

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО  
ВИРОБНИЦТВА

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
до випускної атестаційної роботи бакалавра  
зі спеціальності 136 – **Металургія**

**Тема роботи:** «Дослідження особливостей виробництва сталі при використанні металізованої залізвмісної сировини.»

Виконав:

Студентка групи МТ-22-2

Ошека Юлія Андріївна

Керівник випускної роботи

Ярош Тетяна Петрівна

Нормоконтролер

Ярош Тетяна Петрівна

Завідувач кафедри

Бабощко Дмитро Юрійович

Кривий Ріг  
2026

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет:** гірничо-металургійний  
**Кафедра** металургії чорних металів і ливарного виробництва  
**Освітньо-кваліфікаційний рівень:** бакалавр  
**Спеціальність:** 136 Металургія

**Затверджую**

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р

**ЗАВДАННЯ**

**на випускню атестаційну роботу бакалавра**

Ошеки Юлії Андріївни

**1. Тема роботи:** «Дослідження особливостей виробництва сталі при використанні металізованої залізovмісної сировини»

**керівник роботи:** Ярош Тетяна Петрівна

затверджено наказом по КНУ від «\_19\_»\_лютого\_2026 р. № 113с

**2. Строк подання роботи студентом** «\_04\_»\_червня\_2026 р.

**3. Вихідні дані до роботи** Технологічні параметри процесу плавлення; марка сталі – Ст30; склад базової шихти (металобрухт і переробний чавун ПЛ-2); склад проектної шихти (з додавання металізованих окатишів), маса металозавалки.

**4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)**

Розділ 1. Стан питання та огляд ринку шихтових матеріалів

Розділ 2. Теоретичне обґрунтування технології плавлення DRI

Розділ 3. Порівняльний аналіз варіантів шихтування

**5. Перелік графічного матеріалу** Порівняльні таблиці матеріального балансу, діаграми зміни складу шлаку та витрат матеріалів, алгоритм розрахункової моделі (демонстраційний матеріал для презентації на захисті).

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання бакалаврської роботи	Термін виконання етапів
<b>1</b>	Одержання завдання, патентно-інформаційний пошук та аналіз науково-технічної літератури за темою використання металізованої сировини у ДСП	20.02.26
<b>2</b>	Збір виробничих даних та матеріалів щодо технології виплавки сталі	25.02.26
<b>3</b>	Теоретичний аналіз особливостей виплавки сталі, з використанням звичайної шихти та шихти з додаванням металізованих окатишів	09.03.26
<b>4</b>	Розробка математичної розрахункової моделі матеріального балансу та оптимізації шихти в середовищі MS Excel	20.03.26
<b>5</b>	Виконання порівняльних розрахунків базового та проектного варіантів для сталі Ст30, оформлення технологічних розділів записки	04.05.26
<b>6</b>	Оформлення вступу, висновків, списку використаних джерел та підготовка реферату	11.05.26
<b>7</b>	Підготовка демонстраційного матеріалу (слайдів презентації) та доповіді для захисту	20.05.26
<b>8</b>	Проходження нормоконтролю, отримання відгуку керівника та подача роботи для перевірки на плагіат, та рецензування	04.06.26

Дата видачі завдання «\_20\_» лютого\_2026 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ Ошека Ю. А.  
(підпис) (П.І. по-батькові)

Керівник випускної  
Кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Ярош Т. П.  
(підпис) (П.І. по-батькові)



## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту на тему «Дослідження особливостей виробництва сталі при використанні металізованої залізовмісної сировини»: 76 с., 12 рис., 33 табл., 17 джерел.

Дипломна робота присвячена дослідженню технологічних особливостей виплавки сталі Ст30 з використанням різних варіантів металошихти, зокрема класичної на основі сталевого брухту та альтернативної на основі окатишей.

Об'єкт дослідження – процес виплавки сталі в електричній дуговій печі.

Предмет дослідження – вплив складу металошихти на технологічні показники сталеплавильного процесу.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу виплавки сталі шляхом оптимізації складу шихти.

У роботі проаналізовано матеріальний баланс виплавки сталі в електричній дуговій печі. Для цього розроблено Excel-модель, що автоматизує розрахунок витрат шихти, окиснювачів і флюсів, а також оцінює хімічний склад металу на всіх етапах плавки.

Проведено порівняння двох варіантів шихтування: традиційного та з додаванням металізованих окатишів. Доведено, що використання окатишів знижує вміст сірки та фосфору в розплаві, проте призводить до збільшення обсягів шлаку, підвищення енерговитрат і зниження виходу придатного металу.

Ключові слова: ДУГОВА СТАЛЕПЛАВИЛЬНА ПІЧ, МЕТАЛІЗОВАНІ ОКАТИШІ, МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС, СТАЛЬ СТ30, ШЛАКОВИЙ РЕЖИМ, EXCEL-МОДЕЛЬ, ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.Р					
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Реферат					
Розробив	Ошека							Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірів	Ярош								1	1
Рецензент								Кафедра МЧМЛВ		
Н.контроль	Ярош							Група МТ-22-2		
Затвердив	Бабошко									

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД РИНКУ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	11
1.1 Роль металізованої сировини в сучасній електросталеплавильній практиці .....	11
1.2. Порівняльний аналіз фізико-хімічних властивостей та переваг металізованих окатишів у порівнянні з металобрухтом і чавуном ПЛ-2 .....	17
1.3. Постановка задачі: оптимізація технології виплавки сталі Ст30 з використанням безперервного завантаження .....	23
2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАВЛЕННЯ DRI .....	26
2.1. Механізм відділення заліза від кислої пустої породи (SiO <sub>2</sub> ).....	26
2.2. Кінетика дефосфорації та десульфурації при використанні металізованої сировини.....	28
3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ШИХТУВАННЯ.....	31
3.1 Розрахунок матеріального балансу традиційної шихтовки з використанням брухту та чавуну .....	31
3.1.1 Вихідні данні .....	31
3.1.2 Шихтування за вмістом вуглецю .....	35
3.1.3 Розрахунок вагового складу .....	36
3.1.4 Розрахунок періоду плавлення.....	38
3.1.5 Окиснювальний період .....	40
3.1.6 Відновний період.....	42
3.2 Аналіз технології виплавки з використанням металізованих окатишів ...	45
3.2.1 Вихідні данні .....	45
3.2.2 Шихтування за вмістом вуглецю .....	46
3.2.3 Розрахунок вагового складу шихти .....	47
3.2.4 Період плавлення.....	49
3.2.5 Окиснювальний період .....	53

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.3						
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Зміст						
Розробив		Ошека							Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Ярош								1	2
Рецензент									Кафедра МЧМЛВ Група МТ-22-2		
Н.контроль		Ярош									
Затвердив		Бабощко									

3.2.6 Відновний період.....	55
3.3 Порівняльний аналіз використання передільного чавуну та металізованих окатишів у металошихті .....	58
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	75

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку електрометалургії характеризується жорсткими вимогами до якості сталі, енергоефективності процесів та екологічної безпеки виробництва. Традиційна технологія виплавки сталі в дугових сталеплавильних печах (ДСП) з використанням металобрухту та переробного чавуну (наприклад, марки ПЛ-1 чи ПЛ-2) стикається з низкою викликів. По-перше, якість амортизаційного брухту постійно погіршується через накопичення «кольорових» домішок (міді, олова, хрому), які практично не видаляються під час плавки. По-друге, використання чавуну, хоч і забезпечує ванну необхідним вуглецем, призводить до збільшення тривалості плавки та високих питомих витрат енергії на його розплавлення.

Альтернативою класичній шихті є впровадження безкоксової металургії, а саме використання металізованої сировини – металізованого заліза (у вигляді окатишів або брикетів гарячого брикетування). Металізовані окатиші характеризуються високою чистотою за шкідливими домішками (фосфором, сіркою) та газами (азотом), що є критично важливим для виробництва якісного металопрокату, наприклад, марки Ст30. Перехід до використання металізованого заліза дозволяє не лише покращити хімічний склад сталі, а й суттєво змінити саму технологію плавлення завдяки переходу від періодичного завантаження до безперервної подачі шихти.

Робота базується на порівняльному аналізі фактичних даних експлуатації електропечей (звітні дані щодо використання шихти «скрап + чавун») та теоретичних засад впровадження безперервного завантаження металізованої сировини. Дослідження спрямоване на оптимізації шляхом запропонування нових технологій металізована сировина електро дугова піч.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.Вс		
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Вступ		
Розробив		Ошека					
Перевірив		Ярош					
Рецензент							
Н.контроль		Ярош					
Затвердив		Бабошко					
					Літера	Аркуш	Аркушів
						1	3
					Кафедра МЧМЛВ Група МТ-22-2		

Метою роботи є обґрунтування технологічних переваг заміни частини традиційної шихти на металізоване залізо та розробка оптимального режиму його плавлення в ДСП.

Для досягнення мети було поставлено наступні завдання:

- Проаналізувати хімічні та фізичні властивості металізованого заліза порівняно зі скрапом та чавуном.
- Розробити комп'ютерну програму на підставі відомих методик для автоматизації розрахунку всього процесу виплавки сталі в дуговій сталеплавильній печі (ДСП).
- Виконати порівняльний розрахунковий аналіз матеріального балансу виплавки сталі марки Ст30 для двох варіантів: базового (з використанням традиційної шихти) та проектного (із застосуванням металізованої залізовмісної сировини).
- Провести порівняльний аналіз матеріальних балансів обох варіантів плавки, оцінивши витрату сировинних матеріалів, а також кількісний (вихід) і хімічний склад отриманих металевої та шлакової фаз.
- Дослідити вплив ступеня металізації залізородних окатишів та вмісту в них кислотої пустої породи ( $\text{SiO}_2$ ) на формування шлакового режиму ДСП.
- Обґрунтувати переваги безперервного завантаження металізованих окатишів для стабілізації горіння електричної дуги та підвищення техніко-економічних показників роботи печі.

Об'єкт дослідження – процес виплавки сталі в сучасній дуговій сталеплавильній печі.

Предмет дослідження – матеріальний баланс та шлаковий режим процесу виплавки сталі в ДСП за умов використання різних за складом варіантів металошихти (традиційної та з вмістом металізованої залізовмісної сировини).

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблена модель для розрахунків у Microsoft Excel дає можливість автоматично підбирати оптимальний шихтовий набір для виплавки сталі певного

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.Вс	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

маркового складу (наприклад, марки Ст30) в залежності від характеристик вихідних матеріалів.

Результати розрахунків та обґрунтовані раціональні параметри безперервного завантаження окатишів (на рівні 28–32 кг/(хв·МВт)) можуть бути використані для автоматизації процесів подачі шихти в дугову сталеплавильну піч. Це допомагає стабілізувати електричні дуги, скоротити час плавлення та зменшити витрати електроенергії й електродів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.Вс	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

## 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД РИНКУ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

### 1.1 Роль металізованої сировини в сучасній електросталеплавильній практиці

Металізована сировина, зокрема прямовідновлене залізо (DRI), відіграє все важливішу роль у сучасному виготовленні сталі в електродугових печах (EAF). Історично у світовій металургійній галузі домінував традиційний технологічний шлях «доменна піч – киснева піч» (BF-BOF), який значною мірою залежить від вугілля та коксу. Однак за останні кілька десятиліть технологічний шлях EAF зазнав стрімкого зростання. Зростаючий попит на високоякісну сталь у поєднанні з дефіцитом, ціновою нестабільністю та мінливою якістю брухту призвів до ширшого застосування альтернативних залізовмісних матеріалів у вторинному виробництві сталі. [1, с. 23].

Металобрухт залишається головною металевою сировиною для виготовлення сталі в електродугових та індукційних печах, на які спільно припадає стрімко зростаюча частка світового виробництва сталі [1, с. 36]. Однак цикл переробки має деякі обмеження. Обмежена наявність високоякісного первинного брухту та стійке зростання цін на брухт створили гостру потребу в альтернативних джерелах первинної залізної руди. У цьому контексті DRI розглядається не лише як заміник металевого брухту, а й як високоспеціалізований якісний шихтовий матеріал, потрібний для виготовлення високоякісних сталевих виробів.

Прямовідновлене залізо, також відоме як губчасте залізо, – це пористий металевий продукт, який отримують шляхом прямого відновлення залізної руди без плавлення.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив	Ошека				Стан питання	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош						1	15
Рецензент						Кафедра МЧМЛІВ Група МТ-22-2		
Н.контроль	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

Процес прямого відновлення (DR) – це реакція відновлення в твердому стані, під час якої кисень вилучається з оксидів заліза (гематиту або магнетиту) за допомогою відновників, таких як оксид вуглецю (CO) та водень (H<sub>2</sub>), що формуються в результаті реформування природного газу, або елементарного вуглецю, отриманого з вугілля. Цей процес відбувається при температурах від 800 °C до 1050 °C, що значно нижче за температуру плавлення та спікання руди. [1, с. 50]

Так як у ході цього процесу регенерації плавлення не відбувається, макроскопічний зовнішній вигляд частинок руди (незалежно від того, це окатиші чи кусковий матеріал) залишається майже незмінним, тоді як їхній відтінок переходить із яскраво-червоного гематиту на тьмяно-чорний. На мікроскопічному рівні видалення атомів кисню спричиняє появу високопористої будови, що обґрунтовує поширений термін «губчасте залізо».

DRI став однією з найважливіших шихтових субстанцій для виготовлення сталі в дугових електропечах завдяки своєму сталому, передбачуваному хімічному складу та надзвичайно низькому вмісту небажаних домішок. На відміну від застарілої металобрухтової сировини, яка має значні коливання за якістю та неодмінно містить залишкові домішкові елементи, як-от мідь, олово, хром, нікель і молібден, ДВЧ сприймається як джерело «чистого» заліза. Під час процесу очищення в дуговій електропечі домішкові елементи не можуть бути видалені зі сталевого розплаву шляхом окислення. Наприклад, мідь спричиняє «гарячу крихкість» (поверхнєве розтріскування під час гарячого прокатування), а олово може призвести до значного руйнування. Шляхом комбінування ДВЧ з металобрухтом виробники сталі можуть якісно знизити концентрацію цих домішкових елементів до прийнятних меж, забезпечуючи набагато більший нагляд над хімічним складом фінальної сталі. Цей ефект розведення є абсолютно критичним у виготовленні плоского прокату, спеціальних видів сортового прокату (SBQ) та інших сталей високого класу, які застосовуються в автомобільній та аерокосмічній галузях.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розширення застосування прямого відновлення заліза (DRI) тісно пов'язане з розвитком технологій прямого відновлення, які умовно поділяють на газові та вугільні процеси.

Газові процеси:

Газові процеси переважають у світовому виробництві DRI, забезпечуючи понад 70 % світового обсягу [1, с. 53]. Дві найвідоміші технології – це процес MIDREX® і процес ENERGIRON® (HYL). Обидві використовують вертикальну шахтну піч, де залізна руда опускається під дією сили тяжіння, а гарячий відновлюючий газ (синтетична суміш CO і H<sub>2</sub>) піднімається протипотоком.

Процедура MIDREX: Цей метод використовує запатентований реформер для трансформації природного газу у синтез-газ за допомогою CO<sub>2</sub> та H<sub>2</sub>O, які самостійно виникають всередині відновлювальної шахти. Постійний, нерухомий стан шахтної печі сприяє точному керуванню металізацією та вмістом вуглецю у виробі.

Процедура ENERGIRON: Створений фірмами Tenova та Danieli, цей метод здатний функціонувати без зовнішнього реформера, прямо перетворюючи природний газ всередині шахтної печі завдяки каталітичним якостям самого металевого заліза. Він функціонує при вищих тисках, що підвищує кінетику відновлення та дає змогу отримувати DRI з вуглецевим вмістом, який легко коригувати.

Ще однією відчутною перевагою технології DRI є її сумісність із сучасними технологіями дугових електропічок (EAF) та її вплив на термодинаміку й кінетику процесу плавлення. Застосування металізованої сировини кардинально змінює стандартні процедури експлуатації дугових електропічок, створюючи як певні виклики, так і вагомі експлуатаційні переваги.

Механізми завантаження:

Традиційне розплавлення металобрухту ґрунтується на завантаженні ковшами, коли склепіння печі відчиняється, і великі ковші з ломом скидаються у вогнище. Ця операція спричиняє суттєві тепловтрати, оголює внутрішню

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частину печі до довкілля та розладнує електричну стабільність дуги. На відміну від цього, DRI можна безперервно подавати до ЕДП через п'ятий отвір у склепінні печі. Безперервна подача дає змогу ЕДП функціонувати як плавильнику в сталому режимі. Безперервне стале додавання DRI прямо у пласку ванну (басейн із розплавленої сталі) убезпечує, що електричні дуги лишаються прихованими товстим шаром спіненого шлаку, що зводить до мінімуму втрати тепла через випромінювання на стінки печі та посилює передачу тепла до розтопу [7, с. 142].

Енергоспоживання та утворення шлаку:

Використання DRI змінює енергетичний баланс дугової печі. Оскільки DRI містить невідновлений оксид заліза (FeO) та кислий шлакоутворювач ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), для розплавлення DRI потрібна більша кількість електроенергії на тонну, ніж для плавлення стовідсоткового сталевого брухту. Відновлення залишку FeO у рідкій ванні є ендотермічною (теплопоглинаючою) процесом, а додатковий шлакоутворювач зумовлює потребу в додаванні флюсів (вапна та доломіту) для збереження лужності, що спричиняє зростання обсягу шлаку, який також потребує переплавлення [5, с. 111].

Проте ці енергетичні втрати частково або цілковито компенсуються хімічною енергією, що надходить від вуглецю, який міститься у DRI. Газовий DRI зазвичай містить від 1,5 % до 3,0 % вуглецю, значна частина якого хімічно зв'язана у вигляді цементиту ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Коли цей вуглець реагує із залишком FeO або доданим киснем у ванні дугової печі, він вивільняє тепло. Окрім того, внаслідок реакції в глибині сталеві ванни утворюється велика кількість газу карбон монооксиду (CO). Підіймаючись, ці бульбашки CO спричиняють розширення та спінення шару шлаку. Високоякісний «пінний шлак» огортає електричні дуги, приглушує звуковий шум, запобігає зносу вогнетривів та суттєво покращує електричну продуктивність, передаючи тепло безпосередньо у рідкий метал, а не випромінюючи його назовні.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головною ознакою DRI є його займисті властивості. Завдяки своїй надзвичайно пористій, губчастій будові DRI володіє величезною внутрішньою площею. Під впливом вологи та кисню з довкілля металеве залізо окислюється з виділенням тепла. Якщо DRI зберігається насипом без належної вентиляції, тепло, що утворюється внаслідок цього самовільного окислення, може збиратися, що спричиняє сильні загоряння та погіршення якості металізації.

Аби подолати проблеми, пов'язані з трансокеанськими перевезеннями та довгим зберіганням, у цій галузі було розроблено гаряче пресоване залізо (НВІ). НВІ отримують, беручи гаряче DRI безпосередньо після виходу з відновлювальної печі (за температури близько 700 °С) та стискаючи його між важкими валками у щільні брикети у формі подушок. Це механічне ущільнення усуває внутрішню пористість, знижуючи площу поверхні приблизно на 90% і роблячи матеріал майже незаймистим. НВІ можна безпечно перевозити морем та зберігати на відкритому повітрі, що робить його товаром, який обертається на світовому ринку і заповнює географічний розрив між областями з дешевим природним газом (як-от Близький Схід та Північна Америка) та регіонами з великим попитом на брут [4, с. 43].

Найсуттєвішим чинником зростання попиту на металізовану сировину є загальносвітова потреба декарбонізації металургійної галузі. На даний час на виготовлення сталі припадає приблизно 7–9 % світових антропогенних викидів CO<sub>2</sub>, переважна частина яких виникає від вугільноємного технологічного циклу «доменна піч – киснева піч» (МЕА, 2020).

Посилення уваги до екологічно стійкого виготовлення сталі спричинило стрімке зростання зацікавлення до технологій DRI на базі газу. Виробництво сталі за технологією «природний газ-DRI-EAF» зумовлює викиди вуглекислого газу, що на 40–50 % менші на тонну рідкої сталі, порівняно з усталеним процесом «доменна піч-конвертер». Це миттєве зменшення викидів робить DRI проміжною технологією у протидії зміні клімату.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Що більш вагоме, технологія DRI володіє винятковими передумовами для переходу до виробництва сталі без викидів вуглецю. Шахтні печі, які використовуються у технологіях MIDREX та ENERGIRON, теоретично здатні функціонувати на чистому водні ( $H_2$ ) замість реформованого природного газу. У процесі Hydrogen-DRI (H-DRI) єдиним побічним результатом реакції відновлення заліза є водяна пара ( $H_2O$ ), а не вуглекислий газ ( $CO_2$ ) [2, с. 71]. У Швеції, вже довели технічну можливість виготовлення сталі без використання викопного палива з використанням губчастого заліза, відновленого воднем, розплавленого в дуговій печі [2, с. 71]. У міру того, як зелений водень (вироблений шляхом електролізу з використанням відновлюваних джерел енергії) стає економічно вигіднішим, H-DRI стане основою світової революції «зеленої сталі».

Попри численні переваги у металургійному та екологічному аспектах, широке запровадження DRI стикається з певними фінансовими обмеженнями. Виготовлення DRI є надзвичайно капіталомістким і потребує стабільного довготривалого забезпечення дешевим природним газом (або, у перспективі, «зеленим» воднем) та якісних DR-пелет. Таким чином, розташування об'єктів з виробництва DRI переважно сконцентроване у краях зі значними ресурсами природного газу, як-от Близький Схід, Північна Африка, Росія та Сполучені Штати.

Для сталеливарних виробників у зонах, де відсутній дешевий природний газ, часто доводиться ввозити НВІ або чавун, аби зменшити домішки у брукхті, що наражає їх на коливання тарифів морських перевезень та світові тренди цін на первинну сировину. До того ж, у міру руху світу до H-DRI прогнозується, що потреба у залізній руді DR-гатунку перевищить наявну пропозицію, що може спричинити обмеження у системі постачання. Залізна руда повинна мати високий вміст заліза ( $Fe > 67\%$ ) та надзвичайно низький рівень порожніх порід, щоб підходити для прямого відновлення; інакше надмірна кількість шлаку, що формується у дуговій печі, нейтралізує плюси застосування DRI [2, с. 71]

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підводячи підсумок, можна зазначити, що металізована сировина, особливо залізо прямого відновлення та його брикетована форма (НВІ), трансформувалася з нішевої альтернативної сировини на невід’ємний складник сучасного виготовлення сталі в електродугових печах. Її більше не сприймають лише як замітник металобрухту, а як стратегічний металургійний важіль, що дає змогу операторам електродугових печей випускати сталь найвищого гатунку, паралельно оптимізуючи енергоспоживання завдяки безперервному постачанню сировини та технології пінистого шлаку.

Оскільки світова металургійна галузь відчуває небувалий тиск щодо зменшення вуглецевого викиду й оперує в умовах дедалі дефіцитнішого ринку якісного брухту, залежність від технологій прямого відновлення тільки зростатиме. Перехід від DRI на основі природного газу до DRI на основі водню є найбільш реалістичним шляхом до виробництва сталі з нульовими викидами. Таким чином, стратегічне включення металізованої сировини визначатиме економічну конкурентоспроможність та екологічну відповідність виробників сталі у 21 столітті.

## 1.2. Порівняльний аналіз фізико-хімічних властивостей та переваг металізованих окатишів у порівнянні з металобрухтом і чавуном ПЛ-2

Металізована сировина як шихтовий матеріал для виплавки сталі відрізняється від чавуну та брухту.

Вміст кисню в залізорудній сировині в процесі металургійного перероблення (у цьому й полягає фізико-хімічна відмінність безкоксової металургії від класичної) поступово знижується (рис. 1.1) [ 3, с. 52].

У сучасному електросталеплавильному виробництві металізовані окатиші та губчасте залізо набувають все більшого поширення завдяки стабільного хімічного складу, низькому вмісту шкідливих домішок та високій технологічності використання.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

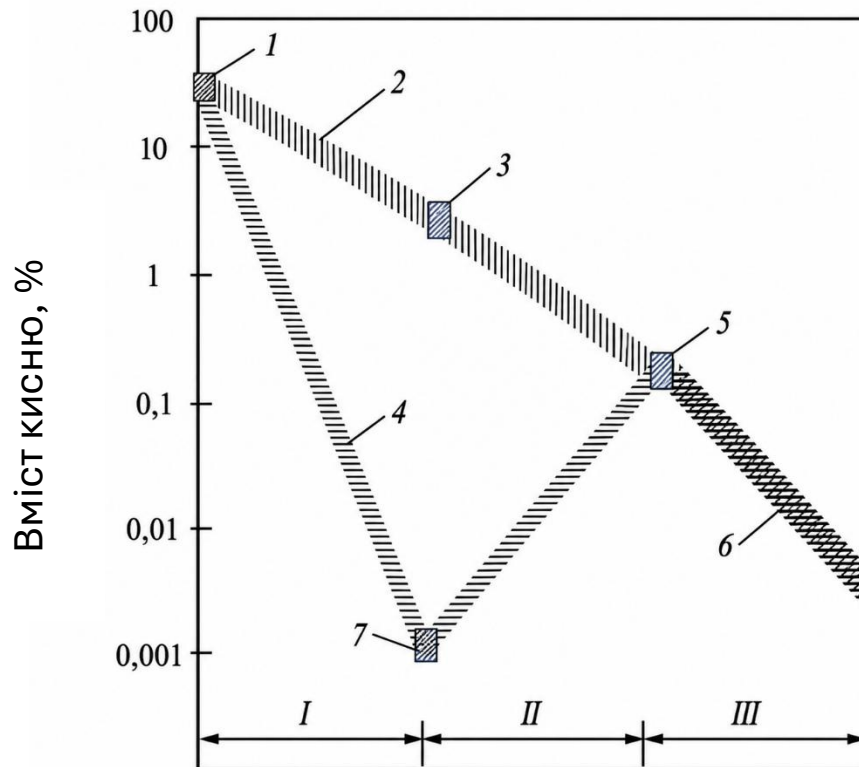


Рис. 1.1 - Зміна вмісту кисню в матеріалі під час виробництва сталі:

I – відновлення; II – виробництво; III – розливання; 1 – руда; 2 – установка металізації – електропіч; 3 – металізована сировина; 4 – доменна піч – конвертор; 5 – рідка сталь; 6 – злиток; 7 – чавун

На відміну від металобрухту, який характеризується значною неоднорідністю, металізована сировина дозволяє забезпечити більш прогнозований перебіг плавки та отримання сталі із заданими властивостями.

Залежно від виду вихідної сировини губчасте залізо в більшості випадків являє собою пористі шматки відновленої руди або окатиші. Зазвичай розмір шматкової металізованої сировини становить 5–30 мм, щільність 0,25–0,4 г/см<sup>3</sup>, сипуча маса  $1,5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а пористість 40–70 %. Така структура є однією з головних особливостей металізованих окатишів. Висока пористість забезпечує добру реакційну здатність матеріалу та позитивно впливає на процес плавлення в електродугових печах. Крім того, пориста структура сприяє більш швидкому

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагріванню матеріалу, що дозволяє скоротити тривалість окремих стадій плавки. [3, с. 63].

Металізовані окатиші мають однорідний гранулометричний склад, що створює значні переваги при транспортуванні, дозуванні та автоматизованій подачі шихтових матеріалів у піч. На відміну від металобрухту, який може мати різну форму, масу та габарити, металізована сировина характеризується стабільністю фізичних параметрів. Це полегшує організацію безперервної подачі матеріалу та сприяє підвищенню ефективності електроплавки.

Електро- та теплопровідність металізованої сировини нижча, ніж у брухту: електропровідність приблизно на 10 %, а теплопровідність – приблизно на порядок. Пористість губчастого заліза полегшує його плавлення. Зниження теплопровідності пояснюється значною кількістю пор у структурі матеріалу. Незважаючи на це, металізоване залізо досить швидко прогрівається внаслідок проникнення тепла у внутрішні пори. При використанні металобрухту нагрівання часто відбувається нерівномірно через великі габарити окремих фрагментів, що може призводити до локальних перегрівів та нестабільності плавки.

Хімічний склад губчастого заліза визначається переважно складом вихідної сировини. Склад пустої породи більшості руд, що використовуються для металізації, знаходиться у кремнеземному куті потрібної діаграми стану  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ . Тому основність пустої породи металізованої сировини є невисокою (не більше 0,1–0,3). Під час плавлення металізованої сировини її кисла пуста порода призводить до утворення додаткової кількості шлаку, що впливає на показники електроплавлення. [3, с. 66]. Таким чином, наявність кислої пустої породи є одним із основних недоліків металізованих окатишів. Для компенсації цього ефекту в процесі плавлення необхідно додатково вводити флюси, що забезпечують формування шлаку необхідної основності.

Разом із тим, у порівнянні зі скрапом металізоване сировина характеризується значно нижчим вмістом шкідливих домішок. Металобрухт

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часто містить кольорові метали, мастила, іржу, залишки неметалевих матеріалів та інші забруднення, які негативно впливають на якість сталі. У металізованих окатишах кількість таких домішок мінімальна, що забезпечує високу чистоту металу та полегшує контроль хімічного складу готової сталі.

Вміст вуглецю в металізованій сировині залежить від способу виробництва і становить 0,2–0,5 % при відновленні твердим вуглецем та 0,5–2 % при відновленні газом. Вміст кисню в губці залежить від повноти відновлення і в більшості випадків не перевищує 1,5–2 % ( $\varphi_{\text{мет}} > 90 \%$ ). Вміст вуглецю в металізованій сировині є важливим технологічним параметром, оскільки він впливає на тепловий баланс плавки та процеси відновлення оксидів заліза. Газове відновлення дозволяє отримувати матеріал із більш високим вмістом вуглецю, що позитивно впливає на енергетичні показники електроплавки. [ 3, с. 72].

Наявність залишкового кисню в металізованих окатишах зумовлює часткове окислення металу під час плавлення. Проте при високому ступені металізації кількість кисню є незначною та не створює суттєвих труднощів у процесі виплавки сталі. У порівнянні з чавуном ПЛ-2 металізоване сировина має менший вміст вуглецю та домішок, що дозволяє отримувати більш якісну сталь із нижчим рівнем небажаних елементів.

Вміст сірки в металізованій сировині не перевищує 0,01–0,015 %, тому вона є хорошим матеріалом для виробництва сталі. Оскільки фосфор у губці присутній у вигляді оксидів, за відповідної організації плавлення оксиди фосфору можуть безпосередньо переходити у шлак. Низький вміст сірки та фосфору є важливою перевагою металізованих окатишів. Ці елементи належать до шкідливих домішок, які погіршують механічні властивості сталі, знижують її пластичність та ударну в'язкість. Зменшення кількості сірки та фосфору сприяє отриманню високоякісної сталі для відповідальних конструкцій та машинобудування.

Особливістю металізованої сировини як шихти для виплавки сталі є також низький вміст у ній газів. При відновленні газом вміст азоту в губці становить

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<0,003 %. Необхідно зазначити, що при плавці в електропечі цей азот значною мірою видаляється. Низький вміст газів позитивно впливає на якість металу та зменшує ризик утворення внутрішніх дефектів у сталевих заготовках. Металобрухт, навпаки, часто містить значну кількість газів та сторонніх включень, що може призводити до утворення пористості та тріщин у готовому металі.

Важливою перевагою металізованого сировини є стабільність хімічного складу. Для металобрухту характерна значна мінливість складу, оскільки він формується з різних видів відходів чорної металургії та машинобудування. Це ускладнює прогнозування результатів плавки та потребує постійного коригування шихти. Металізовані окатиші виробляються за контрольованих умов, тому їх властивості залишаються практично незмінними від партії до партії.

Перевагами металізованої сировини порівняно зі скрапом є висока чистота щодо шкідливих домішок та домішок кольорових металів, однорідність за хімічним і гранулометричним складом та стабільність властивостей, а також сипучість. Її недоліками є наявність кислої пустої породи та схильність до окислення. У табл. 1.1 наведено результати порівняння властивостей металізованої сировини та скрапу.

Як видно з табл. 1.1, металізоване сировина має суттєві переваги над металобрухтом завдяки стабільності хімічного складу, низькому вмісту шкідливих домішок та можливості механізованого безперервного завантаження. [3, с. 92].

Завдяки своїй сипучості металізовані гранули можна транспортувати за допомогою конвеєрів, пневматичних систем та інших механізованих засобів. Це значно спрощує виробничі процеси та дозволяє впроваджувати сучасні автоматизовані системи завантаження.

Схильність металізованого матеріалу до окислення зумовлена його високою пористістю та великою площею поверхні. При зберіганні в умовах

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 - Результати порівняння властивостей металізованої сировини та скрапу

Брухт (скрап)	Металізована сировина	Ефект при використанні металізованої сировини
Хімічні властивості		
Невідомий хімічний склад	Відомий хімічний склад	Вища точність досягнення заданого хімічного складу
Нестабільний хімічний склад	Постійний хімічний склад	Переваги при автоматизації Стабільність складу і властивостей сталі від плавки до плавки
Забрудненість шкідливими домішками	Чистота щодо шкідливих домішок	Покращення якості сталі Можливість роботи зі зниженою основністю шлаку
Відсутність пустої породи	Наявність пустої породи	Збільшення кількості шлаку
Фізичні властивості		
Погана сипучість	Добра сипучість	Зручніше зберігання, розвантаження, дозування та транспортування Можливість безперервного завантаження
Компактність шматків	Пористість шматків	Схильність до вторинного окислення при зберіганні під впливом вологи
Добра теплопровідність	Знижена теплопровідність	Знижена швидкість плавлення
Різна крупність шматків	Однорідна крупність	Можливість безперервного завантаження
Відсутність дрібної фракції	Наявність дрібної фракції	Виділення пилу при транспортуванні та завантаженні

підвищеної вологості може відбуватися вторинне окислення металу, що призводить до погіршення технічних властивостей матеріалу. Тому металізовані гранули вимагають дотримання спеціальних умов транспортування та зберігання.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо порівнювати металізовану сировину з чавуном ПЛ-2, то в ній менше вуглецю та домішок на кшталт кремнію, марганцю, сірки та фосфору. Чавун ПЛ-2 хоч і використовують для отримання вуглецю та рідкого металу, але через велику кількість домішок з нього складно виготовити якісну сталь. А ось металізовані окатиші допомагають точніше контролювати склад шихти та витратити менше коштів на очищення металу.

Крім того, використання металізованих окатишів позитивно впливає на екологію виробництва. Адже чиста шихта допомагає зменшити шкідливі викиди, пил і отруйні речовини під час плавлення. Це особливо важливо зараз, коли до металургійних заводів висувають дедалі суворіші екологічні вимоги.

У підсумку виходить, що металізовані окатиші мають багато важливих переваг у порівнянні з металобрухтом і чавуном ПЛ-2. Головні з них – це стабільний хімічний склад, мало шкідливих домішок, однаковий розмір гранул, хороша сипучість і легкість механізованого завантаження. Але є у металізованої сировини й мінуси: у ній буває кисла пуста порода, вона сильніше утворює шлак і може повторно окислюватися. Незважаючи на це, металізовані окатиші все одно вважаються одним із найперспективніших матеріалів для сучасного виробництва сталі в електропечах.

### 1.3. Постановка задачі: оптимізація технології виплавки сталі Ст30 з використанням безперервного завантаження

На сучасному етапі розвитку електрометалургії критичне значення має, щоб процес був енергоефективним, щоб склад металу був стабільним, і щоб витрати на плавку були якомога нижчими. Проте традиційна технологія виплавки, коли для виплавки сталі в таких печах використовують металобрухт і чавун, має кілька серйозних недоліків. Одна з головних труднощів – це те, що матеріали завантажують у піч порціями, за допомогою ковшів. Щоразу при цьому

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

доводиться відкривати кришку печі, і через це втрачається багато тепла. У підсумку, плавка займає більше часу, і електроенергії на неї витрачається більше.

Ще один мінус такого завантаження – це непостійний хімічний склад металобрухту. У брухті часто зустрічаються домішки кольорових металів, наприклад, мідь, олово та цинк. Їх майже неможливо видалити під час плавки, і вони дуже погано позначаються на якості готової сталі. До того ж, при цьому способі піч споживає електроенергію нерівномірно: на початку плавки в електромережі виникають великі стрибки навантаження. Це заважає нормальній роботі печі та збільшує витрати на її обслуговування.

Але є й багатообіцяючий шлях, як поліпшити роботу електродугової печі – це використовувати металізовану сировину, наприклад, металізовані гранули або залізо прямого відновлення (DRI). Така сировина має більш стабільний хімічний склад, у ній мало шкідливих домішок і дуже високий відсоток металу. Якщо використовувати DRI, можна отримати сталь кращої якості і менше залежати від того, наскільки хороший металобрухт.

Однак використання металізованих гранул має свої особливості в процесі. У них, наприклад, міститься кислий шлак, і вони гірше проводять тепло, ніж металобрухт. При звичайному завантаженні це може уповільнити плавку і змусити витратити більше енергії. Щоб уникнути цих проблем, добре було б використовувати безперервну подачу металізованих гранул – прямо через дугу електродугової печі в розплавлений метал. Цей метод допомагає рівномірно подавати сировину, стабілізує температуру і дозволяє об'єднати процеси плавки та окислення.

Коли сировина подається безперервно, тепла втрачається менше, електроенергія витрачається ефективніше, а сама плавка займає менше часу. Крім того, якщо гранули подавати прямо в розплав, це створює відмінні умови для активного обміну теплом і масою. А це, у свою чергу, добре позначається на тому, скільки сталі може виробити піч, і на її якості.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головна мета цього дослідження – поліпшити процес плавки сталі марки Ст30 в електродуговій печі. Необхідно відійти від звичайного складу шихти та перейти на використання металізованих гранул з безперервною подачею.

Для цього потрібно вирішити такі завдання:

- розрахувати, витрату сировинних матеріалів, для підтримання основних показників ефективності, на тому ж рівні, що і при традиційному плавленні сталі Ст30;
- вивчити й дослідити, ступінь видалення шкідливих домішок, при використанні металізованої сировини;
- визначити технологічні параметри, які найкраще підходять для безперервної подачі, особливо швидкість, з якою потрібно подавати металізовані гранули;

Щоб виконати всі необхідні розрахунки, була створена універсальна модель Microsoft Excel, яка дозволяє автоматично виконувати розрахунок необхідної кількості шихтових матеріалів для процесу виготовлення сталі марки Ст30. Ця система може самостійно перераховувати основні технологічні показники, якщо змінити вихідні дані. Це робить розрахунки гнучкими та дозволяє швидко аналізувати різні варіанти плавки сталі.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.СП	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАВЛЕННЯ DRI

### 2.1. Механізм відділення заліза від кислої пустої породи ( $\text{SiO}_2$ )

Як відомо з літературних джерел, головна особливість металізованої сировини полягає в тому, що вона завжди містить пусту породу. Вона надходить до печі разом із металізованими окатишами. Тому, коли плавимо губчасте залізо (DRI) в електродуговій печі, дуже важливо, щоб відновлене залізо відокремилось від цієї породи, а сама порода перетворилася на шлак. [ 11, с. 84].

Хімічний аналіз показує, що пуста порода в більшості руд, які використовують для металізації, містить багато кремнію. По суті, це в основному діоксид кремнію, або кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ). Через такий склад основність цієї порожньої породи в губчастому залізі дуже низька – зазвичай від 0,1 до 0,3, і лише в рідкісних випадках доходить до 0,5 – 0,7. Таким чином, пуста порода металізованих окатишів має виражений кислий характер.

Відділення заліза починається, як тільки металізована сировина надходить в гарячу частину печі (або прямо в розплав, якщо подача йде без перерви). Метал в окатиші плавиться, і кисла пуста порода звільняється. Але вільний кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) агресивний – він інтенсивно взаємодіє з футеровкою печі, тому його потрібно негайно нейтралізувати.

Щоб зв'язати кремнезем у міцні силікатні сполуки, у розплав додають основні матеріали для утворення шлаку, в основному це вапно ( $\text{CaO}$ ). У підсумку хімічна реакція нейтралізації зв'язує компоненти кислої пустої породи, і вона перетворюється на пічний шлак.

Якщо розглянути цей процес (а це підтверджується й графіками, де показано взаємозв'язок між масою шлаку та часткою губки) [11, с. 89], то можна

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.02.ТОТП			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив		Ошека			Теоритичне обґрунтування технології плавлення DRI	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Ярош					1	5
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ Група МТ-22-2		
Н.контроль		Ярош						
Затвердив		Бабошко						

побачити пряму залежність: чим більша частка металізованої сировини у шихті, тим більша кількість  $\text{SiO}_2$  надходить у піч і тим більша витрата флюсів потрібна для підтримання необхідної основності шлаку, і тим швидше зростає загальний об'єм шлаку. При звичайному складі порожньої породи (коли там близько 60 %  $\text{SiO}_2$  і 10 %  $\text{CaO}$ ) вапна, щоб шлак залишався достатньо «основним», потрібно в рази більше.

Те, що кремнезем так відокремлюється і переходить у великий об'єм шлаку, впливає на плавку дwoяко:

1. Втрати енергії. Багато тепла від електричних дуг витрачається на те, щоб розплавити саму пусту породу і отримати додатковий об'єм шлаку. Через це потрібно дуже суворо стежити за всіма матеріалами та коригувати подачу електрики, щоб температура в печі не падала [ 12, с. 100].
2. Технологічний плюс (захист дуг). Великий об'єм шлаку, який з'являється через зв'язування  $\text{SiO}_2$ , виконує дуже важливу захисну функцію. Якщо правильно подавати кисень, цей густий шлак починає пінитися і повністю закриває електричні дуги. Таке «екранування» дуг товстим шаром шлаку захищає вогнетривкі стінки та стелю печі від сильного теплового випромінювання, знижує шум і дозволяє плавити на максимальній потужності трансформатора [ 12, с. 114].

Отже, при збільшенні частки металізованих окатишів у шихті зростає надходження  $\text{SiO}_2$  до плавки, що потребує додаткового введення вапна для підтримання необхідної основності шлаку. Саме тому в подальших розрахунках особливу увагу приділено визначенню витрат флюсів залежно від частки DRI у шихті.

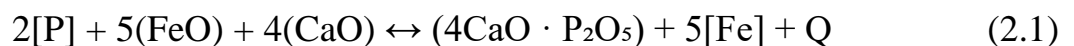
					КНУ.РБ.136.26.113с-08.02.ТОПІ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.2. Кінетика дефосфорації та десульфурації при використанні металізованої сировини

Як відомо з базового курсу металургійних процесів, видалення шкідливих домішок – сірки (S) та фосфору (P) – є одним із найважливіших завдань у виробництві високоякісної сталі. У традиційній технології (при використанні 100 % металобрухту) процеси дефосфоризації та десульфуризації розділені в часі через їхні протилежні термодинамічні вимоги. Однак використання металізованої сировини (DRI) суттєво змінює кінетику та механізм цих реакцій [13, с. 120].

Аналіз вихідного складу губчастого заліза показує, що, на відміну від брухту з автомобілів, що вичерпали термін експлуатації, воно практично не містить домішок кольорових металів (міді, олова, цинку); однак вміст сірки та фосфору в ньому безпосередньо залежить від якості вихідної залізної руди. Механізм видалення цих елементів під час безперервного завантаження окатишів у розплав має свої специфічні особливості.

Кінетика та термодинаміка дефосфоризації Реакція окислення фосфору та його перетворення на шлак описується таким загальним рівнянням (2.1):



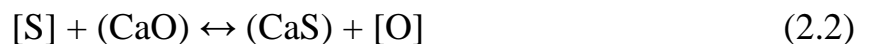
Для успішного протікання цієї реакції (зсуву рівноваги вправо) необхідні три основні умови: високий вміст оксидів заліза (FeO) у шлаку, висока лужність шлаку (надлишок CaO) та відносно низька температура металу [13, с. 127].

Безперервна подача металізованих гранул створює майже ідеальні умови для дефосфоризації. По-перше, гранули завжди містять певний відсоток залишкового (невідновленого) FeO. Потрапляючи в шлак, вони постійно підтримують його високу окислювальну здатність. По-друге, безперервне додавання вапна забезпечує необхідну лужність.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.02.ТОПІ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З кінетичної точки зору ключовим фактором є площа контакту фаз (метал-шлак). Коли гранули плавляться у шлаковій масі, утворюються незліченні дрібні краплі рідкого заліза, які, опускаючись крізь лужний залізистий шлак, піддаються глибокому екстрактивному очищенню. Крім того, реакція між вуглецем та залишковим киснем у гранулах спричиняє безперервне виділення бульбашок оксиду вуглецю (CO) [14, с. 113]. Це локальне «кипіння» ванни забезпечує інтенсивне перемішування, різко знижуючи опір дифузії на межі фаз і значно прискорюючи масообмін фосфору з металу в шлак [14, с. 113]. В результаті до кінця періоду плавлення метал вже глибоко дефосфорований.

Особливості десульфурування в присутності DRI На відміну від фосфору, видалення сірки вимагає інших умов. Реакція десульфурування (2.2):



Термодинаміка процесу вимагає високої температури, високої лужності та, що найголовніше, мінімального вмісту кисню (FeO) у системі [14, с. 116].

Як зазначалося вище, у період безперервного завантаження губчастого заліза шлак перенасичений оксидами заліза (FeO). Високий окислювальний потенціал системи в цей період блокує реакцію десульфурування. Оксид заліза перешкоджає переходу сірки в шлак, оскільки кисень витісняє сірку з сульфїду кальцію назад у метал.

Однак на практиці це не стає критичною проблемою. По-перше, якісні металізовані окатиші спочатку містять дуже мало сірки (зазвичай не більше 0,010–0,015%), оскільки основна частина сірки видаляється ще на стадії прямого відновлення руди природним газом. По-друге, хоча термодинаміка в період плавлення несприятлива, кінетичний фактор (проходження дрібних крапель металу через спінений шлак) частково компенсує це, дозволяючи видаляти до 20–30 % вихідної сірки [15, с. 108].

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.02.ТОПІ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Остаточне і глибоке десульфування при роботі з DRI переноситься на період рафінування (доведення). Після припинення подачі окатишів ванна розкислюється, окисленість шлаку падає, і при високій температурі створюються оптимальні умови для зв'язування залишкової сірки.

Для сталі марки Ст30 особливе значення має забезпечення низького вмісту фосфору та сірки, оскільки ці домішки негативно впливають на пластичність і ударну в'язкість металу. Тому використання металізованої сировини, яка характеризується низьким вмістом зазначених елементів, є перспективним напрямом удосконалення технології її виплавки.

Таким чином, використання DRI створює сприятливі умови для дефосфорації сталі вже на стадії плавлення, тоді як процес десульфурації потребує завершального рафінування металу. Ці особливості повинні враховуватися при розрахунку матеріального балансу та шлакового режиму.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.02.ТОПІ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ШИХТУВАННЯ

3.1 Розрахунок матеріального балансу традиційної шихтовки з використанням брухту та чавуну

Для виконання технологічних розрахунків процесу виплавки сталі була розроблена універсальна розрахункова модель у середовищі Microsoft Excel. Модель створена на основі загальноприйнятої методики розрахунку шихти та матеріального балансу плавки в електродуговій печі.

Особливістю розробленої моделі є можливість автоматичного перерахунку всіх основних технологічних показників при зміні вихідних параметрів. Це дозволяє оперативно визначати необхідну кількість шихтових матеріалів, оцінювати вплив окремих компонентів на хімічний склад металу та аналізувати різні варіанти проведення плавки.

#### 3.1.1 Вихідні данні

Розрахунок виконано для сталі марки Ст30. Основною метою розрахунку є визначення такого складу шихти, який забезпечить отримання металу із заданими показниками хімічного складу.

Вимоги до хімічного складу готової сталі наведені в таблиці 3.1.

Для формування шихти використовувалися металеві та вуглецевмісні матеріали. До складу металевої частини шихти входили вуглецевий лом, повернення власного виробництва та ливарний чавун марки ПЛ-2.

Як вуглецевмісний матеріал застосовувався кокс. Хімічний склад вихідних шихтових матеріалів наведено в таблиці 3.2.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА					
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Порівняльний аналіз					
Розробив	Ошека							Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош								1	46
Рецензент								Кафедра МЧМЛІВ Група МТ-22-2		
Н.контроль	Ярош									
Затвердив	Бабощко									

Таблиця 3.1 – Заданий хімічний склад сталі Ст30

Елемент	Вміст, %
C	0,29–0,33
Mn	0,70–1,20
Si	2,8–3,2
Cr	2,8–3,2
V	0,60–0,70
P	не більше 0,02
S	не більше 0,02

Таблиця 3.2 – Хімічний склад шихтових матеріалів

Найменування матеріалу	C	Mn	Si	S	P	Cr	Fe	Зола	Летючі
Лом вуглецевий, ГОСТ 2787-86	0,3	0,5	0,27	0,035	0,03	0,22	98,645	0	0
Повернення власного виробництва	0,15	0,49	0,36	0,02	0,02	0	98,96	0	0
Чавун ПЛ-2, ГОСТ 805-80	4	0,3	0,7	0,05	0,12	0	94,83	0	0
Кокс, ГОСТ 3213-71	82	–	–	–	–	–	–	11	6,92

Одним із найважливіших неметалевих компонентів шихти є кокс, який виступає основним джерелом вуглецю під час плавки. Для забезпечення стабільного засвоєння вуглецю металеву ванною та правильного формування шлаку, до коксу висуваються жорсткі вимоги щодо вологості, пористості та механічної міцності. Його технологічний склад наведено у таблиці 3.3.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 – Технічний склад коксу

Показник	Значення, %
Вуглець (C)	82,0
Зола (A)	11,0
Леткі речовини (V)	6,92
Волога (W)	до 1,0
Сірка (S)	до 0,8

Кокс використовується як джерело вуглецю для навуглецювання металу під час плавки. Його якість визначається вмістом фіксованого вуглецю, зольністю та кількістю летких речовин. Ці показники безпосередньо впливають на ефективність засвоєння вуглецю металеву ванною та формування кінцевого хімічного складу сталі.

Для виконання розрахунків матеріального балансу плавки та визначення витрат шихтових і допоміжних матеріалів були прийняті технологічні параметри процесу виплавки сталі в електродуговій печі. Вихідні дані включають характеристики окислювального та відновного періодів плавки, витрати шлакоутворювальних матеріалів, параметри десульфурзації металу, а також витрати вогнетривких матеріалів. Прийняті значення наведені в таблиці 3.4.

Розрахунок виконується на умовну металеву завалку масою 100 кг, що дозволяє отримати універсальну розрахункову модель та надалі легко перераховувати результати для плавки будь-якої місткості. Усі подальші розрахунки матеріального балансу виконуються на основі даних, наведених у таблиці 3.4.

На основі наведених у таблиці 3.4 вихідних даних виконано розрахунок матеріального балансу плавки та визначено необхідну кількість шихтових матеріалів для отримання сталі заданого хімічного складу.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.4 – Технологічні вихідні дані для розрахунку виплавки сталі

Показник	Значення
Маса відливки, кг	1500
Вміст вуглецю, що окислюється в період плавлення, %	0,10
Витрата залізної руди при завалці, %	2,0
Залишок шлаку після періоду плавлення, %	20
Основність шлаку в окиснювальний період	2,5
Вміст FeO в шлаку окислювального періоду, %	12
Залишок шлаку після окислювального періоду, %	5
Коефіцієнт розподілу сірки у відновний період	20
Витрата футерувальної цегли, кг/100 кг шихти	0,2
Перехід футерувальної цегли в шлак у період плавлення, частка	0,10
Перехід футерувальної цегли в шлак в окиснювальний період, частка	0,07
Перехід футерувальної цегли в шлак у відновний період, частка	0,03
Витрата магнезитового порошку, кг/100 кг шихти	1,0
Перехід магнезитового порошку в шлак у період плавлення, частка	0,40
Перехід магнезитового порошку в шлак в окиснювальний період, частка	0,30
Перехід магнезитового порошку в шлак у відновний період, частка	0,30
Витрата склепіння, кг/100 кг шихти	0,2
Перехід матеріалу склепіння в шлак у період плавлення, частка	0,10
Перехід матеріалу склепіння в шлак в окиснювальний період, частка	0,07
Перехід матеріалу склепіння в шлак у відновний період, частка	0,03
Маса металеві завалки, кг	100

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з класичною технологією електрометалургійного виробництва, повний розрахунок матеріального балансу в розробленій програмі було розділено на три ключові технологічні режими:

1. період плавлення;
2. окиснювальний період;
3. відновлювальний період.

Поетапний розрахунок кожного з цих періодів дозволяє максимально точно змоделювати фізико-хімічні процеси, що відбуваються в печі, та визначити оптимальні витрати матеріалів.

### 3.1.2 Шихтування за вмістом вуглецю

Першим кроком розрахункового алгоритму є шихтування за вмістом вуглецю. Цей показник є критично важливим для забезпечення правильного температурного та шлакового режиму під час плавки. Розрахунок необхідного вмісту вуглецю в металевій шихті здійснюється за балансовим рівнянням (3.1):

$$C_{\text{ш}} = C_{\text{г.с.}} + C_{\text{пл}} + C_{\text{о.п.}} - C_{\text{в.п}} \quad (3.1)$$

де  $C_{\text{ш}}$  – необхідний вміст вуглецю в металевій шихті, %;

$C_{\text{г.с.}}$  – заданий вміст вуглецю в готовій сталі, %;

$C_{\text{пл}}$  – кількість вуглецю, що окислюється в період плавлення, % (залежно від кількості та типу окиснювача, легковагості шихти та інших технологічних факторів значення  $C_{\text{пл}}$  зазвичай коливається в межах від 0 до 0,2 % за абсолютною величиною);

$C_{\text{о.п.}}$  – кількість вуглецю, що окислюється в окиснювальний період (з метою забезпечення якісної дегазації металеві ванни на практиці приймається  $C_{\text{о.п.}}$  від 0,2 % до 0,5 % за абсолютною величиною);

$C_{\text{в.п.}}$  – кількість вуглецю, що вноситься в метал у відновному періоді за рахунок присадок вуглецевих феросплавів та науглецювання через шлак при розкисненні останнього меленим коксом, %.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з результатами розрахунку, необхідний вміст вуглецю в металевій шихті становить 0,54 % (рис. 3.1), що забезпечує отримання сталі заданого хімічного складу після завершення всіх стадій плавки. Результати розрахунку наведено на рис. 3.1.

$C_{ш} = C_{г.с.} + \Delta C_{шл} + \Delta C_{о.п.} + \Delta C_{в.п.}$		КГ
$C_{г.с.}$	0,15%	0,15
$\Delta C_{шл}$	0,10%	0,1
$\Delta C_{о.п.}$	0,30%	0,3
$\Delta C_{в.п.}$	0,01%	0,01
$C_{ш}$	0,54%	0,54

Рис. 3.1 – Розрахунок вмісту вуглецю в металевій шихті

Як показано на рис. 3.2, інтерфейс таблиці містить додаткові текстові пояснення, які розкривають суть змінних та наведених формул. Загалом, уся розроблена програма супроводжується аналогічними примітками й коментарями до тексту.




	КГ
$C_{г.с.}$	<div data-bbox="766 1332 1308 1556"> <p> Юлія Ошека В46  </p> <p>вміст вуглецю в готовій сталі (0,15) %;</p> <p>5 травня 2026 р., 18:40</p> <p>Відповісти</p> </div>
$\Delta C_{шл}$	
$\Delta C_{о.п.}$	
$\Delta C_{в.п.}$	
$C_{ш}$	

Рис. 3.2 – Відображення приміток до розрахункових параметрів плавки в середовищі MS Excel

### 3.1.3 Розрахунок вагового складу

Після визначення загального необхідного вмісту вуглецю в шихті, наступним етапом є розрахунок вагового складу металеві завалки. Оскільки розрахунок ведеться на базові 100 кг шихти, для визначення маси кожного компонента було складено систему балансових рівнянь.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частка повернення власного виробництва є фіксованою величиною і в даному розрахунку становить 40 кг. Відповідно, невідомими залишаються маса сталевих брухту та маса чавуну. Система рівнянь базується на загальному матеріальному балансі (3.2) та балансі за вуглецем (3.3):

$$C_{\text{ш}} = C_{\text{лома}} + C_{\text{чуг}} + C_{\text{ВСП}} \quad (3.2)$$

$$x + y + 40 = 100 \quad (3.3)$$

де  $x$  – шукана маса чавуну, кг;

$y$  – шукана маса сталевих брухту, кг;

40 – регламентована маса повернення власного виробництва, кг.

Розв'язання даної системи рівнянь за допомогою інструментів автоматизації Microsoft Excel дозволило визначити оптимальне співвідношення компонентів: маса сталевих брухту склала 51,89 кг, а маса чавуну марки ПЛ-2 – 8,11 кг.

Отримані вагові значення стали базою для подальшого розрахунку кількості кожного хімічного елемента, що вноситься в металеву ванну разом із компонентами шихти. Зведені результати матеріального та хімічного балансу металевих заваляк наведено в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Розрахунок кількості хімічних елементів, що вносяться в шихту її компонентами

Матеріал	Вага кг	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe
Лом сталевий	51,8919	0,1557	0,2595	0,1401	0,0156	0,0182	0,1142	51,1888
Повернення власного виробництва	40	0,0600	0,1960	0,1440	0,0080	0,0080	-	39,5840
Чавун	8,1081	0,3243	0,0243	0,0568	0,0097	0,0041	-	7,6889
Разом, кг	100	0,5400	0,4798	0,3409	0,0333	0,0302	0,1142	98,4617

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

### 3.1.4 Розрахунок періоду плавлення

Після завалки шихти розпочинається період плавлення, який супроводжується складними фізико-хімічними перетвореннями. Для формування коректного матеріального балансу розроблена математична модель спочатку розраховує надходження оксидів (CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> тощо) від присадки шлакоутворювальних матеріалів (вапна та залізної руди), а також враховує частку оксидів, що переходять у шлак внаслідок зносу магnezитового футерування та вогнетривкого склепіння печі.

Одночасно з розплавленням шихти відбувається часткове окиснення її складових (кремнію, марганцю, хрому, фосфору та вуглецю). Програма автоматично визначає масу елементів, що окислилися, кількість утворених оксидів та відповідну потребу в кисні, яка в розрахунках виражається через еквівалентну кількість оксиду заліза (FeO). Результати розрахунку реакцій окиснення наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Процеси, що відбуваються в період плавлення

Окиснення компонентів у період плавлення	Кількість компонентів, окиснених у період плавлення, кг	Кількість оксидів, що перейшли в шлак у період плавлення, кг	Потреба в FeO у період плавлення для окиснення компонентів, кг
$[C] + (FeO) = \{CO\} + [Fe]$	0,10	–	0,6
$[Mn] + (FeO) = (MnO) + [Fe]$	0,239891892	0,309678624	0,314040295
$[Si] + 2(FeO) = (SiO_2) + 2[Fe]$	0,204518919	0,438254826	1,051811583
$2[Cr] + 3(FeO) = (Cr_2O_3) + 3[Fe]$	0,011416216	0,016685239	0,023710603
$2[P] + 5(FeO) + 4(CaO) = (4CaO \cdot P_2O_5) + 5[Fe]$	0,009989189	0,022878466	0,059935135
		Всього	2,049497616

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як видно з таблиці 3.6, у період плавлення відбувається окиснення вуглецю, марганцю, кремнію, хрому та фосфору. Найбільша кількість оксидів утворюється в результаті окиснення кремнію та марганцю, що істотно впливає на формування шлакової фази. Загальна потреба в FeO для перебігу реакцій окиснення становить 2,05 кг на 100 кг металеві завалки.

Утворені в результаті реакцій окиснення неметалеві включення спливають у верхню частину ванни, де поєднуються з доданими шлакоутворювальними матеріалами та продуктами руйнування футерування, формуючи первинний шлак. Загальний склад і масу шлаку періоду плавлення зведено у таблицю 3.7.

Таблиця 3.7 – Склад і кількість шлаку періоду плавлення

Елементи	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Σ
Вміст, кг	0,0175	0,5870	0,3097	0,3960	0,5173	0,0540	0,0229	0,0281	1,9324
Вміст, %	0,9056	30,3763	16,0253	20,4936	26,7667	2,7944	1,1839	1,4542	100

Відповідно до таблиці 3.7 загальна маса шлаку наприкінці періоду плавлення становить 1,9324 кг на 100 кг металеві завалки. Основними компонентами шлаку є діоксид кремнію 30,4 %, оксид магнію 26,8 %, оксид заліза 20,5 % та оксид марганцю 16,0%. Отриманий склад шлаку забезпечує необхідні умови для подальшого перебігу окислювального періоду плавки.

Після переходу частини елементів у шлакову фазу, хімічний склад та загальна маса металеві ванни закономірно змінюються. Матеріальний баланс металу наприкінці періоду плавлення, який слугуватиме вихідною точкою для наступного (окиснювального) періоду, наведено у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Склад і кількість металу наприкінці періоду плавлення

Елементи	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	Σ
Вміст, кг	0,4400	0,2399	0,1363	0,0233	0,0302	0,1027	98,4617	99,4342
Вміст, %	0,4425	0,2413	0,1371	0,0234	0,0304	0,1033	99,0220	100,0000

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Згідно з таблицею 3.8 маса металу після завершення періоду плавлення становить 99,43 кг. У результаті окиснення спостерігається зниження вмісту вуглецю, кремнію, марганцю та інших елементів порівняно з початковим складом шихти. Отриманий склад металу є вихідними даними для розрахунку окислювального періоду плавки.

### 3.1.5 Окиснювальний період

Головним технологічним завданням окиснювального періоду є дефосфорація металу, видалення газів та неметалевих включень, а також нагрівання ванни до температури випуску. Ці процеси відбуваються завдяки присадкам залізної руди та інтенсивному окисненню домішок.

Для коректної роботи математичної моделі було закладено технологічні нормативи щодо ступеня засвоєння кисню та видалення домішок. Зокрема, базові частки елементів, що окиснюються в цей період, наведено у таблиці 3.9.

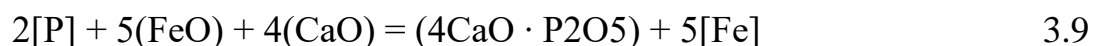
Таблиця 3.9 – Ступінь окиснення домішок в окиснювальний період

Приймаємо, що в окиснювальний період окислюється:	
Кремній	100,00
Марганець	60,00
Хром	50,00

Основна маса кисню, необхідна для протікання реакцій, надходить із залізної руди. У розрахунковій системі потреба в кисні перераховується на еквівалентну кількість оксиду заліза на основі таких хімічних реакцій (3.4-3.9):



					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Продукти цих реакцій спливають і формують новий, активний шлак. Враховуючи, що після попереднього етапу в печі залишається частина шлаку періоду плавлення (0,3865 кг на 100 кг металеві завалки), маса новоутвореного шлаку в окиснювальний період становить 1,6999 кг. Таким чином, формується загальний матеріальний баланс шлакової фази. Детальний хімічний склад і масу шлаку окиснювального періоду наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Склад і кількість шлаку окиснювального періоду

Елементи	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Σ
Вміст, кг	1,3359	0,5607	0,2477	0,2832	0,5309	0,0528	0,0122	0,0877	0,0081	3,1191
Вміст, %	42,8304	17,9754	7,9427	9,0792	17,0209	1,6920	0,3896	2,8118	0,2581	100

Видалення частини елементів у шлак та газову фазу (у вигляді CO) призводить до зміни маси та складу самої металеві ванни. Наприкінці окиснювального періоду вміст фосфору знижується до заданих нормативів, а кремній видаляється повністю. Підсумковий матеріальний баланс металу перед початком відновного періоду наведено у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Склад і кількість металу наприкінці окиснювального періоду

Елементи	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	Σ
Вміст, кг	0,1400	0,0960	0,0000	0,0200	0,0302	0,0514	98,4617	98,7992
Вміст, %	0,1417	0,0971	0,0000	0,0202	0,0306	0,0520	99,6584	100,0000

Аналіз даних таблиці 3.11 підтверджує, що поставлені цілі окиснювального періоду досягнуто. Однак метал на цій стадії є переокисненим, що вимагає проведення завершального етапу плавки – відновного періоду,

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

метою якого є розкислення ванни, десульфурація та доведення хімічного складу сталі до марочних значень.

### 3.1.6 Відновний період

Заключним етапом електрометалургійного циклу є відновний період. Його головна технологічна мета полягає у глибокому розкисленні металевої ванни, максимальному видаленні сірки (десульфурації) та доведенні хімічного складу сталі до марочних вимог шляхом введення легувальних елементів.

На початку періоду проводиться розрахунок необхідної кількості феросплавів для легування сталі Ст30 марганцем та кремнієм. З огляду на нормативні коефіцієнти засвоєння елементів (97 % для марганцю та 50 % для кремнію), розрахункова модель визначає масу присадок силікомарганцю марки СМн20 та феросиліцію марки ФС75. Кількість легувальних елементів, що вносяться цими феросплавами в розрахунку на 100 кг металевої завалки, наведено у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Кількість легувальних елементів, внесених до металу феросплавами

Найменування феросплаву	Найменування легуючих елементів	
	Si	Mn
СМн20	0,09968091	0,410349847
ФС75	0,257193235	-
Разом	0,356874145	0,410349847

Як видно з таблиці 3.12, основна кількість марганцю надходить до металу із силікомарганцем СМн20, тоді як джерелом кремнію є як силікомарганець, так і феросиліцій ФС75. Врахування коефіцієнтів засвоєння феросплавів дозволяє забезпечити необхідний хімічний склад сталі наприкінці плавки.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для успішнооь десульфуратції та захисту металу від вторинного окиснення формується високоосновний шлак. Відповідно до даних, для розрахунку прийнято шлакову суміш такого складу: вапно – 75 %, плавиковий шпат – 15 %, шамотний бій – 10 %.

У цей період у печі відбуваються інтенсивні фізико-хімічні реакції. Кисень, розчинений у металі, взаємодіє з кремнієм феросплавів (утворюючи  $\text{SiO}_2$ ) та алюмінієм (утворюючи  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Одночасно присадка плавикового шпату ( $\text{CaF}_2$ ) забезпечує розрідження шлаку, реагуючи з кремнеземом із виділенням леткого фтористого кремнію ( $\text{SiF}_4$ ). Сприятливий шлаковий режим дозволяє зв'язати надлишкову сірку в міцний сульфід кальцію ( $\text{CaS}$ ), що переходить у шлак.

Після завершення всіх масообмінних процесів математична модель формує остаточні баланси плавки. Кінцевий склад сталі наведено у таблиці 3.13, а остаточний склад відновного шлаку – у таблиці 3.14.

Таблиця 3.13 – Кінцевий склад металу наприкінці відновного періоду

Елементи	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	$\Sigma$
Вміст, кг	0,1500	0,5063	0,3569	0,0200	0,0200	0,0514	98,4800	99,5845
Вміст, %	0,1506	0,5084	0,3584	0,0201	0,0201	0,0516	98,8908	100,0000

Згідно з таблицею 3.13 після завершення відновлювального періоду вміст основних елементів у металі відповідає заданим параметрам розрахунку. Вміст шкідливих домішок сірки та фосфору не перевищує допустимих значень, що свідчить про ефективність процесів розкислення та десульфуратції.

Паралельно з коригуванням складу металу відбувається формування відновлювального шлаку. До його складу входять продукти реакцій розкислення, десульфуратції, а також оксиди, що надходять із шлакоутворювальними матеріалами. Остаточний склад і маса шлаку наведені в таблиці 3.14.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА			Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				

Таблиця 3.14 – Остаточна маса та склад шлаку кінця відновного періоду

Елементи	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaS	Σ
Вміст, кг	1,6151	0,8286	0,0124	0,0142	0,3961	0,0773	0,0006	0,0074	0,1495	0,0039	0,0235	3,1285
Вміст, %	51,6248	26,4868	0,3959	0,4526	12,6609	2,4700	0,0194	0,2361	4,7784	0,1231	0,7520	100

Як видно з таблиці 3.14, основними компонентами відновлювального шлаку є оксид кальцію, діоксид кремнію та оксид магнію. Загальна маса шлаку 3,13 кг на 100 кг металеві завалки. Отриманий склад шлаку забезпечує умови для ефективного перебігу процесів десульфурації та остаточного очищення металу.

Головним результатом розрахунку базової математичної моделі є зведена відомість витрат матеріалів. Згідно з отриманими даними (табл. 3.15), система дозволяє з високою точністю визначити потребу в шихтових, шлакоутворювальних та легувальних матеріалах для забезпечення заданих параметрів плавки.

Таблиця 3.15 – Зведена кількість матеріалів на проплавлення 100 кг металеві завалки

№ з/п	Найменування матеріалу	Витрата, кг
1	Лом вуглецевий	51,89
2	Повернення власного виробництва (ПВВ)	40,00
3	Чавун марки ПЛ-2	8,11
4	Силікомарганець марки СМн20	0,59
5	Феросиліцій марки ФС75	0,69
6	Вапно	4,68
7	Залізна руда	3,93
8	Плавиковий шпат	0,31
9	Шамотний бій	0,21
10	Кокс	0,02
11	Алюміній	0,10

Розроблений алгоритм підтвердив ефективність розрахунків, що дозволяє використовувати його як базу для моделювання альтернативних технологій виплавки сталі, зокрема з використанням металізованих окатишів замість чавуну.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.2 Аналіз технології виплавки з використанням металізованих окатишів

#### 3.2.1 Вихідні данні

Для проведення об'єктивного порівняльного аналізу ефективності різних варіантів шихтування, другим етапом дослідження стало моделювання процесу виплавки сталі марки Ст30 із частковою або повною заміною традиційної металошихти на металізовані окатиші. Використання металізованої сировини є перспективним напрямком сучасної електрметалургії, оскільки дозволяє знизити вміст шкідливих домішок (зокрема кольорових металів) у готовій сталі та забезпечити більш стабільний хімічний склад розплаву.

Щоб забезпечити чистоту експерименту та можливість коректного порівняння результатів із базовим варіантом (розділ 3.1), цільова марка сталі (Ст30), маса відливки (1500 кг), а також усі ключові технологічні параметри плавки (частки окиснення елементів, основність шлаку, коефіцієнти розподілу сірки тощо) були залишені без змін.

Вихідні дані щодо хімічного складу нової металевої складової шихти, які були закладені в розрахункову модель Microsoft Excel для цього варіанту, наведено у таблиці 3.16.

Відповідно до розрахунку шихти для виплавки сталі в основній електродуговій печі, хімічний склад вуглецевмісних матеріалів (металургійного коксу) та всіх шлакоутворювальних компонентів (вапна, залізної руди, плавикового шпату, шамотного бою тощо) був прийнятий ідентичним до базового варіанту.

Також для даного режиму плавлення залишаються актуальними попередньо прийняті нормативи щодо витрат вогнетривких матеріалів.

Зокрема, витрата футерувальної цегли та цегли склепіння становить по 0,2 кг на 100 кг шихти, а магнезитового порошку – 1,0 кг на 100 кг шихти. Частки їх переходу в шлак розподіляються за періодами (плавлення, окиснювальний,

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.16 – Хімічний склад металевої шихти для варіанту з окатишами, %

Найменування матеріалу	C	Mn	Si	S	P	Cr	Fe <sub>заг</sub>	Зола	Летючі
Металізовані окатиші	0,9	0	0	0,01	0,03	0	86	0	0
Повернення власного виробництва	0,15	0,49	0,36	0,02	0,02	0	98,96	0	0
Лом вуглецевий, ГОСТ 2787-86	0,3	0,5	0,27	0,035	0,03	0,22	98,645	0	0
Кокс, ГОСТ 3213-71	82	–	–	–	–	–	–	11	6,92

відновний) аналогічно до розрахунків, наведених у пункті 3.1.

Зафіксувавши ці єдині вихідні дані та шлаковий режим, отримуємо можливість ізольовано оцінити вплив саме металізованих окатишів на матеріальний баланс плавки, витрату енергоносіїв та вихід придатного.

### 3.2.2 Шихтування за вмістом вуглецю

Першим кроком у визначенні матеріального балансу для нового варіанту плавки є розрахунок шихтування за вмістом вуглецю.

Для забезпечення оптимального вуглецевого режиму під час виплавки сталі з використанням металізованих окатишів розрахункова модель використовує такі вихідні параметри:

- заданий вміст вуглецю в готовій сталі ( $C_{г.с}$ ) = 0,15 %;
- кількість вуглецю, що окислюється в період плавлення ( $C_{пл}$ ) = 0,10 %;
- кількість вуглецю, що окислюється в окиснювальний період ( $C_{о.п.}$ ) = 0,30%;

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

- науглецювання металу у відновний період ( $C_{в.п.}$ ) = 0,01 %.

Відповідно, балансове рівняння необхідної кількості вуглецю набуває такого вигляду:

$$C_{ш} = C_{г.с.} + C_{пл} + C_{о.п.} - C_{в.п.} = 0,15 + 0,10 + 0,30 - 0,01 = 0,54\%$$

Виконаний алгоритмом розрахунок підтверджує, що для даного технологічного режиму загальний необхідний вміст вуглецю в металевій шихті ( $C_{ш}$ ) становить 0,54 % (або 0,54 кг у перерахунку на 100 кг базової завалки).

### 3.2.3 Розрахунок вагового складу шихти

Після визначення загальної потреби у вуглеці (0,54 %) необхідно розрахувати масові частки кожного компонента шихти. Розрахунок виконується на базові 100 кг металеві завалки. Частка повернення власного виробництва (ПВВ) залишається фіксованою згідно з технологічною інструкцією і становить 40 кг.

Для визначення маси металізованих окатишів та лому було складено систему балансових рівнянь (за загальною масою та за балансом вуглецю).

Позначимо невідомі:

- $x$  – шукана маса металізованих окатишів, кг;
- $y$  – шукана маса лому, кг.

Система рівнянь має такий вигляд:

$$x + y + 40 = 100$$

$$C_{окатишів} \cdot x + C_{лом} \cdot y + C_{ПВВ} \cdot 40 = C_{ш} \cdot 100$$

Підставляємо відомі відсоткові значення вмісту вуглецю у рівняння:

$$0,9 \cdot x + 0,3 \cdot y + 0,15 \cdot 40 = 0,54 \cdot 100$$

Для розв'язання системи виразимо  $y$  через  $x$  з першого рівняння:

$$y = 60 - x$$

Підставимо отриманий вираз у друге рівняння та виконаємо математичні перетворення:

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$0,9x + 0,3(60 - x) + 6 = 54$$

$$0,9x + 18 - 0,3x = 48$$

$$0,6x = 30$$

$$x = 50$$

Відповідно, маса металізованих окатишів становить 50 кг. Знаходимо масу лому:

$$y = 60 - 50 = 10$$

Отже, розрахунки підтверджують, що оптимальний ваговий склад шихти для даного варіанту плавки складатиме:

1. Металізовані окатиші – 50 кг;
2. Повернення власного виробництва – 40 кг;
3. Лом вуглецевий – 10 кг.

Отримані вагові значення дозволили розрахувати масу кожного хімічного елемента, що вноситься в металеву ванну. Зведені результати матеріального та хімічного балансу для варіанту з окатишами наведено у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Розрахунок кількості хімічних елементів, що вносяться в шихту її компонентами

Матеріал	Вага, кг	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe
Металізовані окатиші	50	0,45	0	0	0,015	0,005	0	43,000
Повернення власного виробництва	40	0,06	0,196	0,144	0,008	0,008	-	39,584
Лом вуглецевий	10	0,03	0,050	0,027	0,003	0,0035	-	9,8645
Разом, кг	100	0,54	0,246	0,171	0,026	0,0165	0	92,4485

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

### 3.2.4 Період плавлення

Період плавлення супроводжується інтенсивним формуванням первинного шлаку, який утворюється за рахунок присадок шлакоутворювальних матеріалів, а також неминучого зносу вогнетривкого футерування печі.

Оскільки розрахунок ведеться на нормовані 100 кг металевої завалки, витрата цих матеріалів залишається на рівні базової технології.

Насамперед розрахункова модель визначає кількість оксидів, що потрапляють у шлак внаслідок розмивання магнезитової цегли та магнезитового порошку, якими заправляються укуси печі. Загальна маса магнезиту, що переходить у шлак на цьому етапі, становить 0,5 кг. Розподіл утворених оксидів наведено у таблиці 3.18.

Аналогічним чином враховується вплив високих температур та випромінювання дуг на знос магнезито-хромітового склепіння печі.

Таблиця 3.18 – Надходження оксидів у шлак від зносу магнезитового футерування

Найменування компонента	Кількість, кг
Оксид магнію (MgO)	0,4512
Оксид кальцію (CaO)	0,0175
Оксид кремнію (SiO <sub>2</sub> )	0,0173

Маса матеріалу склепіння, що осипається у ванну в період плавлення, становить 0,1 кг. Його хімічний внесок у шлак відображено у таблиці 3.19.

Таблиця 3.19 – Надходження оксидів у шлак від зносу склепіння печі

Найменування компонента	Кількість, кг
Оксид магнію (MgO)	0,0660
Оксид кремнію (SiO <sub>2</sub> )	0,0065
Оксид алюмінію (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,0040
Оксид заліза (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,0115
Оксид хрому (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,0100

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основним джерелом формування високоосновного шлаку є вапно, яке додається в завалку в кількості 2 % (або 2 кг на 100 кг шихти). Його розчинення забезпечує ванну необхідною кількістю оксиду кальцію для майбутньої дефосфорації металу (табл. 3.20).

Таблиця 3.20 — Надходження оксидів у шлак від присадки вапна

Найменування компонента	Кількість, кг
Оксид кальцію (CaO)	1,840
Оксид магнію (MgO)	0,066
Оксид кремнію (SiO <sub>2</sub> )	0,050

Разом із вапном у завалку додається залізна руда (2 кг). Її головне завдання – забезпечити ванну киснем для раннього окиснення домішок ще на стадії розплавлення, а також сприяти швидкому розрідженню шлаку. Кількість оксидів, внесених рудою, наведено у таблиці 3.21.

Таблиця 3.21 – Надходження оксидів у шлак від присадки залізної руди

Найменування компонента	Кількість, кг
Оксид заліза (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,800
Оксид кремнію (SiO <sub>2</sub> )	0,125
Оксид алюмінію (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,050

Крім утворення шлаку, під час розплавлення металізованих окатишів та брухту кисень атмосфери печі та залізної руди взаємодіє з елементами металеві ванни. Для розрахункової моделі встановлено такі регламентовані частки окиснення домішок у період плавлення (табл. 3.22).

Згідно з прийнятими нормативними частками, під час розплавлення шихти відбувається інтенсивне окиснення її компонентів. Кисень для цих реакцій надходить переважно за рахунок присадки залізної руди. Варто відзначити

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічну особливість даного варіанту плавки: оскільки в металізованих окатишах та інших компонентах шихти хром повністю відсутній, реакція його окиснення не відбувається.

Таблиця 3.22 – Частка окиснення елементів у період плавлення

Елемент	Частка окиснення, %
Кремній (Si)	60
Марганець (Mn)	50
Хром (Cr)	10
Фосфор (P)	30
Вуглець (C)	0,1

Загальні результати розрахунку маси окиснених елементів, кількості утворених неметалевих включень та відповідної потреби в кисні (через еквівалент закису заліза FeO) наведено у таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Процеси окиснення, що відбуваються в період плавлення

Окиснення компонентів у період плавлення	Кількість окиснених компонентів, кг	Кількість оксидів, що перейшли в шлак, кг	Потреба в FeO для окиснення, кг
$[C] + (FeO) = \{CO\} + [Fe]$	0,1000	–	0,6000
$[Mn] + (FeO) = (MnO) + [Fe]$	0,1230	0,1588	0,1610
$[Si] + 2(FeO) = (SiO_2) + 2[Fe]$	0,1026	0,2199	0,5277
$2[Cr] + 3(FeO) = (Cr_2O_3) + 3[Fe]$	0,0000	0,0000	0,0000
$2[P] + 5(FeO) + 4(CaO) = (4CaO \cdot P_2O_5) + 5[Fe]$	0,0078	0,0179	0,0472
		Всього	1,3355

Продукти окиснення домішок (за винятком газоподібного монооксиду вуглецю CO) спливають на поверхню розплаву. Там вони змішуються з оксидами,

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

які надійшли від розчинення вапна, залізної руди та руйнування вогнетривкого футерування печі. У результаті злиття цих неметалевих фаз формується первинний шлак періоду плавлення.

Програма автоматично зводить баланс усіх надходжень та розраховує підсумковий хімічний склад і масу шлаку (табл. 3.24).

Таблиця 3.24 – Склад і кількість шлаку періоду плавлення

Елементи	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Σ
Вміст, кг	2,3575	1,5436	0,1588	5,29	0,9333	0,429	0,0179	0	10,73
Вміст, %	21,971	14,3858	1,4798	49,3012	8,6975	3,9981	0,1665	0	100

Безповоротне видалення частини вуглецю, марганцю, кремнію та фосфору з металу призводить до закономірної зміни маси та хімічного складу самої сталеві ванни. Стан розплаву на момент повного розплавлення металеві завалки відображено в таблиці 3.25.

Таблиця 3.25 – Склад і кількість металу наприкінці періоду плавлення

Елементи	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	Σ
Вміст, кг	0,44	0,123	0,0684	0,0182	0,0165	0	92,4485	93,11
Вміст, %	0,4754	0,1321	0,0735	0,0195	0,0177	0	99,2846	100

Аналіз отриманого матеріального балансу (табл. 3.25) свідчить, що наприкінці періоду плавлення маса металу становить майже 92,4485 кг (з розрахунку на 100 кг завалки). Залишковий вміст вуглецю (0,4754 %) є цілком достатнім для забезпечення активного кипіння ванни в наступному періоді. Оскільки вміст фосфору все ще знаходиться на межі допустимого, плавка переходить до наступного технологічного етапу – окиснювального періоду, головним завданням якого є глибока дефосфорація та дегазація розплаву.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

### 3.2.5 Окиснювальний період

Головним завданням окиснювального періоду є дефосфорація металу та нагрівання ванни. Для варіанту плавки з використанням металізованих окатишів частки окиснення домішок залишаються на рівні базової технології:

- Вуглець (C) = 0,30 % (за абсолютною величиною);
- Кремній (Si) = 100 %;
- Марганець (Mn) = 60 %;
- Хром (Cr) = 50 %.

Для забезпечення марочної концентрації фосфору у готовому металі розрахункова модель визначає, що з розплаву підлягає видаленню 0,0045 % фосфору. Враховуючи термодинамічні умови процесу, середній вміст п'ятиоксиду фосфору ( $P_2O_5$ ) в шлаку приймається рівним 0,6 % (що відповідає практичним даним, де цей показник може досягати 2 %).

На основі цих даних розраховується необхідна маса шлаку для дефосфорації. Перед початком періоду 80 % первинного шлаку видаляється з печі. Баланс шлаку формується наступним чином:

- Необхідна кількість нового шлаку ( $M_{ш}$ ) = 1,7352 кг;
- Залишок шлаку періоду плавлення (20 %) = 2,146 кг;
- Загальна розрахункова маса шлаку окиснювального періоду = 3,881 кг.

Одночасно з формуванням шлаку відбувається окиснення елементів металеві ванни за рахунок кисню, що вноситься із залізною рудою. Масу окиснених компонентів та відповідну потребу в еквіваленті FeO наведено у таблиці 3.26.

Формування активного шлаку окиснювального періоду відбувається з кількох джерел. Основну частку вносить залишок шлаку періоду плавлення (зокрема 0,4715 кг CaO; 0,3087 кг SiO<sub>2</sub>; 1,0580 кг FeO; 0,1867 кг MgO). Додатково враховується надходження оксидів від зносу магнезитової цегли, порошку (0,37 кг) та магнезитохромітового склепіння.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.26 – Процеси, що відбуваються в окиснювальному періоді

Окислення компонентів в	Кількість окислених компонентів, кг.	Кількість оксидів, що перейшли в шлак, кг.	Потреба в FeO, в окиснювальний період, кг.
$[C] + (FeO) = \{CO\} + [Fe]$	0,30	-	1,8
$[Mn] + (FeO) = (MnO) + [Fe]$	0,0738	0,095269091	0,161018182
$[Si] + 2(FeO) = (SiO_2) + 2[Fe]$	0,0684	0,146571429	0,351771429
$2[Cr] + 3(FeO) = (Cr_2O_3) + 3[Fe]$	0	0	0
$2[P] + 5(FeO) + 4(CaO) = (4CaO \cdot P_2O_5) + 5[Fe]$	0,0032	0,007329032	0,018580645
		$\Sigma$	2,331370256

Для розрахунку потреби у свіжообпаленому вапні приймається технологічна основність шлаку ( $CaO/SiO_2$ ) на рівні 2,7, а сума основних оксидів ( $CaO + MgO + MnO$ ) має становити 65 % від загальної розрахункової маси шлаку (3,881 кг), що дорівнює 2,5228 кг. На основі складеного балансу за оксидами магнію, марганцю та кальцію, маса необхідного вапна склала 1,411 кг. Це вапно додатково вносить у систему  $MgO$  0,0466 кг, 1,298 кг  $CaO$  та 0,0353 кг  $SiO_2$ .

Потреба в залізній руді визначається на основі дефіциту кисню. Розрахунки показали, що для окиснення домішок та підтримання шлакового режиму необхідно додати в піч 4,347 кг  $FeO$ , що у перерахунку на  $Fe_2O_3$  становить 3,220 кг. З урахуванням хімічного складу руди, її необхідна маса склала 3,5778 кг. Ця кількість руди вносить у шлак 0,4657 кг  $FeO$  та 0,2236 кг  $SiO_2$  та  $Al_2O_3$  0,0894 кг.

Після підсумовування всіх присадок виконується перевірка на вміст кремнезему. Загальна кількість  $SiO_2$ , що надійшла в шлак (від залишків, окиснення кремнію, футерування, вапна та руди), склала 0,713 кг.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для збереження регламентованої основності на рівні 2,7 було виявлено незначний надлишок кремнезему (0,019 кг). Щоб його нейтралізувати, в розрахункову модель було закладено присадку додаткових 0,051 кг вапна.

Остаточний матеріальний та хімічний баланс шлакової фази після завершення всіх реакцій наведено у таблиці 3.27.

Таблиця 3.27 – Склад і кількість шлаку окиснювального періоду

Елементи	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Σ
Вміст, кг	1,8292	0,7328	0,127	1,5238	0,6150	0,178	0,0109	0,007	0,0081	5,0317
Вміст, %	36,353	14,5628	2,5245	30,2829	12,2226	3,5384	0,2167	0,1391	0,160	100

Видалення частини елементів у шлак та газову фазу закономірно змінює масу та склад металеві ванни. Підсумковий матеріальний баланс металу перед початком завершального (відновного) періоду наведено у таблиці 3.28.

Таблиця 3.28 – Склад і кількість металу наприкінці окиснювального періоду

Елементи	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	
Вміст, кг	0,140	0,0492	0	0,0150	0,0165	0	92,4485	92,6692
Вміст, %	0,1511	0,0531	0	0,0162	0,0178	0	99,7618	100,0000

### 3.2.6 Відновний період

Заключним технологічним етапом є відновний період, під час якого здійснюється глибоке розкислення металеві ванни, видалення сірки (десульфурація) та остаточне легування сталі до марочного хімічного складу. Розрахунок необхідної маси відновного шлаку базується на умовах десульфурації. Для досягнення регламентованого вмісту сірки у готовому металі (0,015 %) з розплаву необхідно видалити 0,0026 кг сірки (або 0,00281 %).

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Враховуючи коефіцієнт розподілу та забезпечення концентрації сірки у шлаку на рівні 0,3 %, необхідна маса відновного шлаку становитиме 0,8665 кг (0,935 % від маси металу).

Для легування сталі марганцем та попереднього розкислення в піч присаджується силікомарганець марки СМn20 (із засвоєнням марганцю 97 %). Для отримання заданого хімічного складу витрата силікомарганцю становить 0,6099 кг. Одночасно для доведення вмісту кремнію використовується феросиліцій марки ФС75 (із засвоєнням кремнію 50 %), витрата якого склала 0,6164 кг. Загальну кількість легувальних елементів, внесених цими феросплавами, наведено у таблиці 3.29.

Для забезпечення ефективної десульфурації формується високоосновний шлак.

Його матеріальний баланс (загальна маса 0,8665 кг) складається з 5 % залишку шлаку окиснювального періоду (0,2516 кг), продуктів руйнування футерування стін і поду (0,33 кг), склепіння (0,03 кг) та свіжої шлакової суміші (0,2549 кг).

Таблиця 3.29 – Кількість легувальних елементів, внесених до металу феросплавами

Найменування феросплаву	Найменування легуючих елементів	
	Si	Mn
СМn20	0,110575157	0,426954639
ФС75	0,231140007	-
Разом	0,341715164	0,426954639

Склад шлакової суміші приймається за практичними даними: 75 % вапна (0,1912 кг), 15 % плавикового шпату (0,0382 кг) та 10 % шамотного бою (0,0255 кг). Алгоритм підсумовує оксиди, що надходять з усіх перелічених джерел, а також оксиди кремнію, що утворюються внаслідок згоряння частини

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

феросплавів. Попередній хімічний склад відновного шлаку до протікання реакцій розкислення наведено у таблиці 3.30.

Таблиця 3.30 – Попередній склад та маса шлаку відновного періоду

Елементи	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaF <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Σ
Вміст, кг	0,2789	0,6686	0,0064	0,0762	0,3547	0,0190	0,0005	0,0363	0,0034	0,0039	1,4479
Вміст, %	19,2649	46,1784	0,4387	5,2621	24,4974	1,3141	0,0376	2,5093	0,2314	0,2661	100

Упродовж відновного періоду в печі відбуваються реакції розкислення металу та десульфурації. Розрахункова кількість кисню в металі становить 0,0293 % (або 0,132 % у формі FeO). У процесі розкислення 40 % цього кисню взаємодіє з кремнієм, утворюючи 0,0220 кг кремнезему (SiO<sub>2</sub>), а 60 % кисню реагує з алюмінієм, утворюючи 0,0374 кг глинозему (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Одночасно плавиковий шпат (фтористий кальцій) взаємодіє з кремнеземом, внаслідок чого утворюється 0,01 кг леткого фтористого кремнію (SiF<sub>4</sub>), який повністю випаровується. На цю реакцію витрачається 0,0069 кг SiO<sub>2</sub> та утворюється 0,0130 кг CaO. Паралельно протікає реакція десульфурації, під час якої утворюється 0,0058 кг CaS та 0,0058 кг FeO, при цьому витрачається 0,0045 кг CaO і відновлюється 0,0045 кг заліза (Fe).

Після завершення всіх масообмінних процесів система формує остаточні баланси плавки. Кінцевий склад сталі наведено у таблиці 3.31, а остаточний склад шлаку – у таблиці 3.32.

Таблиця 3.31 – Кінцевий склад металу наприкінці відновного періоду

Елементи	C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	Σ
Вміст, кг	0,1500	0,4762	0,3417	0,015	0,015	0	92,453	93,4509
Вміст, %	0,1605	0,5095	0,3657	0,0161	0,0161	0	98,9322	100

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Таблиця 3.32 – Остаточна маса та склад шлаку кінця відновного періоду

Елементи	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaS	Σ
Вміст, кг	0,2874	0,6836	0,0063	0,0761	0,35469	0,019	0,0005	0,0033	0,0181	0,0038	0,0058	1,45905
Вміст, %	19,699	46,854	0,4353	5,222	24,309	1,304	0,0374	0,2296	1,245	0,264	0,4009	100,00000

Підсумовуючи всі технологічні етапи математичного моделювання, була отримана зведена відомість витрат. Таким чином, на проплавлення 100 кг шихти знадобиться наступна кількість матеріалів:

1. Металізовані окатиші	50
2. ПВВ	40
3. Лом металевий	10
4. Силікомарганцю марки СМн20	0,609935199
5. Феросиліцію марки ФС75	0,616373351
6. Вапна	3,652885772
7. Руди	5,577766745
8. Плавикового шпату	0,038242969
9. Шамотного бою	0,025495312
10. Коксу	0,02
11. Алюмінію	0,1

3.3 Порівняльний аналіз використання передільного чавуну та металізованих окатишів у металошихті

На основі отриманих результатів розрахунку матеріального балансу можна прослідкувати чітку зміну в співвідношенні компонентів шихти при впровадженні до складу металеві завалки металізованих окатишів. Аналіз розрахункових даних показує, що у базовому варіанті маса металевого брухту складала 51,89 кг, а маса передільного чавуну марки ПЛ-2 – 8,11 кг. При переході на альтернативну шихту завалка зазнає сутєвих змін: маса металізованих окатишів становить 50 кг, а витрата металобрухту зменшується до 10 кг. Разом із

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цим спостерігається зростання витрати шлакоутворювальних матеріалів (зокрема вапна) для здійснення процесів шлакоутворення. Такі зміни в матеріальному балансі плавки зумовлені відмінностями у хімічному складі та фізико-хімічних властивостях вихідних матеріалів.

Детальний аналіз цих відмінностей та їхнього впливу на хід технологічного процесу наведено нижче.

1. Вміст шкідливих домішок (сірка та фосфор) Головною перевагою металізованих окатишів порівняно з передільним чавуном є їхня висока хімічна чистота від насамперед за шкідливими домішками. Як свідчать вихідні дані (табл. 3.2 та табл. 3.16), передільний чавун вносить у металевий розплав значну кількість фосфору (0,15–0,30 %). Це зумовлює необхідність витратити додатковий час і матеріали на інтенсивну дефосфорацію, зокрема наводити більший об'єм залізного шлаку в окисний період плавки. Натомість в окатишах вміст фосфору є незначним (0,01–0,03 %), як і сірки (0,005–0,015 %). Таким чином, використання окатишів замість чавуну та частини брухту виконує роль своєрідного «розріджувача» шкідливих домішок у ванні: вони суттєво знижують їхню загальну концентрацію, що технологічно полегшує та прискорює процес отримання високоякісної сталі із низьким вмістом сірки й фосфору.

2. Вуглець та баланс тепла Різна поведінка матеріалів під час розплавлення має прямий вплив на хімічні реакції в ЕДП. Передільний чавун характеризується високим вмістом вуглецю (4,0–4,4 %), а також наявністю кремнію (0,5–1,2 %) та марганцю (0,5–1,5 %). З одного боку, екзотермічні реакції окиснення цих елементів киснем виділяють додаткове хімічне тепло, що позитивно впливає на нагрівання ванни та знижує витрати електроенергії. З іншого боку, для випалювання значного обсягу вуглецю до параметрів необхідної марки сталі потрібна більш тривала продувка ванни киснем, що збільшує загальну тривалість окисного періоду. На відміну від чавуну, в окатишах вміст вуглецю значно нижчий (1,0–2,5 %), що є ближчим до оптимального вмісту вуглецю по розплавленню шихти. Оскільки вони практично не містять кремнію та марганцю,

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тривалість кисневої продувки та пов'язаний із нею часовий інтервал окисного періоду можуть бути скорочені.

3. Шлакоутворення (вплив пустої породи) Основним технологічним недоліком збільшення частки металізованих окатишів у завалці є наявність у їхньому складі пустої породи. Згідно з даними табл. 3.16, окатиші містять діоксид кремнію ( $\text{SiO}_2$  – 2,0–4,0 %) та оксид алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,5–1,5 %). Для нейтралізації кислого діоксиду кремнію та підтримання необхідної основності шлаку виникає потреба в присадці значно більшої кількості вапна. Збільшення загальної маси шлаку призводить до супутніх негативних наслідків: підвищених теплових втрат зі шлаком, зростання питомих витрат електроенергії на його розплавлення та деякого зниження виходу придатного рідкого заліза (оскільки частина металу заплутується у великому об'ємі шлакового розплаву). Передільний чавун, будучи готовим металевим сплавом, не містить компонентів пустої породи, тому об'єм технологічного шлаку при його використанні є помітно меншим.

Підсумовуючи результати порівняння вихідних даних, можна зазначити, що заміна передільного чавуну та частини сталевого брухту на 50 кг металізованих окатишів із відповідним коригуванням маси брухту до 10 кг має двоякий технологічний вплив. Вона дозволяє суттєво знизити концентрацію шкідливих домішок (сірки та фосфору) у первинному розплаві та оптимізувати тривалість окисного періоду завдяки раціональному вмісту вуглецю. Водночас наявність пустої породи ( $\text{SiO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в окатишах неминуче зумовлює збільшення кількості утвореного шлаку, що вимагає підвищеної витрати вапна та призводить до зростання питомих витрат електроенергії на плавку.

Аналіз результатів розрахунку матеріального балансу для виплавки сталі марки Ст30 показав можливість використання металізованих окатишів при виплавці сталі в ЕДП. Для оцінки впливу різних варіантів шихтування на технологічні показники процесу плавлення і якість сталі було побудовано відповідні гістограми. На діаграмах порівнюються два варіанти складання шихти, які умовно позначені як «Чавун» (класична шихтовка з чавуном і

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вуглецевим брухтом) та «Окатиші» (альтернативна шихтовка з використанням металізованої сировини).

На рис. 3.3 наведено порівняння загальної маси фосфору (P), що вноситься в піч компонентами шихти в обох технологічних варіантах.

Як видно з рисунка 3.3, перехід на металізовані окатиші у шихтових матеріалах дозволяє знизити загальну кількість фосфору у шихті з  $\sim 0,033$  кг до  $0,026$  кг (у розрахунку на 100 кг металозавалки).

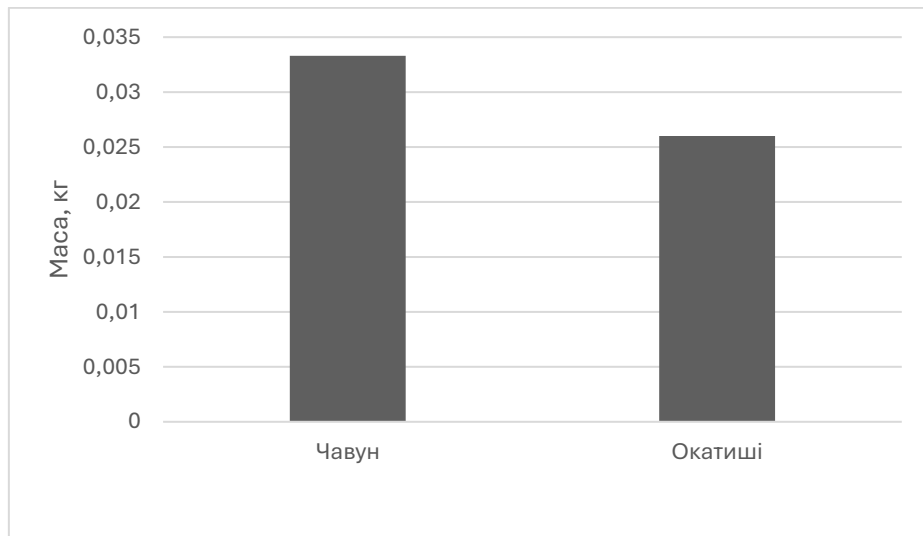


Рис. 3.3 – Порівняння кількості шкідливої домішки фосфору (P) залежно від варіанту шихти

Ще більш суттєву позитивну динаміку можна спостерігати при порівнянні маси сірки (S), що вноситься в ЕДП з шихтовими матеріалами (рис. 3.4.)

Дані, відображені на рис. 3.4, підтверджують, що маса сірки при переході на окатиші зменшується майже вдвічі – з  $0,030$  кг у базовому варіанті до  $0,0165$  кг в альтернативному.

Розроблена математична модель дозволяє чітко зафіксувати це зниження концентрації шкідливих домішок на етапі розрахунку матеріального балансу. Цей підхід забезпечує високу точність прогнозування хімічного складу розплаву без необхідності врахування специфічних геометричних розмірів плавильної печі, що робить алгоритм універсальним. Значно менша кількість сірки та фосфору на

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

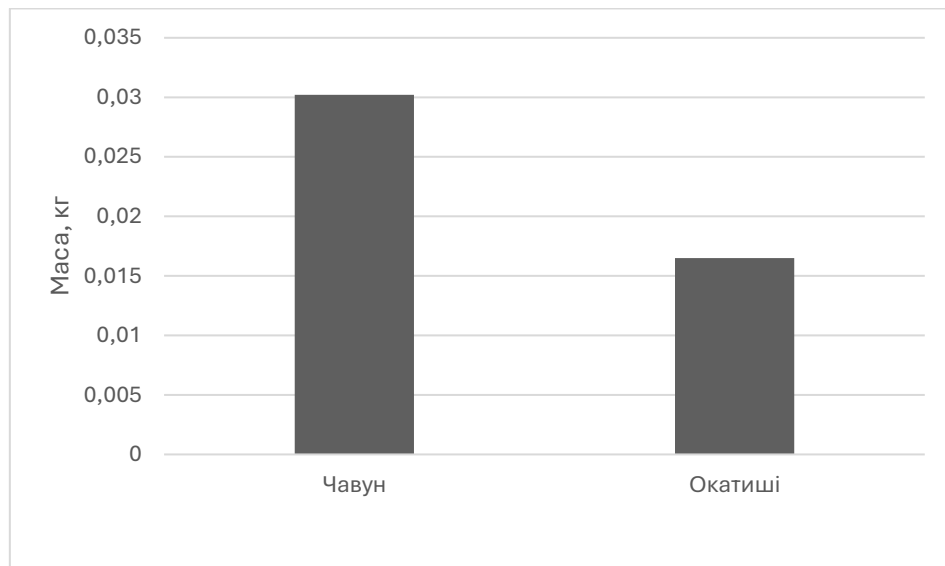


Рис. 3.4 – Порівняння кількості шкідливої домішки сірки (S) залежно від варіанту шихти

стадії завалення створює сприятливі умови для ведення плавки: це дозволяє зменшити витрати шлакоутворювальних матеріалів, скоротити тривалість рафінувального періоду та гарантувати стабільно високі хімічні властивості готового металу.

Наступним важливим етапом порівняльного аналізу є комплексна оцінка окиснювального потенціалу, необхідного для видалення домішок на різних стадіях плавки. На початкових етапах (у період плавлення) відбувається інтенсивне окиснення супутніх елементів шихти - зокрема кремнію (Si), марганцю (Mn) та частини вуглецю (C). Наступний, окиснювальний період, спрямований на нагрів металу, дефосфорацію та вигорання надлишкового вуглецю до заданих меж марки сталі Ст30.

Джерелом кисню для зазначених реакцій в обох періодах виступає закис заліза (FeO), що утворюється безпосередньо в печі внаслідок угару або вноситься ззовні у вигляді твердих окиснювачів (залізної руди, окалини). Для візуалізації та порівняння витрат окиснювача за різними технологічними варіантами було побудовано об'єднану діаграму (рисунок 3.5), яка демонструє розрахункову потребу в FeO у період плавлення та в окиснювальний період при використанні

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

класичної шихти (з чавуном і сталевим брухтом) та альтернативної (з металізованими окатишами).

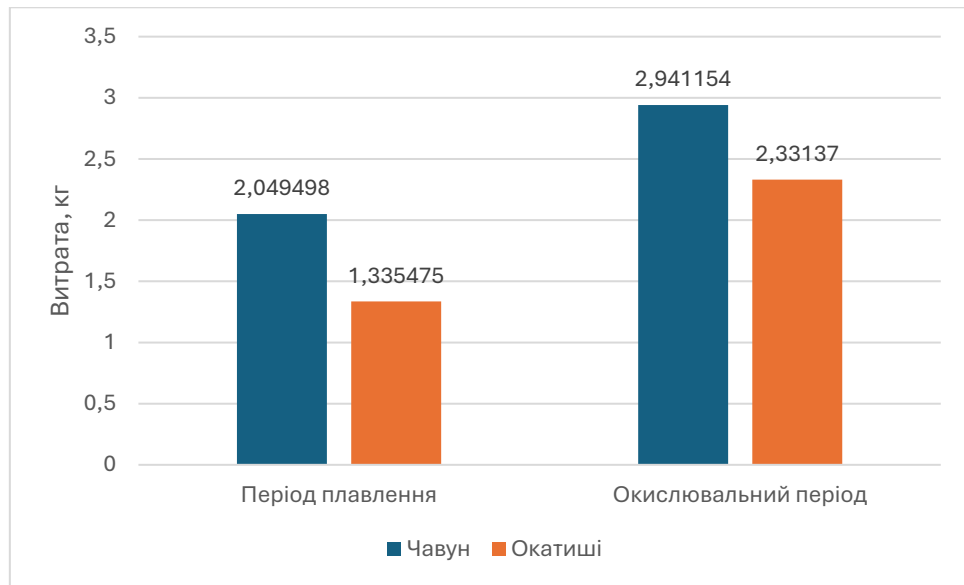


Рис. 3.5 – Порівняння потреби в FeO у період плавлення для окиснення компонентів шихти

Як свідчать дані, наведені на рис. 3.5, перехід на використання металізованих окатишів дозволяє суттєво знизити потребу в закисі заліза протягом усього технологічного циклу плавки.

У період розплавлення шихти для класичного варіанту («Чавун») розрахункова маса необхідного FeO становить понад 2,0 кг на 100 кг завалення, тоді як для варіанту з окатишами ця величина зменшується приблизно до 1,3–1,35 кг. Така різниця, що становить зниження потреби в окиснювачі майже в 1,5 рази, має чітко визначене підґрунтя. Металізовані окатиші є хімічно чистішою сировиною і майже не містять марганцю та кремнію порівняно зі сталевим ломом. Відповідно, менша концентрація цих елементів у розплаві потребує пропорційно менших витрат кисню FeO на їхнє переведення у шлакову фазу.

З технологічної точки зору це забезпечує кілька вагомих переваг у першій половині плавки:

1. Зменшення обсягу твердих присадок: Потрібно менше залізної руди чи окалини, що знижує загальні витрати матеріалів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Оптимізація шлакового режиму: Менша кількість продуктів окиснення ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ) означає менший загальний вихід шлаку.
3. Підвищення виходу придатного: Зниження концентрації  $\text{FeO}$  в системі сприяє зменшенню безповоротних втрат заліза зі шлаком, що позитивно позначається на техніко-економічних показниках.

Під час окиснювального періоду тенденція до зниження витрат окиснювача зберігається. Аналіз графіка (рис. 3.5) показує, що для шихти на основі металізованих окатишів потреба в  $\text{FeO}$  є нижчою (близько 2,3 кг) порівняно з класичним варіантом шихтовки (близько 2,95 кг).

Даний ефект пояснюється двома ключовими факторами. По-перше, розплав, отриманий з окатишів, від самого початку має значно нижчу концентрацію супутніх домішок, що мінімізує витрати кисню на їх доокиснення. По-друге, самі металізовані окатиші містять у своєму складі певну частку залишкових оксидів заліза (невідновлений  $\text{FeO}$ ), які під час нагрівання металевої ванни виконують роль внутрішнього окиснювача. Це активізує реакцію «кипіння» ванни (взаємодію  $[\text{C}] + (\text{FeO}) \rightarrow \text{Fe} + \text{CO} \uparrow$ ) без потреби у значних присадках зовнішніх дефіцитних окиснювачів. Як наслідок, скорочується тривалість окиснювального періоду.

Вибір матеріалів металошихти має вирішальний вплив на формування шлакового режиму під час виплавки сталі Ст30. Для порівняльної оцінки масових показників утворення шлаку за різними періодами плавки було використано розроблену автоматизовану Excel-модель. Розрахункові дані для класичної шихти («Чавун») та альтернативної («Окатиші») наведено на рис. 3.6.

Як свідчать результати розрахунків та наведена діаграма (рис. 3.6), динаміка утворення шлакової фази кардинально відрізняється залежно від використаних матеріалів.

Для класичного варіанту плавки (на основі чавуну) характерне більш-менш рівномірне утворення шлакової фази за всіма періодами процесу - маса коливається у вузьких межах від 1,93 до 2,97 кг.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

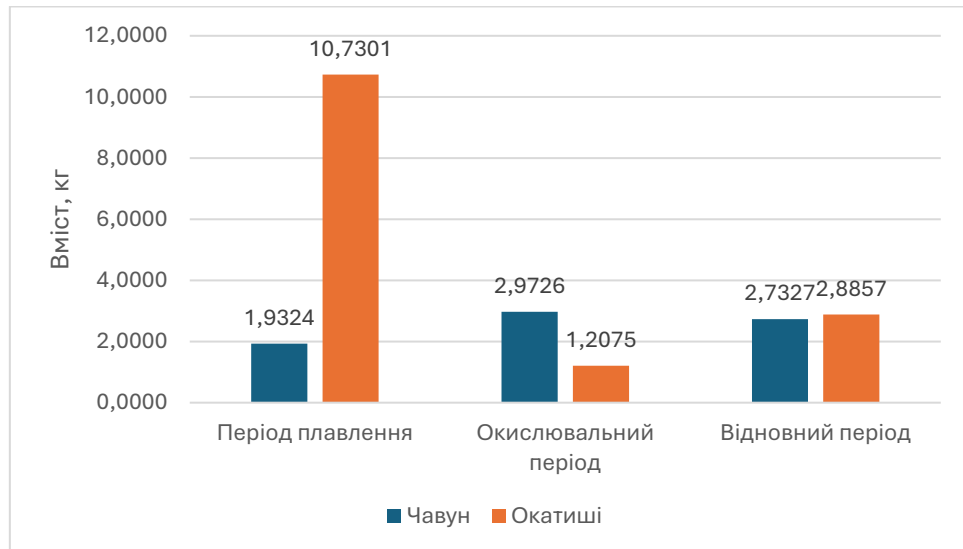


Рис. 3.6 – Порівняння маси шлаку в різні періоди сталеплавильного процесу

Натомість при використанні металізованих окатишів спостерігається різкий перерозподіл: велика кількість шлаку утворюється під час плавлення, після чого відбувається значне зменшення кількості його утворення.

Найбільша маса шлаку при використанні окатишів фіксується саме в період плавлення – 10,73 кг проти 1,93 кг для класичного варіанту. Ця різниця має чітке металургійне пояснення: у період розплавлення вся пуста порода, що міститься в окатишах (переважно оксиди кремнію та алюмінію), повністю переводиться в шлакову фазу. Для нейтралізації цієї кислої породи та наведення шлаку необхідної основності потрібно вводити додаткову кількість вапна, що сумарно різко збільшує об'єм шлаку на цьому етапі.

Для видалення шкідливих домішок, зокрема фосфору, які перейшли у шлак під час розплавлення, технологією передбачено скачування 80 % шлаку. Оскільки загальна маса шлаку в печі для варіанту з окатишами є значно більшою, маса скачаного (видаленого з печі) шлаку також закономірно зростає і становить 2,15 кг порівняно з 0,39 кг для шихти на основі чавуну. Ця технологічна операція є критично важливою для запобігання зворотному переходу домішок (рефосфорації) у рідкий метал.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В окислювальний період на відміну від періоду плавлення, де варіант з окатишами генерував максимальну кількість шлаку, спостерігається його значне зменшення. Маса новоутвореного шлаку для альтернативної шихти становить лише 1,21 кг, що більш ніж удвічі менше порівняно з класичним варіантом, який у цей період досягає свого піка – 2,97 кг. Оскільки розплав, отриманий з металізованих окатишів, від самого початку має вищу хімічну чистоту і потребує меншого окислення домішок (кремнію, марганцю, вуглецю) порівняно з чавуном, потреба у шлакоутворювальних матеріалах різко падає.

У відновний період (період розкислення та легування) маси шлаків для обох варіантів майже зрівнюються: 2,73 кг для чавуну та 2,89 кг для окатишів. Це зумовлено стандартною для обох технологій необхідністю наведення високоосновного вапняного шлаку для проведення фінальної десульфурації.

Таким чином, результати моделювання підтверджують: класичний процес характеризується відносно рівномірним розподілом шлакоутворення, тоді як використання окатишів зміщує майже весь об'єм шлаку на період плавлення через необхідність зв'язування пустої породи. Проте це забезпечує значне зменшення шлакоутворення на наступній, окислювальній стадії плавки.

Завершальним етапом розрахункової моделі є визначення кінцевої маси готової сталі після всіх технологічних періодів.

Згідно з даними діаграми, кінцева маса металу для класичної шихти становить 99,58 кг, тоді як при використанні металізованих окатишів цей показник знижується до 93,45 кг. Таким чином, при роботі на альтернативній шихті ми отримуємо на 6,13 кг менше придатного металу з кожних 100 кг завалення. У відсотковому відношенні зниження виходу готової сталі становить близько 6,16 %.

Порівняння виходу придатного металу для двох варіантів шихтовки наведено на рис. 3.7.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

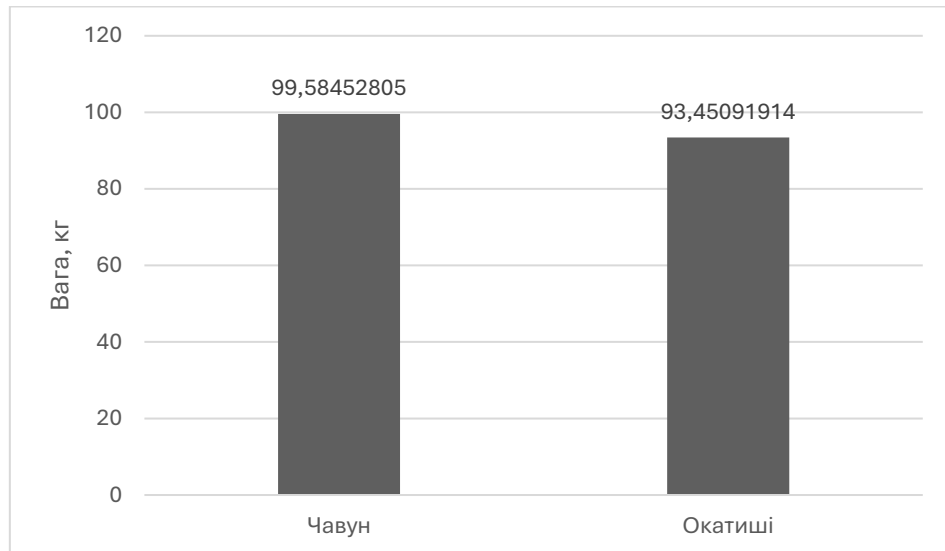


Рис. 3.7 – Кінцева маса металу

Таке зниження маси металу є закономірним і має чітке обґрунтування, пов'язане з двома основними факторами:

1. Фізико-хімічні властивості сировини: Металізовані окатиші не є стовідсотково чистим залізом. Ступінь їхньої металізації зазвичай складає 90–95 %, а решта маси - це пуста порода та невідновлені оксиди, які переходять у шлак.
2. Вплив шлакового режиму: Як було показано на рис. 3.6, використання окатишів призводить до утворення значно більшого об'єму шлакової фази у період плавлення. Більша кількість шлаку неминуче спричиняє підвищення безповоротних втрат заліза (у вигляді оксиду FeO), яке розчиняється у шлаку і частково видаляється з печі під час його скачування.

Технологія виплавки сталі Ст30 з використанням металізованих окатишів вимагає певного технологічного та економічного компромісу. З одного боку, спостерігається зниження масового виходу придатного металу приблизно на 6 % через збільшене шлакоутворення. З іншого боку, ця технологія гарантує виняткову хімічну чистоту розплаву від шкідливих домішок, мінімізує потребу у дефіцитних флюсах під час відновлювального періоду та забезпечує стабільно високу якість кінцевої металопродукції.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз ефективності відновлювального періоду неможливий без детального вивчення хімічного складу кінцевого шлаку. На рисунках 3.8 та 3.9 у вигляді кругових діаграм наведено хімічний склад шлаку наприкінці плавки для класичної шихти («Чавун») та альтернативної («Окатиші»).

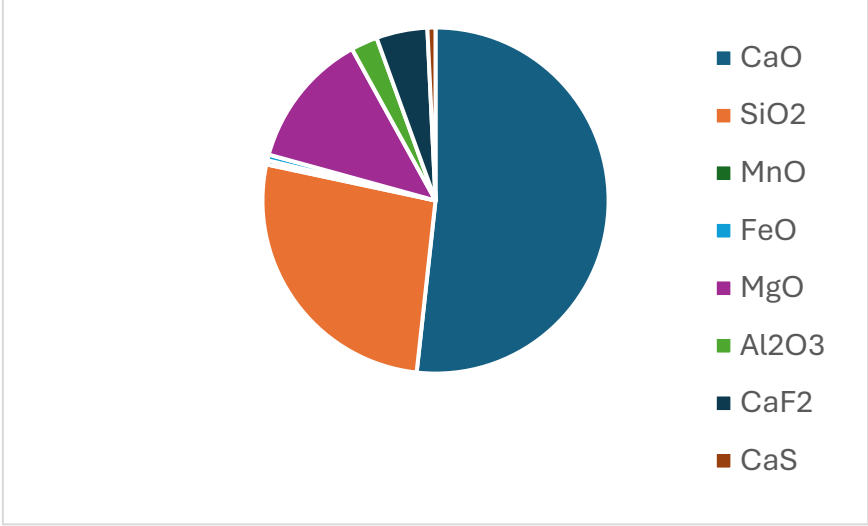


Рис. 3.8 –Хімічний склад шлаку кінця відновного періоду (чавун)

Як свідчать розрахункові дані (рисунок 3.8), хімічний склад шлаку при роботі на класичній шихті має яскраво виражений основний характер. У ньому абсолютно переважає оксид кальцію (CaO), масова частка якого становить 51,55%.

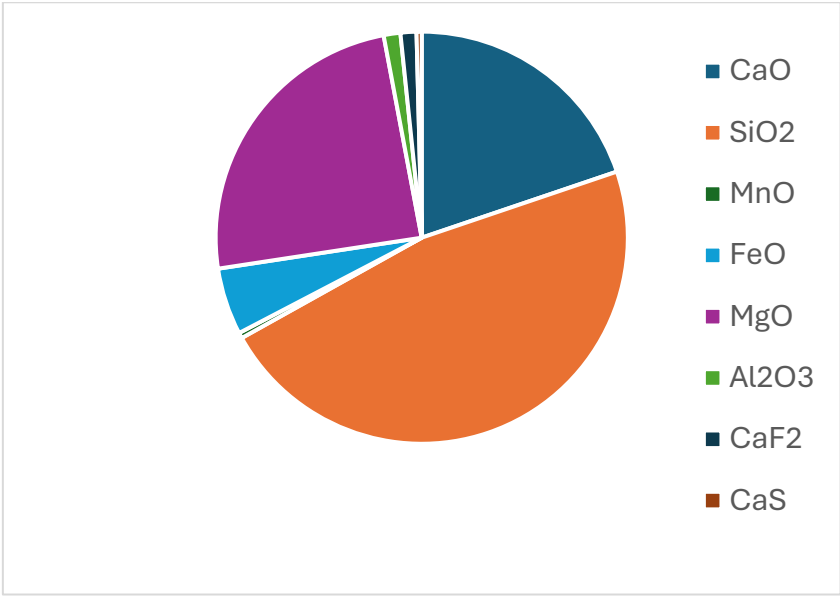


Рис. 3.9 – Хімічний склад шлаку кінця відновного періоду (металізовані окатиші)

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Високий вміст СаО є технологічно необхідною умовою для класичного процесу, оскільки високоосновний вапняний шлак забезпечує глибоку десульфурацію металу. Відповідно, вміст утвореного продукту десульфурації – сульфїду кальцію (СаS) – у базовому варіанті становить 0,75 %.

На противагу базовому варіанту, хімічний склад шлаку кінця відновного періоду за умови застосування металізованих окатишів (рисунок 3.9) має суттєві відмінності. Згідно з класифікацією В. В. Лапіна, хімічну природу шлаків визначає показник основності, який розраховується як відношення суми концентрацій основних оксидів до суми концентрацій кислотних. Для шлаку, утвореного при використанні металізованих окатишів, розрахунок основності має такий вигляд:

Оскільки отриманий показник основності становить 1,03, що відповідає нормативному діапазону 1,0–1,5, даний розплав, відповідно до класифікації В. В. Лапіна, впевнено відноситься до групи середніх за основністю шлаків.

Окрім вапна, зниження загальної маси шлаку у відновлювальний період дозволяє суттєво зекономити на розріджувачах, що вносяться для забезпечення його текучості. Розрахункова частка плавикового шпату (СаF<sub>2</sub>) знижується з 4,76 % (рис. 3.8) до 1,25 % (рис. 3.9). Таким чином, на фінальній стадії плавки окатиші забезпечують значну економію шихтових матеріалів.

Аналізуючи хімічний склад, також варто відзначити елементи, яких у системі мінімальна кількість. В обох варіантах спостерігається майже повна відсутність оксиду фосфору (PO<sub>5</sub>) - 0,02 % для чавуну та 0,04 % для окатишів, а також дуже низький вміст оксиду марганцю (MnO) — 0,40 % та 0,44 % відповідно. Це підтверджує, що процеси окиснення та видалення цих домішок успішно завершилися ще в першій половині плавки.

Окремої уваги заслуговує вміст закису заліза (FeO) у кінцевому шлаку. При роботі на чавуні він є мінімальним (0,53 %), що свідчить про успішне розкислення металу. Натомість у варіанті з окатишами частка FeO наприкінці плавки залишається аномально високою - 5,22 %. Це має важливе значення для

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розуміння процесу: металізовані окатиші містять невідновлені оксиди і працюють як внутрішній окиснювач. З огляду на це, при роботі на окатишах у піч можна було додавати значно менше зовнішніх окиснювачів. Надлишок кисню перейшов у шлак, захопивши залізо, що додатково пояснює зниження виходу придатного металу. Крім того, наявність активного FeO та кислий характер шлаку підвищують розмивання вогнетривів, про що свідчить зростання частки оксиду магнію (MgO) з 12,66 % до 24,31 %.

У даному розділі було проведено комплексне математичне моделювання процесу виплавки сталі для двох технологічних варіантів: класичного (із використанням сталевого брухту та чавуну) та альтернативного (при плавці на металізованих окатишах).

Для реалізації цього завдання було розроблено та застосовано автоматизовану Excel-модель. Важливою особливістю створеної програми є те, що вона не лише виконує наскрізний розрахунок матеріального балансу по всіх періодах плавки, але й враховує технологічні обмеження і одразу порівнює результати між собою. Програма автоматично аналізує фінальні дані та сигналізує, чи була отримана потрібна марка сталі (Ст30) за хімічним складом, що дозволяє оперативно коригувати хід плавки ще на етапі проєктування матеріалопотоків без прив'язки до геометричних параметрів конкретної печі.

За результатами проведеного порівняльного аналізу встановлено, як саме змінилися техніко-економічні показники процесу при переході на металізовану сировину:

Що покращилось:

- Хімічна чистота: Кардинально знизився вміст шкідливих домішок (сірки та фосфору) та супутніх елементів (марганцю і кремнію) у розплаві.
- Економія матеріалів: Значно знизилась потреба у зовнішніх окиснювачів (FeO), а також різко впали витрати вапна (CaO) та плавикового шпату (CaF<sub>2</sub>) у відновлювальний період завдяки відсутності потреби у глибокій десульфурації.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Що погіршилось:

- Шлаковий режим на початку плавки: Суттєво (більш ніж у 4 рази) зріс об'єм шлаку в періоди плавлення через наявність пустої породи у металізованих окатишах.
- Вихід придатного металу: Знизився масовий вихід готової сталі (з 99,58 кг до 93,45 кг у розрахунку на 100 кг завалення) через збільшення безповоротних втрат заліза з великим об'ємом первинного шлаку та надлишком нереалізованого кисню.
- Енергоефективність: Збільшення маси первинного шлаку більш ніж у 4 рази неминуче призведе до зростання питомих витрат електроенергії та подовження тривалості плавки. Додаткова теплова енергія витратиметься на проплавлення збільшеного обсягу порожньої породи окатишів, нагрівання додаткового вапна та ендотермічні реакції відновлення залишкових оксидів заліза.

Завершальним етапом технологічного проєктування є визначення загальної кількості додаткових матеріалів (розкислювачів, легуючих добавок та флюсів), необхідних для проплавлення 100 кг шихти та доведення металу до марочного складу сталі Ст30. Для наочного порівняння структури цих витрат побудовано кругові діаграми (рисунки 3.10 та 3.11).



Рис. 3.10 – Структура витрат матеріалів на проплавлення 100 кг шихти (чавун)

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як свідчать розрахункові дані, абсолютну більшість у структурі додаткових матеріалів для обох варіантів займає вапно, що є головним шлакоутворювальним компонентом. При роботі на класичній шихті (рисунок 3.10) витрата вапна становить 3,01 кг на 100 кг завалення (близько 70,3 % від загальної маси цих добавок). Витрати феросплавів для розкислення та легування розподіляються наступним чином: силікомарганець СМн20 - 0,59 кг (13,7 %), феросиліцій ФС75 — 0,69 кг (16,0 %).

При переході на металізовані окатиші (рисунок 3.11) загальна структура добавок візуально зберігається, проте абсолютні значення зазнають певних змін.

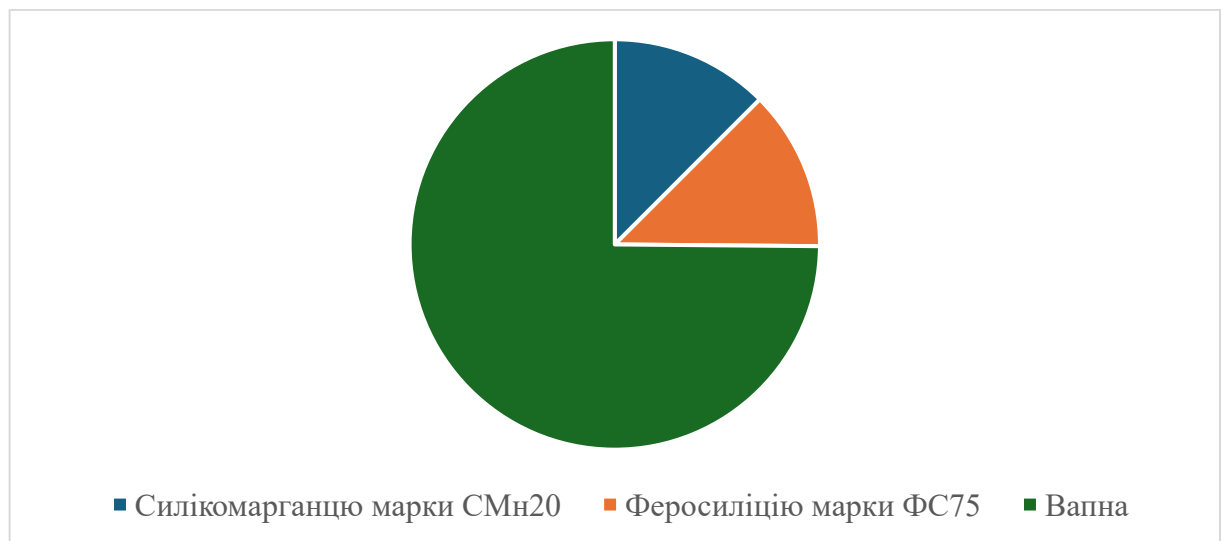


Рис. 3.11 – Структура витрат матеріалів на проплавлення 100 кг шихти (металізовані окатиші)

Витрата вапна зростає до 3,65 кг (що становить майже 74,9 % від загальної маси присадок). Це зростання сумарної кількості вапна за всю плавку є закономірним наслідком того, що металізовані окатиші містять значну кількість кислої пустої породи ( $\text{SiO}_2$ ), для нейтралізації якої ще на стадії плавлення потрібно вводити додаткові порції основного флюсу.

Водночас витрати дефіцитних феросплавів залишаються відносно стабільними, оскільки вони жорстко регламентуються цільовим хімічним

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складом сталі Ст30. Для альтернативного варіанту потреба в силікомарганці СМн20 становить 0,61 кг (12,5 %), а у феросиліції ФС75 — 0,62 кг (12,6 %). Незначне коливання в масі розкислювачів (зменшення ФС75 та збільшення СМн20) пояснюється відмінностями в окисненості ванни перед початком відновлювального періоду та різним ступенем засвоєння елементів із феросплавів під шаром шлаку іншого хімічного складу.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ПА	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розроблено та реалізовано універсальну розрахункову модель матеріального балансу процесу виплавки сталі в електродуговій печі в середовищі Microsoft Excel. Модель дозволяє виконувати автоматизований перерахунок основних технологічних параметрів при зміні вихідних даних, що забезпечує її універсальність та придатність для аналізу різних варіантів шихтування.

У межах роботи виконано розрахунок базового варіанту виплавки сталі із використанням традиційної металошихти (вуглецевий лом, повернення власного виробництва, чавун ПЛ-2 та кокс). На основі поетапного матеріального балансу визначено склад металевої завалки, шлакоутворення та зміну хімічного складу металу в основні технологічні періоди плавки

Додатково змодельовано перспективний варіант технології виплавки із частковою заміною традиційної металошихти на металізовані окатиші. Для цього виконано перерахунок шихтування, матеріального балансу та розподілу елементів у процесі плавки з урахуванням зміненого хімічного складу вихідних матеріалів.

Порівняльний аналіз двох варіантів показав, що використання металізованих окатишів змінює структуру металевої шихти та характер надходження домішок у ванну, що впливає на параметри шлакоутворення та умови протікання окисно-відновних реакцій. При цьому модель дозволяє оперативно оцінювати вплив зміни шихтових матеріалів на кінцевий хімічний склад сталі.

Розроблена Excel-модель підтвердила дієвість та може бути використана для інженерних розрахунків та вдосконалення технології виплавки сталі, зокрема при впровадженні альтернативних металошихтових матеріалів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.В			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив		Ошека			Висновки	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Ярош					1	1
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ Група МТ-22-2		
Н.контроль		Ярош						
Затвердив		Бабошко						

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гиммельфарб А. А., Неменов А. М., Тарасов Б. Е. Металлизация и электроплавка железорудного сырья. М. : Metallurgy, 1981. 152 с.
2. Григорян В. А., Белянчиков Л. Н., Стомахин А. Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Metallurgy, 1987. 272 с.
3. Fruehan R. J. The Making, Shaping, and Treating of Steel: Ironmaking Volume. AISE Steel Foundation, 1998.
4. International Energy Agency (IEA). Iron and Steel Technology Roadmap. Paris : IEA, 2020.
5. Kirschen M., Badr K., Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. Energy. 2011. Vol. 36, No. 10. P. 6146–6155.
6. Kopfle J. T. The Role of DRI in Future Steelmaking. Midrex Technologies Direct From Midrex. 2019. 4th Quarter.
7. Memoli F. et al. Continuous Feeding of DRI/HBI in EAFs: Best Practices and Recent Innovations. Iron & Steel Technology. 2017.
8. Midrex Technologies. 2021 World Direct Reduction Statistics. Midrex Technologies Inc., 2022.
9. Pei M., Petäjaniemi M., Regnell A., Wijk O. Toward a fossil free future with HYBRIT: Development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland. Metals. 2020. Vol. 10, No. 7. P. 972.
10. Poveromo J. J. Iron Ores for Direct Reduction. AISTech Conference Proceedings. 2018.
11. Turkdogan E. T. Fundamentals of Steelmaking. Institute of Materials, 1996.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.СВД					
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Список використаних джерел					
Розробив	Ошека							Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош								1	2
Рецензент								Кафедра МЧМЛВ Група МТ-22-2		
Н.контроль	Ярош									
Затвердив	Бабошко									

12. World Steel Association. World Steel in Figures 2023. Brussels : World Steel Association, 2023.
13. Cavaliere P. Ironmaking and Steelmaking Processes: Greenhouse Emissions, Control, and Reduction. Springer, 2019.
14. Chatterjee A. Sponge Iron Production by Direct Reduction of Iron Oxide. PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
15. Камкін В. Ю., Токарєв С. І., Мішалкін А. П., Анкудінов Р. В., Безшкурєнко О. Г. Спінювання шлаку в ДСП як ефект застосування шлакоутворюючих сумішей з регульованим співвідношенням компонентів при вдуванні у ванну в струменях газу. Теорія і практика металургії. 2018. № 6. С. 7.
16. Elkader M. A., Fathy A., Eissa M., Shama S. Effect of Direct Reduced Iron Proportion in Metallic Charge on Technological Parameters of EAF Steelmaking Process. International Journal of Science and Research. 2016. Vol. 5, No. 2. URL: [[https://www.academia.edu/86172576/Effect\\_of\\_Direct\\_Reduced\\_Iron\\_Proportion\\_in\\_Metallic\\_Charge\\_on\\_Technological\\_Parameters\\_of\\_EAF\\_Steelmaking\\_Process](https://www.academia.edu/86172576/Effect_of_Direct_Reduced_Iron_Proportion_in_Metallic_Charge_on_Technological_Parameters_of_EAF_Steelmaking_Process)] (дата звернення: 23.05.2026).
17. Heo J. H., Park J. H. Effect of Direct Reduced Iron (DRI) on Dephosphorization of Molten Steel by Electric Arc Furnace Slag. Metallurgical and Materials Transactions B. 2018. URL: [<https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-018-1406-5>] (дата звернення: 23.05.2026).

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.00.СВД	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		