

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

на тему: Дослідження та розробка технології виготовлення
феросилікохром у електродуговій печі

Виконав:

студент групи МТ-22-1

Керівник випускної роботи

Нормоконтролер

Т.в.о. завідувача кафедри

Кирило Гугняков

Дар'я Кассім

Дар'я Кассім

Дмитро Бабошко

Кривий Ріг

2026 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра: металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

т.в.о. зав. кафедрою

_____ Дмитро БАБОШКО

« ___ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до випускної атестаційної роботи бакалавра

ГУГНЯКОВ КИРИЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

Тема роботи: Дослідження та розробка технології виготовлення феросилікохрому в електродуговій печі

керівник роботи: д.т.н., професор Дар'я Кассім

затверджено наказом по КНУ від «_19_»__02__2026 р. № 113с

2. Строк подання роботи студентом «_25_»__05__2026 р.

3. Вихідні дані до роботи:

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

5. Перелік графічного матеріалу: презентація (___ стор. формату А4)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Кирило ГУГНЯКОВ

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Дар'я КАССІМ

РЕФЕРАТ

Структура дипломної роботи включає завдання, вступ, три основних розділи, загальні висновки та список використаних літературних джерел. Загальний обсяг роботи становить 76 сторінок, ілюстративний матеріал представлений 13 рисунками та 8 таблицями.

Як об'єкт дослідження визначено потрійний сплав — феросилікохром, а головна мета роботи полягає у комплексному вивченні його фізико-хімічних та структурних властивостей. У текстовій частині виконано глибокий аналітичний огляд наукової літератури за профілем теми. Наведено експериментальні результати хімічного, термогравіметричного та рентгеноструктурного аналізів промислових зразків феросилікохрому марки ФСХ-45, виплавленого в умовах Запорізького заводу феросплавів.

На основі проведених експериментальних випробувань встановлено, що:

1. Для досліджуваного феросилікохрому характерна наявність послідовності безперервних фазових і магнітних перетворень у ході термічного циклу.
2. Матеріал характеризується гексагональним типом кристалічної ґратки, причому факт формування безперервного ряду проміжних інтерметалідних сполук надійно верифіковано комплексами оптичної мікроскопії та рентгенівської дифракції.

Ключові слова: ФЕРОСПЛАВ, ФЕРОСИЛІКОХРОМ, ФЕРОХРОМ, ДІАГРАМА СТАНУ, ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ, ТЕРМОГРАВІМЕТРІЯ, РЕНТГЕНОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.Р			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РЕФЕРАТ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		Гугняков К.О.					1	1
<i>Перевір.</i>		Кассім Д.О.						
<i>Н. Контр.</i>		Кассім Д.О.						
<i>Затверд.</i>		Бабошко Д.Ю.						
						МТ-22-1		

ЗМІСТ

ВСТУП		8
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ		11
	ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ФЕРОСИЛІКОХРОМУ	
1.1. Виробництво хромистих сплавів		11
1.1.1	Світове виробництво хромистих сплавів	11
1.1.2	Виробництво ферохрому в Україні	12
1.2. Отримання феросилікохрома.		16
1.2.1	Ферохром	16
1.2.2	Феросилікохром. Склад, застосування, відповідність характеристик нормативним документам, діючим в Україні	17
1.2.3	Фізико-хімічні основи отримання феросилікохрома	20
2. ТЕХНОЛОГІЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛІКОХРОМУ		25
2.1. Види печей, які використовуються при виробництві феросилікохрому		25
2.1.1	Види печей та їх конструкція	25
2.1.2	Електродугові печі АТ «Запорізький завод феросплавів»	25
2.1.3	Механічне обладнання печі	31
2.1.4	Форма та розміри плавильного простору електродугової печі	34
2.1.5	Футеровка основної електродугової печі	37
2.1.6	Електроди	40
2.1.7	Електрообладнання печі	41
2.2 Технологія виплавки феросилікохрому		44
2.2.1	Технологія виплавки феросилікохрому двостадійним методом	44
2.2.2	Електричний режим виплавки феросилікохрому	44
2.2.3	Розрахунок шихти для виплавки 45 %-го феросилікохрому	46

КНУ.РБ.136.26.113с-05.3				
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
<i>Розроб.</i>		Гугняков К.О.		
<i>Перевір.</i>		Кассім Д.О.		
<i>Н. Копр.</i>		Кассім Д.О.		
<i>Зтверд.</i>	<i>Арк.</i>	Бабич Д.Ю.	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
ЗМІСТ				
		<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
			1	2
МТ-22-1				

3.	ДОСЛІДЖЕННЯ В НАПРЯМКУ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ФЕРОСИЛІКОХРОМУ	53
3.1	Вихідні матеріали	53
3.2	Діаграма стану системи залізо – хром (Fe-Cr)	53
3.3	Діаграма стану системи залізо-кремній (Fe-Si)	57
3.4	Методика та апаратура	60
3.4.1	Термогравіметрія (ТГ) або термогравіметричний аналіз	60
3.4.2	Застосування термогравіметричної кривої (ТГ)	63
3.4.3	Диференціальний термічний аналіз (ДТА)	64
3.4.4	Диференціальна скануюча калориметрія (ДСК)	65
3.4.5	Області застосування ДТА и ДСК	66
3.5	Результати та їх обговорення	68
3.5.1	Термогравіметричний аналіз феросилікохрому	69
	ВИСНОВКИ	72
	Список використаної літератури	76

ВСТУП

Актуальність проблеми. Феросилікохром є продукцією імпортозамінною та основна його кількість йде на експорт. Підтримка та розширення ринку феросилікохрому вимагає отримання продукції широкої номенклатури та високої якості. Контроль за якістю даного сплаву є важливою ланкою в ланцюзі виробництва та продажу. У зв'язку з цим тема дипломної роботи, спрямовану вивчення властивостей феросилікохрому - актуальна.

В умовах тенденцій до конкурентної боротьби на внутрішньому та світовому ринках феросплавів дуже актуальне зростання їх конкурентоспроможності за рахунок підвищення якості продукції, зниження витрат на виробництво, розширення сортаменту продукції. Враховується весь комплекс інженерно-технічних та технологічних заходів, завдяки яким у виробництві забезпечуються максимально високі техніко-економічні показники феросплавних процесів.

Основними обсягами глобального виробництва феросплавів традиційно володіють Китай (беззаперечний лідер), Індія, Південна Африка, Бразилія та Австралія.

Світовий ринок феросплавів формують великі транснаціональні корпорації та гірничо-металургійні гіганти. Серед них — швейцарський трейдер Glencore, бразильський конгломерат Vale S.A. та компанії з Індії.

Європа залишається великим споживачем, імпортуючи продукцію з Північної Америки, Азії та частково Східної Європи

У минулому Україна була потужним світовим гравцем, забезпечуючи значну частку світового виробництва марганцевих феросплавів.

Проте у 2026 році галузь зіткнулася з глибокою кризою через енергетичні

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.В			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВСТУП	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		Гугняков К.О.					1	3
<i>Перевір.</i>		Кассім Д.О.						
<i>Н. Контр.</i>		Кассім Д.О.						
<i>Затверд.</i>		Бабошко Д.Ю.						
						МТ-22-1		

проблеми, безпекові ризики та високу вартість електроенергії. За перші місяці 2026 року експорт скоротився на 96% у річному вимірі, а підприємства суттєво знизили потужності, тому зараз ринок більше орієнтований на імпорт сировини з країн ЄС (Польща, Румунія, Нідерланди).

Основні виробники феросплавів в Україні та їх поточний статус:

Запорізький завод феросплавів (ЗЗФ)

Спеціалізація: Традиційно завод випускав феросиліцій (марок ФС65 та інші), ферохром, а також силікомарганець.

Статус (2026): Через високу вартість електроенергії (яка складає понад 50% у собівартості) та логістичні проблеми, завод працює лише на кількох малих печах із 31 наявної.

Розташування: м. Запоріжжя.

Нікопольський завод феросплавів (НЗФ)

Спеціалізація: Найбільше підприємство в Європі з виробництва силіко- та феромарганцю, а також феросиліцію.

Статус (2026): Через значні цінові коливання на ринку електроенергії та близькість до зони активних бойових дій завод працює на мінімальній потужності (кілька печей) або зупиняє роботу для оптимізації.

Розташування: м. Нікополь, Дніпропетровська область.

Покровський та Марганецький ГЗК

Спеціалізація: Видобуток марганцевої руди, яка є базовою сировиною для українських феросплавів.

Статус (2026 р.): Підприємства значно скоротили або періодично зупиняють видобуток через бойові дії у регіоні та проблеми з постачанням електроенергії.

Феросилікохром (код УКТЗЕД 7202500000) — це важливий феросплав, який використовується в металургії для легування та розкислення сталей. В Україні його виготовляють та реалізують спеціалізовані підприємства, а також використовують як сировину для створення якісних сплавів.

Головне призначення феросилікохрому — це виробництво

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.В	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низьковуглецевого ферохрому та легування сталі.

Цей феросплав, що складається переважно з хрому, кремнію та заліза, виконує три ключові функції у металургії.

1. Виробництво інших феросплавів (сировинна функція)
2. Легування сталі та чавуну
3. Розкислення сталі

В Україні якість, відбір проб та хімічний аналіз цього сплаву суворо регламентуються національними стандартами, зокрема ДСТУ ISO 4552-1:2010.

Феросилікохром зазвичай виглядає як важкі металеві шматки або каміння сріблясто-сірого кольору з характерним кристалічним блиском.

Зовнішній вигляд цього сплаву залежить від форми випуску та хімічного складу.

Практична значимість – результати аналізу технології виробництва феросилікохрому можна використовувати підприємством для вдосконалення технології отримання феросилікохрома.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.В	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ФЕРОСИЛІКОХРОМУ

1.1 Виробництво хромистих сплавів

1.1.1 Світове виробництво хромистих сплавів

До найбільших світових виробників ферохрому традиційно входять країни з найбільшими запасами хромової руди: ПАР, Казахстан, Китай, Індія та Фінляндія.

Частка у світовому виробництві ферохрому:

Китай~40% – 45% Світовий лідер за обсягами виробництва, що працює переважно на імпорتنій сировині.

ПАР~28% – 30% Найбільший виробник «первинного» ферохрому (*charge chrome*) із власних найбільших у світі рудних запасів.

Казахстан~10% – 12% Світовий лідер з виробництва високоякісного високовуглецевого ферохрому.

Індія~7% – 9% Забезпечує стабільне зростання завдяки власним хромітовим рудникам та внутрішньому попиту.

Фінляндія~3% – 4% Єдиний інтегрований виробник у Європейському Союзі (завод у Торнію).

Інші країни~5% – 7% Сюди входять Зімбабве, Туреччина, Бразилія та інші дрібніші гравці.

Детальний огляд структури світового виробництва ферохрому надано у Діаграмі на Рисунку № 1.1.1 даного Розділу.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ФЕРОСИЛІКОХРОМУ	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Гугняков К.О.					1	14
Перевір.		Кассім Д.О.						
Н. Контр.		Кассім Д.О.						
Затверд.		Бабошко Д.Ю.						
						МТ-22-1		

Структура світового виробництва ферохрому

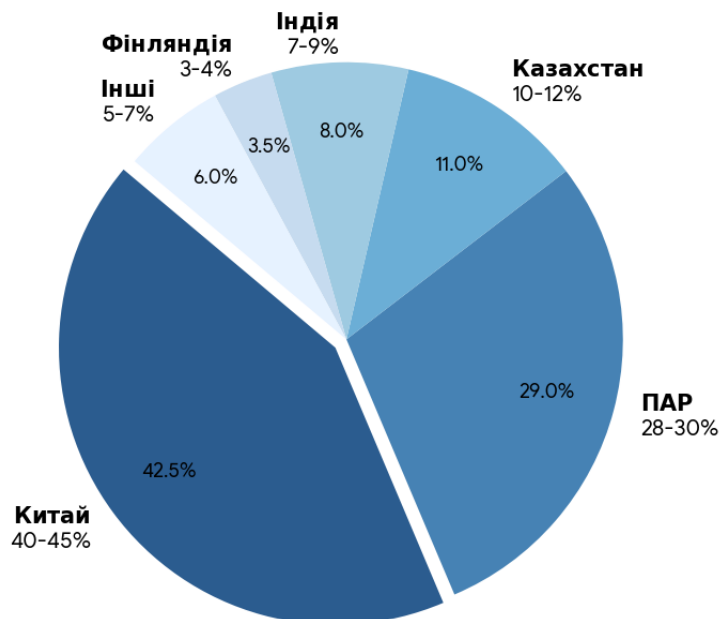


Рисунок 1.1

Оскільки ферохром є ключовим легуючим елементом, його виробництво переважно обумовлене збільшенням світових обсягів виплавки нержавіючої сталі.

Особливістю організації виробництва феровмісної продукції (феросплавів) є її висока енергоємність та прив'язка до джерел електроенергії (електротермічний спосіб), наявність сировинної бази і комбінування з переробкою відходів (шлаків).

1.1.2 Виробництво ферохрому в Україні

Хромова промисловість України (видобуток хромових руд) та виробництво феросплавів історично відігравали ключову роль у забезпеченні металургійного комплексу. Галузь представлена наступними основними підприємствами:

Виробництво ферохрому та інших феросплавів:

- Нікопольський завод феросплавів (АТ "НЗФ"): Найбільше підприємство України та один із лідерів у Європі з випуску силікомарганцю і феромарганцю. Завод розташований у місті Нікополь Дніпропетровської

області.

Основними товарними позиціями заводу є:

Феросилікомарганець (сплав марганцю, кремнію та заліза)

Феромарганець (високо- та середньовуглецевий сплав марганцю та заліза)

Ці сплави виплавляються з марганцевої руди (яку постачають Покровський та Марганецький ГЗК) і використовуються в металургії для розкислення та легування сталі.

- Запорізький завод феросплавів (АТ "ЗФЗ"): Історично це ключовий виробник рафінованого ферохрому та феросилікохрому в Україні.

Запорізький завод феросплавів (АТ "ЗФЗ") є потужним енергоємним комплексом, який забезпечує металургійну галузь критично важливою сировиною для легування та розкислення сталі. Основний асортимент включає:

- Феросилікомарганець
- Феросиліцій
- Феромарганець
- Марганець металевий (АТ «ЗФЗ» є єдиним виробником металічного марганцю в Україні).

АТ «Запорізький завод феросплавів» має у своєму складі 31 плавильну піч загальною встановленою потужністю трансформаторів 450,7 МВА.

Структура пічного комплексу

Всі агрегати розподілені між 4 основними плавильними цехами підприємства:

- 29 рудовідновлювальних електропечей (потужність окремих трансформаторів варіюється від 5 до 27,6 МВА). Одна з цих печей є унікальною та працює на струмах ультранизької частоти.
- дугові печі постійного струму.

Додатково на заводі функціонують 3 шахто-щілинні печі для виробництва металургійного вапна.

До повномасштабної війни АТ «Запорізький завод феросплавів» виготовляв у середньому від 250 до 330 тисяч тон феросплавів на рік, проте через воєнні

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дії, проблеми з електроенергією та логістикою реальні обсяги значно скоротилися.

Поточний стан виробництва (дані на 2026 рік)

Через повномасштабну війну, логістичні труднощі та критично високу вартість електроенергії (яка становить понад 53% у собівартості продукції):

Зі згаданого комплексу в 31 піч у робочому стані перебувають лише 3 малі печі.

Загальний обсяг виробництва знизився до 2 тис. тон на місяць (менше ніж 10% від довоєнного рівня).

Для виробництва феросилікохрому (сплаву заліза, кремнію та хрому) на феросплавних заводах використовується суворо визначений комплекс мінеральної сировини, відновників та флюсів: хромовмісна сировина (основа сплаву); хромова руда або хромітовий концентрат; переробні хромисті шлаки; кремнієвмісна сировина; кварцит; відновники (для хімічних реакцій).

Наразі АТ «ЗФЗ» орієнтувався на виготовлення високовуглецевого ферохрому (базового сплаву) марок: ФХ650, ФХ800, ФХ850, ФХ900; середньовуглецевого ферохрому марок: ФХ200, ФХ400; низьковуглецевого ферохрому (рафінованого) марок: ФХ005, ФХ010, ФХ015, ФХ025, ФХ100.

Сьогодні основними марками товарної продукції АТ «ЗФЗ» є:

- Феросилікомарганець (зокрема, марка МнС17).
- Феросиліцій (основна марка — ФС65).
- Феромарганець (марка ФеМн78).
- Марганець металевий (марки Мн95, Мн96)

Для розширення сортаменту сплавів та освоєння нових марок продукції на феросплавних підприємствах (включаючи досвід АТ «ЗФЗ») застосовується комплекс технологічних, технічних та сировинних заходів.

- Технологічні заходи (Зміна процесів)
- Позапічна обробка металу: Рафінування сплавів у ківші (продування киснем або аргоном).
- Двоетапні схеми виплавки: Використання проміжних сплавів (наприклад,

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

силікомарганцю чи феросилікохрому) як відновників для отримання чистих середньо- та низьковуглецевих марок.

- Зміна температурних режимів: Регулювання потужності дуги та електричного опору шихти для виплавки сплавів з різним вмістом кремнію та марганцю.
- Технічні заходи (Модернізація агрегатів)
- Перепрофілювання печей: Модернізація футеровки та заміна електродних систем рудотермічних печей під виплавку іншого типу сплаву (наприклад, перехід з феросиліцію на силікомарганець).
- Впровадження постійного струму: Використання дугових печей постійного струму, які дозволяють точніше контролювати хімічний склад сплаву та працювати з ширшим спектром компонентів.
- Ультранизька частота струму: Застосування спеціальних трансформаторів для ефективного відновлення тугоплавких металів та залучення дрібних фракцій сировини.
- Сировинні заходи (Управління шихтою)
- Використання комплексних флюсів і добавок: Введення в шихту рідкісноземельних елементів, титану, хрому або ванадію для отримання спеціальних модифікованих та легуючих сплавів.
- Брикетування та агломерація: Змішування подрібнених руд різних металів (наприклад, марганцевої та хромової) у брикети для виплавки нових комплексних сплавів.
- Залучення техногенних відходів: Використання багатих на метали шлаків попередніх плавок для створення супутніх або бідніших марок сплавів за низькою собівартістю.

Окрім основних марок феросплавів, АТ «Запорізький завод феросплавів» випускає та реалізує попутну (супутню) продукцію, яка утворюється під час основного технологічного циклу або у процесі переробки промислових відходів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

1.2. Отримання феросилікохрома.

1.2.1 Ферохром

Ферохром — це залізохромовий сплав, промислове освоєння якого розпочалося наприкінці 1860-х років. Його хімічний склад, окрім основних компонентів, включає супутні домішки: вуглець, кремній, фосфор, сірку та азот. Залежно від концентрації вуглецю та наявності інших елементів, сплав класифікують на високовуглецевий, середньовуглецевий, низьковуглецевий та азотований.

Підготовка сировини залежить від її якості: високосортні руди потребують лише подрібнення та фракційного сортування, тоді як бідні поклади обов'язково проходять цикл збагачення для отримання кондиційних концентратів. Фізико-хімічні властивості хрому (здатність утворювати тверді розчини із залізом та стабільні карбіди з вуглецем) зумовлюють пряму залежність кінцевого складу сплаву від обраної технології плавки:

- Високовуглецевий ферохром (4,0–10% С) виплавляють безперервним методом шляхом карботермічного відновлення руди в потужних електропечах (відкритого або закритого типу), звідки метал і шлак випускають періодично.
- Середньовуглецевий сплав (0,5–4% С) одержують за допомогою силікотермічного методу або шляхом киснево-конвертерного рафінування високовуглецевого напівпродукту.
- Низьковуглецевий ферохром ($\leq 5\%$ С) синтезують силікотермічним способом у малопотужних дугових печах чи методом позапічного змішування рудно-вапняного розплаву із рідким силікохромом у ківшах. Для отримання ультранизького вмісту вуглецю (0,03%) застосовують технології вакуумного рафінування попередньо окисленого порошкоподібного або кускового ферохрому.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

- Азотований ферохром (1,0-10 % N) одержують нагріванням подрібненого низько- або середньовуглецевого ферохрому в середовищі азоту або аміаку при $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ферохром є базовим компонентом для виплавки легованих сталей та спецсплавів, де його середня питома витрата становить близько 2,5 кг на тонну готової сталі. Для синтезу беззалістистих сплавів та високохромистих сталей надвисокої чистоти замість феросплаву застосовують металевий (технічно чистий) хром, який отримують позапічним алюмінотермічним відновленням його чистого оксиду.

Стандартизований ферохром із вмістом Cr 65% потребує використання рудної сировини із масовим співвідношенням CrFe 2,8.

1.2.2 Феросилікохром.

Склад, застосування, відповідність характеристик нормативним документам, діючим в Україні



Рисунок 1.2 Феросилікохром ДСТУ ISO 4552-1:2010

Феросилікохром — це потрійний феросплав, основними компонентами якого є хром, залізо та кремній. Споживачеві сплав постачається у подрібненому або гранульованому стані. Для кускової (дробленої) форми встановлено обмеження за масою окремого фрагмента — до 20 кг, або ж матеріал сортується за фракційними класами крупності з максимальним розміром часток до 315 мм.

У металургійній практиці феросилікохром виконує кілька функцій:

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Комплексне легування та розкислення сталей і спеціальних сплавів.
- Модифікування структури чавунів.
- Ефективний відновник у технологічних процесах виплавки низько- та середньовуглецевого ферохрому.

Абревіатура марок феросилікохрому відображає їхній хімічний склад: Ф (залізо), Х (хром), С (кремній) та Р (фосфор). Лінійка базових марок включає ФХС 20, ФХС 33, ФХС 40, ФХС 48, а також їхні аналоги з підвищеними вимогами до фосфору (з індексом «Р»). За погодженням із замовником жорстко регламентується вміст вуглецю: ($\leq 2,5\%$) для марки ФХС 20, ($\leq 0,05\%$) або ($0,1\%$) для ФХС 40, та ($\leq 0,04\%$) для ФХС 48. Крім того, на вимогу споживача у марках ФХС 48 і ФХС 48Р гранична масова частка сірки може бути обмежена до значення не більше ($0,005\%$). Сплав постачається у кусковому або фракційному (подрібненому та просіяному) вигляді.

Головне призначення феросилікохрому — роль відновника під час силікотермічного виплавляння низьковуглецевого ферохрому. Його використання дозволяє значно знизити витрати дорогого рафінованого ферохрому. Сплав також затребуваний як комплексний розкислювач і легуючий компонент при отриманні корозійностійких та низьколегованих хромистих сталей, а також як модифікатор для чавуну.

З погляду хімії феросилікохром є складною багатокомпонентною системою {Fe-Cr-Si-C-P-S}, елементи якої поділяють на три технологічні групи:

1. Залізо (Fe) і хром (Cr): їхня концентрація в розплаві прямо залежить від пропорцій та складу вихідних шихтових матеріалів.
2. Фосфор (P) і сірка (S): супутні домішки з різним характером поведінки. Фосфор майже повністю переходить із шихра в метал, тому потребує суворого відбору вихідної сировини (руди, кварциту, відновників). Сірка, навпаки, ефективно виводиться в газову фазу завдяки високій активності кремнію, який зв'язує її у летючі сульфідні (SiS) та (SiS).

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Кремній (Si) і вуглець (C): перебувають у зворотній функціональній залежності — підвищення концентрації кремнію в сплаві автоматично призводить до витіснення та зниження вмісту вуглецю.

Вимоги до хімічного складу феросилікохрому встановлюють такі нормативні документи:

1. Міжнародний та європейський стандарт (основний орієнтир) ISO 5449:1980 (Ferrosilicochromium — Specification and conditions of delivery). Цей стандарт регламентує світові вимоги до хімічного складу, маркування та допустимого вмісту домішок у феросилікохромі. Оскільки національний ДСТУ був його автентичним перекладом, металурги керуються напряму специфікацією ISO 5449.

Металургійні підприємства України (зокрема Запорізький та Нікопольський заводи феросплавів) під час закупівлі сировини та виробництва продукції використовують прямі контракти на базі міжнародного стандарту:

2. Технічні умови підприємств (ТУ У)

3. Діючі супутні ДСТУ на методи контролю складу

Відповідно до технічних умов, що діють на феросплавних заводах, феросилікохром випускається двох марок: «багатий», що містить 37-55 % Si, і «бідний», що містить 16-37 % Si. Хімічний склад феросилікохрому цих марок представлений у Таблиці 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.1. - Хімічний склад феросилікохрому за ISO 5449

Назва марки	Вміст Хрому (Cr), %	Вміст Кремнію (Si), %	Вміст Вуглецю (C), макс. %	Вміст Фосфору (P), макс. %	Вміст Сірки (S), макс. %
FeCrSi 15	55,0 – 65,0	10,0 – 18,0	6,0	0,050	0,040
FeCrSi 23	45,0 – 55,0	18,0 – 28,0	3,0	0,040	0,030
FeCrSi 30	40,0 – 50,0	28,0 – 35,0	1,0	0,040	0,030

FeCrSi 35	35,0 – 45,0	35,0 – 40,0	0,10	0,030	0,020
FeCrSi 40	30,0 – 40,0	40,0 – 45,0	0,06	0,030	0,015
FeCrSi 45	25,0 – 35,0	45,0 – 50,0	0,04	0,030	0,015

Таблиця 1.2 - Хімічний склад феросилікохрома (ТУ У)

Марка	Масова доля, %				
	Si	Cr	C	P	S
	не менше		не більше		
ФХС20	16 - 23	48	4,5	0,04	0,02
ФХС33	30 - 37	40	0,9	0,03	0,02
ФХС40	37 - 45	35	0,2	0,03	0,02
ФХС48	вище 45	28	0,1	0,03	0,02

1.2.3 Фізико-хімічні основи отримання феросилікохром

Взаємозв'язок кремнію та вуглецю при виплавці феросилікохрому

У системі хром–кремній можливе формування низки силіцидних фаз, зокрема Cr_3Si , Cr_3Si_2 , $CrSi$ та $CrSi_2$. Під час отримання феросилікохрому методом карботермічного (вуглевідновного) процесу фінальна концентрація вуглецю в розплаві критично залежить від поточної частки кремнію.

Дослідженню кількісних закономірностей розподілу вуглецю та кремнію в силікохромі присвячено багато наукових праць. У міру накопичення кремнію в сплаві він активно витісняє вуглець, руйнуючи карбіди хрому, що призводить до природного зневуглецювання металу.

На основі статистичного аналізу масиву даних із 3270 промислових плавок силікохрому дослідник побудував усереднену криву залежності, яка графічно відображена на Рисунку 1.3.

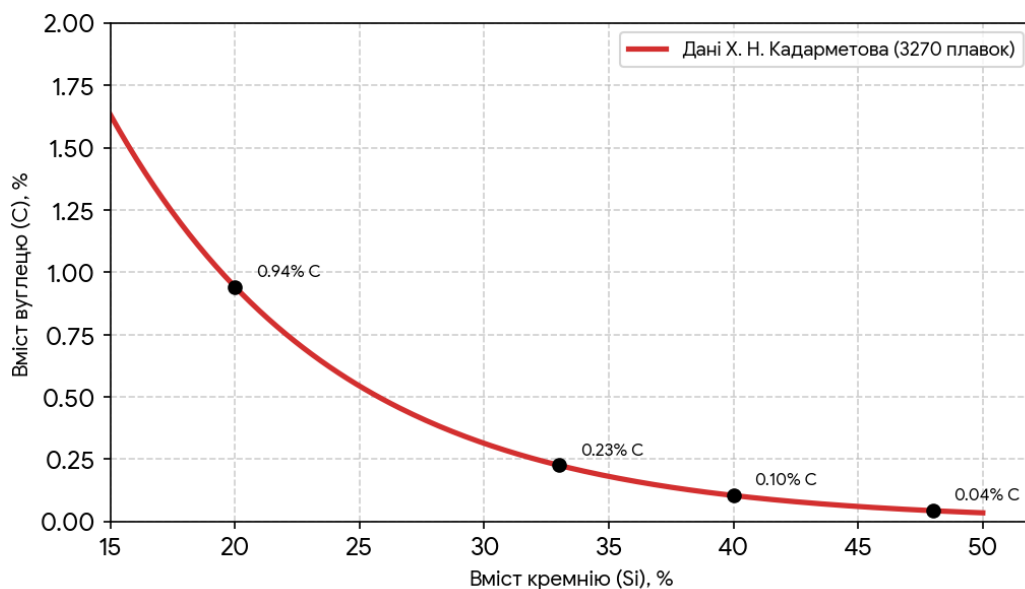
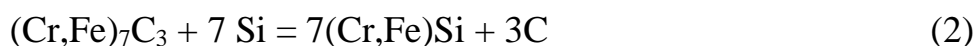


Рисунок 1.3.

Залежність вмісту вуглецю від концентрації кремнію у феросилікохромі

Сьогодні у металургійній практиці застосовують дві технологічні схеми виплавки силікохрому: двостадійну (безшлакову) та одностадійну (шлакову).

При використанні першої (двостадійної) схеми сплав отримують шляхом відновлення кварциту вуглецем коксикю за обов'язкової присутності передільного ферохрому. Фізико-хімічною основою цього процесу є руйнування карбідів хрому та заліза, що містяться у вихідному передільному ферохромі, під дією відновленого кремнію. Таким чином, хімізм утворення силікохрому можна описати за допомогою таких послідовних реакцій:



Аналіз термодинамічних закономірностей безшлакової технології отримання силікохрому свідчить, що базою цього методу, як зазначалося раніше, є відновлення кремнезему з кварциту за допомогою вуглецю коксикю. Цей процес карботермічного відновлення переважно протікає через проміжну

стадію — синтез карбіду кремнію. Утворення зазначеної сполуки відбувається відповідно до такої хімічної реакції:



де кокс, завдяки своїй високій пористості, досить повно взаємодіє з газоподібним монооксидом кремнію, який у свою чергу утворюється за такими реакціями:



Порівняльний аналіз термодинамічних показників дає змогу змодельовати таку схему відновлення кремнію. У високотемпературній зоні внаслідок взаємодії рідкого кремнезему з розплавленим кремнієм, а також із твердим вуглецем генерується газоподібний монооксид кремнію. Під час руху вгору цей газ реагує з карбідом кремнію. У верхніх горизонтах печі монооксид кремнію, який не встиг прореагувати, взаємодіє з вуглецем коксиду, утворюючи новий карбід кремнію. Безпосередня поява чистого кремнію є результатом відновних реакцій монооксиду кремнію з карбідом кремнію або безпосередньо з вуглецем.

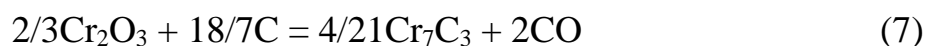
Суттєвий вплив на рівноважний стан цих хімічних процесів чинить передільний ферохром. Цей метал, як відомо, є подвійним карбідом хрому та заліза. У міру просування шихти донизу відбувається поступове зневуглецювання зазначеної сполуки згідно з реакціями (3.2) та (3.3).

Отже, за умов безшлакової технології отримання силікохрому базовими є процеси карботермічного відновлення кремнезему, а також реакції руйнування подвійних карбідів хрому та заліза під дією кремнію.

Шлаковий метод виробництва

При використанні шлакової схеми виплавки силікохрому відбувається спільне відновлення оксидів хромової руди та кварциту за допомогою вуглецю коксиду. Особливості хімізму та перебігу металургійного процесу у цьому випадку описуються такими реакціями:

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12



Особливості формування розплаву за шлаковою технологією

Для виплавки силікохрому за шлаковим методом як шихтові матеріали застосовують хромову руду, кварцит та коксик як відновник. Оскільки хромові руда містить значну кількість важковідновних оксидів (Al_2O_3 , MgO , CaO), під час плавки утворюються тугоплавкі та в'язкі шлаки. Через це механізм утворення металевої фази у шлаковому процесі є набагато складнішим, ніж за безшлаковою схемою.

Певна частка вихідного кремнезему витрачається на формування шлакового розплаву, характеристики якого критично впливають на отримання кінцевого сплаву зі зниженою концентрацією вуглецю. Як зазначалося раніше, відновлення SiO_2 та хроміту відбувається через проміжні стадії — синтез карбиду кремнію SiC та утворення вуглецевої фази (карбідного розплаву).

Головна перевага шлакової технології порівняно з безшлаковою схемою отримання силікохрому полягає в її одностадійності, тоді як альтернативний варіант потребує двох переділів: спочатку виплавки передільного ферохрому, а потім — самого силікохрому. Крім того, концентрація вуглецю в сплаві, отриманому за одностадійною (шлаковою) методикою, стабільно нижча.

Висновки по розділу:

Аналіз глобального та вітчизняного ринків свідчить про докорінну зміну позицій України у світовій структурі феросплавного виробництва.

На сьогодні українська феросплавна галузь перебуває у стані глибокої системної кризи.

До найбільших світових виробників ферохрому традиційно входять

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

країни з найбільшими запасами хромової руди: ПАР, Казахстан, Китай, Індія та Фінляндія.

Особливістю організації виробництва феровмісної продукції є її висока енергоємність та прив'язка до джерел електроенергії, наявність сировинної бази і комбінування з переробкою відходів (шлаків).

Для виробництва феросилікохрому на феросплавних заводах використовується суворо визначений комплекс мінеральної сировини, відновників та флюсів.

Виділено безшлакову та шлакову технології отримання силікохрому.

Концентрація вуглецю в сплаві, отриманому за шлаковою методикою, стабільно нижча.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01 АО	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛІКОХРОМУ

2.1. Види печей, які використовуються при виробництві феросилікохрому

2.1.1 Види печей та їх конструкція

Пічний комплекс АТ «Запорізький завод феросплавів» є унікальним для металургії України. Завод експлуатує електродугові печі різних типів та конструкцій, що дозволяє гнучко переходити з виплавки марганцевих сплавів на кремнієві.

Загалом на балансі підприємства перебуває 31 електропіч. За принципом роботи та конструкцією вони поділяються на три основні групи:

1. Рудовідновлювальні (рудотермічні) печі змінного струму — 28 одиниць. У цих агрегатах тепло виділяється як від електричної дуги, так і за рахунок електричного опору самої шихти (коксу, руди, кварциту).

2. Електродугові печі постійного струму (ДППС) — 2 одиниці. Ці печі частіше залучають для виплавки рафінованих марок сплавів (наприклад, металевого марганцю) та переробки дрібнофракційних відходів (шлаків і скрапу).

3. Унікальна піч на струмах ультранизької частоти (УНЧ) — 1 одиниця

Завод експлуатує одну рудотермічну піч, переведену на живлення струмом ультранизької частоти.

2.1.2 Електродугові печі АТ «Запорізький завод феросплавів»

Трифазні дугові печі (змінного струму) становлять абсолютну більшість пічного фонду АТ «Запорізький завод феросплавів» — до цієї групи належать 28 із 31 наявних на підприємстві печей.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Гугняков К.О.			ТЕХНОЛОГІЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛІКОХРОМУ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		Кассім Д.О.					1	28
<i>Н. Контр.</i>		Кассім Д.О.			МТ-22-1			
<i>Затверд.</i>		Бабошко Д.Ю.						

Саме ці агрегати забезпечують основні обсяги виплавки кремнієвих та марганцевих сплавів завдяки своїй високій продуктивності та надійності

За принципом нагрівання ці печі відносяться до типу електродугових печей прямої дії. На Рисунку 2.1 схематично зображена електродугова піч. Електричні дуги у них горять безпосередньо між кожним електродом та металевим садом. Нагрівання металу відбувається в основному за рахунок тепла, яке випромінюється саме дугами.

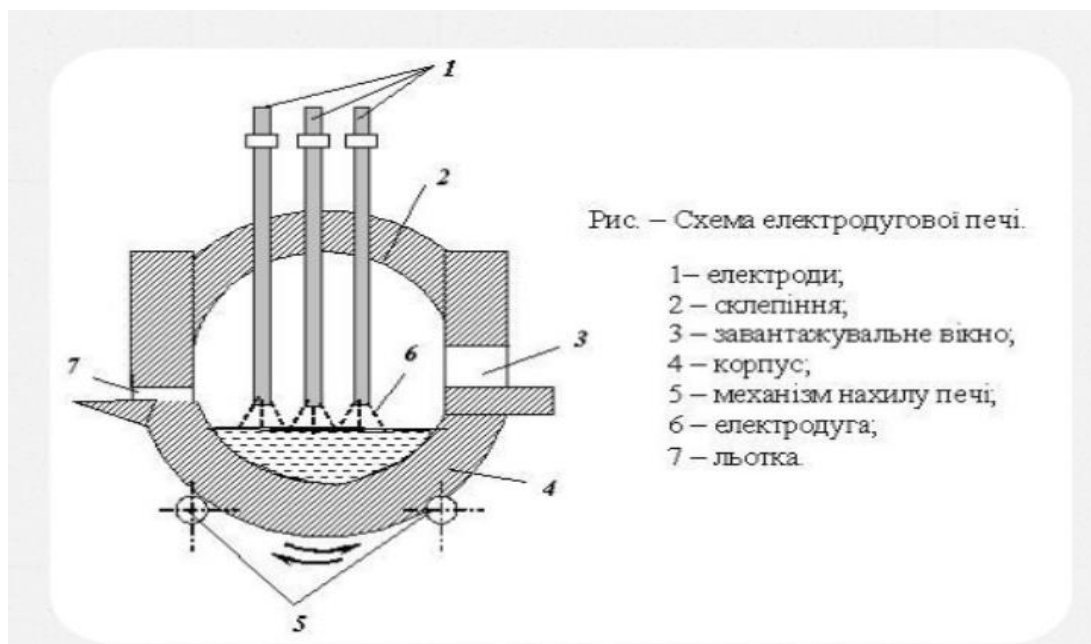


Рисунок 2.1

Конструкція електродугової печі складається з двох незалежних, але механічно пов'язаних частин: нахильного корпусу (ванни) та поворотного порталу зі склепінням.

1. Корпус печі (Ванна)

- Кожух: Циліндрична сталева чаша із закругленим дном (подиною). На відміну від печей із викочуваним корпусом, тут ванна під час завантаження залишається нерухомою на своєму фундаменті, що спрощує підведення комунікацій.
- Футеровка: Внутрішня багат шарова оболонка з вогнетривкої цегли (магнезитової або хромомагнезитової).

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

- Елементи випуску: З одного боку корпусу розташоване робоче вікно (для скачування шлаку), з протилежного — випускний жолоб або еркерний отвір (для зливу металу в ківш).

2. Поворотний портал (Несуча конструкція)

Це масивна металева П-подібна або Г-подібна ферма (рама), яка встановлена на окремому потужному вертикальному валу (осі) збоку від печі. Портал тримає на собі:

- Механізм підйому та підвіску самого склепіння.
- Електродні стійки (щогли) з каретками та гідроциліндрами переміщення електродів.
- Коротку мережу — жорсткі мідні шини або водоохолоджувані «труби-коромисла», що підводять струм від гнучких кабелів трансформатора до електродотримачів.

3. Конструкція самого склепіння (Кришки)

Сучасне склепіння дугової печі — це знімна водоохолоджувана конструкція:

- Водоохолоджувані панелі: Периферійна (зовнішня) частина зварена зі сталевих чи мідних труб, по яких безперервно циркулює вода для захисту від прогару дугою.
- Вогнетривкий центр (Серцевина): Центральне кільце склепіння викладається з високоглиноземистої вогнетривкої цегли. У ньому виконано три симетричні отвори для проходу електродів та отвір для відведення газів у систему аспірації.

Механізм та цикл роботи повороту

Коли настає час завантаження печі, процес відбувається за чітким покроковим алгоритмом:

[Підйом електродів] → [Підйом склепіння (на 200–300 мм)] → [Поворот порталу на 60–85°] → [Завантаження баддею]

1. Виведення електродів: Автоматика піднімає графітові електроди у крайнє верхнє положення, повністю виймаючи їх із робочого простору ванни.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Підйом склепіння: Гідравлічні циліндри порталу піднімають кришку вгору на 200–300 мм, щоб відірвати її від пісочного чи лабіринтового ущільнення на верхньому краї кожуха печі.
3. Відведення (Поворот): Потужний гідроциліндр повороту (або рейковий електромеханічний привід) повертає весь портал разом зі склепінням та електродами вбік навколо опорної вертикальної осі. Ванна печі повністю відкривається зверху.
4. Завантаження та повернення: Мостовий кран опускає над ванною баддю (грейфер), відбувається скидання шихти. Після цього портал повертається назад, склепіння опускається на корпус, електроди опускаються, і дуга запалюється знову.

У трифазних печах заводу використовуються три потужних вертикальних електроди, кожен з яких підключений до окремої фази трифазного трансформатора.

Комбінований нагрів (рудотермічний режим): Електричний струм проходить від електродів через тверду шихту та рідкий розплав. Це дозволяє досягати температур понад 1500–2000 °С у зоні плавлення.

Залежно від архітектури плавильного агрегату та способу введення компонентів металозавалки у робочий простір, промислові дугові та рудотермічні печі поділяються на два магістральні типи:

1. Печі з фронтальним завантаженням через робоче (технологічне) вікно;
2. Печі з вертикальним завантаженням зверху (через колошник або при відчиненні склепіння).

Загальне планувальне та об'ємно-просторове рішення цеху виплавки феросплавів, що ілюструє взаємодію завантажувальних систем із плавильними прольотами, представлено на рисунку 2.3.

Метод введення матеріалів через бокове робоче вікно, розташоване в стінці (кожусі) кожуха печі, орієнтований переважно на плавильні агрегати малої місткості, а також на печі спеціального призначення. Це вікно призначене для ручного, механізованого або напівавтоматичного подання кускових

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів, флюсів чи присадок безпосередньо на подину або в дзеркало розплаву.

Залежно від рівня механізації прольоту, операція заповнення ванни реалізується за однією з таких схем:

- Механізована схема: за допомогою підлогових або підвісних завалочних машин із використанням чавунних чи сталевих мульд;
- Напівавтоматична схема: із застосуванням спеціалізованих похилих лотків і направляючих жолобів;
- Ручна схема: в окремих випадках (для малих лабораторних або доводочних печей) — вручну за допомогою завалочних лопат спеціального профілю.

Головними недоліками даного способу є тривалість операції, значні радіаційні втрати тепла через відчинене вікно та висока частка важкої фізичної праці.

Завантаження плавильних агрегатів зверху є основним, найбільш високопродуктивним та повністю автоматизованим методом подачі сировини. Дана технологічна схема є базовою для всього парку великогабаритних рудотермічних і потужних трифазних дугових сталеплавильних печей (ДСП), експлуатованих в умовах інтенсивного виробництва АТ «Запорізький завод феросплавів».

На відміну від обмеженого порційного введення матеріалів через бокові вікна, вертикальний метод дозволяє безперервно транспортувати тисячі тонн масової шихти (марганцевої чи хромової руди, кварциту, коксу, флюсующих добавок) без порушення герметичності реакційного простору печі та без залучення ручної праці.

При дискретному завантаженні дугових печей повний об'єм металозавалки вводиться в один прийом протягом 3-6 хвилин Глибина ванни Н за допомогою спеціалізованого завантажувального кошика (цебера) з грейферним або секційним днищем. Завдяки скороченню тривалості завантаження в 8–10 разів порівняно з мульдовими завалочними машинами,

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєво знижується час простою печі без струму, мінімізуються теплові втрати випромінюванням і, як наслідок, різко підвищується загальна годинна продуктивність плавильного комплексу.

Залежно від кінематики розкриття робочого простору для доступу завантажувального кошика, печі з верхнім завантаженням диференціюються на три конструктивні типи:

1. Печі з корпусом (ванною), що викочується: У даній архітектурі вогнетривке склепіння разом із системою електродів підвішується до стаціонарного, жорстко закріпленого на фундаменті порталу. Перед завантаженням корпус печі (ванна) за допомогою гідравлічних циліндрів або електромеханічного рейкового приводу викочується по рольгангу чи колійній трасі з-під склепіння у завантажувальний проліт.
2. Печі зі склепінням, що відкочується:

Конструктивно корпус печі залишається нерухомим. Вогнетривке склепіння спільно з електродотримачами та короткою сіткою підвішується до потужного порталного мосту. Міст оснащений ходовими колесами і переміщується по залізничних рейках, укладених по обидва боки від плавильного агрегату, повністю відкриваючи ванну зверху під час відкочування.

3. Печі з поворотним склепінням:

Дана конструкція є найбільш раціональною, компактною та поширеною в сучасній електрометалургії. Робочий цикл передбачає вертикальне підняття склепіння на 200-300 мм за допомогою гідроциліндрів підйому з метою виходу ножів пісочного затвора з пазів, після чого портал разом зі склепінням та електродами повертається в горизонтальній площині на кут 80-90⁰ навколо вертикальної осі опорної цапфи, забезпечуючи швидкий і вільний доступ кошика до ванни печі.

Електродугова піч із поворотним (відкидним) склепінням — це класична конструкція плавильного агрегату прямої дії, у якій верхня кришка (склепіння)

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

разом із тримачами електродів може підніматися та автоматично повертатися вбік на 60–85°.

Така інженерна схема є базовою для дугових печей типу ДСП.



Рисунок 2.2. Електродугові печі



Рисунок 2.3. Цех виплавки феросплавів

2.1.3 Механічне обладнання печі

Кожух печі — це зовнішній тримальний каркас (металева «одежа») плавильного агрегату, який забезпечує жорсткість усієї конструкції та утримує всередині вогнетривку кладку.

Кожух печі виготовляють із високоміцних зварюваних конструкційних сталей.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

- найчастіше використовуються вуглецеві сталі звичайної якості (наприклад, Ст3сп, Ст5сп) або низьколеговані конструкційні сталі з підвищеною міцністю (наприклад, 09Г2С, 17Г1С).
- товщина сталевих листів залежить від міцності та місткості печі. Для циліндричних стінок (обичайки) використовують листи товщиною 30–50 мм, а для сферичного дна (подини), яке тримає найбільшу вагу, товщина може досягати 60–80 мм.

Кожух виконує три найважливіші інженерні функції:

- конструктивна опора (несучий каркас): він утримує на собі багатотонну вогнетривку футеровку (цеглу) і не дає їй розсунутися чи зруйнуватися під дією внутрішнього тиску розплавленого металу та шлаку.
 - герметичність та захист від проривів: кожух є останнім фізичним бар'єром.

У сучасних печах ЗФЗ зсередини кожуха додатково встановлюють водоохолоджувані панелі (кесони) для захисту сталі від перегріву.

- механічна основа для нахилу: саме до кожуха приварюються опорні сектори (люлька) або цапфи, за які гідроциліндри хапають і нахиляють усю піч вперед для випуску феросплаву або назад для скачування шлаку.

Опорне кільце склепіння — це один із найважливіших тримальних елементів верхньої кришки (склепіння) електродугової печі.

Призначення кільця склепіння:

- Утримання розпору вогнетривкої кладки.
- Несучий каркас для підйому та повороту.
- Опора для водоохолоджуваних панелей.

У печах із завантаженням зверху для забезпечення герметичності стику склепіння та кожуха влаштовується пісочний затвор.

Пісочний затвор (пісочний затвор склепіння) — це просте, але надзвичайно надійне інженерне рішення для герметизації стику між нерухомим корпусом (ванною) електродугової печі та її знімною кришкою (склепінням).

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робоче вікно (технологічне вікно) електродугової печі — це спеціальний прямокутний отвір у бічній стінці (кожусі) корпусу печі, призначений для візуального контролю плавки, відбору проб, скачування шлаку та проведення допоміжних технологічних операцій.

У трифазних дугових печах робоче вікно зазвичай розташовується з боку, протилежного випускному жолобу (отвору для зливу металу).

Робоче вікно має такі розміри: ширина - 0,4-0,35 діаметра плавильного простору, висота - 0,8 ширини вікна.

Зливний жолоб — це знімний металургійний вузол електродугової печі, призначений для спрямування та безпечного перетікання розплавленого металу й шлаку з печі в розливний ківш під час випуску плавки.

Ущільнюючі кільця (або кільця ущільнення електродів) в електродугових і рудотермічних печах АТ «ЗФЗ» встановлюються безпосередньо навколо вертикальних електродів.

Ущільнюючі кільця призначені для того, щоб закрити цей зазор без блокування руху електрода.

Електродотримачі в електродугових та рудотермічних печах механічно утримують багатотонні електроди над ванною печі, переміщують їх вертикально для регулювання потужності дуги та підводять до них електричний струм величезної сили (десятки тисяч ампер).

У процесі виплавки феросплавів нижній кінець електрода постійно обгорає (витрачається). Електрод необхідно періодично опускати відносно самого електродотримача. Цей процес називається перепуском:

1. Навантаження з печі частково знімається.
2. Гідравліка послаблює затискний хомут електродотримача.
3. Електрод під власною вагою плавно проковзує вниз на задану технологічну величину (зазвичай 50–100 мм).
4. Пружини знову жорстко фіксують хомут на новому місці, і плавка продовжується.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механізм нахилу забезпечує нахил печі у бік випуску (зливного жолоба) на кут 40-45° та на кут 10-15° у бік робочого вікна для скачування шлаку.

Нахил печі ДСП-80 виробляється двома зубчастими рейками, прикріпленими до секторів люльки, що рухаються двома електромоторами через редуктори і направляючі коробки.

Механізм нахилу обов'язково обладнується обмежувачами ходу обидві сторони.

2.1.4 Форма та розміри плавильного простору електродугової печі

Форма та розміри плавильного простору (ванни) електродугової печі (ДСП) є критично важливими параметрами. Вони безпосередньо впливають на стійкість вогнетривкої футеровки, швидкість плавлення шихти, умови наведення шлаку та енергоефективність усього процесу виплавки сталі чи феросплавів.

У сучасних трифазних електродугових печах (наприклад, типу ДСП-80 або агрегатах АТ «ЗФЗ») плавильний простір має сфероконічну форму. Вона умовно ділиться на три основні зони:

1. Подина (нижня частина ванни): Має форму сферичного сегмента (чаші).
2. Стінки (середня частина): Мають форму перевернутого зрізаного конуса, який розширюється догори під кутом 6–12° до вертикалі.
3. Верхня межа (Шлаковий пояс): Найширша частина ванни, де рідкий метал межує зі шлаком. Це зона найжорсткішої хімічної та термічної агресії.

2. Ключові розміри плавильного простору

Розміри геометричних параметрів розраховуються на етапі проектування печі залежно від її номінальної місткості (наприклад, для печі місткістю 80 тон розміри будуть пропорційно більшими, ніж для малих феросплавних печей).

- Діаметр ванни на рівні порогу робочого вікна ((D)): габаритний розмір плавильного простору. Для печей різної місткості він становить від 3,0 до

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6,5 метрів (для ДСП-80 діаметр кожуха складає близько 5,6–5,8 м, а внутрішній діаметр ванни по футеровці — біля 4,8–5,2 м).

- Глибина ванни рідкого металу ((H)): Вимірюється від найнижчої точки подини до рівня порогу робочого вікна. Оптимальне співвідношення глибини до діаметра зазвичай становить $(H/D = 0,18–0,22)$.
- Радіус сфери подини ((R)): Зазвичай дорівнює або трохи перевищує радіус ванни за дзеркалом металу для створення плавної геометрії чаші.
- Висота плавильного простору (від порогу вікна до склепіння): Цей простір має вміщувати першу (найбільш об'ємну) порцію твердого металевого брухту (скрапу) після завантаження баддею, щоб кришка-склепіння могла вільно закритися без механічного тиску на шихту.

Геометрія та просторове профілювання внутрішнього робочого простору дугової сталеплавильної печі (ДСП) визначають термодинаміку плавки, кінетику гетерогенних реакцій на межі розділу фаз «метал–шлак», а також забезпечують гідродинамічну стабільність розплаву при нахилі агрегату.

Для дугових електропечей високої місткості повна глибина ванни розплаву лежить у нормативному діапазоні 700-1300 мм. Конструктивно ванна складається з циліндричної (стінової) зони та нижнього сферичного сегмента.

- Висота сферичного сегмента подини регламентується пропорцією до загальної глибини ванни і зазвичай становить $1/5$ її частини:
- Гідродинамічне співвідношення профілю: Між загальною глибиною ванни та її дзеркальним діаметром встановлюється фіксована інженерна залежність.

У вихідних матеріалах зазначено відношення $H/D = 5$, що є геометричною інверсією пропорції $D/H = 4-5$. Для великих печей класичним є саме відношення $D/H = 4-5$, що гарантує легке і повне спорожнення (випуск металу) з тигля при нахилі корпусу печі на кут $40-45^{\circ}$, а також забезпечує максимальну питому площу контакту між рідким металом і реакційним шлаком для інтенсифікації процесів дефосфорації та десульфурації.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

На рівні дзеркала рідкого металу (ванни) в кожусі печі облаштовується поріг робочого (технологічного) вікна. З метою термохімічного захисту лінії стику між вертикальною футеровкою стін та похилими укосами ванни від агресивної дії високоактивного залізного шлаку, верхню кромку укосів піднімають вище рівня дзеркала металу (порога вікна) на величину 100-200 мм.

На рівні спряження укосів із вертикальними стінами утворюється умовна лінія перетину, що має форму кола з діаметром. Цей геометричний параметр дефініюється як діаметр плавильного простору печі.

Висота безпосередньо плавильного простору печі — це вертикальна відстань від рівня порога робочого вікна до лінії п'яти (опори) вогнетривкого склепіння. Для електропечей великої місткості цей параметр корелюється з діаметром ванни.

Раціональне збільшення висоти плавильного простору (висоти кожуха печі) дозволяє суттєво наростити корисний внутрішній об'єм для завалки першої порції шихти. Це забезпечує можливість:

1. Введення до складу металозавалки значної частки дешевого, але легковогого і дрібнодисперсного сталевого брухту (металобрухту) без його попереднього брикетування;
2. Скорочення кількості проміжних додаткових підвалок шихти баддями в процесі розплавлення (з 3–4 підвалок до 1–2).

Як наслідок, мінімізується час роботи печі з відкритим склепінням, знижуються питомі витрати електроенергії, підвищується годинна продуктивність плавильного комплексу та суттєво знижується собівартість тонни рідкої сталі.

Для забезпечення стійкості вертикальних стін та зниження теплового навантаження на вогнетривку кладку від електричних дуг, футеровку стін виконують із технологічним розширенням (нахилом) назовні. Градієнт нахилу зазвичай становить 100 мм на кожен 1 м висоти плавильного простору.

Звідси, внутрішній діаметр плавильного простору на найвищому рівні — по лінії п'яти склепіння (верхньої робочої кромки кожуха печі) —

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

$$D_B = D_{III} + 2 \cdot 0,1 \cdot H_{III}$$

Розраховані геометричні координати слугують фундаментальною основою для розробки креслення «Поздовжній розріз дугової сталеплавильної печі» та для розрахунку теплового балансу огорожувальних конструкцій агрегату.

2.1.5 Футеровка основної електродугової печі

Футеровка електродугових печей — це внутрішнє захисне облицювання агрегату з вогнетривких матеріалів. Вона безпосередньо контактує з розплавленим металом (температура понад 1550–1700 °С), агресивним шлаком і витримує жорстке випромінювання електричних дуг.

Сучасна футеровка виконується за багатошаровим принципом і має суттєві відмінності залежно від зони печі.

Внутрішня кладка чаші печі ділиться на три основні шари:

1. Теплоізоляційний шар (прилягає до сталевих кожуха):

Матеріал: Азбестові листи, шамотна цегла легких марок або плити з керамоволокна.

Призначення: Зниження втрат тепла через стінки та захист сталевих кожуха від перегріву.

2. Армуючий шар (середній):

Матеріал: Щільна магнезитова або хромомagneзитова цегла.

Призначення: Створення міцного жорсткого каркаса ванни, який утримує внутрішню робочу кладку.

3. Робочий шар (безпосередньо контактує з розплавом):

Подина (дно): Виконується набивним способом. На армуючу цеглу пошарово насипають порошок сухого металургійного магнезиту з додаванням пеку (смоли) як зв'язки. Кожен шар ретельно ущільнюють пневмотрамбовками. Під час першої плавки ця маса спікається в монолітну високоміцну чашу без швів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Стінки викладаються з периклазохромітових або магнезитоуглецевих (MgO-C) цеглин.

Шлаковий пояс: зона на стику металу та шлаку. Футерується виключно високоякісною магнезитоуглецевою цеглою з підвищеним вмістом графіту (до 15–20%), оскільки тут відбувається найінтенсивніша хімічна ерозія.

У металургії феросплавів і сталі тип футеровки (основна або кисла) вибирається залежно від хімічного складу шлаку, який утворюється під час плавки. Основна футеровка є стандартом для більшості дугових печей (включаючи ДСП-80 та агрегати АТ «ЗФЗ»), оскільки вона дозволяє проводити найважливіші хімічні процеси очищення металу.

Для викладання та набивання такої футеровки використовують хімічно стійкі до лугів матеріали:

- Периклаз (оксид магнію (MgO)) — основа більшості основних вогнетривів.
- Магнезитові та магнезитоуглецеві цегли (MgO-C) — використовуються для стінок та шлакового поясу.
- Доломіт ($(CaCO_3 \cdot MgCO_3)$)
- Хромомагнезит — для зон із високими температурними коливаннями.

Експлуатаційний ресурс (стійкість) вогнетривкої кладки елементів футерування дугових сталеплавильних печей є визначальним чинником, що детермінує міжремонтний період агрегату, коефіцієнт технічного використання обладнання та питомі витрати на вогнетриви на тонну виплавленої сталі. У процесі проектування ДСП-80 структури футерування диференціюють за зонами термічного та хімічного навантаження.

Подина (череві) печі піддається постійному металостатичному тиску, гідродинамічному впливу потоків розплаву під час електромагнітного перемішування, а також хімічній агресії з боку первинних і фінішних шлаків.

- У дугових електропечах місткістю 80 т середня експлуатаційна стійкість правильно навареної магнезитової подини становить 1300-1800 плавов до моменту проведення повного капітального перефутерування.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

- Для порівняння, в електропечах меншої місткості (за рахунок нижчого гідростатичного стовпа рідкого металу та меншої тривалості теплових фільтрів плавки) ресурс подини може досягати до 5000 плавок.

Зона стін зазнає найбільш жорсткого руйнівного впливу: прямого радіаційного випромінювання від електричних дуг (особливо в період розплавлення шихти), термічних ударів при завалці scrap-баддею та хімічного роз'їдання бризками шлаку.

Кладка вертикальних стін основних дугових електропечей серії ДСП-80 виконується за допомогою великоблочних або великомірних систем із сучасних основних вогнетривів за двома базовими варіантами:

1. Безопальна магнезитохромітова цегла: монтується у металевих касетах (пакетах), проектна товщина стінового футерування при цьому складає 380 мм.
2. Периклазошпінелідна цегла: має підвищену термостійкість до циклічних тепломін, проектна товщина кладки стін у цьому випадку становить 460 мм.

Внаслідок екстремальних умов експлуатації у високопотужних агрегатах, середня стійкість стінового футерування великих печей обмежена і становить 100-150 плавок. Це вимагає впровадження у проекті зонного футерування із застосуванням водоохолоджуваних панелей (елементів трубчастих настінних кесонів) у районі «гарячих плям».

Склепіння печі працює в умовах постійного впливу високих температур склепінних газів та склепінного пилу, що насичений оксидами заліза.

Заміна застарілих динасових (кремнеземистих) склепінь на сучасні високостійкі основні вогнетриви є магістральним інженерним рішенням проекту. Кінетика і термодинаміка використання магнезитохромітових вогнетривів для футерування склепінь характеризується такими показниками:

- Стійкість високоглиноземистих та магнезитохромітових купольних склепінь в 2-3,5 рази перевищує тривалість експлуатації динасових аналогів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Абсолютний ресурс магнетитохромітового склепіння досягає 100-200 плавов. При цьому вищі показники стійкості відносяться до плавильних печей меншої місткості, тоді як для ДСП-80 за умов форсованого дугового режиму цей показник тяжіє до нижньої межі — 100-120 плавов, що обумовлює необхідність наявності в цеху змінного водоохолоджуваного склепінного контуру.

На печач ємністю 30–80 тон товщина склепіння досягає 300 мм. Після завершення кладки стін та подини встановлюють кришку й електроди, після чого починають сушіння футеровки та спікання набивного дна.

Цей процес відбувається так:

1. У піч завантажують шар коксу завтовшки 200–400 мм.
2. На кокс опускають електроди та вмикають електричний струм.
3. Під дією високої температури з набивної маси видаляються леткі компоненти, а смола і пек коксуються.
4. Окремі фракції магнетиту зцементовуються вуглецевою сіткою, перетворюючи набивку на міцну монолітну чашу.

2.1.6 Електроди

Електричний струм у плавильний простір трифазної дугової печі подається за допомогою трьох циліндричних електродів. Електроди повинні зберігати цілісність під дією власної ваги, а також під час нахилу корпусу печі для зливу розплаву. Усім цим критеріям повною мірою відповідають лише вуглецеві вироби — вугільні або графітовані електроди.

Вугільні електроди використовуються переважно в малотоннажних печач (місткістю до 5 тон), тоді як графітовані є стандартом для агрегатів середньої та великої потужності. Сировинною базою для виробництва вугільних електродів є антрацит (або термоантрацит), ливарний і нафтовий кокс, а також природний графіт, де як з'єднуючі компоненти застосовуються кам'яновугільний пек і смола. Технологічний процес їх виготовлення включає прожарювання, подрібнення та розсівання матеріалів за фракціями. Отриману суміш певного

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гранулометричного складу пресують, піддають випалу за температури 1300 °С і на фінальному етапі механічно обробляють для досягнення заданих геометричних розмірів.

Для проведення процесу графітизації виробу додатково піддають тривалій високотемпературній термічній обробці за температури близько 2500 °С.

Графітовані електроди мають комплекс переваг, що зумовлює їхнє використання у середньо- та великотоннажних печах.

Графітовані електроди відзначаються вищою стійкістю до окислювального середовища всередині печі. На агрегатах типу ДСП-80 стандартно використовуються електроди діаметром 500 мм, що розраховані на граничну щільність струму до 14,5 А/см². При цьому розрахунок номінального діаметра електродів ((D)) безпосередньо залежить від робочої сили струму та встановленої потужності пічного трансформатора.

Торці електродів виготовляють із нарізними ніпельними гніздами, що дозволяє послідовно з'єднувати окремі секції за допомогою ніпелів. У великотоннажних печах питома витрата графітованих електродів становить 5,5–6 кг на тонну виплавленої сталі, тоді як для вугільних цей показник досягає 13–15 кг/т.

2.1.7 Електрообладнання печі

До складу електричної схеми трифазної дугової печі входить високовольтна лінія, живлення з якої через повітряний роз'єднувач та головний масляний вимикач спрямовується через реактор (дросьель) і перемикач ступенів напруги на первинну обмотку пічного трансформатора. З його вторинної обмотки струм низької напруги подається на електроди через систему струмопідводу, відому як коротка мережа. Електричне оснащення також включає шунтуючий вимикач реактора, трансформатори струму, контрольно-вимірювальні прилади, блоки релейного захисту та системи автоматичного керування.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Повітряний роз'єднувач призначений для візуального та фізичного відокремлення електропечі від високовольтної лінії живлення. Будь-які комутації з ним дозволяється проводити виключно після попереднього вимкнення силового масляного вимикача.

Своєю чергою, головний масляний вимикач забезпечує безпечний розрив високовольтного ланцюга безпосередньо під робочим навантаженням. Його внутрішній пристрій включає залізний бак із внутрішньою ізоляцією, заповнений трансформаторним маслом, у яке занурено комутаційний механізм. Масляне середовище виконує подвійну функцію: ефективно гасить електричну дугу, що спалахує при розмиканні контактів під навантаженням, та слугує надійною діелектричною ізоляцією між струмопровідними елементами.

Дросель (реактор) призначений для підвищення стабільності горіння електричних дуг та обмеження стрибків струму під час експлуатаційних коротких замикань.

На агрегатах високої потужності (понад 10 тис. кВт) додаткові дроселі не застосовують, оскільки власного індуктивного опору короткої мережі та трансформатора цілком достатньо для стабілізації дуги й обмеження струмів короткого замикання. Регулювання підведеної до печі потужності здійснюється безпосередньо під час плавки за допомогою перемикача ступенів напруги. Зміна вторинної напруги на електродах забезпечується перемиканням схеми з'єднання первинних обмоток із «трикутника» на «зірку» (що знижує напругу в 1,73 рази), а також комутацією секцій обмоток через спеціальні відпайки, виведені на перемикач. Цей регулювальний автотрансформатор зазвичай об'єднаний у спільному кожусі з пічним трансформатором. Процес перемикання ступенів виконується дистанційно з пульта керування за допомогою масляних вимикачів із приводами, при цьому напруга з печі знімається, а головний вимикач залишається увімкненим.

На Рисунку 2.4 представлено цех.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Рисунку 2.4. Цех

Пічний трансформатор призначений для зниження високої вхідної напруги (6–35 кВ) до робочого рівня (116–420 В) з пропорційним збільшенням сили струму. Екстремальні умови експлуатації, зумовлені регулярними перевантаженнями та короткими замиканнями під час запалювання дуг чи обвалів шихти, висувають жорсткі вимоги до надійності його конструкції. Обмотки агрегату повинні мати посилену діелектричну ізоляцію, високу механічну стійкість та ефективну систему охолодження.

Активна частина (серцевина з обмотками) розміщена в баку з трансформаторним маслом, а на потужних печатках застосовується примусове водоолійне охолодження. Трансформатор монтують у спеціальному ізольованому приміщенні поруч із піччю. Його встановлена потужність є головним фактором, що визначає тривалість плавки та загальну продуктивність агрегату, при цьому максимальне енергоспоживання фіксується на етапі плавлення твердої шихти.

Струмopідвід від низьковольтних висновків трансформатора до електродів реалізований через так звану коротку мережу, довжину якої мінімізують для зниження втрат. Вона складається з жорстких мідних шин (що виходять із трансформаторної кімнати), гнучких кабельних гірлянд та мідних шин або труб, що охолоджуються водою, безпосередньо на рукавах електродотримачів.

Для оперативного керування енергетичним режимом печі за рахунок зміни напруги або довжини дуги застосовують системи автоматичного

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювання положення електродів. Вертикальне переміщення електродотримачів здійснюється автоматичними регуляторами (наприклад, електромашинними підсилювачами), які керують приводними двигунами.

2.2 Технологія виплавки феросилікохрому

2.2.1 Технологія виплавки феросилікохрому двостадійним методом

Виплавку феросилікохрому здійснюють у трифазних рудовідновних електропечах потужністю від 16,5 до 40,0 МВА. Внутрішнє облицювання (футеровку) цих агрегатів виконують з вуглецевих блоків, здатних витримувати екстремальне термічне навантаження до 2000–2200 °С.

Ще однією конструктивною особливістю є те, що безпосереднім робочим шаром стінок ванни слугує гарнісаж. Він являє собою щільний шар із запечених компонентів шихти, частково оплавленої футеровки, карбїду кремнію та застиглих корольків металу.

Для облаштування випускного отвору (льотки) застосовують фасонні вуглецеві блоки. Ними ж викладають і зливний жолоб. Склепіння (арку) льотки приблизно раз на тиждень оновлюють за допомогою набивання свіжою електродною масою, тоді як блоки зливного жолоба замінюють за потреби у міру їхнього зносу.

2.2.2 Електричний режим виплавки феросилікохрому

Електричний режим роботи електропечі чинить визначальний вплив як на обсяг втрат кремнію, так і на загальну ефективність плавки. Ключовим параметром, що формує цей режим, є величина вторинної напруги. Проте підвищення напруги на вторинній стороні трансформатора є доцільним лише до певної межі (для заданої потужності агрегату). Перевищення цього ліміту погіршує показники плавки, попри теоретичне зниження суто електричних втрат.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Зі зростанням вторинної напруги зменшується глибина занурення електродів у шихтові матеріали. Внаслідок цього високотемпературна зона зміщується ближче до колошника.

За умов високого положення електродів збільшується опір газового проміжку, через що зростає частка потужності, яка виділяється безпосередньо в газовій порожнині піделектродного простору. Це, у свою чергу, активізує процеси випаровування кремнію та стимулює реакції утворення летючого монооксиду кремнію SiO.

З іншого боку, перехід на занижені ступені напруги призводить до зростання електричних втрат і звуження зони високих температур, яка є критично важливою для ефективного відновлення кремнезему.

Для кожної конкретної конструкції електропечі та певного типу шихти існує оптимальне значення вторинної напруги. Саме воно гарантує ефективний перебіг необхідних фізико-хімічних процесів за максимально високого загального коефіцієнта корисної дії (ККД) агрегату.

Для виплавки силікохрому за безшлаковою технологією застосовують такі види шихтових матеріалів:

1. Кварцит — становить рудну частину шихти;
2. Передільний ферохром і залізна стружка — формують металеву добавку;
3. Металургійний коксик та вугілля — виконують роль відновників.

Для виплавки силікохрому придатні лише ті кварцити, у яких концентрація SiO₂ становить не менше 96–97%. Сумарна частка сторонніх домішок, як-от глинозему, оксидів магнію та кальцію, обмежена лімітом у 2–3%. Перевищення цієї норми стимулює формування тугоплавких шлакових мас, що порушують стабільний перебіг плавки. Особливо негативно на якість силікохрому впливає фосфор, який повністю переходить у рідкий метал, що на етапі виплавки рафінованого ферохрому ускладнює отримання кондиційного сплаву за вмістом фосфору.

Перед завантаженням у піч кварцит подрібнюють до отримання шматків розміром 50–80 мм. Після дробильних операцій робочу фракцію обов'язково

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

просіюють на віброгрохотах, обладнаних нижнім ситом із розміром чарунок 25x25мм.

Передільний ферохром є спеціальним залізохромовим сплавом, який виплавляють суто для безшлакового синтезу силікохрому. Цей напівпродукт постачається переважно у гранульованому вигляді, при цьому граничний розмір шматків обмежений 40 мм. Вміст домішок шлаку в гранулах не має перевищувати 0,5%, а в кусковому матеріалі — 1,5%.

Вуглецевий відновник, що застосовується у технологічному процесі, повинен характеризуватися мінімальною зольністю та низьким виходом летких речовин. Компоненти золи (зокрема Al_2O_3 , CaO) та MgO стимулюють небажане формування шлакової фази під час безшлакової плавки.

Крім того, відновник має виявляти високий питомий електричний опір. Це гарантує глибоке занурення електродів у ванну печі та дозволяє вести процес на вищих ступенях напруги. З огляду на це, перспективною альтернативою стандартному коксику є спеціальні види вуглецевих матеріалів: формований і газовий кокс, напівкокс, а також низькозольне газове вугілля.

2.2.3 Розрахунок шихти для виплавки 45 %-го феросилікохрому

Для виконання металургійного розрахунку виплавки феросилікохрому марки ФСХ45 (45% Si) на базі стандартних навчально-методичних завдань використовують базовий технологічний хімічний склад сировини. Розрахунок ведеться на 100 кг кварциту.

Нижче наведено типову Таблицю 2.1, яка містить склад кварциту, хромової руди та коксику, необхідний для подальшого матеріального балансу елементів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Таблиця 2.1 — Хімічний склад вихідних сирих матеріалів (%)

Найменування матеріалу	SiO_2	Cr_2O_3	FeO	Al_2O_3	MgO	CaO	$C_{ТВ}$	Золи
Кварцит	97,0	—	0,8	1,0	0,5	0,7	—	—
Хромова руда	4,5	52,0	13,5	8,0	15,5	1,0	—	—
Коксик (відновлювач)	—	—	—	—	—	—	86,0	11,0

Приймаємо наступний розподіл елементів між продуктами плавки: Оксиди розподілено за їхньою головною ознакою — куди переходить більша частина елемента.

• **Повністю відновлюються (100%):**

- Cr_2O_3 → 100% відновлюється.
- P_2O_5 → 100% відновлюється (при цьому 40% від загальної кількості фосфору додатково випаровується).

• **Переважно відновлюються (90–98%):**

- Fe_2O_3 → 98% відновлюється, 2% йде в шлак.
- MnO → 94% відновлюється, 6% йде в шлак.
- SiO_2 → 92% відновлюється, 1% у шлак, 7% випаровується у вигляді SiO .

• **Розподіляються порівну або переважно йдуть у шлак:**

- Al_2O_3 → 50% відновлюється, 50% йде в шлак.
- CaO → 40% відновлюється, 60% йде в шлак.

У розрахунках прийнято, що всі елементи залізної стружки повністю переходять у сплав, а сірка коксикі та кварциту видаляється з газовою фазою.

Розрахунок кількості вуглецю, необхідного для відновлення оксидів золи коксикі, представлено наступним чином:

При використанні 100 кг коксикі відновленню підлягають оксиди золи, що потребує відповідної витрати вуглецю. Зокрема, на відновлення **кремнезему до кремнію** витрачається **2,116 кг** вуглецю (відновлюється 5,29 кг оксиду), а на його часткове відновлення до **субоксиду SiO** — ще **0,080 кг**

(відновлюється 0,402 кг оксиду). Для відновлення **оксиду заліза** до металу необхідно **0,633** кг вуглецю (відновлюється 2,817 кг оксиду). Найменш активний **оксид алюмінію** відновлюється лише наполовину (1,562 кг), що потребує **0,551** кг вуглецю.

Відповідно, вміст активного вуглецю в коксикі становить:

$$75 - 7,585 = 67,415 \text{ кг або } 67,415 \%$$

Відповідно до виробничих даних, питома витрата електродної маси на 1 т кварциту дорівнює 30 кг.

Наступним етапом іде підрахунок кількості вуглецю для відновлення оксидів хромової руди, кварциту та золи електродів.

На основі вихідних даних виконано розрахунок балансу оксидів та витрати вуглецю на їх відновлення:

Оксид кремнію (SiO₂). З кварцитом та золою електродів вноситься 62,24 кг оксиду. З цієї кількості відновлюється 57,26 кг. Для безпосереднього відновлення до кремнію необхідно 21,1 кг вуглецю, а для відновлення до субоксиду SiO — ще 1,91 кг.

Оксид заліза (Fe₂O₃). Загальна кількість внесеного оксиду становить 1,029 кг. З них відновлюється 1,008 кг, що потребує витрати 0,226 кг вуглецю.

Оксид марганцю (MnO). Вноситься у кількості 0,1 кг. Відновленню підлягає 0,094 кг оксиду, на що витрачається 0,015 кг вуглецю.

Оксид алюмінію (Al₂O₃). Вноситься з матеріалами в кількості 1,553 кг. Оксид відновлюється наполовину, тобто 0,776 кг, на що необхідно 0,273 кг вуглецю.

Оксид кальцію (CaO). Загальна кількість становить 0,217 кг. Відновлюється 0,086 кг, для чого потрібно 0,018 кг вуглецю.

Оксид фосфору (P₂O₅). Вноситься 0,02 кг оксиду, який відновлюється повністю. Витрата вуглецю на цю реакцію становить 0,008 кг.

Вода (H₂O). Вноситься з матеріалами в кількості 0,09Target кг. На відновлення (взаємодію з вуглецем) витрачається 0,059Target кг вуглецю.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

На відновлення (взаємодію з вуглецем) витрачається 0,059Target кг вуглецю **Оксид хрому (Cr₂O₃)**. Надходить у кількості 65,8Target кг. Оксид відновлюється повністю, що потребує 15,6Target кг вуглецю.

Сумарний підсумок. Загальна кількість вуглецю, необхідна для відновлення всіх оксидів, становить 39,00Target кг.

Вважаємо, що вуглець електродів компенсує чад відновлювача на колошнику.

Враховуючи, що у відновлювачі міститься 67,415% активного вуглецю, необхідна кількість коксиду становить:

$$39,0 / 0,67415 = 57,85 \text{ кг}$$

Вага сплаву з вмістом 45 % Si становить:

$$\frac{42,995}{0,45} = 101,3 \text{ кг}$$

Необхідно додати заліза:

$$26 \text{ кг}$$

Або залізної стружки:

$$26 / 0,98 = 26,5 \text{ кг}$$

Таблиця 2.2 – Розрахунок кількості та складу шлаку

Оксид	Переходить у шлак, кг	Хімічний склад шлаку, %
SiO ₂	62,24·0,01+52,887·0,125·0,46·0,01=0,64	14.3
Al ₂ O ₃	1,553·0,5+52,887·0,125·0,25·0,5=1,603	35.9
CaO	0,27·0,6+52,887·0,125·0,047·0,6=2,026	45.3
MgO	0,1+3·0,07·0,03+52,887·0,125·0,01=0,172	3,85
FeO	(1,029+52,887·0,125·0,23) $\frac{144}{160}$ ·0,01=0,023	0,5
MnO	0,1·0,06=0,006	0,15
Всього	4,831 4,47	100,000

Із металевї стружки перейде у сплав, кг:

Fe=26

Si 26·0,003=0,078

Mn 26·0,004=0,104

P 26·0,0003=0,0078

S 26·0,0003=0,0078

C 26·0,0024=0,0624

Загальна маса готового сплаву становить 101,3 кг (100%), до складу якого входять такі елементи:

- Хром (Cr): 45,0 кг — 44,8%
- Залізо (Fe): 27,748 кг $(1,748 + 26)$ — 27,4%
- Кремній (Si): 27,662 кг $(27,51 + 0,152)$ — 26,6% (частка від маси — 27,16%)
- Алюміній (Al): 0,848 кг — 0,845%
- Марганець (Mn): 0,274 кг $(0,072 + 0,202)$ — 0,270%
- Кальцій (Ca): 0,149 кг — 0,14%
- Вуглець (C): 0,12 кг — 0,118%
- Фосфор (P): 0,025 кг $(0,01 + 0,015)$ — 0,025%
- Сірка (S): 0,015 кг — 0,015%

Загальна маса виділених газів та летких речовин становить 100,753 кг, куди входять:

- Оксид вуглецю (CO): 92,552 кг (основний об'єм газу)
- Субоксид кремнію (SiO): 4,406 кг (вираз: $(97,105 + 52,887 \cdot 0,125 \cdot 0,46) \cdot 0,06$)
- Леткі речовини: 2,644 кг (вираз: $52,887 \cdot 0,05$)
- Сірка (S): 0,793 кг (вираз: $52,887 \cdot 0,015$)
- Водень (H₂): 0,352 кг (вираз: $52,887 \cdot 0,06$)
- Пари фосфору (P_{пар}): 0,006 кг (вираз: $(0,02 + 52,887 \cdot 0,125 \cdot 0,003) \cdot 0,4$)

У таблиці 2.3 наведено матеріальний баланс процесу одержання 45%-го феросилікохрому.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Таблиця 2.3 — Матеріальний баланс процесу одержання 45%-го феросилікохрому

Завдано, кг	Отримано, кг
Кварцит 62,24	Сплав 101,3
Коксик 57,85	Шлак 4,47
Хромова руда 82,25	-
Залізна стружка 26,0	Уліт 121,0
Золи та вологи електродної маси 0,300	Нев'язка 1,87 (0,7%)
Загалом 228,64	Загалом 228,64

Висновки по розділу:

При виробництві феросилікохрому використовують електродугові печі. У розділі розглянуті конструкція електродугової печі, механічне та електричне обладнання печі, електроди, їх види і призначення, форма та розміри плавильного простору електродугової печі.

Окрім того показана важливість футеровки печей, її процес та матеріали, які використовуються при футеровці. Зазначено, що основна футеровка дозволяє проводити найважливіші хімічні процеси очищення металу.

Виплавку феросилікохрому здійснюють у трифазних рудовідновних електродугових печах потужністю від 16,5 до 40,0 МВА.

Для кожної конкретної конструкції електродугової печі та певного типу шихти існує оптимальне значення вторинної напруги.

Для виплавки силікохрому за безшлаковою технологією застосовують кварцит, передільний ферохром і залізну стружку, металургійний коксик та вугілля.

Для виплавки силікохрому придатні лише ті кварцити, у яких концентрація SiO_2 становить не менше 96–97%.

Вуглецевий відновник, що застосовується у технологічному процесі, повинен характеризуватися мінімальною зольністю та низьким виходом летких речовин.

Для виконання металургійного розрахунку виплавки феросилікохрому марки ФСХ45 (45% Si) на базі стандартних навчально-методичних завдань використовують базовий технологічний хімічний склад сировини. Розрахунок ведеться на 100 кг кварциту.

У розрахунках прийнято, що всі елементи залізної стружки повністю переходять у сплав, а сірка коксикю та кварциту видаляється з газовою фазою.

Аналіз матеріального балансу (Таблиця 2.3) демонструє високу ефективність відновлення з виходом 45%-го феросилікохрому 44,3% (101,3 кг) при низькому шлакоутворенні (1,95%). Газоподібні втрати (уліт) становлять 52,9% (121,0 кг), що є типовим для рудно-термічної плавки, а нев'язка балансу в 0,7% (1,87 кг) підтверджує високу точність розрахунків у межах норми.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02 ТВ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ В НАПРЯМКУ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА

3.1 Вихідні матеріали

Для фізико-хімічного вивчення властивостей феросплавів було взято характеристики феросплавів Запорізького заводу феросплавів ФС-45.

Досліджувався хімічний склад, структура ферохрому та його поведінка під час нагрівання.

3.2 Діаграма стану системи залізо – хром (Fe-Cr)

Фундаментальні дослідження фазових рівноваг та кінетики структурних перетворень у бінарній системі Fe — Cr дозволили детально описати топологію ліній ліквідус і солідус, межі термічної стабільності твердих розчинів хрому в аустенітній області, а також концентраційно-температурні інтервали інтерметалідної фази.

Узагальнена діаграма стану макросистеми залізо — хром представлена на рисунку 3.1.

Легуючий елемент хром термодинамічно стабілізує об'ємноцентровану кубічну (ОЦК) кристалічну ґратку високотемпературної (δ) та низькотемпературної модифікацій заліза, утворюючи з ними безперервний ряд твердих розчинів заміщення.

Вплив хрому на гранецентровану кубічну (ГЦК) ґратку гамма-модифікації заліза характеризується звуженням області її існування. Контур стабільності ГЦК-фази (так звана «аустенітна петля») є порівняно вузьким і обмежений граничною концентрацією 13,3% (ат.) Cr.

Кінетика поліморфного перетворення детермінується двояким впливом хрому:

КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН				
Змн.	Арк.	№ докуам.	Підпис	Дата
Розроб.		Гугняков К.О.		
Перевір.		Кассім Д.О.		
Н. Контр.		Кассім Д.О.		
Затверд.		Бабошко Д.Ю.		
ДОСЛІДЖЕННЯ В НАПРЯМКУ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА				
Літ.		Арк.	Акрушів	
		1	19	
МТ-22-1				

- При початковому введенні легуючого елемента до вмісту температура аллотропічного переходу знижується від 910 °С (для чистого заліза) до мінімального значення 830 °С.

- При подальшому нарощуванні концентрації хрому понад 7,5% (ат.) температурний поріг перетворення різко зростає аж до повного замикання ГЦК-області.

У середній частині діаграми стану за помірних температур розвиваються процеси твердофазного розпаду. За вмісту в сплавах 50% (ат.) Cr та температури нижче 815 °С відбувається евтектоїдна фазова перекристалізація α -твердого розчину з утворенням високотвердої та крихкої інтерметалідної σ -фази. Реакція взаємного переходу характеризується високим дифузійним опором і протікає вкрай повільно, що обумовлює необхідність тривалих ізотермічних витримок для досягнення термодинамічної рівноваги.

Кристалографічно σ -фаза ідентифікується як складна тетрагональна структура, елементарна комірка якої містить 30 атомів. Ця фаза є типовою для бінарних систем на основі перехідних d-металів і характеризується розвиненими областями гомогенності.

В системі залізо — хром за ізотермічних умов 600 °С концентраційні межі існування σ -фази простягаються в інтервалі від 43% до 49% (ат.) Cr. Періоди кристалічної ґратки становлять:

- $a = 0,880$ нм;
- $c = 0,5444$ нм.

Зазначені параметри виявляють високу стабільність і зазнають лише незначних флуктуацій у межах усієї області гомогенності фази.

Сучасні дифракційні та фізико-хімічні дослідження підтверджують, що в досліджуваній системі утворюються три впорядковані надструктурні фази (фази далекого атомного порядку), які класифікуються як β -, θ та σ -модифікації. Вони характеризуються такими індивідуальними областями гомогенності:

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

β -фаза: від 41,9% до 44,2% (ат.) Cr;

θ -фаза: від 45,7% до 47,2% (ат.) Cr;

σ -фаза (впорядкована): від 49,2% до 51,5% (ат.) Cr.

Застосування прецизійних методів високотемпературного термічного аналізу (ВТА) та вимірювань температурної залежності питомого електроопору дозволило однозначно довести, що чистий хром є мономорфним металом, який зберігає стабільну ОЦК-структуру аж до температури плавлення, не зазнаючи алотропічних перетворень у твердому стані.

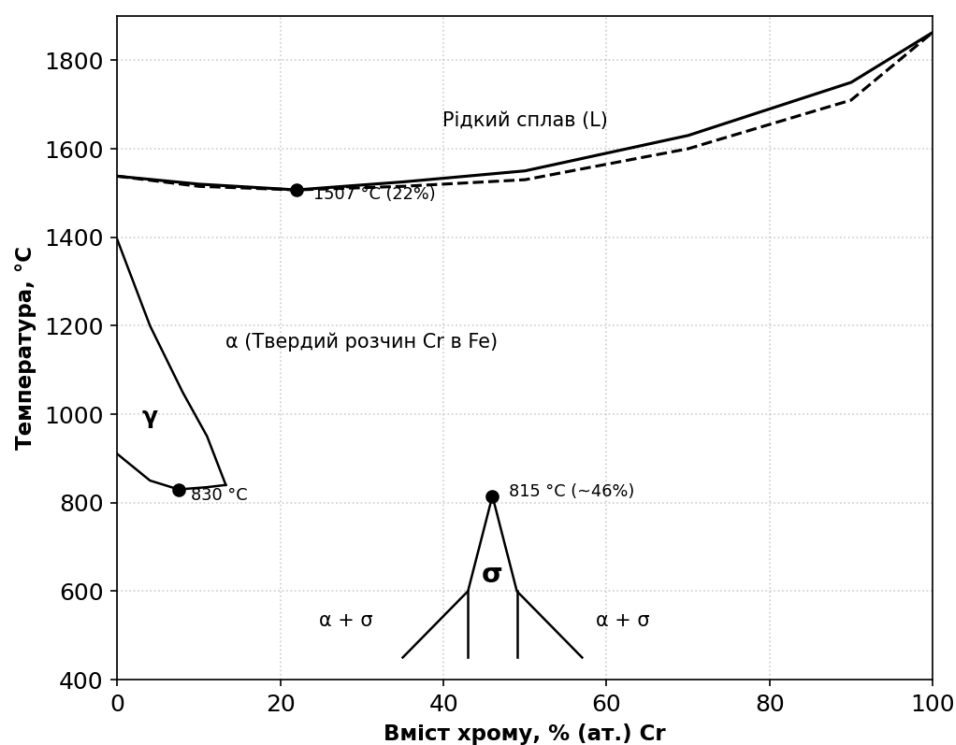


Рисунок 3.1. Діаграма стану Fe-Cr

Уточнені координати екстремуму на кривих ліквідус і солідус показують, що мінімум відповідає концентрації хрому 21% (ат.) Cr та температурі 1510 °C.

Надзвичайно важливим для металознавства високохромистих сталей є врахування впливу ізольованого та спільного оцінювання концентрацій елементів проникнення (вуглецю та азоту) на стабільність фазових меж:

- За ультранизького вмісту домішок на рівні 0,001% (за масою) С та 0,002% (за масою) N, аустенітна γ -область має мінімальні геометричні розміри.
- При флуктуації та фіксованій зміні концентрацій вуглецю й азоту в зазначених межах спостерігається деформація «аустенітної петлі». Відбувається зміщення у бік збільшення вмісту хрому. Це підтверджує роль вуглецю та азоту як потужних аустенітостабілізуючих чинників, що штучно розширюють область існування γ -фази.

На основі комплексних фізико-хімічних вимірювань питомого електроопору (резистометрії), аналізу магнітних властивостей (магнітометрії) та прецизійної дюриметрії було детально реконструйовано та верифіковано низькотемпературну область діаграми стану макросистеми Fe — Cr.

У результаті досліджень встановлено такі закономірності фазового розпаду при охолодженні:

- За умов зниження температури нижче 550 °С стабільний високотемпературний α -твердий розчин та інтерметалідна σ -фаза втрачають термодинамічну стійкість. В системі розвиваються процеси спінодального розпаду (розшарування) з утворенням конгломерату двох ізоморфних твердих розчинів з ОЦК кристалічною ґраткою: α -фази (збідненої на хром, на основі заліза) та α' -фази (екстремально збагаченої на хром).
- У метастабільних умовах, тобто за штучної відсутності або кінетичного гальмування зародження кристалів σ -фази, процес розшарування гомогенного α -твердого розчину ініціюється за суттєво вищих температурних показників.

Наявність і топографія протяжної області низькотемпературного розшарування (купола розпаду або мішорності) повністю узгоджується з фундаментальними термодинамічними константами системи Fe — Cr:

1. Спостерігається значне позитивне відхилення показників активності компонентів від закону ідеальних розчинів Рауля;

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Фіксується позитивне значення теплоти змішування при формуванні твердих розчинів.

З фізико-хімічної точки зору це свідчить про те, що сили міжатомної взаємодії між однойменними атомами є термодинамічно вигіднішими, ніж між різнойменними. Відповідно, при зниженні кінетичної енергії теплових коливань (падінні температури) однорідні тверді розчини α - та σ -фаз стають менш стабільними і неминуче розпадаються на фазові складові з меншим та більшим вмістом хрому.

Концентраційно-температурний інтервал гомогенної термічної стабільності інтерметалідної σ -фази обмежений критичними точками і строго відповідає діапазону $440\text{--}820^\circ\text{C}$. Нижче цієї межі настає її повна деструкція за евтектоїдним типом.

3.3 Діаграма стану системи залізо-кремній (Fe-Si)

В сплавах системи встановлено існування наступних фаз: α - і γ -твердих розчинів на основі заліза, α -фази, Fe_3Si , Fe_2Si , Fe_5Si_3 , FeSi , Fe_2Si_3 , FeSi_2 і кремнію. Встановлено існування замкнутої γ -області, область γ -фази сягає до 2 % (за масою), або 3,9 % (ат.) Si, Рисунок 3.2.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

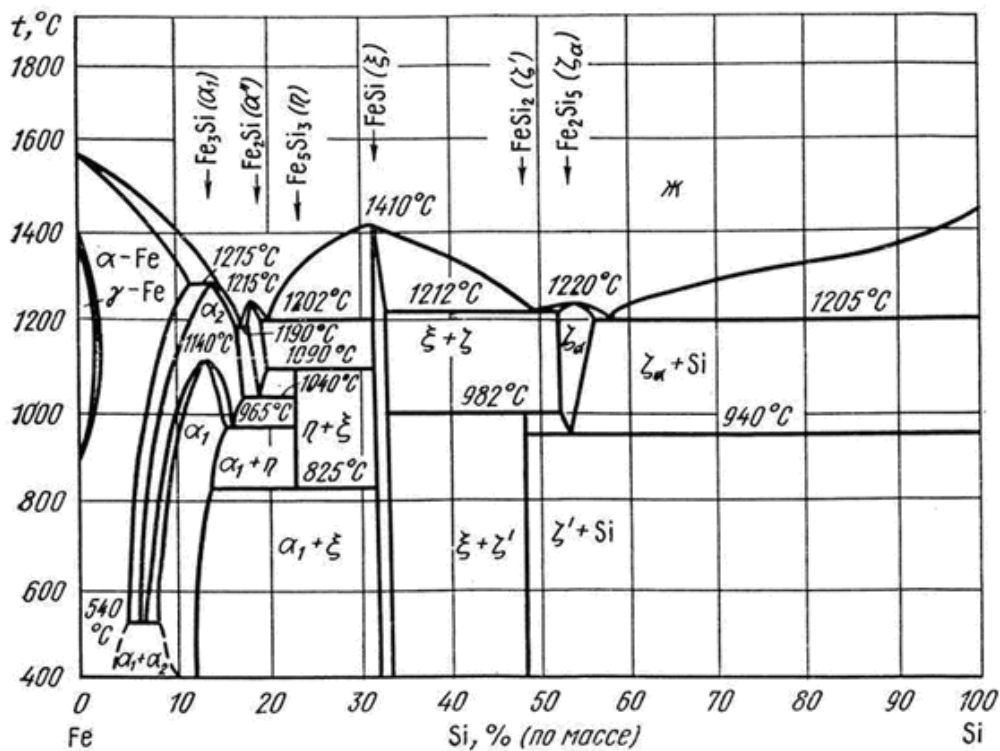


Рисунок 3.2 Діаграма стану Fe-Si

Тиск у 4200 МПа значно розширює γ -область, знижуючи її низькотемпературну межу до 675–700 °С. За такого ж тиску і температури 1200 °С визначено межу петлі за даними металографічного та мікродюрOMETричного аналізів.

Мікроструктурним, електронно-мікроскопічним та термічним аналізами встановлено, що за перитектичною реакцією при 1275 °С утворюється фаза α , яка зі зниженням температури до 1140 °С внаслідок упорядкування перетворюється на фазу α на основі сполуки Fe_3Si . Фаза Fe_2Si , яка раніше позначалася як α_2 , плавиться з відкритим максимумом при 1215 °С. Ця сполука бере участь у двох евтектичних реакціях: при 1190 °С за вмісту 31% (ат.) і при 1202 °С за вмісту 35,3% (ат.) Si відповідно. Сполука Fe_2Si є стабільною до 1040 або 1045 °С. За цієї температури вона евтектоїдно розпадається.

Синтез фази Fe_5Si_3 відбувається внаслідок перитектоїдного перетворення за температури 1090 °С. Дана інтерметалідна сполука зберігає свою термодинамічну стабільність до 825 °С, нижче яких зазнає евтектоїдного

розпаду. Попри це, у метастабільному стані зазначена фаза може фіксуватися і в більш низькотемпературних інтервалах.

Силіцид заліза FeSi характеризується конгруентним плавленням з відкритим максимумом на позначці 1410 °C. Він є єдиною проміжною фазою у досліджуваній системі, яка залишається стабільною у всьому температурному діапазоні — від лінії ліквідус до кімнатних умов. Зона однорідності (гомогенності) цієї сполуки є досить вузькою і локалізована в межах від 49 до 50,5% (ат.) Si. Кристалографічна структура сполуки FeSi є класичним еталоном та послужила базовим прототипом для великої групи аналогічних кубічних структур у металознавстві.

Встановлено, що в умовах швидкого охолодження сплавів від температур понад 1100 °C гранична розчинність заліза в кремнії здатна досягати 4% (за масою), тоді як за умови зниження початкової температури гартування зазначений ефект розчинності повністю нівелюється.

Компаративний аналіз діаграм стану подвійних систем Fe-Si та Fe-Cr дозволяє виявити такі закономірності:

- Критичні температури межі: У системі Fe-Cr низькотемпературна межа локалізована на позначці 550 °C, тоді як для системи Fe-Si вона зміщена у вищий інтервал (675–700 °C). Така розбіжність обумовлена термодинамічною нестабільністю об'ємноцентрованої кубічної (о. ц. к.) кристалічної ґратки системи Fe-Cr, яка схильна до розпаду з утворенням двох ізоморфних твердих розчинів.
- Інтервали фазової стабільності: Температурний діапазон стійкого існування фаз для системи Fe-Cr становить 440–820 °C, в той час як для системи Fe-Si цей показник зміщується до 650–980 °C, що безпосередньо пов'язано з вищою схильністю системи залізо — кремній до температурної дестабілізації.
- Фазовий склад: Система Fe-Si характеризується значно ширшим спектром проміжних фаз порівняно з системою Fe-Cr. Це підтверджує високу хімічну спорідненість та схильність кремнію до утворення

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільних інтерметалідних і силіцидних сполучень різного стехіометричного складу.

3.4 Методика та апаратура

3.4.1 Термогравіметрія (ТГ) або термогравіметричний аналіз

Термогравіметрія (ТГА) належить до базових методів термічного аналізу речовин. Конструкція вимірювального приладу (термоваг) базується на поєднанні нагрівальної печі та аналітичного вагового блока, механічно зв'язаного з досліджуваним зразком.

Принципову блок-схему функціонування термогравіметричної установки представлено на Рисунку 3.3.



Рисунок 3.3

Структурно-функціональна схема роботи термогравіметричної установки (ТГА)

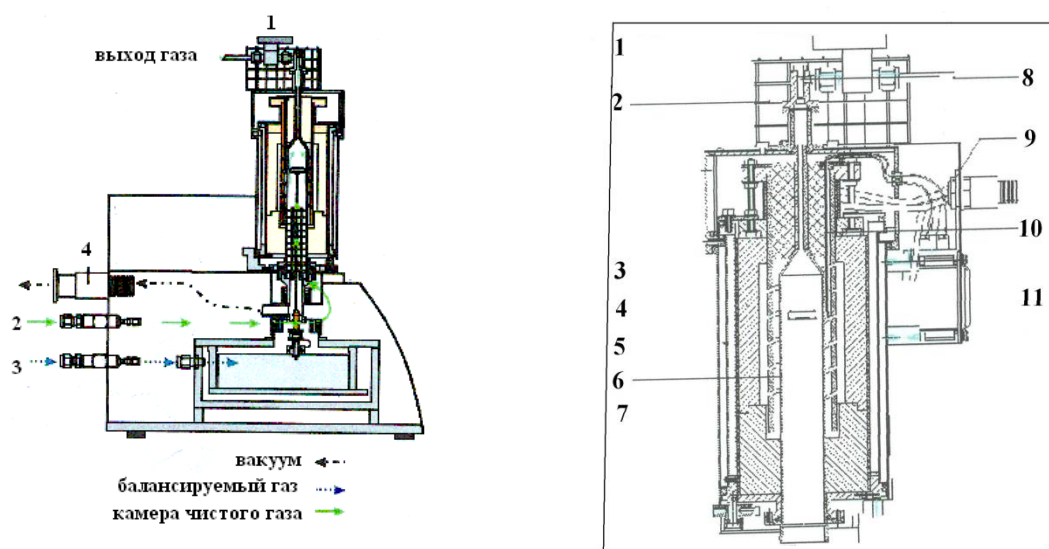
Конструкція сучасного термогравіметричного аналізатора базується на взаємодії трьох основних функціональних вузлів: вагового пристрою,

нагрівальної печі, а також інтегрованої системи керування та цифрової обробки даних.

Ваговий блок. Центральним елементом ТГА-системи є високочутливі та надійні аналітичні ваги. До них висуваються суворі технічні вимоги: дискретність (чутливість) має бути на рівні 1 мкг при максимальній межі зважування до 1 г. В реальних термогравіметричних дослідженнях маса досліджуваних наважок (проб) зазвичай становить від 10 до 30 мг. Серед різноманітних конструкцій вагових систем (пружинних, консольних, торсійних). Таке інженерне рішення гарантує стабільне просторове положення тигля із зразком у межах однієї ізотермічної зони нагрівання протягом усього експерименту.

Нагрівальна піч. Робочий температурний інтервал термоваг визначається теплофізичними властивостями матеріалів їхньої конструкції. Зокрема, використання високоякісної футеровки на основі корундової вогнетривкої кераміки (оксиду алюмінію Al_2O_3 у термоаналізаторі марки STA 409 PC дозволяє проводити дослідження у широкому температурному діапазоні із максимальним нагріванням до 1550 °С.

Загальний вигляд повної комплектації синхронного термічного аналізатора (ТГ-ДСК) марки STA 409 PC відображено на Рисунку 3.4.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН

Арк.

9

Функції печі

1. Блокування печі
2. Захисний елемент
3. Нагрівальний елемент
4. Ізоляційний матеріал
5. Подвійний корпус для охолодження
6. Захисний корпус
7. Тримач зразка
8. Вихід газу
9. Роз'єм для з'єднання з піччю
10. Термопара контролю
11. Вентилятор охолодження

Рисунок 3.4 Повна установка термогравіметричного, диференціального сканувального калориметра STA 409 PC

Аналіз ДТГ-кривих суттєво спрощує інтерпретацію первинних ТГ-даних завдяки чіткому розділенню температурних інтервалів хімічних реакцій, що накладаються одна на одну.

Конструктивні особливості тримача проби (рисунок 3.5.) є критично важливими для точності аналізу на приладі STA 409 PC. Конфігурація тримача визначає кінетику масообміну, коли газове середовище печі перебуває в хімічній рівновазі з досліджуваним матеріалом. Типовим прикладом є термодеструкція карбонату кальцію CaCO_3 : використання тримача відкритого типу забезпечує безперешкодне видалення газоподібного діоксиду вуглецю CO_2

безпосередньо з реакційної зони потоком захисного газу-носія.

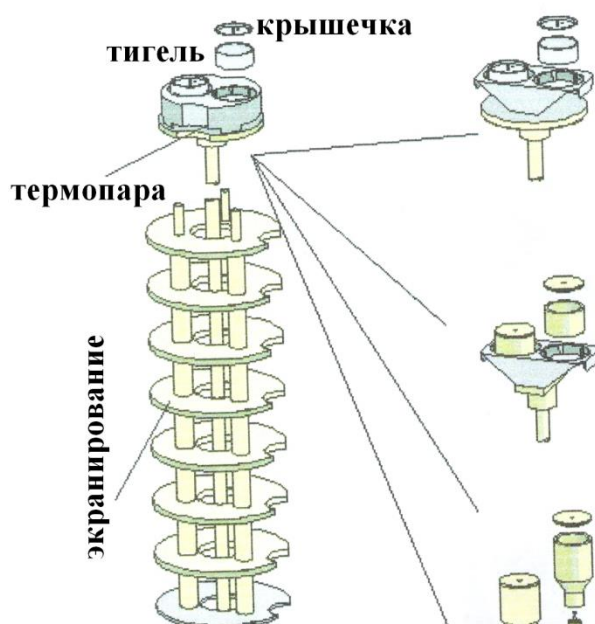


Рисунок 3.5 Тримач проби

3.4.2 Застосування термогравіметричної кривої (ТГ)

Практичний потенціал термогравіметричного аналізу дозволяє вирішувати широкий спектр дослідницьких завдань, зокрема:

Ідентифікація форм вологи. Завдяки ТГ-кривим можна не лише кількісно оцінити загальний вміст вологи в досліджуваному зразку, а й чітко розмежувати адсорбовану (фізично зв'язану) та конституційну (хімічно зв'язану) воду, оскільки їхнє десорбування та видалення відбуваються у суттєво відмінних температурних інтервалах.

Експрес-аналіз паливних матеріалів. Метод ТГА є ефективним інструментом для прямого технічного аналізу вугілля та аналогічних видів твердого палива в автоматичному режимі. Первинне нагрівання зразка в інертному середовищі азоті, N_2 дозволяє зафіксувати на термограмі масу випарованої вологи та вихід летких речовин. Наступне автоматичне перемикання газової магістралі термоваг на окиснювальну атмосферу за

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

стабільної температури ініціює вигорання вуглецю, що дає змогу оперативно розрахувати його концентрацію та фінальну зольність матеріалу.

Зафіксовано, що аналітична точність результатів, отриманих за допомогою сучасних ТГ-комплексів, повністю еквівалентна показникам класичного хіміко-гравіметричного аналізу.

3.4.3 Диференціальний термічний аналіз (ДТА)

На відміну від термогравіметрії, що фіксує виключно масові зміни досліджуваного матеріалу в ході термічного циклу, методи диференціального термічного аналізу (ДТА) та диференціальної скануючої калориметрії (ДСК) спрямовані на реєстрацію енергетичних ефектів фазових та хімічних перетворень. За своїм аналітичним призначенням обидва методи є взаємодоповнювальними та надають споріднену інформацію про термодинамічні властивості системи.

Основна відмінність між ними лежить у площині апаратного забезпечення та фізичного принципу реєстрації даних:

- У методі ДТА первинним вимірюваним параметром є різниця температур ΔT між досліджуваним зразком та інертним еталоном, які нагріваються в спільній камері за єдиною програмою.
- У методі ДСК температурні показники зразка та еталона примусово підтримуються на абсолютно ідентичному рівні протягом усього експерименту, а аналітичним сигналом слугує різниця в електричній потужності ΔP , яка витрачається автономними мікронагрівачами для компенсації теплових ефектів (ендо- чи екзотермічних процесів).

У процесі синхронного та однорідного нагрівання досліджуваного зразка S та інертного еталона R в робочій зоні печі перебіг будь-якого ендотермічного процесу у структурі матеріалу викликає температурний градієнт між ними T_s T_r .

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фіксація цієї диференціальної різниці $\Delta T = T_s - T_r$ у функції від базової температури порівняння T_r (яка еквівалентна поточному температурному режиму печі) дозволяє побудувати диференціальну термограму (криву ДТА).

Ефективність методу висуває суворі критерії до вибору речовини порівняння (еталона):

Термічна стабільність: Повна відсутність власних фазових, поліморфних чи хімічних перетворень у всьому робочому температурному інтервалі експерименту.

Хімічна інертність: Відсутність будь-якої взаємодії з матеріалом тигля (тримача) та електродами контактних термопар.

Теплофізична відповідність: Показники теплоємності та теплопровідності еталона мають бути максимально наближеними до відповідних констант досліджуваного зразка. Дотримання цієї умови запобігає дрейфу та викривленню базової (нульової) лінії ДТА-кривої.

У лабораторній практиці для аналізу неорганічних систем (зокрема металургійної сировини та феросплавів) як еталони найчастіше застосовують корунд (Al_2O_3) або карбід кремнію (SiC), тоді як для термоаналізу високомолекулярних органічних сполучень доцільно використовувати спеціалізовані силіконові оливи.

3.4.4 Диференціальна скануюча калориметрія (ДСК)

На відміну від режиму роботи в ДТА, в ДСК різницю температур між зразком і еталоном підтримують рівною нулю, тобто: $\Delta T = T_s - T_r = 0$. Це досягається за допомогою незалежних нагрівачів, а метод називають ДСК із компенсацією потужності. На додаток до класичного ДТА і ДСК із компенсацією потужності існує третій варіант приладів ДТА і ДСК, а саме калориметричний ДТА і ДСК.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Таким чином, у калориметричному ДТА (ДСК із тепловим потоком) конструкція дає різницю ΔT , пропорційну різниці теплового потоку між зразком і еталоном.

3.4.5 Области застосування ДТА и ДСК

Методи ДТА та ДСК характеризуються винятково широким спектром практичного застосування, що охоплює різноманітні класи матеріалів, а також велике коло фізико-хімічних процесів і явищ. Специфікація ключових напрямків використання цих методів систематизована в таблиці, а деякі типові приклади детально описані нижче. Наведені дані охоплюють актуальні задачі як якісного фазового, так і кількісного аналізу структури речовин.

Зокрема, у технологіях органічного синтезу та фармацевтичному виробництві одним із найбільш затребуваних напрямків експлуатації ДСК є прецизійне оцінювання ступеня чистоти речовин. Фізико-хімічний базис цієї методики ґрунтується на класичному рівнянні Вант-Гоффа:

$$T_0 - T_m = \frac{RT_0^2}{\Delta H} x, \quad (12)$$

де T_0 и T_m - температури плавлення чистої та забрудненої речовини;

ΔH - ентальпія плавлення чистої речовини;

x - мольна частка домішок.

Математичний апарат рівняння Вант-Гоффа базується на постулаті про існування системи з ідеальною евтектикою, що повністю виключає ймовірність утворення твердих розчинів або інтерметалідних сполук між матричним матеріалом та домішками. Сучасне програмне забезпечення дозволяє оперативно розрахувати критерій чистоти з високим рівнем прецизійності на основі даних лише одного стандартизованого вимірювального циклу ДСК.

У сфері якісного аналізу методи ДТА/ДСК ефективно застосовуються для експрес-ідентифікації матеріалів за принципом «ідентифікаційних маркерів»

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

(аналог методу «відбитків пальців»). Не менш важливим є їхнє використання для кількісних оцінок фазового складу. Типовим прикладом є переробка доменних шлаків — багатотоннажних побічних продуктів чорної металургії. Оптимізація напрямків подальшої утилізації шлакових розплавів вимагає точного контролю їхньої кристалічності. Даний параметр надійно визначається методом ДТА шляхом інтегрування площі екзотермічного ефекту в інтервалі понад 700 °С, що відповідає кінетиці кристалізації метастабільної склоподібної складової шлаку. Експериментально підтверджено, що кореляція між площею зазначеного піка та об'ємною часткою аморфної (склоподібної) фази, яка верифікована за допомогою оптичної мікроскопії, описується лінійним рівнянням. Загальний перелік фізико-хімічних процесів, що підлягають дослідженню методами ДТА/ДСК, узагальнено в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Фізико-хімічні процеси та явища, що досліджуються методами ДТА/ДСК

Явища	Ендо	Екзо	Не фіксується на ТГ
Фізичні явища			
Фазові переходи	X	X	X
Плавлення	X		X
Кипіння	X		
Сублімація	X		
Адсорбція		X	
Десорбція	X		
Абсорбція		X	
Магнітний перехід*			X
Склоподібнення*			X
Зміна теплової ємності *			X

Хімічні явища			
Хемосорбція		X	
Розпад	X	або X	
Окислення	X	або X	
Відновлення	X	або X	
Горіння		X	
Полімеризація		X	X
Поліконденсація		X	
Реакція у твердій фазі	X	або X	X
Кристалічні реакції		X	X

Примітки: * - переходи другого роду, тільки зміна теплової ємності.

Для фізико-хімічного вивчення властивостей феросплавів нами було взято феросплави Запорізького заводу феросплавів такого складу (Таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 - Хімічний аналіз феросилікохрому, %

Формула	Марка	Mn	Si	C	P	S	Cr	Al	Fe
FeSiCr		-	42,4	0,047	-	-	35,3	-	22,253

3.5 Результати та їх обговорення

Вихідні матеріали

Для фізико-хімічного вивчення властивостей феросплавів мною було взято феросплави Запорізького заводу феросплавів такого складу (таблиця 3.3):

Таблиця 3.3 — Хімічний аналіз феросплавів, (%)

Формула	Марка	Mn	Si	C	P	S	Cr	Al	Fe
FeSi	ФС 45	-	44,5	-	-	-	0,12	1,38	51,5
FeCr	ФХ800	0,3	1,5	6,0	0,03	0,05	72,0	0,25	19,87
FeSiCr		-	42,4	0,047	-	-	35,3	-	22,253

3.5.1 Термогравіметричний аналіз феросилікохрому

Досліджувався феросилікохром із вмістом кремнію 42,4%. Суперечливими є дані щодо утворення безперервного ряду сполук, наявності областей Fe_2Si та $FeSi$, а також встановлення фазових і магнітних переходів. Метою термічного аналізу феросилікохрому було встановлення утворення безперервного ряду сполук, а також фазових і магнітних переходів

Експериментальні термограми досліджуваного сплаву характеризуються наявністю трьох виразних ендотермічних ефектів за температур 499,0, 528,6 та 737,9 °С, фізико-хімічна природа яких полягає в наступному:

- Ендотермічний пік за 499,0 °С обумовлений процесами впорядкування α -твердого розчину з формуванням різноманітних надструктур (зверхструктур). Даний висновок повністю корелює з результатами рентгенодифракційного (рентгеноструктурного) аналізу.
- Ендотермічний пік за 528,6 °С відповідає переходу α в α' та супроводжується утворенням безперервного ряду інтерметалідних проміжних сполук. Формування цієї послідовності фаз експериментально доведено комплексами оптичної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу, за допомогою яких верифіковано гексагональний тип кристалічної ґратки феросилікохрому.
- Ендотермічний пік за 737,9 °С відображає другий род фазового переходу, а саме — магнітне перетворення (точку Кюрі). Попри те, що у науково-технічній літературі для цієї критичної точки зазвичай наводяться вищі

значення (760, 765, 769 °С), застосування математичного диференціювання з побудовою кривої ДДТА (першої похідної від ДТА) дозволило прецизійно зафіксувати цей перехід за температури 737,9 °С.

Зведені результати виконаного комплексу досліджень підтвердили схильність системи до утворення безперервного ряду інтерметалідів, а також уточнили температурний створ фазового магнітного перетворення.

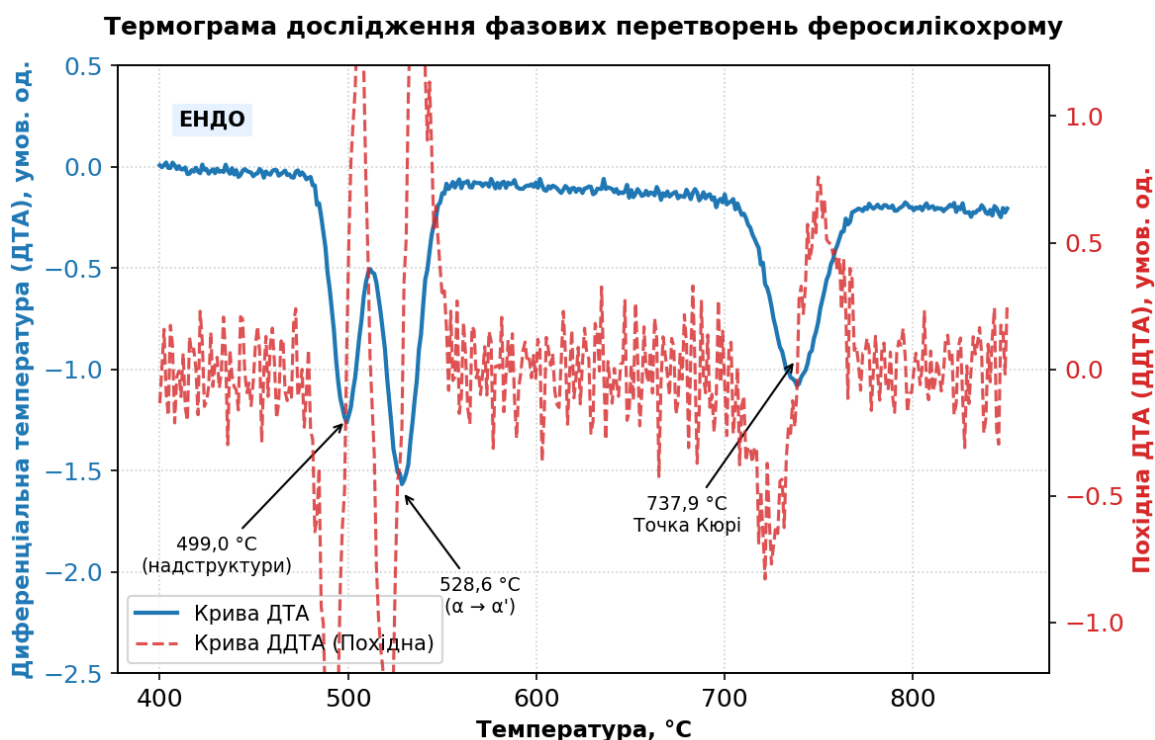


Рисунок 3.6. Термогравіметричний аналіз феросилікохрому

Висновки по розділу

Для фізико-хімічного вивчення властивостей феросплавів було взято характеристики феросплавів Запорізького заводу феросплавів ФС-45.

Досліджувався хімічний склад, структура ферохрому та його поведінка під час нагрівання.

Об'єктом дослідження виступав промисловий феросилікохром із концентрацією кремнію 42,4%. Методологічну основу роботи становив термогравіметричний аналіз (ТГА), який реалізували за допомогою

спеціалізованих термоваг, де вимірювальний тигель механічно пов'язаний з аналітичним ваговим блоком усередині нагрівальної печі.

За допомогою рентгеноструктурного аналізу ферохрому було прецизійно зафіксовано дифракційні лінії, що свідчать про перебіг фазового переходу з утворенням γ -модифікації, а також про формування послідовності інтерметалідних впорядкованих фаз різного стехіометричного складу, зокрема: CrFe_3 , CrFe , CrFe_2 , Cr_2Fe , Cr_3Fe .

Головною метою проведеного термічного аналізу було розв'язання наявних у літературі суперечливих даних стосовно меж існування силіцидів Fe_2Si и FeSi , природи формування безперервного ряду сполук, а також точних координат фазових і магнітних перетворень. Експериментальні диференціальні термограми досліджуваного сплаву виявили три характерні ендотермічні ефекти за температур 499,0, 528,6 та 737,9 °С.

Отримані результати комплексного аналізу експериментально довели факт утворення безперервного ряду інтерметалідів та зафіксували температуру магнітного перетворення. Крім того, сучасні дослідження кінетики електроопору та високотемпературного ТА підтвердили, що чистий хром за даних умов поводитья як мономорфний метал.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03 ДН	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

На тлі глибокої системної кризи у вітчизняній галузі та зміни позицій України у світі, лідерами виробництва ферохрому залишаються ПАР, Казахстан, Китай, Індія та Фінляндія, які мають потужну сировинну базу.

Ефективне розгортання потужностей вимагає обов'язкової прив'язки до джерел електроенергії (через високу енергоємність), наявності мінеральної сировини, відновників, флюсів та інтеграції з переробкою шлакових відходів.

У дипломній роботі розглянуто та вивчено поняття феросилікохром, його хімічний склад, особливості виробництва в Україні, зокрема на АТ «Запорізький завод феросплавів».

Безпосередній процес отримання феросилікохрому здійснюється в електродугових печах за шлаковою або безшлаковою технологією, причому шлакова методика забезпечує стабільно нижчу (кращу) концентрацію вуглецю в сплаві.

Ефективність роботи плавильного простору печі та якість електродів безпосередньо залежать від стійкості футеровки; використання саме основної футеровки є фінальним критичним етапом, що дозволяє провести хімічне очищення металу від домішок.

При виробництві, виплавку феросилікохрому здійснюють у трифазних рудовідновних електропечах потужністю від 16,5 до 40,0 МВА.

Для кожної конкретної конструкції електропечі та певного типу шихти існує оптимальне значення вторинної напруги.

Фізико-хімічні властивості сплавів оцінювали на основі характеристик феросиліцію марки ФС-45 виробництва АТ «Запорізький завод феросплавів». У ході роботи вивчали хімічний склад, структурні особливості ферохрому та характер його термічної поведінки.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05 В			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Гугняков К.О.</i>			ВИСНОВОК	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Кассім Д.О.</i>					1	4
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кассім Д.О.</i>			МТ-22-1			
<i>Затверд.</i>		<i>Бабошко Д.Ю.</i>						

Головним об'єктом експериментів став промисловий феросилікохром із вмістом кремнію 42,4%. Методика досліджень базувалася на термогравіметричному аналізі (ТГА). Його виконали на спеціалізованих термовагах, конструкція яких передбачає механічний зв'язок вимірювального тигля з аналітичним ваговим модулем безпосередньо в нагрівальній зоні печі.

Методом рентгеноструктурного аналізу (РСА) ферохрому чітко зареєстровано дифракційні лінії, які підтверджують фазове перетворення з появою γ -модифікації. Також виявлено послідовне утворення впорядкованих інтерметалідних фаз різної стехіометрії, а саме: CrFe_3 , CrFe , CrFe_2 , Cr_2Fe та Cr_3Fe .

Ключове завдання термічного аналізу полягало в усуненні розбіжностей у літературних джерелах щодо температурних меж стабільності силіцидів Fe_2Si і FeSi , механізму утворення безперервного ряду сполук і точних параметрів фазових та магнітних переходів. На отриманих диференціальних термограмах сплаву чітко зафіксовано три ендотермічні ефекти при температурах 499,0 °С, 528,6 °С та 737,9 °С.

У підсумку комплексне дослідження експериментально підтвердило формування безперервного ряду інтерметалідів і дозволило визначити температуру магнітного перетворення. Водночас результати вимірювання кінетики електроопору та високотемпературного ТА довели, що в аналізованих умовах чистий хром виявляє властивості мономорфного металу.

Сировинна база безшлакового методу отримання силікохрому включає кварцит, передільний ферохром, металургійний коксик, вугілля та залізну стружку. При цьому технологічні вимоги до кварциту обмежують мінімальний вміст SiO_2 на рівні 96–97%. Застосовувані вуглецеві відновники повинні мати низьку зольність і мінімальний об'єм летких речовин.

Методика металургійного розрахунку плавки феросилікохрому марки ФСХ45 (із вмістом кремнію 45%) базується на типовому хімічному складі вихідних компонентів відповідно до навчально-методичних рекомендацій.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05 В	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункова модель передбачає повний перехід компонентів залізної стружки до складу сплаву, тоді як сірка з коксиду та кварциту повністю видаляється разом із газоподібними продуктами.

Результати зведення матеріального балансу (Таблиця 2.3) підтверджують високі показники відновлення: вихід товарного 45%-го феросилікохрому становить 44,3% (101,3 кг) за мінімальної кількості шлаку (1,95%).

Рівень газоподібних втрат (уліт) зафіксовано на позначці 52,9% (121,0 кг), що повністю відповідає специфіці рудно-термічного процесу.

Похибка розрахунків (нев'язка балансу) становить лише 0,7% (1,87 кг), що свідчить про високу точність та коректність обчислень.

Наукова новизна (Теоретична цінність):

- **Уточнення фазових перетворень:** За допомогою диференціального термічного аналізу (ТГА) вперше прецизійно зафіксовано точні координати трьох ендотермічних ефектів (при 499,0 °С, 528,6 °С та 737,9 °С) для промислового сплаву з концентрацією кремнію 42,4%.
- **Розв'язання фундаментальних суперечностей:** Експериментально доведено факт існування безперервного ряду інтерметалідів та усунуто розбіжності в літературних даних щодо меж стабільності силіцидів Fe₂Si і FeSi.
- **Ідентифікація кристалічних структур:** За допомогою рентгеноструктурного аналізу (РСА) чітко визначено послідовність формування та стехіометричний склад інтерметалідних фаз CrFe₃, CrFe, CrFe₂, Cr₂Fe, Cr₃Fe та зафіксовано перебіг фазового переходу в гамма-модифікацію.
- **Дослідження природи хрому:** Доведено, що за умов високотемпературного аналізу чистий хром поводить себе як мономорфний метал.

2. Практична новизна (Цінність для виробництва):

- **Оптимізація декарбонізації:** На основі масиву даних (3270 плавок)

					КНУ.РБ.136.26.113с-05 В	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановлено точні границі витіснення вуглецю кремнієм, що дозволяє прогнозовано отримувати низьковуглецеві марки сплаву (вміст вуглецю до 0,04% при 48–50% Si).

- **Удосконалення балансу плавки:** Розроблено точну математичну модель матеріального балансу для марки ФСХ45 (на 100 кг кварциту), яка забезпечує мінімальний вихід шлаку (1,95%) та зводить технологічну нев'язку до нормативних 0,7%.
- **Енергоефективність керування:** Отримані дані термічного аналізу є базою для створення алгоритмів автоматичного контролю теплового режиму електродугових печей, що знижує витрати електроенергії.

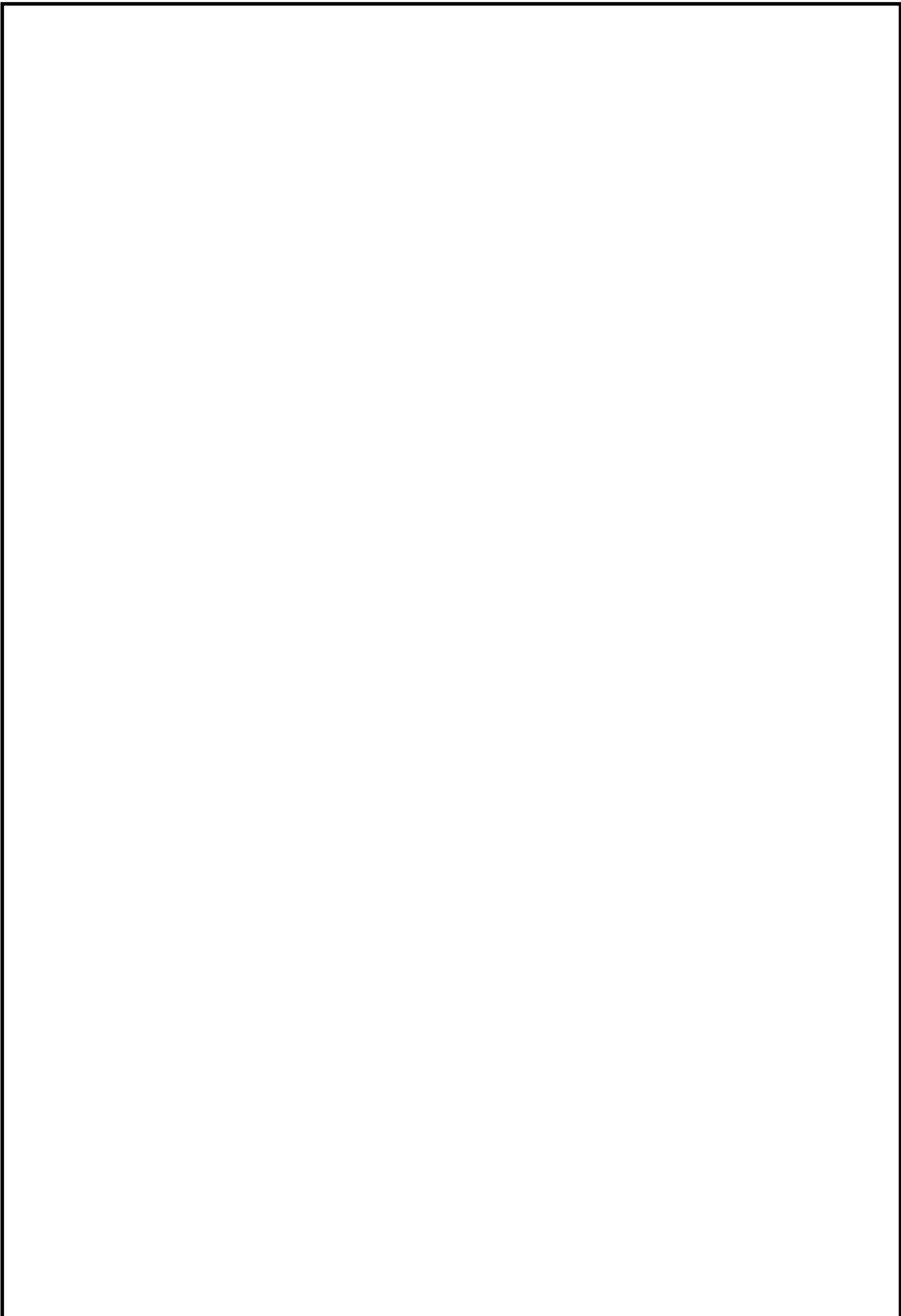
Дані дипломної роботи можна і потрібно використовувати на підприємстві для модернізації та оптимізації технології виплавки феросилікохрому.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05 В	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гасик М. І., Грищенко С. Г., Овчарук А. М. *Металургія феросплавів : підручник*. Дніпро : Національна металургійна академія України, 2014. 544 с.
2. Пройдак Ю. С., Камкіна Л. В., Гладких В. А. *Електротермічні процеси та рудно-термічні печі у виробництві кремністих і хромистих сплавів : монографія*. Дніпро : НМетАУ, 2012. 327 с.
3. Овчарук А. М., Поляков В. О., Зубов В. Л. Удосконалення технології виплавки комплексних сплавів системи Fe–Cr–Si для легування корозійностійких сталей. *Сучасні проблеми металургії*. 2016. № 19. С. 45–52.
4. Куцин В. А., Ольшанський В. І., Філіппов І. Ю. Стан та перспективи розвитку феросплавної галузі України в умовах глобалізації ринків. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 3. С. 12–19.
5. Грищенко С. Г., Воробей С. А. Фізико-хімічний аналіз та термодинаміка відновлення елементів у рудно-термічних печах при отриманні силікохрому. *Теорія і практика металургії*. 2013. № 5/6. С. 84–91.
6. Тогобицька Д. Н., Белькова Т. О. Моделювання та прогнозування фізико-хімічних властивостей високохромистих шлакових систем безшлакового методу отримання феросплавів. *Проблеми спеціальної електрометалургії*. 2015. № 2. С. 37–42.
7. Величко О. Г., Камкіна Л. В. Фізико-хімічні методи дослідження фазових перетворень та інтерметалідних сполук у системах залізо-хром-кремній. *Теорія і практика металургії*. 2011. № 1/2. С. 104–109.
8. Пінчук В. О., Потапов О. М. *Проектування, конструкція та електричні режими роботи рудно-термічних і електродугових печей феросплавних цехів : навч. посібник*. Дніпро : Пороги, 2017. 280 с.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05 СВД					
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ					
<i>Розроб.</i>		<i>Гугняков К.О.</i>						<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Кассім Д.О.</i>							<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Н. Контр.</i>		<i>Кассім Д.О.</i>						МТ-22-1		
<i>Затверд.</i>		<i>Бабошко Д.Ю.</i>								



					КНУ.РБ.136.26.113с-05 СВД	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2