомогенного шлаку з рухомою структурою є однією з найважливіших умов успішного проведення плавки. Шлак являє собою розплав оксидів, силікатів, фосфатів та сульфідів.

Шлак виконує низку важливих технологічних функцій, а саме:

1. Рафінування металу. Видалення з металу шкідливих домішок, насамперед фосфору та сірки.

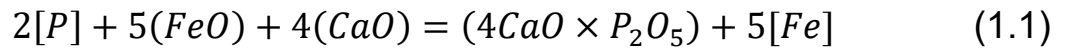
2. Збереження температури розплаву та захист від атмосферних газів. Мінімізація теплових втрат у навколишнє середовище, а також запобігання безпосередньому контакту рідкої сталі з атмосферою, що попереджує насичення металу азотом та воднем.

3. Регулювання гідродинаміки ванни. Процес «спінювання» шлаку в середині продувки сприяє зменшенню налипань металу на кисневу фурму та покращенню перемішування [1].

### 1.2 Теоретичні основи процесу дефосфорації

Видалення фосфору є першочерговою задачею киснево-конвертерної плавки, оскільки цей елемент викликає холодноламкість сталі. Фосфор є поверхнево-активною домішкою, і його окиснення відбувається на межі розділу фаз «метал–шлак» за участю оксидів заліза та оксиду кальцію [1].

Термодинаміку реакції дефосфорації в узагальненому вигляді описують наступним рівнянням:



де  $[P]$  – вміст фосфору в металі, %;

$(FeO)$  – вміст монооксиду заліза в шлаку, %;

$(CaO)$  – вміст оксиду кальцію в шлаку, %;

$(4CaO * P_2O_5)$  – міцний фосфат кальцію, що зв'язується у шлаковій фазі, %;

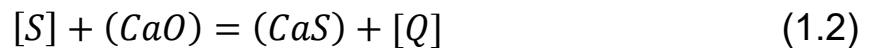
$[Fe]$  – залізо металевої ванни, %.

Аналіз рівняння (1.1) дозволяє виділити три основні термодинамічні умови, що забезпечують високий ступінь дефосфорації сталі:

- Висока основність шлаку (висока концентрація активного  $CaO$ ). Вільний оксид кальцію необхідний для зв'язування вищих оксидів фосфору ( $P_2O_5$ ) у міцні хімічні сполуки. Зниження активності  $CaO$  у шлаку призводить до зворотного переходу фосфору в метал.
- Високий окиснювальний потенціал шлакової фази (високий вміст  $FeO$ ). Оскільки реакція дефосфорації є окиснювальним процесом, наявність достатньої кількості оксидів заліза є рушійною силою для переведення фосфору з металу в оксидну фазу.
- Знижена температура процесу. Реакція дефосфорації є екзотермічною (протікає з виділенням тепла), тому з термодинамічної точки зору низькі та помірні температури на початку та в середині продувки сприяють ефективнішому видаленню фосфору. Наприкінці плавки, коли температура металу перевищує  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ , висока якість дефосфорації утримується лише за рахунок високої основності та окисленості шлаку [1].

### 1.3 Теоретичні основи процесу десульфурації

На відміну від дефосфорації, видалення сірки (яка викликає червоноламкість сталі) є відновлювальним процесом. Сірка розподіляється між металом і шлаком відповідно до закону розподілу Нернста. Реакція десульфурації на межі «метал–шлак» протікає за наступною схемою:



де  $[S]$  – вміст сірки в металі, %;

$(CaS)$  – сульфід кальцію, що переходить у шлак, %;

$[O]$  – вміст кисню в металі, %.

Коефіцієнт розподілу сірки між шлаком і металом значною мірою залежить від фізико-хімічних властивостей розплаву. Для ефективного протікання десульфурації необхідні такі умови:

- Висока основність шлаку. Як видно з рівняння (1.2), іони кальцію безпосередньо беруть участь у заміщенні сірки. Чим вища активність вільного  $CaO$ , тим зміщена реакція вбік утворення сульфиду кальцію.
- Мінімальна окисленість шлаку та металу (низький вміст  $FeO$  та  $[O]$ ). Оскільки кисень є продуктом реакції десульфурації, висока концентрація  $[O]$  у металі та  $FeO$  у шлаку гальмує процес видалення сірки. Це створює фундаментальне технологічне протиріччя киснево-конвертерної плавки: умови, сприятливі для дефосфорації (високий вміст  $FeO$ ), є несприятливими для десульфурації.
- Висока температура. Реакція десульфурації є ендотермічною, тому підвищення температури металургійної ванни наприкінці плавки стимулює перехід сірки в шлак.

- Висока рідкотекучість шлаку. Оскільки дифузія сірки в іонному розплаві протікає повільно, шлак повинен мати низьку в'язкість для полегшення масопереносу на межі розділу фаз [1].

Таким чином, ефективне одночасне видалення фосфору та сірки в кисневому конвертері вимагає точного та динамічного керування витратою шлакоутворюючих матеріалів для формування шлаку з оптимальною траєкторією зміни основності, в'язкості та окисленості впродовж усієї плавки [2].

#### 1.4 Характеристика та аналіз шлакоутворюючих матеріалів

Ефективність формування конвертерного шлаку з необхідними рафінувальними та фізико-хімічними властивостями безпосередньо залежить від якості, хімічного складу та від здатності шлакоутворюючих матеріалів, що вводяться у ванну агрегату під час продувки, розчинятися (просочуватися металом) у ній.

Основним завданням використання флюсів є швидке формування рідкотекучого високоосновного шлаку на початковому етапі плавки та підтримання його гомогенності протягом усього процесу обробки металу. [2]

Перелік шлакоутворюючих матеріалів киснево-конвертерного виробництва класифікують за їхнім функціональним призначенням на такі групи:

- основні флюси (кальцієвмісні матеріали);
- магнійвмісних матеріали (для захисту вогнетривів);
- залізо- та фторвмісні розріджувачі шлаку (окиснювачі та охолоджувачі).

### 1.4.1 Кальцієвмісні шлакоутворюючі матеріали

Основним джерелом оксиду кальцію ( $\text{CaO}$ ), який забезпечує високу основність шлаку ( $B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ ), є обпалене (металургійне) вапно. Швидкість розчинення вапна в первинному залізисто-кремністому шлаку є лімітуючим фактором усього процесу шлакоутворення. Кінетика асиміляції вапна визначається його реакційною здатністю, яка залежить від технології випалу вапняку.

Виділяють два основні типи вапна:

1. *М'яковипалене вапно*. Отримується у шахтних або обертових печах при температурах 950–1150 °С. Воно має високу пористість (до 30–40%), велику питому поверхню та високу реакційну здатність (час гасіння становить менше 3–5 хвилин). Таке вапно швидко змочується залізистим розплавом і розчиняється в конвертері за 3–5 хвилин продувки, забезпечуючи ранню дефосфорацію.

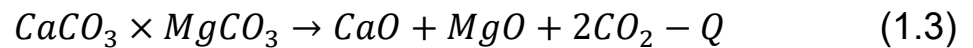
2. *Твердовипалене (перепалене) вапно*. Формується при температурних перегрівах випалювальних агрегатів (понад 1250 °С). Воно характеризується високою щільністю, закритими порами та низькою реакційною здатністю. На поверхні такого вапна під час контакту з первинним шлаком швидко утворюється тугоплавка оболонка двокальцієвого силікату ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , температура плавлення близько 2130 °С), яка блокує подальший дифузійний масообмін і сповільнює розчинення грудочок матеріалу, призводячи до появи нерозчиненого вапна («круп») наприкінці плавки [2].

### 1.4.2 Магнієвмісні шлакоутворюючі матеріали

Для зниження корозійного зносу магнезіально-вуглецевої футеровки конвертера необхідно забезпечити швидке насичення шлаку оксидом магнію ( $\text{MgO}$ ) до межі його термодинамічного насичення

(зазвичай 6–8%, залежно від температури та основності). Основними джерелами потрапляння MgO в метал є сирий чи випалений доломіт.

Використання сирого доломіту ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) супроводжується значними ендотермічними ефектами внаслідок реакцій декарбонізації в порожнині конвертера:



Це збільшує витрати тепла на плавці та потребує додаткової витрати чавуну як носія тепла. Тому найбільш ресурсоефективним рішенням, що відповідає сучасним концепціям ощадливого виробництва на підприємствах Групи Метінвест, є широке застосування випаленого доломіту. Він містить 35–40% MgO та 50–55% CaO, вводиться в перші хвилини продувки і дозволяє стабілізувати вміст магnezії у шлаку без додаткових витрат тепла на декарбонізацію, що суттєво підвищує кампанію роботи футеровки агрегату. [5]

#### 1.4.3 Розріджувачі шлаку та охолоджувачі

Для прискорення наведення рідкотекучого шлаку за умов недостатньої або низької концентрації кремнію в чавуні традиційно використовували плавиковий шпат (флюорит,  $\text{CaF}_2$ ). Іони фтору руйнують міцні кремній-кисневі комплекси (сіткову структуру силікатів), різко знижуючи в'язкість шлаку. Однак, плавиковий шпат є екологічно небезпечним матеріалом (викликає виділення токсичних для людини фторидів в атмосферу) та інтенсивно руйнує футеровку на рівні шлакового поясу [3,4].

Крім того, він є досить вартісним матеріалом, тому використання його зараз не носить систематичного характеру.

У зв'язку з цим сучасна технологія киснево-конвертерної плавки орієнтована на повну або часткову заміну плавикового шпату альтернативними матеріалами:

- *Залізорудні окатиші та окалина.* Вони виконують подвійну роль: діють як охолоджувачі та швидко підвищують концентрацію (FeO) у первинному шлаку на 3–5 хвилині плавки, що знижує температуру плавлення силікатної системи та сприяє асиміляції вапна без використання фтору.

- *Синтетичні багатокomпонентні флюси.* Матеріали на основі систем CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> або префлюсовані суміші, що мають низьку власну температуру плавлення (1250–1350 °C) і забезпечують високу швидкість формування шлаку на початковому етапі продувки ванни. [2]

Таким чином, оптимізація кількості поданих до конвертера вапна та доломіту полягає не просто у механічному підборі маси, в керуванні компонентним складом матеріалів (співвідношенням вапна та випаленого доломіту) із урахуванням їхньої реакційної здатності, що дозволяє мінімізувати матеріальні та теплові втрати процесу. [2]

### 1.5 Вплив складу та фізико-хімічних властивостей шлаку на процеси дефосфорації та десульфурзації металу

Ефективність рафінування сталі від фосфору та сірки безпосередньо визначається не просто масою введених шлакоутворюючих, а поточними фізико-хімічними властивостями шлакового розплаву: його основністю, окисленністю, в'язкістю та оптичною основністю.

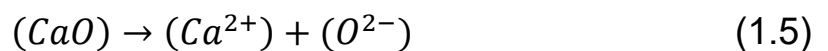
Для кількісної оцінки рафінувальної здатності шлакової фази у металургійній практиці використовують коефіцієнти розподілу елементів між шлаком і металом. Коефіцієнт розподілу фосфору  $L_P$  визначається за формулою:

$$L_p = \frac{P_2O_5}{P} \quad (1.4)$$

де  $P_2O_5$  – концентрація оксиду фосфору в шлаку, %;

$[P]$  – концентрація фосфору в металевій ванні, %.

Основним чинником, що визначає чисельне значення  $L_p$ , є основність шлаку ( $B$ ). Встановлено, що при підвищенні основності від 1,0 до 2,5 спостерігається інтенсивне зростання коефіцієнта розподілу фосфору за рахунок збільшення концентрації вільних іонів кисню ( $O^{2-}$ ), які утворюються при дисоціації  $CaO$ : [8, 9],



Ці іони беруть участь у зв'язуванні фосфору в міцні аніонні комплекси  $PO_4^{3-}$ . Проте при досягненні основності понад 3,0–3,5 подальше зростання  $L_p$  сповільнюється або припиняється. Це пояснюється тим, що надмірна кількість  $CaO$  не встигає розчинитися у розплаві, підвищує гетерогенність шлаку та його в'язкість, що різко погіршує дифузійні умови перенесення фосфору на межі «метал–шлак» [1,9].

Другим вирішальним фактором дефосфорації є окисленість шлаку, що виражається через сумарний вміст оксидів заліза ( $FeO$ ). Зі зростанням концентрації залізистих оксидів збільшується хімічна рушійна сила окиснення фосфору. Водночас надмірна окисленість призводить до розведення шлаку та зниження активності  $CaO$ . Оптимальним для умов кисневого конвертера є вміст ( $FeO$ ) у межах 12–18% на фінальній стадії плавки. [2]

Для оцінки десульфурзації використовують коефіцієнт розподілу сірки  $L_s$ :

$$L_s = \frac{(S)}{[S]} \quad (1.6)$$

де (S) – вміст сірки в шлаку, %;

[S] – вміст сірки в металі, %.

Залежність  $L_s$  від складу шлаку має принципово інший характер порівняно з фосфором. Оскільки десульфурація є відновлювальним процесом, підвищення окисленості шлаку (FeO) негативно впливає на розподіл сірки. [3]

Для досягнення максимальних значень  $L_s$  шлак повинен мати високу основність (що досягається повним розчиненням вапна) та мінімальну активність кисню, що є складним завданням в умовах високої окисної здатності кисневого конвертера. На практиці в конвертері вдається досягти  $L_s$  у межах 4–8, тоді як для глибокої дефосфорації значення  $L_s$  досягають 50–150. [3]

Важливою фізичною властивістю є в'язкість шлаку ( $\eta$ ). Гомогенний шлак повинен мати низьку в'язкість (бути рідкотекучим) для забезпечення високої швидкості дифузії іонів до межі розділу фаз. При зниженні температури або при надмірній присадці сирих шлакоутворюючих матеріалів у шлаку з'являються зважені тверді частинки ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  або магнезіальна шпінель  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), що призводить до різкого «згортання» шлаку, збільшення його ефективної в'язкості та блокування процесів рафінування.

Таким чином, керування витратою шлакоутворюючих матеріалів має забезпечувати такий хід зміни складу шлаку, за якого в перші хвилини плавки мінімізується в'язкість і максимізується вміст (FeO) для раннього видалення фосфору, а наприкінці плавки забезпечується висока основність без переходу шлаку в гетерогенний (нерозчинений) стан [2].

## 1.6 Постановка науково-технічної проблеми та формулювання задач дослідження

Шлаковий режим киснево-конвертерної плавки є базовим технологічним інструментом, який визначає техніко-економічну ефективність сталеплавильного переділу. Термодинамічні закономірності процесів рафінування металу від фосфору і сірки, тепловий баланс процесу, стійкість вогнетривкої футеровки та вихід придатного рідкого металу перебувають у складній нелінійній залежності від кількості, складу та динаміки розчинення шлакоутворюючих матеріалів.

На сучасному етапі розвитку металургійного комплексу України, зокрема на підприємствах Групи Метінвест, впроваджується концепція операційного поліпшення та ощадливого виробництва, спрямована на жорстке зниження собівартості продукції («cost killing»). У конвертерному виробництві одним із головних резервів зниження витрат є мінімізація питомої витрати сировинних матеріалів на плавку, насамперед металургійного вапна.

Проте механічне зменшення маси присадок вапна створює низку технологічних питань, які складають сутність незадоволеної науково-технічної проблеми:

1. Зниження рафінувальної здатності. Зменшення витрати  $\text{CaO}$  за незмінної маси кремнію в чавуні призводить до падіння кінцевої основності шлаку, що термодинамічно обмежує коефіцієнти розподілу фосфору ( $L_P$ ) та сірки ( $L_S$ ) і унеможлиблює виплавку високоякісних марок сталі.

2. Уповільнення кінетики шлакоутворення. При низьких витратах вапна траєкторія формування шлаку зміщується в область тугоплавких сполук (двокальцієвого силікату), що збільшує

гетерогенність та в'язкість розплаву, подовжує час формування активного шлаку та призводить до виносів металу.

3. Ерозія футеровки. Зниження загального об'єму шлаку за недостатньої кількості магнійвмісних флюсів (випаленого доломіту) зміщує баланс насичення розплаву оксидом магнію (MgO). Недонасичений магnezією шлак починає агресивно розчиняти MgO з периклазо-вуглецевих вогнетривів стінок та днища конвертера, різко знижуючи стійкість агрегату.

Таким чином, у практиці роботи конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» існує реальне технологічне протиріччя між необхідністю мінімізації витрат шлакоутворюючих матеріалів та потребою у забезпеченні високих показників рафінування металу від шкідливих домішок.

Для вирішення зазначеної проблеми та досягнення мети кваліфікаційної роботи у другому (технологічному) розділі було сформульовано та поставлено для виконання такі задачі дослідження:

1. Охарактеризувати фактичні параметри киснево-конвертерного процесу та базовий флюсовий режим, що застосовується в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

2. Обчислити економічний ефект від зниження питомої витрати шлакоутворюючих на прикладі однієї досліджуваної марки в масштабах виробництва.

Ми розглянули, як це все влаштовано загалом і організовано та працює на інших підприємствах та у світі. А тепер ми розглянемо, як це відбувається на ПрАТ «Камет-Сталь».

## 2. ОЦІНКА ВПЛИВУ ВИТРАТИ ШЛАКОУТВОРЮЮЧИХ НА ПОКАЗНИКИ ПЛАВОК

### 2.1 Основні шлакоутворюючі матеріали киснево-конверторного виробництва ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

В умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» основним шлакоутворюючим матеріалом, що використовуються у киснево-конверторному процесі є доломітизоване вапно 1 сорту марки ІСД-1 та/або ІС-1 власного виробництва з ділянки вапняко-випалювальних печей, виготовлене за ТУ У 26.5-00193714-042-2001. Допускається використовувати вапно ВК-1 за ДСТУ 3981-2000. Фракційний склад вапна 10-40 мм, шахтного 10-80 мм, кількість фракції менше 10 мм і більше 40 мм не більше 10% кожної.

Таблиця 2.1 – Вимоги до якості вапна

Показники			ІСД-1	ВК-1	ІС-1	ІС-2
(СаО+МgО)	%	Не менше	92,0	92,0	92,0	88,0
Сірка	%	Не більше	0,060	0,040	0,060	0,080
Фосфор	%	Не більше	0,010	0,070	0,010	0,10
SiO <sub>2</sub>	%	Не більше	2,0	1,8	1,8	2,0
MgO	%	Не більше	6-22	3	6	6
Коливання MgO	%	Не більше	3,0	-	-	-
Час гашення	хв	Не більше	2	5	2	-
Витрати при прокалюванні	%	Не більше	4	5	5	8

Вапно надходить у конвертерний цех свіжообпаленим (не пізніше 8 годин після випалу). Термін зберігання у конвертерному цеху - не більше доби. В умовах дефіциту вапна, що виробляється в печах, що обертаються, допускається часткове застосування вапна марки ІС-2, що виробляється в шахтних печах.

Якість вапна, що надходить з ділянки вапняко-випалювальних печей конвертерного цеху контролюють за 3-4 точковими пробами, відібраними працівником конвертерного цеху один раз на зміну в присутності контролера відділу технічного контролю з бункерів вертикального тракту сипких матеріалів та феросплавів. Для відбору точкових проб вапна використовують ємності щонайменше 1 дм<sup>3</sup>. Відібране в ємності вапно змішують, подрібнюють до фракції менше 10 мм, методом квартування доводять до маси 0,3-0,5 кг, подрібнюють до фракції менше 3 мм, упаковують в закриту ємність, маркують із зазначенням дати, часу і місця відбору і відправляють на хімічний аналіз [6,7].

Позаплановий контроль якості вапна проводити у разі завантаження шахтного або привізного вапна, при зниженні основності.

Результати аналізу проб лаборанти хімічної лабораторії вносять до бази даних хім.аналізів та відправляють майстру виробництва. Контролер ВТК записує результати хім.аналізів в паспорт плавки.

Для прискорення шлакоутворення та розрідження шлаку в процесі продування застосовують плавиковий шпат у шматках розміром не більше 100 мм та вмістом фтористого кальцію не менше 65% [6].

Як замітник плавикового шпату для покращення шлакоутворення допускається використовувати брикети дистенсиліманитового концентрату (ТУ У 13.2-36639536-001:2010), брикети ставролітового концентрату (ТУ У 0019694-146-96).

Холодний конвертерний шлак зі шлакових ям з вологістю не більше 5% у шматках до 30 мм допустимо використовувати для коригування теплового балансу та шлакового режиму плавки.

Проби матеріалів для визначення вологи відбирає з приймальних бункерів сушильник ділянки обертових печей ОПІ КЦ від кожної партії. При підвищеній вологості проводити просушування матеріалу в сушильних барабанах ОПІ КЦ із контролем залишкової вологи [6].

Для підвищення стійкості футерування і рафінуючої здатності шлаків використовуються такі матеріали, які забезпечували б підвищення вмісту MgO у шлаках після продування, а саме:

- обпалений доломіт (ГСТУ 322-14-005-97) фракції 2-20 мм;
- м'якообпалений доломіт (ТУ 26.52.0-1-98) фракцій 10-80 мм марки ІСД-1;
- прозалізний доломітовий флюс марки К фракції 5-40 мм за ТУ 14.1- 00191856-007-2005;
- магнезіальні флюси та гранули фракції 10-60 мм. [6]

Дозволяється замість магнезитового порошку використовувати подрібнену б/в цеглу на периклазовій основі фракцією до 50 мм з вмістом води до 5% у кількості до 2,5 кг/т.

В умовах нестачі вапна допускається заміна її частини вапняком марки С-1 фракції 20-60 мм за ТУ У14.1-00191827-001-2003.

В якості навуглержувача використовувати коксову дрібницю. Допускається застосовувати антрацит марки АШ при виплавці низькосірчистих марок, графітову крихту з вмістом сірки не більше 0,3%, фракцією 0,2-10 мм.

Рекомендовані вимоги до навуглержувачів: фракція - 0,5-10 мм, вміст, не більше %: золи 12, води 1.0, летких 15, сірки 0,5 [6].

## 2.2 Вплив витрати вапна на показники конвертерної плавки ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

Для оцінки витрати вапна було обрано плавки, по результатам яких було отримано конструкційну сталь марки ЗПСс14М. Було проаналізовано 291 паспорт плавки. Плавки проведені у 2022 році у кисневому конвертері верхнього продування номінальною місткістю 250 тон.

Було виконано аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на:

- основність шлаку;
- температуру сталі на повалці;
- вихід придатного металу;
- вміст в готовій сталі сірки та фосфору.

### 2.2.1 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на вихід придатної сталі

Вихід придатної сталі є одним із найважливіших показників роботи киснево-конвертерного процесу. Зазвичай у киснево-конверторному процесі вихід придатної сталі складає від 89 до 91%.

По проаналізованим плавкам гістограма розподілення показників виходу придатної сталі наведено на рисунку 2.1. Вихід придатного коливається в інтервалі від 85 до 93%.

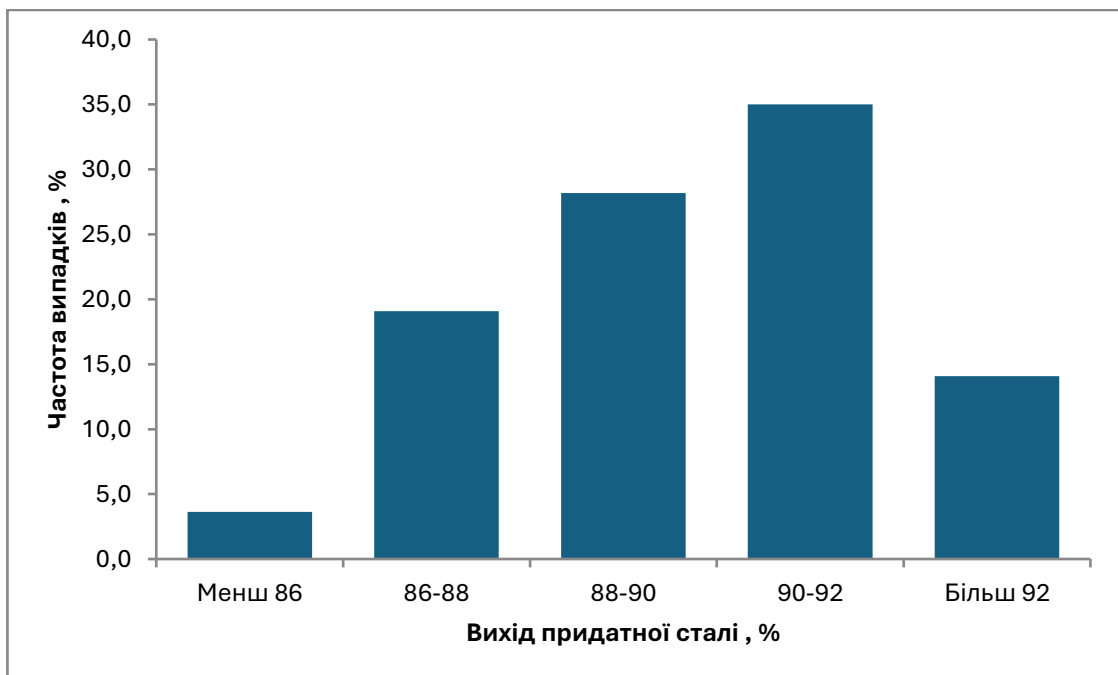


Рисунок 2.1 - Частотний розподіл виходу придатної сталі

Найчастіше показник виходу придатного становить 88-90% в 28,8% плавок, та 90-92% у 35% плавок. Значно рідше вихід придатного складав >92%, - у 14% плавок.

На рисунку 2.2 показано вплив витрати шлакоутворюючих на вихід придатної сталі.

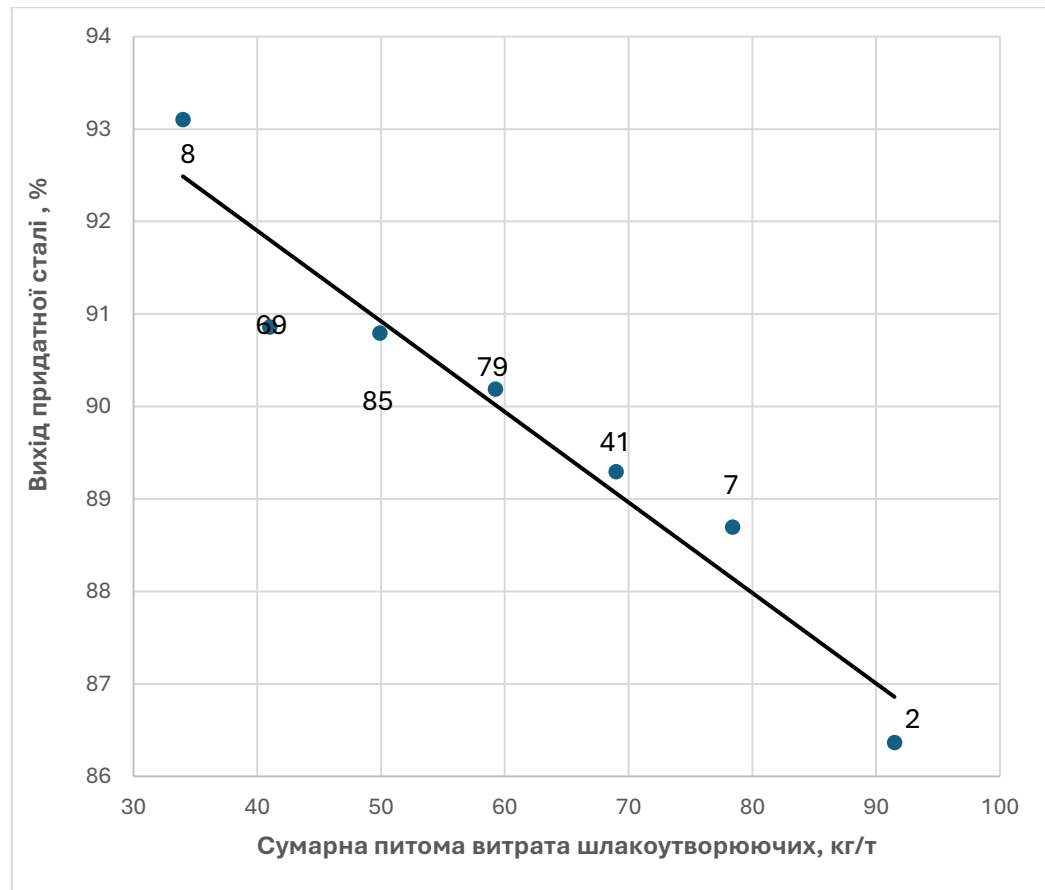


Рисунок 2.2 - Вплив витрати шлакоутворюючих на вихід придатної сталі; цифри біля точок – кількість усереднених плавок

Залежність сумарної витрати шлакоутворюючих на вихід придатної сталі описується рівнянням:

$$M_{\text{прид.сталі}} = -0,0979m_{\text{сум.шлак.}} + 95,816 \quad (2.1)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння 2.1 складає  $R^2 = 0,9272$

На рисунку 2.2 означена графічно чітка залежність: лінія тренду йде вниз — зі зростанням витрати вапна з 33 до 92 кг/т середній вихід придатного металу падає з ~93,1% до ~86,4%. Це пояснюється тим, що кожна додаткова маса вапна штучно збільшує загальну масу шлаку, та викликає зниження виходу придатного. Великий об'єм шлаку екстрагує залізо з металеві ванни, перетворюючи його на оксид ( $\text{FeO}$ ), а також призводить до його механічної втрати у вигляді залишившихся у в'язкому шлаку корольків сталі.

### 2.2.2 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на температуру сталі на повалці

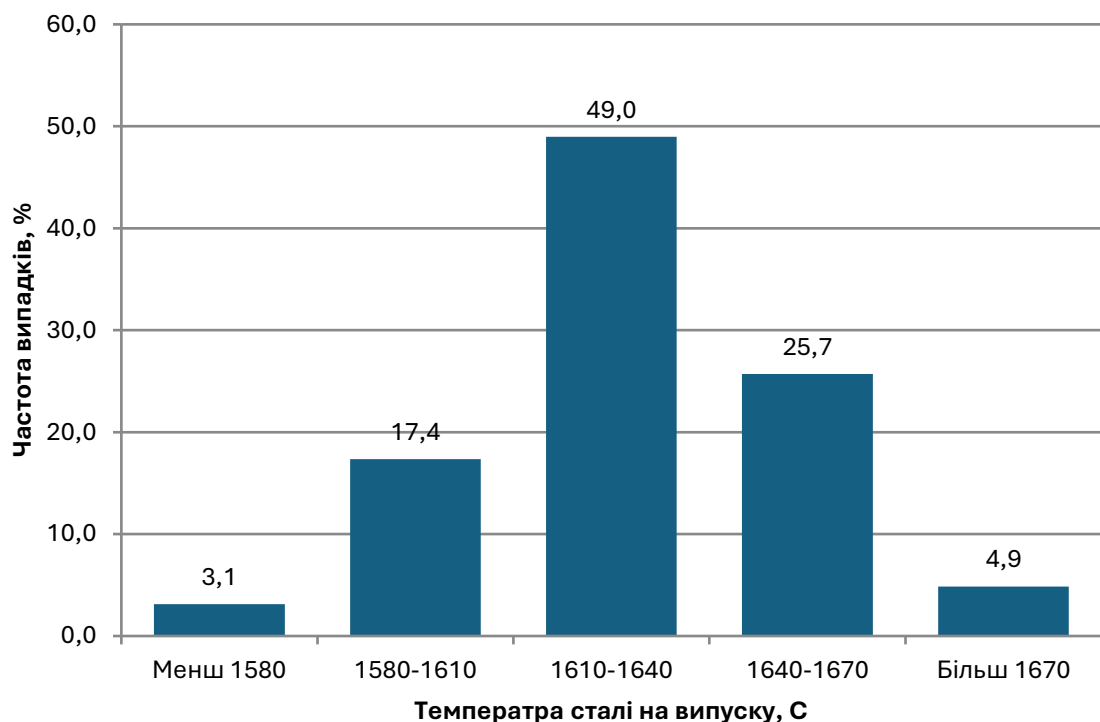


Рисунок 2.3 - Частотний розподіл виходу плавов по діапазонам температур готової сталі

На гістограмі (Рисунок 2.3) показано, що у 49% плавок температура зливаємої сталі була в діапазоні 1610 - 1640°C , 1640-1670°C - у 25,7% плавок, в >4% температура складала >1670°C, решту 20% склали плавки із температурами нижче 1610°C.

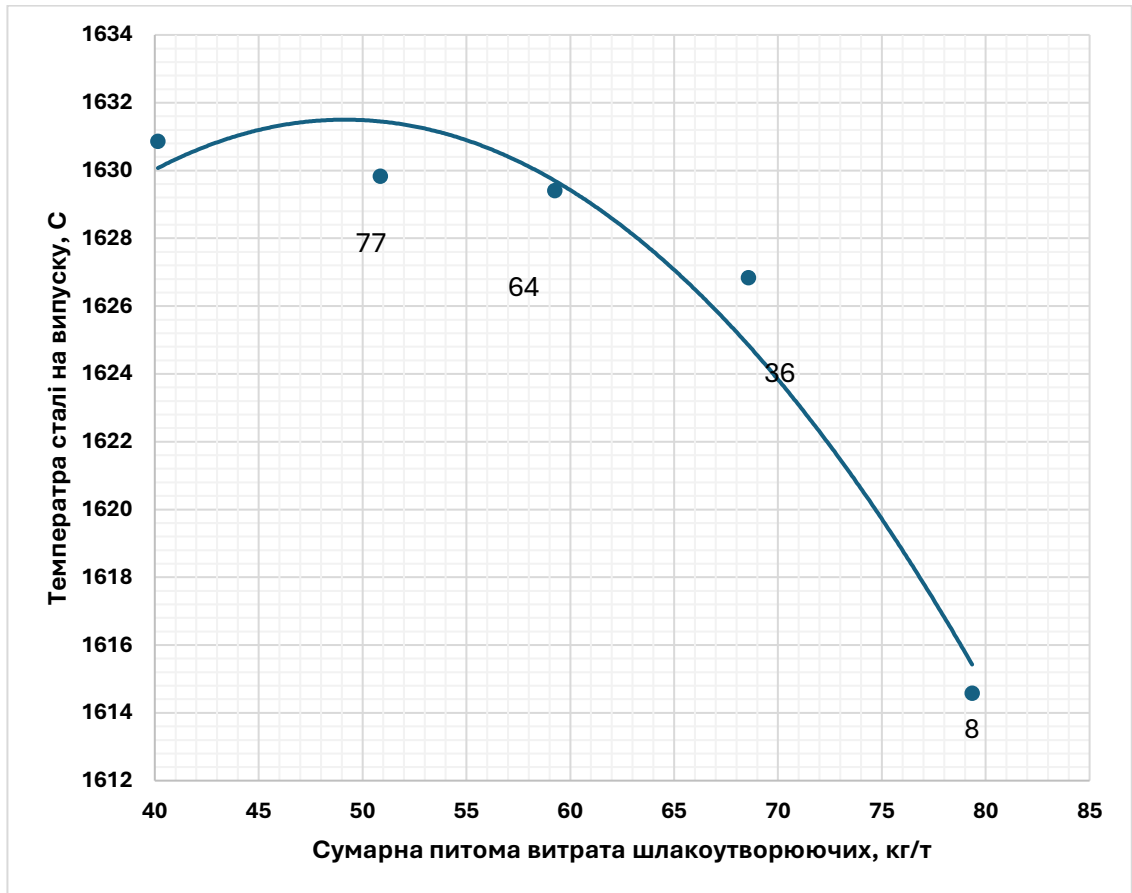


Рисунок 2.4 - Вплив сумарної витрати шлакоутворюючих на температуру сталі на повалці. Цифри біля точок - кількість усереднених плавок

Залежність сумарної витрати шлакоутворюючих на температуру сталі на повалці описується рівнянням:

$$T_{\text{сталі}} = -0,017m_{\text{сум.шлак.}}^2 + 1,7331m_{\text{сум.шлак.}} + 1588,9 \quad (2.2)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння 2.2 складає  $R^2 = 0,9556$

На показаному графіку видно прямий зв'язок між витратою шлакоутворюючих та температурою металу на повалці: температура сталі на повалці знижується з підвищенням витрати вапна на плавку. Дана залежність пояснюється тим що, теплота металу витрачається на нагрівання додаткових мас шлакоутворюючих та витрачається при дисоціації при недопалі вапна.

### 2.2.3 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на основність шлаку

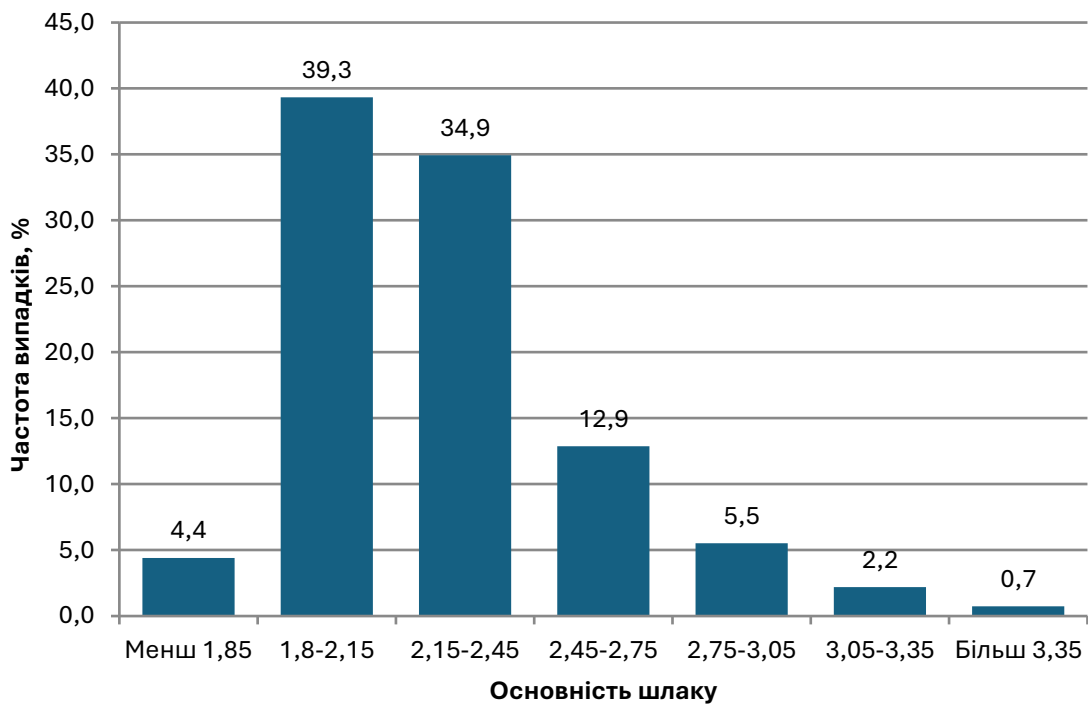


Рисунок 2.5 - Частотний розподіл основності шлаку по плавкам

Як показує гістограма частотного розподілу (рис. 2.5), переважна більшість конвертерних плавок (понад 70% масиву) зосереджена у вузькому діапазоні основності — від 1,8 до 2,5. Такий рівень основності є мінімально допустимим для рядових марок сталі [6,9]. Наявність невеликої кількості плавок із низькою основністю (менше 1,7) можна

пояснити високим вмістом кремнію в отриманому чавуні, де присадженого вапна виявилось недостатньо.

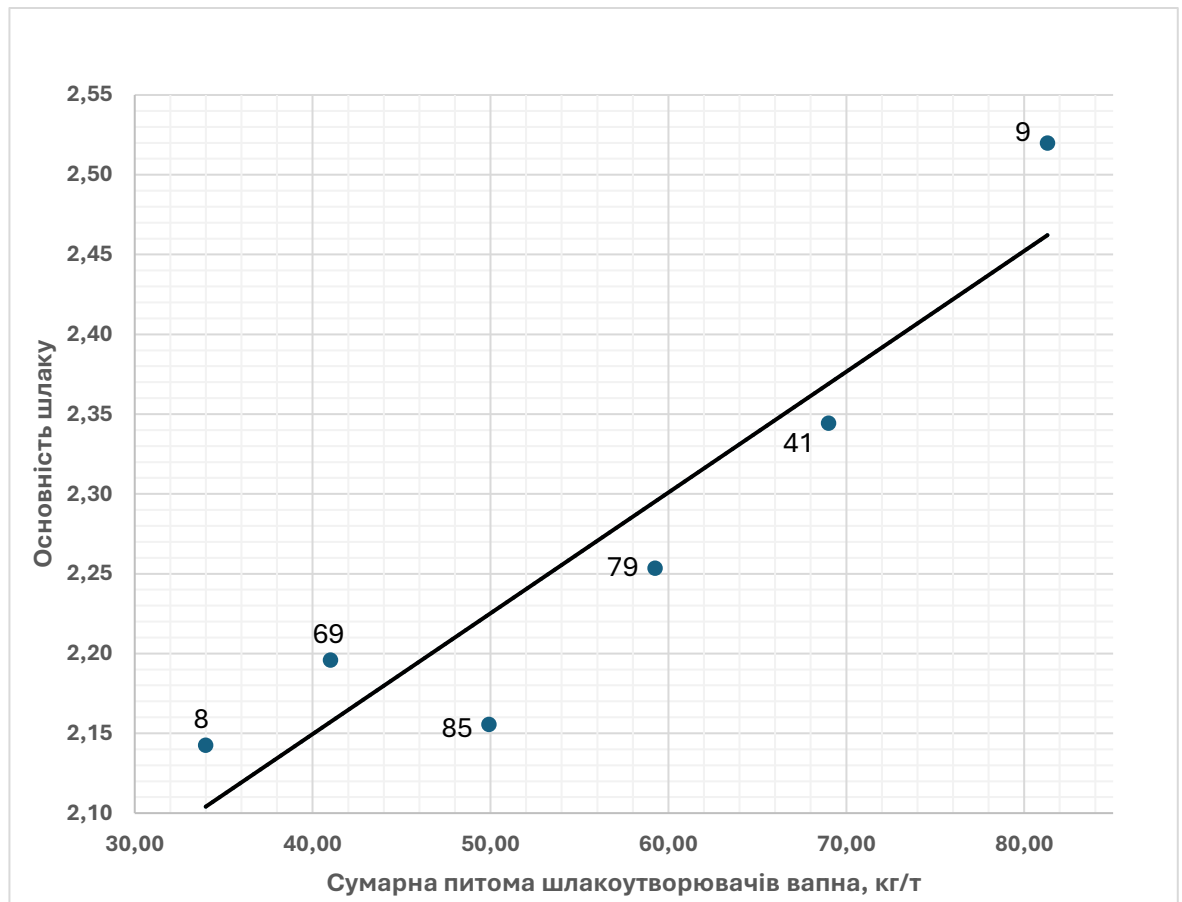


Рисунок 2.6 - Вплив сумарної витрати шлакоутворюючих на основність шлаку. Цифри біля точок - кількість усереднених плавок.

Залежність сумарної витрати шлакоутворюючих на основність шлаку описується рівнянням:

$$B = 0,0076m_{\text{сум.шлак.}} + 1,8468 \quad (2.3)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння 2.3 складає  $R^2 = 0,8698$

На графіку видно суттєве зростання лінії тренду з деяким розсіюванням точок, яка в цілому характеризує ситуацію як таку, при якій при збільшенні витрати флюсів з  $\approx 34$  до 75 кг/т основність коливається переважно в межах 2,1–2,4.

Графік показує, що нарощування сумарної маси присадок шлакоутворюючих матеріалів має низьку ефективність для підвищення рафінувальної здатності розплаву. Положення (кут нахилу) лінії тренду свідчить про те, що збільшення витрати флюсів понад 55 кг/т призводить до асиміляції лише незначної частини CaO, тоді як решта матеріалу залишається у нерозчиненому стані, збільшуючи масу шлаку без суттєвого приросту його активної основності.

#### 2.2.4 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на вміст сірки в сталі

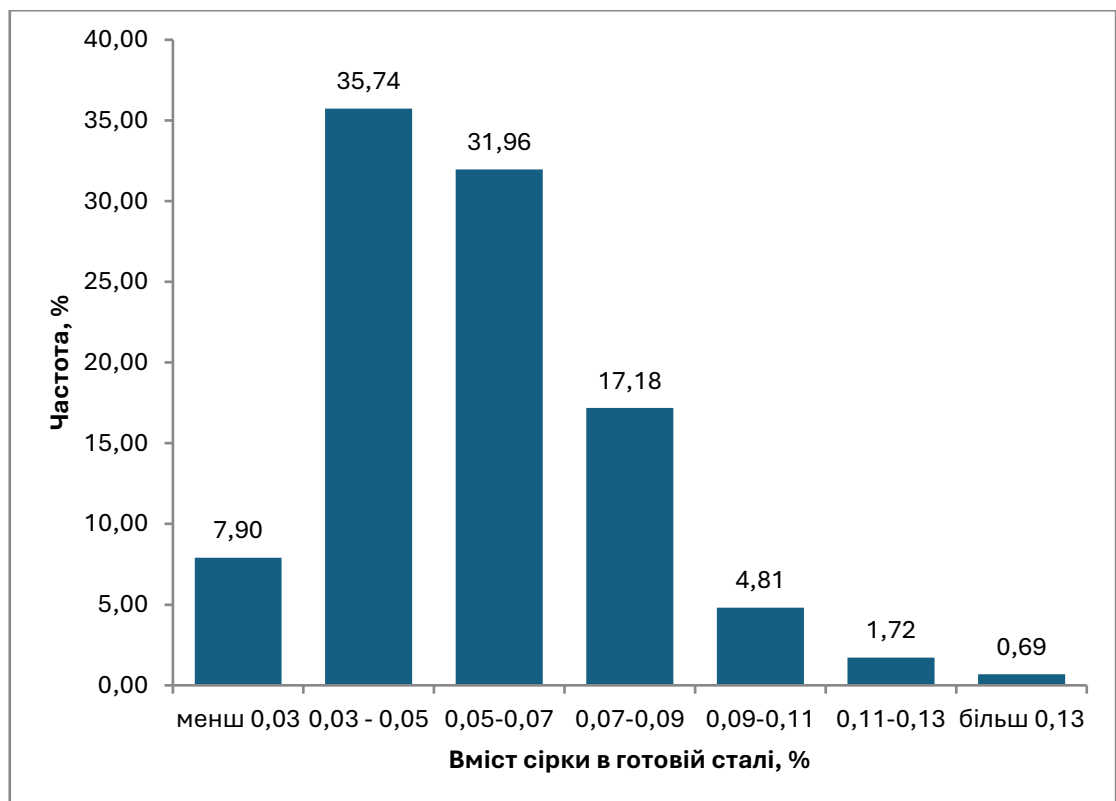


Рисунок 2.7 - Частотний розподіл вмісту S по плавкам

Як показує гістограма частотного розподілу (рис. 2.7),  $\approx 43\%$  конвертерних плавов показали по результатам хіманалізу допустимий та навіть нижче, вміст сірки в металі. А інша частина плавов (57%) дала сталь із вмістом сірки вище норми, тому сталі таких плавов потрібно було додатково піддавати процесам зниження вмісту сірки, - позапічній обробці [7]. Переважання плавов із перевищенням вмісту домішки пояснюється тим, що умови для видалення таких домішок, як S та P, прямо протилежні, і поки в системі є кисень, сірка з металу видаляється погано, хоча і S, і P видаляє з металу оксид CaO.

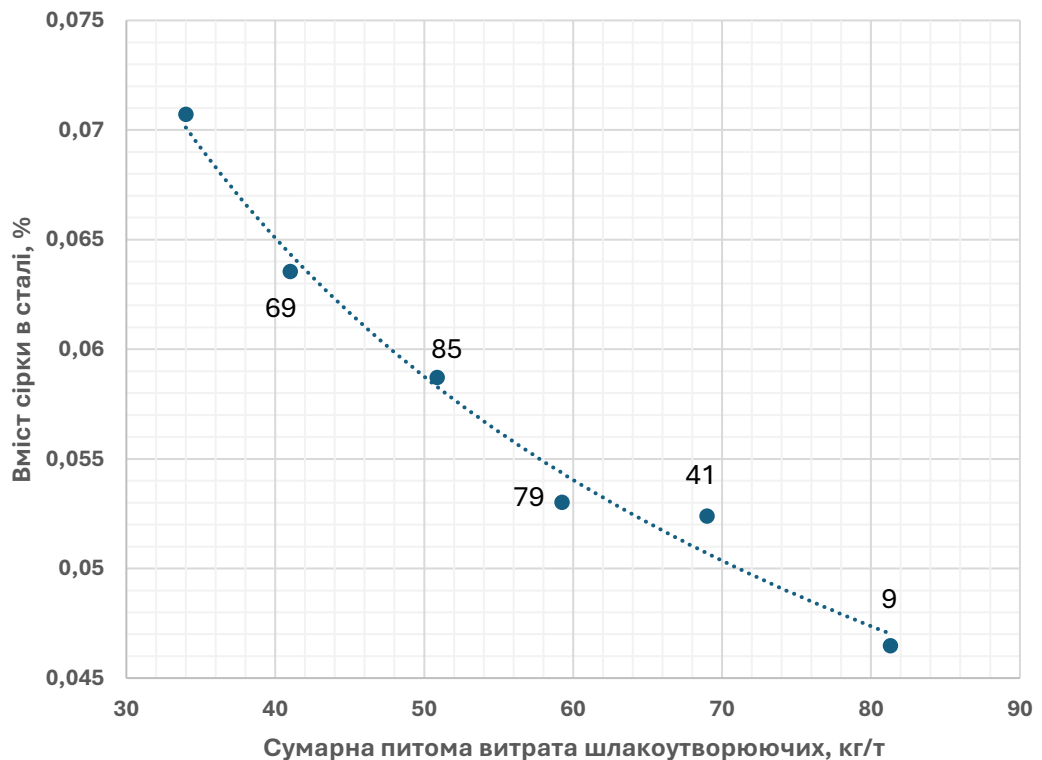


Рисунок 2.8 - Вплив сумарної витрати шлакоутворюючих на вміст сірки в металі. Цифри біля точок - кількість усереднених плавов

Залежність сумарної витрати шлакоутворюючих на вміст сірки в металі описується рівнянням:

$$[S] = 0,3527m_{\text{сум.шлак.}}^{-0.458} \quad (2.4)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння 2.4 складає  $R^2 = 0,9838$

Графік на рис. 2.8 показує тенденцію по зниженню концентрації сірки в готовому металі із підвищенням питомої маси додаваних флюсів. Така залежність викликана тим, що збільшення утворення шлаку означає збільшення площі для "всмоктування" сірки шлаком, тому що сірка видаляється з металу на межі розподілу метал-шлак, а отже, чим більше буде сполук CaO, тим із більшою кількістю S вони зможуть прореагувати із утворенням CaS на поверхні металу.

#### 2.2.5 Аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на вміст фосфору в сталі

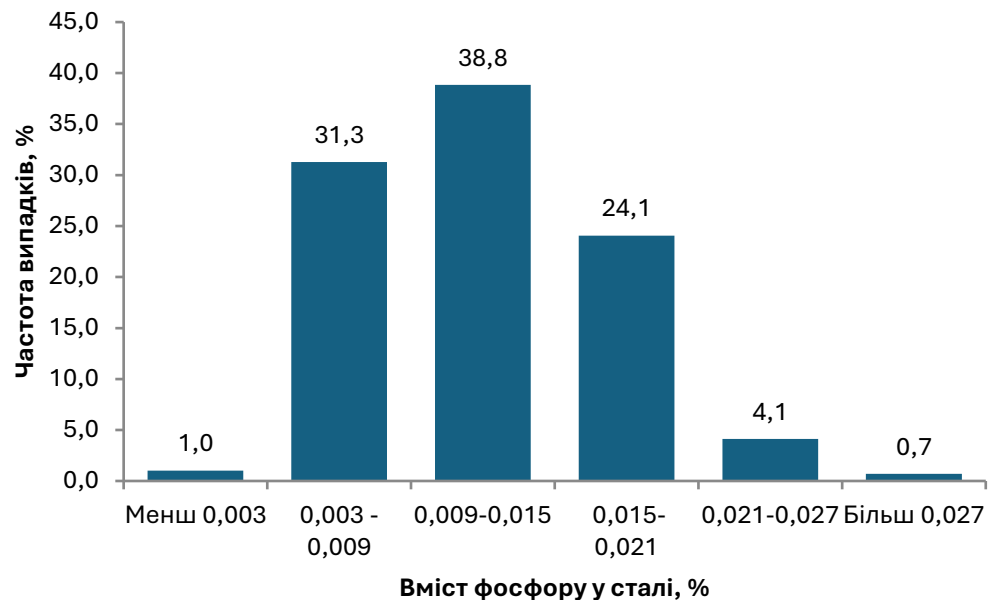


Рисунок 2.9 Частотний розподіл вмісту P в металі по плавкам

Як показує гістограма частотного розподілу (рис. 9), всі плавки дали сталь із допустим, згідно стандартів, вмістом фосфору. Фосфор чудово видаляється в кисневому конвертері оксидом СаО у складі вапна, тому ситуація саме такою і мала бути.

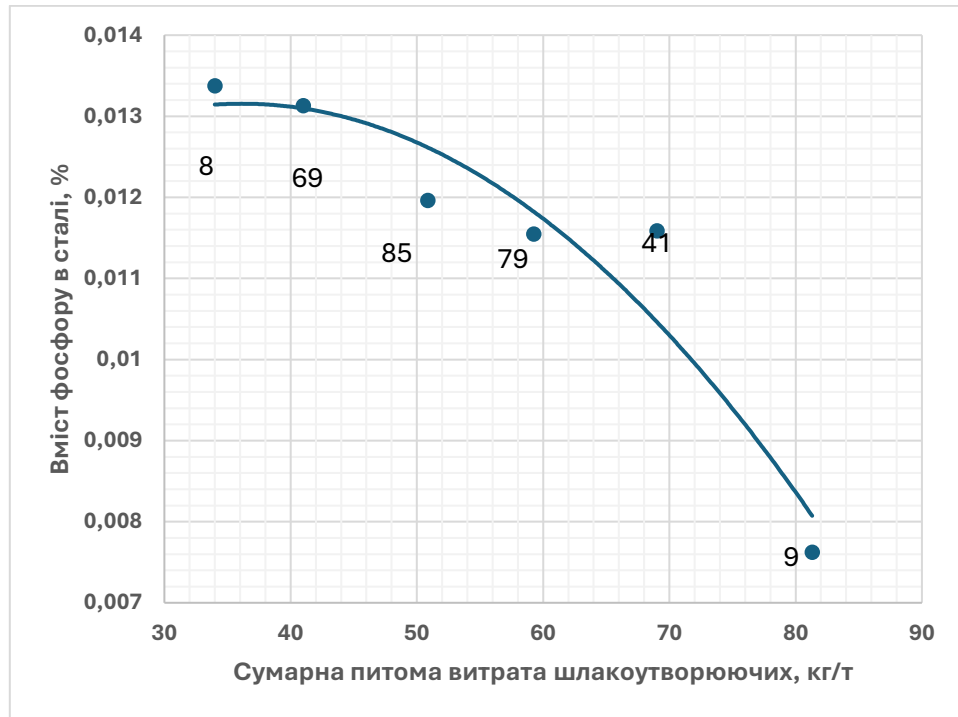


Рисунок 2.10 - Вплив сумарної витрати шлакоутворюючих на вміст P в сталі. Цифри біля точок - кількість усереднених плавок.

Залежність сумарної витрати шлакоутворюючих на вміст P в сталі описується рівнянням:

$$[P] = -2 \cdot 10^{-6} m_{\text{сум.шлак.}}^2 + 0,0002 m_{\text{сум.шлак.}} + 0,0099 \quad (2.5)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння 2.5 складає  $R^2 = 0,9058$

Так як і сірка, фосфор може бути видалений з металу шлаком на межі розділення цих двох фаз, то графік на Рис. 10 показує тенденцію

по зниженню концентрації фосфору в готовому металі зі збільшенням витрати шлакоутворюючих. Відповідно, як і для графіку по вмісту сірки в металі, який знижувався зі збільшенням додаваних шлакоутворюючих речовин, для фосфору справедлива так ж залежність, - чим більше шлаку утворилося (більше оксиду CaO), тим більше фосфору він може в себе забрати.

### Висновок по розділу 2

Проведений аналіз виявив, що зі збільшенням витрати вапна знижуються P та S в сталі, підвищується основність (більше CaO) в шлаку, що дуже корисно з металургійної точки зору. Проте збільшенням витрати шлакоутворюючих матеріалів знижуються вихід придатного металі та температура сталі. Температура сталі важлива, тому що сталь буде проходити позапічну обробку, а після неї ківш зі сталлю кілька годин буде розливатись на МБЛЗ, тому хороша температура сталі потрібна на всіх етапах шляху поза конвертором. [6, 7, 10] А втрати металу зі злитим шлаком здорожчують собівартість сталі в тому числі і тому, що будуть витрачатись додаткові ресурси на вилучення корольків металу зі шлаку, що вичах і повторне його транспортування в скрапове відділення конвертерного цеху для використання у наступних плавках.

З метою поліпшення окупності процесу переділу чавуну в сталь пропонується розглянути можливість отримання позитивного економічного (грошового) ефекту за рахунок деякого скорочення витрати шлакоутворюючих матеріалів на плавку. Це також матиме позитивний грошовий ефект, за рахунок збільшення виходу придатної сталі.

### 3. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД СКОРОЧЕННЯ ВИТРАТИ ШЛАКОУТВОРЮЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Одним з основних показників ефективності технологічного процесу є собівартість продукції, а тому покращення економічних показників за рахунок економії на певному компоненті конвертерної плавки буде досить актуальними.

З метою отримання економічного ефекту у вигляді економії коштів пропонується знизити середню сумарну витрату шлакоутворюючих матеріалів на 1кг. На поточному масиві плавок сталі ЗПСс14М усереднена по всіх плавкам питома витрата цих матеріалів склала 53,55 кг/т готової сталі. У разі зниження на запропоновану величину усереднена по всіх плавкам питома витрата на масиві буде запропонована на рівні 52,55 кг/т.

#### 3.1 Економічний ефект запропонованої дії

Для прорахунку суми зекономлених на флюсуючих матеріалах коштів буде взято за основу те, що в процесі плавки не використовуються ніякі інші матеріали для шлакоутворення крім вапна, а ціна на останнє буде братися станом на 2021 рік, курс валют – також усереднений за 2021 рік.

Згідно з наданим в конвертерному цеху ПрАТ «Камет-Сталь» в період переддипломної практики розцінками по статтям витрат переробного процесу станом на 2021 рік сформована таблиця 2.

Таблиця 3.1 - Ціни зразка 2021 року на складові компоненти конвертерної плавки

Стаття витрати	Одиниця виміру	Вартість, \$/т (2021р)
Чавун рідкий	т	494,81
Чавун рідкий десульфурований	т	503,44
Металолом (покупний)	т	347,21
Вапно (власного виробництва), $C_{\text{вап}}$	т	97,11

Згідно з даним архіву валютних курсів станом Довідковий курс НБУ на міжбанківському валютному ринку України (на 12:00) на 30.12.2021 гривні до долара склав 27,26 грн за \$1 [11].

За даним із паспортів плавок при виплавці сталі ЗПСс14М було відлито 71999,46т придатного металу ( $\Sigma$ сталь). Питома витрата шлакоутворюючих складала 53,55 кг/т ( $m_{6i}$ ) готової сталі.

Загальна витрата шлакоутворюючих (вапна) в цілому за всі плавки сталі ЗПСс14М (базовий варіант, який фактично відбувся), може бути знайдена перемножування маси відлитого придатного металу на базову питому витрату шлакоутворюючих ( $m_{6i}$ ):

$$\Sigma_{\text{вап.б}} = 71999,46\text{т} * 53,55 \text{ кг/т} = 3855571 \text{ кг} = 3855,6 \text{ т}$$

За проєктним сценарієм при зниженні на 1 кг питомої витрати шлакоутворюючих (вапна), нова проєктна витрата в цілому за всі плавки сталі ЗПСс14М може бути знайдена перемножування маси відлитого придатного металу на проєктну питому витрату шлакоутворюючих ( $m_{\text{пi}}$ ):

$$\Sigma_{\text{вап.п}} = 71999,46\text{т} * 52,55 \text{ кг/т} = 3783571 \text{ кг} = 3783,6 \text{ т}$$

Маса зекономленого вапна складає:

$$\Delta\Sigma_{\text{вап}} = \Sigma_{\text{вап.б}} - \Sigma_{\text{вап.п}}, \text{ Т} \quad (3.1)$$

$$\Delta\Sigma_{\text{вап}} = 3855571 - 3783571 = 72000 \text{ кг} = 72 \text{ Т}$$

Сума зекономлених коштів на вапні складатиме добуток вартості тони вапна  $\Delta\Sigma_{\text{вап}}$ .

$$\Sigma_{\text{екон}} = \text{Ц}_{\text{вап}} \times \Delta\Sigma_{\text{вап}}, \text{ грн} \quad (3.2)$$

$$\Sigma_{\text{екон}} = 97,11 * 72 = \$6991,92 = 190599,74 \text{ грн}$$

Зміна собівартості сталі за рахунок зміни питомої витрати шихтового матеріалу може бути знайдено з рівняння:

$$\Delta C_{\text{сталь}} = \frac{\Sigma_{\text{екон}}}{(\Sigma_{\text{сталь}})}, \frac{\text{грн}}{\text{Т}} \quad (3.3)$$

$$\Delta C_{\text{сталь}} = \frac{190599,74}{71999,46} = 2,65 \text{ грн/Т}$$

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Аналіз умов праці та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів у киснево-конвертерному цеху

Виробниче середовище киснево-конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» характеризується наявністю небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Огляд умов праці на робочих місцях цеху та аналіз регламентів та інструкцій із охорони праці на комбінаті дозволяє ідентифікувати певні такі ключові шкідливі фактори.

### 4.1.1 Виробничий мікроклімат

Характерними ознаками виробничого мікроклімату на робочих місцях є:

- Висока температура повітря, яка у літній період може досягати 38–45°C, що значно перевищує допустимі нормативні значення для робіт важкої категорії [12].
- Інтенсивне теплове опромінювання від рідкого металу під час заливання чавуну, завалки брухту та випуску. Нагрівання незахищених ділянок шкіри працівників може викликати порушення терморегуляції, сильне зневоднення організму, втрату солей (до 3–5 літрів рідини за зміну) та створює ризик отримання теплового удару чи серцево-судинних кризів.

### 4.1.2 Про запиленість повітряного середовища

Шкідливим фактором високого ступеня ризику в ККЦ є розпилена в повітрі дрібнодисперсна пилова фаза. Пил у конвертерному цеху на

всіх стадіях процесу. Наприклад, пил металургійного вапна складається з вільного оксиду кальцію ( $\text{CaO}$  — до 92%). При потраплянні його на вологі слизові оболонки дихальних шляхів чи у очі будуть виникають подразнення, сухість, запалення слизових оболонок.

Понад 60% часток вапняного пилу в зоні роботи працівників мають фракцію менше 5 мкм. Систематична дія такого пилу викликає хронічний пиловий бронхіт, емфізему легень та специфічний вид пневмоконіозу — вапняковий фіброз.

Пил випаленого доломіту містить велику кількість оксиду магнію ( $\text{MgO}$  — до 40%) та оксиду кальцію. Магнезіальний пил має виражену токсико-алергенну дію, викликає подразнення лімфатичних вузлів дихальної системи та стимулює розвиток хронічних запальних процесів [13].

#### 4.1.3 Хімічні фактори (токсичні гази)

Склад конвертерного газу, основним компонентом якого є монооксид вуглецю ( $\text{CO}$  — від 70 до 90%), також становить небезпеку для працівників. Оксид вуглецю є кров'яною отрутою сильної дії, яка при потраплянні до легень зв'язується з гемоглобіном крові, утворюючи стійку сполуку — карбоксигемоглобін, що блокує перенесення кисню до тканин та викликає гостру кисневу недостатність (гіпоксію) мозку.

Додатковими шкідливими газами в ККЦ є:

- Діоксид сірки ( $\text{SO}_2$ ), який утворюється при вигоранні сірки чавуну і діє як подразнюючий газ для легень;
- Оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), які формуються навколо високотемпературної зони взаємодії кисневого струменя з металом (температури понад  $2000^\circ\text{C}$ ), мають високу загальнотоксичну дію на організм. [14]

#### 4.1.4 Технічні та організаційні заходи щодо зниження дії шкідливих виробничих факторів

Для мінімізації та нейтралізації, де це можливо, небезпечних і шкідливих виробничих факторів на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» реалізується комплексний підхід, який поєднує першочергові інженерно-технічні рішення (колективний захист) та організаційно-профілактичні заходи. Відповідно до ієрархії заходів з охорони праці, застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) розглядається як обов'язковий фактор безпеки для персоналу, що працює в безпосередньому контакті з агресивним середовищем.

##### *Технічні заходи та інженерні системи захисту повітряного середовища*

Для зниження рівня запиленості повітряного середовища, зумовленого транспортуванням та присадкою вапна та доломіту, у цеху впроваджено деякі рішення щодо локалізації пилоутворення:

1. Герметизація трактів подачі матеріалів

Це унеможливорює винесення дрібнодисперсного пилу CaO та MgO в атмосферу цеху під дією природних конвекційних потоків повітря.

2. Аспірація бункерів шлакоутворюючих

Усі видавальні та вагові бункери флюсів над конвертером підключаються до потужних локальних систем витяжної аспірації.

3. Високоєфективне очищення повітря:

Для тонкого очищення застосовують рукавні фільтри з імпульсним продуванням тканинних елементів (фільтрувальний матеріал типу «Nomex» або поліестер із пиловідштовхуючим покриттям). Це дозволяє знизити залишкову концентрацію пилу на викиді до рівня менше 10 мг/м<sup>3</sup>, що відповідає екологічним нормативам. [15]

### *Організаційні загальні заходи на система безпечного робочого простору*

В цеху є штатна посада інженера з питань охорони праці. В задачі цієї людини, окрім того, що вона щоденно безпосередньо на виробничих майданчиках періодично інспектує робочі місця та виконувані роботи на предмет дотримання вимог а) діючого законодавства з питань охорони праці, б) актів і розпоряджень з питань безпечного виконання робіт, виданих на самому комбінаті, входить:

- щоденна і майже цілодобова підтримка цеху в питаннях безпечних порядків організації виконуваних одноразових/нециклічних робіт;
- оформлення (або консультація щодо оформлення) нарядів-допусків, контроль за правильністю організації таких робіт по нарядах;
- взаємодія зі службою з питань охорони праці та промислової безпеки (ОТ і ПБ) комбінату у всіх перелічених вище питаннях;
- допомога у редагуванні (при чергових переглядах) та у створенні нових посадових інструкцій;
- аналіз та доведення до працівників на змінно-зустрічних зборах даних щодо переліку нещасних випадків та щодо їх причин, які траплялися на підприємствах групи Метінвест і були уже розслідувані.

Серед нещодавніх корисних впроваджень в сфері убезпечення від травмування – встановлення на металургійних мостових кранах у цеху лазерного підсвічування на підлогу габариту небезпечної зони під візком чи крюками крана. Підсвічування вмикається в момент початку руху крана і позначає на підлозі чи обладнанні квадратну чи круглу зони, прохід в які заборонено, або вихід з якої я обов'язковим негайно.

Обов'язковим для працівників всіх посад і всіх цехів є перебування на робочій території/зоні у засобах індивідуального захисту (робочий костюм, захисні окуляри, каска, захисні рукавиці).

#### 4.1.5 Охорона навколишнього середовища

##### *Характеристика джерел забруднення навколишнього середовища в киснево-конвертерному цеху*

Технологічний процес виплавки сталі супроводжується значними викидами дрібнодисперсного пилу, токсичних газів, а також утворенням твердих відходів (шлаків та шламів) [16].

Джерела забруднення атмосферного повітря в ККЦ поділяють на дві основні категорії:

1. Викиди безпосередньо з порожнини конвертера під час продувки ванни киснем. Пил первинних викидів складається переважно з ультрадисперсних оксидів заліза ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), що утворюються внаслідок випаровування металу в підфурменній зоні.

2. Викиди під час допоміжних операцій — завалки металобрухту, заливання рідкого чавуну з ковша в конвертер, присадки шлакоутворюючих матеріалів (вапна, доломіту) та випуску готової сталі й кінцевого шлаку. Викиди під час заливання чавуну характеризуються високим вмістом графітового пилу та діоксиду сірки.

##### *Технічні рішення з очищення конвертерних газів та уловлювання пилу*

Схема газоочищення в цеху базується на системі сухого газоочищення. Над конвертером знаходиться кесон, до порожнини (воронки) якого всмоктуються гази та пил під час заливання чавуну та випуску сталі. Їх очищення здійснюється «сухим» способом за допомогою рукавних фільтрів. У систему відводу газів кесону підключаються системи аспірації бункерів вапна та доломіту, що мінімізує викиди їх пилу безпосередньо у простір цеху та за його межі [17].

*Утилізація та повторне використання конвертерних шлаків та шлаків у рамках концепції ощадливого виробництва*

Цех генерує значну кількість твердих відходів: на кожну тонну виплавленої сталі утворюється близько 110–130 кг кінцевого шлаку та 15–20 кг шлаків газовідвідних систем [18].

Стратегія поводження з твердими відходами ККЦ орієнтована впровадження їх рециклінгу за такими напрямками [18]:

- Рециклінг шлаків у доменне виробництво. Це полягає у використанні, за потреби, частини конвертерного шлаку в доменному цеху як флюсуючої добавки до шихти.
- Відбір із шлаку корольків металу. На шлаковому відвалі цеху шлак пропускається через магніти, а потім піддається дробленню. Металеві включення повертаються на копрову ділянку конвертерного цеху для подальшої видачі совками у конвертер, а шлак може відвантажуватися на дорожнє будівництво.

Загалом, надані в роботі рекомендації щодо коригування витрати шлакоутворюючих матеріалів для плавки дозволять знизити і питоме екологічне навантаження через зменшення утворення шлаків на тонну придатного металу.

## ВИСНОВКИ

У першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто світовий досвід використання основних шлакоутворюючих матеріалів та їх вплив на технологію киснево–конвертерного процесу.

Були проаналізовані паспорти 291 плавка сталі марки ЗПСс14М, надані консультантом від бази практики (ПрАТ «Камет-Сталь»). Засобами Excel було виконано аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на:

- основність шлаку;
- вихід придатної сталі марки ЗПСс14М;
- температуру сталі на повалці;
- вміст у сталі ЗПСс14М сірки та фосфору.

Проведений аналіз впливу витрати шлакоутворюючих матеріалів на основні параметри киснево-конверторної плавки показав, що збільшення їх витрати приводить до підвищення основності шлаку та забезпечує зниження вмісту шкідливих домішок Р та S в сталі, що дуже корисно з металургійної точки зору. Проте збільшенням їх витрати знижуються вихід придатного металу та температура сталі. Температура сталі важлива, тому що сталь буде проходити позапічну обробку, а після неї ківш зі сталлю кілька годин буде розливатись на МБЛЗ, тому хороша температура сталі потрібна на всіх етапах шляху поза конвертором. А втрати металу зі злитим шлаком здорожчують собівартість сталі в тому числі і тому, що будуть витрачатись додаткові ресурси на вилучення корольків металу зі шлаку, що вимагає і повторне його транспортування в скрапове відділення конвертерного цеху для використання у наступних плавках.

За рахунок зміни витрати шлакоутворюючих матеріалів відбувається підвищення виходу придатної сталі з 89,37% до 90,7% що дозволяє скоротити витрату металошихти на тонну сталі.

Виконаний розрахунок економічного ефекту від скорочення витрати шлакоутворюючих матеріалів за рахунок саме економії на вартості останніх показав, що економія складе 190599,74 грн для сталі ЗПСс14М при рівні її виробництва 72 тис.т рік, а зниження собівартості цієї сталі буде складати 2,65 грн/т.

В розділі охорона праці та захист навколишнього середовища розглянуті такі питання, як: основні шкідливі та небезпечні фактори у конверторному виробництві, заходи щодо зменшення шкідливих і небезпечних факторів, засоби індивідуального захисту працівників цеху, безпосередньо задіяних на виробничих ділянках, описано стан питання щодо захисту навколишнього середовища.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теорія металургійних процесів: підручник / В. Б. Охотський та ін. Дніпро: Пороги, 2012. 412 с.
2. Технологія виробництва сталі: навч. посібник / О. Г. Величко, Г. М. Кочетков. Київ: ІСДО, 1994. 232 с.
3. Turkdogan E. T. Fundamentals of Steelmaking. London: Mineralogical Society, 1996. 356 p.
4. ТІ 230-0456-10. Технологічна інструкція із позапічної обробки конвертерної сталі. ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ". Розробник: Технологічне управління ПрАТ «ДМКД». Кам'янське, 2010 г.
5. Захист футеровки та шлаковий режим кисневих конвертерів: монографія / М. В. Ягольник та ін. Запоріжжя: ТУ «Метінвест Політехніка», 2024. 185 с.
6. ТІ 230-С320-2021. Технологічна інструкція із виплавки конвертерної сталі. ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ". Розробник: начальник технологічного управління М.І.Кушнір. Кам'янське, 2021 р. – 59 с.
7. ТІ 230-С440-09 Технологічна інструкція із виплавки та позапічної обробки конвертерної сталі. ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ". Розробник: Технологічне управління ПрАТ «ДМКД». Кам'янське, 2009 г.
8. Теорія металургійних процесів : підручник / В. Б. Охотський, Ю. С. Пройдак, Г. О. Квас та ін. – Дніпропетровськ : Пороги, 2012. – 412 с. (Див. Розділ 6: «Взаємодія металу і шлаку», підрозділ «Окиснення та розподіл фосфору»).
9. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія : підручник / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотський, П. С. Харлашин. – Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. – 454 с.

10. ТР 230-С16-2011. Технологічний регламент розливання сталі на МБЛЗ. ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ". Розробник: Технологічне управління ПрАТ «ДМКД». Кам'янське, 2011 г.
11. Архів валютних курсів. Мінфіну. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/exchange/archive/2021-12-30/> (дата звернення: 13.06.2026).
12. Технічний паспорт конвертерного цеху ПАО «ДМКД». Розробник: Головне технологічне управління ПАО «ДМКД». Кам'янське, 2016 р. – 162 с.
13. Охорона праці в металургійній промисловості: підручник / Й. М. Гліков, В. А. Косенко, О. В. Шаповалов. Дніпро: Середняк Т. К., 2020. 344 с.
14. НПАОП 27.1-1.02-17. Правила безпеки у сталеплавильному виробництві / затв. Наказом Міністерства соціальної політики України від 20 лют. 2017 р. № 251. Київ: Форт, 2017. 184 с.
15. Аспірація та вентиляція бункерних естакад сталеплавильних цехів: монографія / М. В. Ягольник, Х. В. Малій. Запоріжжя: ТУ «Метінвест Політехніка», 2025. 198 с.
16. Екологічна безпека металургійного виробництва: навч. посіб. / О. Г. Величко та ін. Дніпро: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2008. 244 с.
17. Закон України «Про охорону атмосферного повітря»: станом на 01 січ. 2026 р. Київ: Парламентське вид-во, 2026. 44 с.
18. Комплексна переробка та використання шлаків чорної металургії: монографія / М. В. Ягольник, С. В. Семірягін. Маріуполь: ПДТУ, 2019. 210 с.