

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНИ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки  
(повна назва кафедри)

*До звітності*  
*17.08.23р*

**Кваліфікаційна робота / проєкт**  
перший (бакалаврський) рівень  
(рівень вищої освіти)

на тему Огляд особливостей технології виплавки низькокремністого феросиліцію

Виконав: студент 5 курсу, групи МЕТ-18-16з  
спеціальності 136 «Металургія»  
(код і назва спеціальності)

освітньої програми

Металургія

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

О.Д. Шеварихін

(ініціали та прізвище)

Керівник доц. каф. металургійних технологій,  
екології та техногенної безпеки,  
канд. техн. наук О.С.Воденнікова

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. каф. металургійних технологій,  
екології та техногенної безпеки,

канд. техн. наук Т.М. Нестеренко

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНИ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 136 «Металургія»

(шифр і назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Освітня програма Металургія

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Ю.О. Белоконь

«28» 12 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Шеварихіну Олександр Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкту) Огляд особливостей технології виплавки низькокремністого феросиліцію

керівник роботи канд. техн. наук, доцент Воденнікова Оксана Сергіївна

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

затверджені наказом ЗНУ від "29" грудня 2022 року № 1894-с

2. Строк подання студентом роботи 19.05.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи Науково-технічна література, статті у фахових виданнях, матеріали конференцій, патенти та ДСТУ.

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

Вступ. Загальна частина. Технологічна частина. Конструкційна частина. Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Титульний лист – 1. Мета роботи. Завдання роботи – 1. Шихтові матеріали для виплавки феросиліцію – 1. Печі для виплавки феросиліцію – 1. Матеріальний баланс виплавки ФС65 – 1. Технічна характеристика феросплавної печі типу РКЗ-16,5 – 1. Феросплавна піч типу РКЗ-16,5 – 1. Загальні висновки – 1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Загальна частина	доцент О.С. Воденнікова	29.12.2022р. <i>ОВВ</i>	29.12.2022р. <i>МШ</i>
Технологічна частина	доцент О.С. Воденнікова	29.12.2022р. <i>ОВВ</i>	29.12.2022р. <i>МШ</i>
Конструкційна частина	доцент О.С. Воденнікова	29.12.2022р. <i>ОВВ</i>	29.12.2022р. <i>МШ</i>
Охорона праці та техногенна безпека	доцент О.С. Воденнікова	29.12.2022р. <i>ОВВ</i>	29.12.2022р. <i>МШ</i>

7. Дата видачі завдання 29.12.2022 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	15.05-21.05.2023	
2	Реферат	15.05-21.05.2023	
3	Загальна частина	20.03-26.03.2023	
3	Технологічна частина	27.03-19.04.2023	
4	Конструкційна частина	10.04-16.04.2023	
5	Охорона праці та техногенна безпека	17.04-23.04.2023	
6	Загальні висновки. Перелік джерел посилання	01.05-07.05.2023	

Студент *МШ* (підпис) О.Д. Шеварихін (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) *ОВВ* (підпис) О.С. Воденнікова (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер *Ю.О. Белоконь* (підпис) Ю.О. Белоконь (ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 62 с., 3 рис., 8 табл.,  
16 джерел посилання.

### НИЗЬКОКРЕМНІСТИЙ ФЕРОСИЛЦІЙ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА, ШИХТОВІ МАТЕРІАЛИ, ФЕРОСПЛАВНА ПІЧ

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Огляд особливостей технології виплавки низькокремністого феросиліцію.

Мета роботи – проаналізувати технологічні аспекти технології виплавки феросиліцію марки ФС65.

У розділі 1 розглянуто призначення та хімічний склад феросиліцію марки ФС65, галузь його використання, вимоги до якості; проаналізувано вплив легуючого елемента кремнію на якість та властивості сталі; розглянуті відомі способи виплавки ФС65.

У розділі 2 приведено розрахунок шихти для виплавки феросиліцію марки ФС65.

У розділі 3 надана характеристика феросплавних печей, що застосовуються для виплавки феросиліцію.

У розділі 4 приведено аналіз шкідливих факторів феросплавного виробництва.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	8
1.1 Призначення та хімічний склад феросиліцію марки ФС65, галузь його використання, вимоги до якості.....	8
1.2 Вплив легуючого елементу кремнію на якість та властивості сталі...	9
1.3 Фізико-хімічні властивості феросиліцію ФС65, його сполук та сплавів.	10
1.4 Огляд відомих способів виплавки ФС65, їх особливості, агрегати для їх проведення, недоліки.....	16
1.5 Фізико-хімічні основи виробництва сплаву.....	23
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	27
2.1 Розрахунок шихтових матеріалів для виплавки ФС65.....	27
2.1.1. Вхідні дані для розрахунку.....	27
2.1.2. Розрахунок кількості кварциту.....	27
2.1.3. Розрахунок необхідної кількості відновлювача.....	29
2.1.4 Розрахунковий склад сплаву.....	32
2.1.5 Розрахунковий склад металу та шлаку.....	33
2.2 Апаратурно-технологічна схема процесу.....	38
2.3 Технологія виплавки та розливки феросиліцію марки ФС65.....	41
3 КОНСТРУКЦІЙНА ЧАСТИНА.....	45
3.1 Розрахунок геометричних параметрів феросплавної печі.....	45
3.2 Ознайомлення з видами та конструкцією феросплавних печей.....	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	47
4.1 Охорона праці в феросплавному цеху: основні аспекти.....	54
4.2 Шкідливі фактори феросплавного виробництва.....	54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	56

## ВСТУП

У металургії та ряді інших галузей техніки використовують феросплави, а також технічно чисті метали для розкислення й легування сталі, отримання легованого чавуну і різних сплавів.

Феросиліцій марки ФС65 – це сплав заліза з кремнієм. Його використовують у виробництві сталі для поліпшення її властивостей і легування. Вводити в сталь кремній у вигляді його сплаву із залізом зручніше внаслідок нижчої температури його плавлення і вигідніше, оскільки вартість ведучого елемента в сплаві із залізом нижче в порівнянні з вартістю технічно чистого металу. Початковою сировиною для отримання ФС65 служать кварцити, з високим вмістом діоксиду кремнію, який підлягає відновленню.

ФС65 отримують відновленням оксидів кремнію вуглетермічним способом у рудовідновних відкритих печах. Відновником служить вуглець, що має вищу хімічну спорідненість до кисню та утворює більше хімічно міцний оксид, ніж кремній. Відновні процеси полегшуються, якщо вони проходять у присутності заліза або його оксидів, тому обов'язково в завалку дають залізну стружку.

ФС65 використовують як легуючий або розкислюючий феросплав для виплавки жаростійких, електротехнічних та корозійностійких сталей [1], [3].

**Мета роботи** – проаналізувати технологічні аспекти технології виплавки низькокремністого феросиліцію.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні **теоретичні та прикладні завдання:**

- показати призначення та хімічний склад феросиліцію марки ФС65, галузь його використання, вимоги до якості;
- проаналізувати вплив легуючого елемента кремнію на якість та властивості сталі;
- привести розрахунок шихти на виплавку ФС65;

- привести конструкцію феросплавних печей;
- проаналізувати потенційно-небезпечні та шкідливі чинники в процесі виплавки феросиліцію.

## 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

### 1.1 Призначення та хімічний склад феросиліцію марки ФС65, галузь його використання, вимоги до якості

Феросиліцій – сплав кремнію із залізом і застосовується як розкислювач і легуюча добавка при виплавці сталі. До феросиліцію відноситься велика група сплавів системи Fe–Si. Феросиліцій отримуваний в електропечах може містити 19–92%. Марка феросплаву ФС65 відноситься до групи з середнім вмістом кремнію. Феросиліцій отримують відновленням кремнезему, що міститься в кварциті, твердими вуглецевими відновниками у присутності сталеної і чавунної стружки. Кремній використовується хорошим розкислювачем, тому його сплави використовують при виробництві сталей багатьох марок. Витрата феросиліцію ФС65 складає приблизно 0,65% від випуску сталі.

Із залізом кремній сплавляється в будь-яких співвідношеннях і утворює ряд силіцидів –  $\text{FeSi}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}_3$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}_2$  та інші, з яких найміцнішим є  $\text{FeSi}$ , його температура плавлення  $1410^\circ\text{C}$

Феросиліцій також широко використовують як відновник в металотермічних процесах для приготування термітних сумішей і вибухових речовин, при отриманні кремнійорганічних з'єднань, для виготовлення зварювальних електродів і у ряді інших областей промисловості. Технічно чистий кремній використовують для здобуття напівпровідникових матеріалів, силумінів, крем'янистих бронз, ряду лігатур і так далі. Значення сплавів кремнію видно з того, що печі для їх виплавки складають приблизно 60% потужностей феросплавної промисловості.

Феросиліцій поставляється в шматках масою не більше 25 кг, в чушках масою не більше 45 кг і у вигляді роздріблених просіяних частинок.

Для тривалого зберігання феросиліцій виготовляють з товщиною злитка не більше 100 мм при розливанні в один шар або завтовшки не більше 150 мм при розливанні в два шари.



Феросиліцій не повинен бути забруднений чужорідними матеріалами. Допускаються окремі включення піску, що приварився, сліди протипригарних матеріалів і графіту, а також шлакова плівка.

## **1.2 Вплив легуючого елементу кремнію на якість та властивості сталі**

Виробництво феросиліцію більш енергоємне, ніж виробництво феромарганцю, але цілком якісна сировина для виплавки феросиліцію - кварцити – є практично у всіх куточках Землі, а родовищ багатих марганцевих руд небагато.

Якість кремнію як розкислювача полягає в його високій хімічній спорідненості до кисню, що дозволяє отримувати спокійну сталь при залишковому вмісті його в металі 0,15-0,3%, а також у здатності утворювати нітриди ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) і запобігати старінню сталі, тобто знижувати негативний вплив азоту на властивості сталі.

Кремній розкислює сталь, тому його кількість зростає від киплячої до спокійної сталі. Він дещо погіршує зварюваність, стійкість проти корозії і сильно знижує ударну в'язкість сталі. Шкідливий вплив кремнію може компенсуватися підвищеним вмістом марганцю.

Кремній у кількості понад 1% надає особливий вплив на властивості сталі: вміст 1–1,5% Si збільшує міцність, причому в'язкість зберігається. При більшому вмісті кремнію збільшуються електроопір і магнітопроникність, поліпшуються опір корозії і стійкість проти окислення при високих температурах. Кремній збільшує також пружність, окалійність, твердість.

Кремній збільшує межу плинності і тимчасовий опір, але знижує зварюваність і ударну в'язкість сталі при вмісті до 0,3%, із збільшенням кількості кремнію до 0,6% підвищуються пружні властивості сталі.

Легування сталі кремнієм супроводжується підвищенням показників міцності при одночасному незначному зниженні відносного стиску і збереженні

відносного подовження приблизно на одному і тому ж рівні. Ударна в'язкість при вмісті в сталі кремнію 1,5% і більше різко знижується.

Кремній, як елемент, не утворюючий карбідів, головним чином впливає на феритну основу сорбіту поліпшеної сталі, і так само сильно уповільнює процес збільшення карбідів при відпустці і тому збільшує стійкість сталі проти відпустки. Сукупність дії кремнію в зазначених напрямках призводить до того, що у відпущеної при однаковій температурі нагріву сталі з підвищенням вмісту кремнію зростає міцність, але знижується в'язкість.

Отже, вплив кремнію на ударну в'язкість і температурний запас в'язкості не є однозначним; при середньому вмісті цього елемента (приблизно 1,5%) його дія може оцінюватися скоріше як позитивне; при високому вмісті (3,0%) – як явно негативне [4]–[6].

### **1.3 Фізико-хімічні властивості феросиліцію ФС65, його сполук та сплавів**

Основний елемент, який міститься в ФС65 - це кремній. Кремній - елемент головної підгрупи четвертої групи третього періоду періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва, з атомним номером 14. Вміст кремнію в земній корі становить за різними даними 27,6-29,5% за масою. Таким чином за поширеністю в земній корі кремній займає друге місце після кисню. Найчастіше в природі кремній зустрічається у вигляді кремнезему - сполук на основі діоксиду кремнію (IV)  $\text{SiO}_2$  (близько 12% маси земної кори). Основні мінерали і гірські породи, утворені діоксидом кремнію - це пісок (річковий і кварцовий), кварц і кварцити, кремій, польові шпати. Другу за поширеністю в природі групу сполук кремнію складають силікати і алюмосилікати.

Властивості кремнію характеризують такі величини:

- атомна (молярна) маса = 28,0855 а.е.м. (г/моль);
- радіус атома = 132 пм;
- щільність = 2,33 г/см<sup>3</sup>;

- валентність = 4 ( $\text{SiO}_2$ ), 2( $\text{SiO}$ ) ;
- температура плавлення = 1688 К;
- температура кипіння = 2623 К;
- теплота плавлення = 50,6 кДж/моль;
- теплота випаровування = 383 кДж/моль;
- питома теплоємність = 0,718 Дж/кг·К;
- теплопровідність = (300 К) 149 Вт/(м·К).

Електричні властивості кремнію дуже сильно залежать від домішок. Власне питомий об'ємний електроопір кремнію при кімнатній температурі приймається рівним  $2,3 \times 10^3 \text{ Ом} \times \text{м}$  ( $2,3 \times 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ ).

У промисловості кремній технічної чистоти отримують, відновлюючи розплав  $\text{SiO}_2$  коксом при температурі близько  $1800^\circ\text{C}$  в руднотермічних печах шахтного типу. Чистота отриманого таким чином кремнію може досягати 99,9% (основні домішки – вуглець, метали).

Фізико-хімічні властивості феросиліцію ФС90, його сполук та сплавів наступні:

#### 1. Фізичні властивості.

Кристалічна решітка кремнію кубічна гранецентрованої типу алмазу, параметр  $a = 0,357 \text{ нм}$ , але через більшу довжину зв'язку між атомами Si-Si в порівнянні з довжиною зв'язку C-C твердість кремнію значно менше, ніж алмазу. Кремній крихкий, тільки при нагріванні вище  $800^\circ\text{C}$  він стає пластичною речовиною. Кремній прозорий для інфрачервоного випромінювання починаючи з довжини хвилі 1,1 мкм. Власна концентрація носіїв заряду –  $5,81 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$  (для температури 300 К).

#### 2. Хімічні властивості

У з'єднаннях кремній зазвичай проявляє себе як чотиривалентний елемент зі ступенем окислення +4 або -4. Зустрічаються двовалентні з'єднання кремнію, наприклад, оксид кремнію (II)  $\text{SiO}$ . При нормальних умовах кремній хімічно малоактивний і активно реагує тільки з газоподібним фтором, утворюючи леткий  $\text{SiF}_4$ .

При нагріванні до температури понад 400-500°C кремній реагує з киснем з утворенням діоксиду SiO<sub>2</sub>, процес супроводжується збільшенням товщини шару діоксиду на поверхні, швидкість процесу окислення лімітується дифузією атомарного кисню крізь плівку діоксиду.

При температурах понад 1000°C можна отримати сполуку кремнію і вуглецю – карбід кремнію SiC (карборунд), який характеризується високою твердістю і низькою хімічною активністю. Карборунд широко використовується як абразивний матеріал. При цьому розплав кремнію (1415°C) може тривалий час контактувати з вуглецем у вигляді великих шматків щільнозпеченого дрібнозернистого графіту шляхом ізостатичного пресування, практично не розчиняючи і ніяк не взаємодіючи з останнім.

У чистому вигляді карбід кремнію – безбарвний кристал з алмазним блиском; технічний продукт зеленого або синього кольору. Карбід кремнію існує в двох основних кристалічних модифікаціях – гексагональної (a-SiC) і кубічної (b-SiC).

Перехід b-SiC в a-SiC відбувається при температурі 2100–2300°C. Карбід кремнію важкоплавкий (при 2830°C), має виключно високу твердість (мікротвердість 33400 Мн/м<sup>2</sup>); крихкий; щільність 3,2 г/см<sup>3</sup>. Карбід кремнію стійкий в різних хімічних середовищах, в тому числі при високих температурах.

Карборунд отримують в електропечах при 2000–2200°C з суміші кварцового піску (51–55%), коксу (35–40%) з добавкою NaCl (1–5%) і деревної тирси (5–10%) за реакцією :



При нагріванні кремнію з металами можуть утворюватися силіциди. Силіциди можна поділити на дві групи: іонно-ковалентні (Ca<sub>2</sub>Si, Mg<sub>2</sub>Si та ін) і металлоподібні (силіциди перехідних металів). Металлоподібні силіциди мають високі температури плавлення (до 2000°C). Найбільш часто утворюються MeSi,

$\text{Me}_3\text{Si}_2$ ,  $\text{Me}_2\text{Si}_3$ ,  $\text{Me}_5\text{Si}_3$  і  $\text{MeSi}_2$ , вони хімічно інертні, стійкі до дії кисню навіть при високих температурах.

Особливо слід зазначити, що з залізом кремній утворює евтектичну суміш, що дозволяє сплавляти ці матеріали для утворення ферросиліцієвої кераміки при температурах помітно менших, ніж температури плавлення заліза і кремнію.

Силіцид кальцію – бінарне неорганічне з'єднання кальцію і кремнію з формулою  $\text{CaSi}_2$ , свинцево-сірі блискучі кристали.

### 3. Фізичні властивості $\text{CaSi}_2$ :

- свинцево-сірі блискучі кристали, молярна маса 96,25 г/моль
- щільність 2,5; 2,46 г/см<sup>3</sup>
- твердість 3 (Шкала Мооса)
- температура плавлення 1020; 1033°C

Реагує з мінеральними кислотами.

Горить і може самозайматися на повітрі.

У виробництві спеціальних сплавів, для видалення з них фосфору.

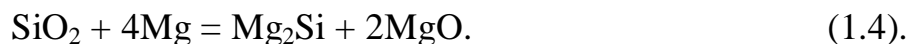
Силіциди - сполуки кремнію з металами; утворюються при високих температурах; їх отримують синтезом з елементів або відновленням оксидів металів кремнієм:



Або взаємодією кремнію з гідридами металів:



А також взаємодією надлишку металу на оксид кремнію (IV):



Велике практичне значення має ферросиліцій. З залізом кремній

сплавляється в будь-яких співвідношеннях і утворює ряд силіцидів –  $\text{Fe}_2\text{Si}_3$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}_2$  та інші, з яких найбільш міцним є феросиліцій  $\text{FeSi}$ ; температура його плавлення =  $1410^\circ\text{C}$ . У системі  $\text{Fe} - \text{Si}$  існують три евтектики: перша, відповідна змістом 20% кремнію  $\text{Si}$  і температурі плавлення  $1195^\circ\text{C}$ , друга – 51%  $\text{Si}$  і  $1212^\circ\text{C}$  і третя – 59% кремнію і  $1207^\circ\text{C}$ . Температура плавлення стандартних сортів феросиліцію не перевищує  $1370^\circ\text{C}$ .

Щільність сплавів кремнію з залізом змінюється в залежності від вмісту в них  $\text{Si}$  та приведена у таблиці 1.1.

Сплавам заліза і кремнію властива велика схильність до ліквідації. Феросиліцій – феросплав, основні компоненти якого залізо і кремній (середній вміст  $\text{Si}$  90, 75, 65, 45, 25 і 18%, решта  $\text{Fe}$  і домішки); виплавляють із кварцитів (рідше кварцу) в потужних руднотермічних печах. Феросиліцій застосовують для розкислення і легування сталі, а багаті сорти також для відновлення металів з оксидів.

Процес виробництва феросиліцію заснований на відновленні кремнезему. Підвищення вмісту кремнію в феросиліцію знижує його щільність.

Кремній підвищує твердість сталі, опір розриву, межі пружності і текучості, збільшує опір окисленню, знижує втрати електроенергії.

ФС45 має щільність  $5,0 \text{ г/см}^3$ , а 75%-й -  $3,5 \text{ г/см}^3$ . Температури плавлення 45% - і 75%-ого феросиліцію відповідно рівні  $1330\text{--}1220$  і  $1300\text{--}1330^\circ\text{C}$ .

Таблиця 1.1 – Щільність сплавів кремнію

Вміст $\text{Si}$ , %	20	45	65	75	90
Щільність, $\text{г/см}^3$	6,4	5,15	3,76	3,27	2,55

З азотом кремній при температурі близько  $1000^\circ\text{C}$  утворює нітрид  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , з бором - термічно і хімічно стійкі бориди  $\text{SiB}_3$ ,  $\text{SiB}_6$  і  $\text{SiB}_{12}$ .

Не взаємодіє з хлором до  $900^\circ\text{C}$ , з сірководнем – до  $1000^\circ\text{C}$ , з воднем – до  $1200^\circ\text{C}$ . З оксидами металів вище  $1200^\circ\text{C}$  – силікати. При нагріванні до

температури понад 400–500 °С кремній реагує з хлором, бромом і йодом.

Сульфід кремнію – бінарне неорганічне з'єднання кремнію і сірки  $\text{SiS}_2$ , білі або сірі кристали, легко гідролізується водою, реагує з киснем повітря.

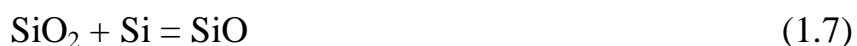
Сплавлення кремнію і сірки відбувається згідно з реакцією:



Кремній з воднем безпосередньо не взаємодіє. Силани отримують тільки непрямим шляхом, наприклад дією кислот на деякі силіциди:



Оксид кремнію (II)  $\text{SiO}$  - смолоподібна аморфна речовина, при звичайних умовах стійка до дії кисню. Пари монооксиду  $\text{SiO}$  утворюються при нагріванні кремнезему з кремнієм при 1300°C і конденсуються в чорно-коричневий порошок, на повітрі повільно окислюються до  $\text{SiO}_2$ :



Найбільш характерним і стійким з'єднанням кремнію є кремнезем. Кремнезем зустрічається як у кристалічному, так і в аморфному вигляді.

Моноксид кремнію проявляє наступні властивості: при нагріванні на повітрі оксид кремнію (II) частково окислюється; при 500 С взаємодіє з парами води і  $\text{CO}_2$ , виділяючи відповідно  $\text{H}_2$  і  $\text{CO}$ ; при 800°C реагує з хлором, даючи  $\text{SiCl}_4$ . Моноксид кремнію можна отримати, нагріваючи кремній в нестачі кисню при температурі вище 400°C.

Кремнезем (IV),  $\text{SiO}_2$  – безбарвні кристали,  $t_{\text{пл}}=1713\text{--}1728^\circ\text{C}$ , мають високу твердість і міцність. Відноситься до групи кислотних оксидів. При

нагріванні взаємодіє з основними оксидами і лугами. Розчиняється в плавиковій кислоті.  $\text{SiO}_2$  відноситься до групи склоутворюючих оксидів. Має атомну кристалічну решітку.

Діоксид кремнію має кілька поліморфних модифікацій. При нормальних умовах діоксид кремнію найчастіше знаходиться в поліморфній модифікації  $\alpha$ -кварцу, яка при температурі вище  $573^\circ\text{C}$  оборотно переходить в  $\beta$ -кварц. При подальшому підвищенні температури кварц переходить в трідіміт і кристобаліт. Ці поліморфні модифікації стійкі при високих температурах і низьких тисках. Також має аморфну модифікацію— кварцове скло [4]–[6].

#### **1.4 Огляд відомих способів виплавки ФС65, їх особливості, агрегати для їх проведення, недоліки**

Кремній і феросплави відіграють значну роль у металургійному виробництві. Кремній застосовують як досить сильний розкислювач. В Україні виплавляється 11 марок феросиліцію з вмістом кремнію від 20 до 92%.

Початок розвитку феросплавної промисловості було покладено будівництвом першої черги Челябінського заводу феросплавів у 1931 р. у складі семи феросплавних печей. У царській Росії феросплавна промисловість фактично була відсутня – тільки на Уралі на Саткінському заводі працювали дві невеликі електропечі потужністю по 280 кВА, що виробляють 45%-ий феросиліцій і вуглецевий ферохром.

Плавка ФС65 здійснюється у відкритій печі 16,5 МВА звичайним способом. Для отримання феросиліцію застосовують шихту, що складається з кварциту, коксикі і сталеві стружки.

Шихтові матеріали при підготовці до плавки піддають дробленню й сортуванню: кварцит 25–60 мм, коксик 5–20 мм, сталеві стружки. Відновлення кремнезему кварциту вуглицем коксика в контакті з залізом, що надходять з сталеві стружки, описується наступною хімічною реакцією:





При відновленні кремнію можливе утворення проміжних продуктів у вигляді монооксиду кремнію SiO і карбіду кремнію SiC за схемою  $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{SiO} \rightarrow \text{SiC} \rightarrow \text{Si}$ . Благотворно на розвиток відновлення кремнію впливає залізо, розчиняє його.

Підготовка шихти до виплавки феросиліцію зводиться до дроблення і сортування їх у цілях отримання заданого однорідного гранулометричного складу.

Кварцит дробиться і промивається водою для видалення глинистих домішок, а потім піддається розсіву для відсіву дрібниці і сортування по фракціях. Оптимальний розмір шматків кварциту при виробництві феросиліцію ФС65 50–100 мм. Кварц, застосовуваний при виробництві кристалічного кремнію, дробиться до шматків розміром менше 50 мм. Коксик піддається дробленню і грохоченню для отримання фракції розміром 6–20 мм. Розмір шматків, використовуваних у виробництві кристалічного кремнію нафтового та пекового коксу, повинен бути рівний 5–15 мм, а деревного вугілля 10–80 мм.

Як відновлювач застосовують металургійний коксик. Основні вимоги, пропоновані до відновника: низька зольність; високе електроопір; низький вміст летких; міцність шматків при нагріванні.

Контролюють наступні показники вуглецевих відновників: вміст твердого вуглецю, золи, летючих, вологи і сірки; хімічний склад золи; питомий електричний опір; пористість; гранулометричний склад і міцність; відновна здатність по відношенню до оксидів і ін.

Залізну стружку дроблять до розміру 50 мм. Слід прагнути, щоб в підготовленій шихті розміри кварциту і коксика були більш однорідними і щоб не траплялися як великі, так і дрібні шматки і того й іншого. Наявність дрібниці погіршує газопроникність колошника, крупний коксик різко негативно позначається на глибині посадки електродів, а великий кварцит веде до обгару електродів, ускладнень в роботі льотки.

Якість феросплавів залежить від вмісту і меж коливань ведучого елемента, вмісту вуглецю, сірки, фосфору, кисню, водню, азоту, кольорових металів та ін., від гранулометричного складу, щільності, температури плавлення, змісту неметалічних включень.

Для виготовлення феросплавів переробляється більша частина шихтових матеріалів, якість яких визначає техніко-економічні показники технологічного процесу. Шихтові матеріали, з яких виготовляють феросплави, являють собою наступні три групи компонентів:

- руди, агломерати або концентрати, що містять оксиди головного елемента феросплавів;
- вуглець, кремній, алюміній (до вуглецевмісних відновників відносять коксик, одержуваний при сортуванні доменного коксу, напівкокс, деревне вугілля, нафтовий і пековий кокс і ін.);
- залізовмісний частини (при виплавці різних марок феросиліцію основним залізовмісним компонентом шихтових матеріалів є стружка вуглецевих сталей).

Феросплавні заводи в основному використовують руди і концентрати, що не вимагають додаткового збагачення. Цінність руд і концентратів в значній мірі визначається вмістом в них сірки і фосфору. Немале значення має фракційний склад шихтових матеріалів, що піддаються відновленню. При переробці пиловатих руд і концентратів має місце значний винесення дрібних частинок, що досягає 15% і більш від кількості заданих в печі матеріалів, тому пиловаті руди і концентрати піддають попередньому огрудкуванню (агломерації, брикетування та інші). В процесі виготовлення феросплавів в якості шлакоутворюючих присадок використовують вапно, плавиковий шпат, кварцити, боксити. Досить високою якістю володіє вапно, отримана випалюванням вапняку у обертових трубчастих печах. У кварцитах і бокситах вміст шкідливих домішок має бути мінімальним.

У феросплавній промисловості застосовують такі способи отримання феросплавів:

- вуглетермічний процес, при якому ведеться плавка в дугових

руднотермічних печах з підведенням тепла ззовні за рахунок електроенергії;

– металотермічний процес - плавка ведеться без підведення тепла ззовні, необхідну кількість тепла виходить в результаті екзотермічних реакцій відновлення оксидів;

– плавка в доменних печах – дає можливість отримувати тільки високовуглецевий феромарганець і бідний феросиліцій (9-12% FeSi).

Для виробництва ФС90 застосовують вуглетермічний процес, при якому ведеться плавка в дугових руднотермічних печах з підведенням тепла ззовні за рахунок електроенергії. При вуглетермічному процесі оксиди провідного елемента відновлюються з руди твердим вуглецем. Процес відновлення оксидів вуглецем описується наступною реакцією:



Рудної складової шихти є кварцити, що містять понад 95%  $\text{SiO}_2$  і невелика кількість глинозему ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Для отримання потрібної концентрації кремнію в сплаві в шихту вводять подрібнену стружку вуглецевих сталей. Кремній відновлюється вуглецем за реакцією:



При надлишку відновника утворюється і карбід кремнію:



Наявність карбиду кремнію небажано, так як через його тугоплавкої ( $T_{\text{пл}} \approx 2700 \text{ }^\circ\text{C}$ ) захаращується нижня частина печі і знижується продуктивність. У присутності заліза карбід кремнію руйнується вільним кремнеземом ( $\text{SiO}_2$ ) за реакцією:



Чим більше заліза в шихті, тим при більш низькій температурі відбувається отримання феросиліцію. Незважаючи на застосування вуглецевого відновлювача феросиліцій містить незначну кількість вуглецю (менше 0,1% С). Пояснюється це тим, що силіциди міцніше карбідів. У присутності кремнію розчинність вуглецю в сплаві зменшується і чим більше в сплаві кремнію, тим менше сплав містить вуглецю.

У процесі плавки, яка ведеться безперервно, електроди глибоко занурені в шихту. При завантаженні шихтових матеріалів прагнуть створити і підтримувати навколо електродів шихту у вигляді конусів. Призначення конусів шихти полягає в тому, щоб утруднити вихід газам, що утворюються в зоні реакцій, зменшити втрати тепла. Чим ширше конус шихти, тим більше активна зона печі, краще осідає шихта, стабільніше хід печі. У зоні дуг в шихті утворюється порожнина з дуже високою температурою. Стінки цієї порожнини безперервно оплаваються, кремній відновлюється і розчиняється в рідкому залозі, утворюючи сплав феросиліцію. Сплав опускається в зону реакцій.

При нормальному ході печі електроди повільно опускаються в міру згорання і відбувається рівномірне осідання шихти навколо електродів. Виплавлений феросиліцій випускають у ківш 12–15 разів на добу і розливають. Феросплави виплавляють переважно в потужних електричних печах спеціальної конструкції, що одержали назву феросплавних печей. Ці печі придатні для ряду електротермічних виробництв – рудовідновних або руднотермічних печей [4].

При виробництві феросиліцію будують круглі феросплавні печі з обертовою ванної печі, потужністю 16,5–39 і навіть 75 МВА, які працюють на самоспекаючихся і рідше на вугільних електродах. Робоча напруга становить зазвичай 150–210 В при силі струму порядку 35–70 А і при відносно сили

струму до робочій напрузі, що становить зазвичай близько 300.

Розрахунок шихти для виробництва феросиліцію FeSi ведуть з умови розподілу окислів у процесі плавки, і при цьому допускається, що сірка і фосфор з стружки переходять в сплав, а сірка коксика випаровується.

Нормальний хід технологічного процесу характеризується:

- рівномірним газовиділенням по всій поверхні колошника;
- відсутністю потемнілих спеклися ділянок та місцевих сильних виділень газу – «свищів»;
- рівномірним сходом шихти у електродів і в трикутнику між ними;
- стійкої глибокої посадкою електродів в шихті (відстань від торця електрода до подини печі повинна складати 500-700 мм);
- регулярним виходом при кожному випуску сплаву невеликої кількості шлаку;
- стійкої навантаження на електродах і рівномірної переробкою завантаженої шихти при нормальному питомій витраті електроенергії.

Мінімальні втрати тепла і відліт кремнію з печі при максимально великій кількості шихти досягаються при досить глибокій (1300–1700 мм) і стійкій посадці електродів і рівномірному виділенні газів по всій поверхні колошника.

При виробництві феросиліцію глибину занурення електродів в шихту регулюють зміною електричного опору печі або, що більш бажано, зміною робочої напруги. Для зміни електричного опору печі, в якій виробляють сплави кремнію, збільшують або зменшують провідність шихтових матеріалів, змінюючи склад шихтових сумішей або розміри шматків шихти. Збільшення в шихтових сумішей кількості вуглецевого відновника або збільшення його крупності збільшують провідність шихти. Заміна частини рядового коксика ангарським напівкоксом з підвищеним електроопору, деревним вугіллям або добавка деревних відходів знижують її провідність, процес плавки відбувається головним чином у електродів, де в цій найбільш гарячій зоні печі під кожним електродом утворюються газові порожнини - тиглі, в яких і протікають реакції відновлення кремнезему. При гарячому ході печі нижні частини тиглів

з'єднуються, утворюючи загальний тигель.

Нижня частина тигля являє собою газову порожнину. Відстань між торцем електрода і поверхнею розплаву зазвичай становить близько 200 мм. Температура газів, що утворюються внизу, біля дуг, висока, і ці гази, проходячи через вищерозміщені шари шихти, нагрівають їх. Проходження гарячого газу через більш холодну шихту веде до конденсації парів кремнію. При виробництві феросиліцію для забезпечення рівномірного розподілу по колошника виходять з печі газів, запобігання спікання колошника і зниження втрат кремнію у відліт необхідно обертати ванну печі, а при роботі на високопроцентних сплавах і «прошивати» шихту. Завалку шихти необхідно проводити безперервно або можливо часто невеликими порціями в першу чергу близько електродів. Завантаження зайвої шихти неприпустима, оскільки збільшення стовпа матеріалів веде до зсуву плавильної зони вгору і порушення теплового режиму в зоні реакції. Недовантаження печі шихтою призводить до збільшення втрат тепла з газами і втрат кремнію у відліт.

Для завантаження шихти у відкриті феросплавні печі на вітчизняних заводах застосовують завалочні машини. При переході до печей великої потужності з обертовою ванній доцільно здійснювати завалку по трубах, проведеним з пічних кишень.

Виробництво феросиліцію і кремнію в печах з обертовою ванній має ряд технологічних особливостей. У цьому випадку обсяг газової порожнини під електродами зменшується в 3–4 рази в порівнянні з об'ємом при роботі з нерухомою ванній. Газова порожнина формується в основному з набігає боку електрода, а зі збігає сторони або зовсім відсутня, або розвивається дуже слабо. Приблизно 65% шихти треба завалювати з набігає боку електрода.

Феросиліцій випускають з печі періодично по мірі його накопичення. При виплавці ФС65 4–5 випусків в зміну. Занадто часті випуски сплаву призводять до великих втрат тепла і зниження температури в районі випускного отвору, що утрудняє вихід сплаву і шлаку, а також збільшує втрати при випуску і розливанні сплаву.

Найбільш широко поширені в феросплавної промисловості круглі трифазні печі. У круглому агрегаті, електроди якої розташовані по трикутнику, тепло концентрується досить добре для того, щоб утворюються під кожним електродом плавильні тиглі з'єдналися між собою. Це дозволяє працювати з одним випускним отвором. У таких феросплавних печей мінімальна по величині тепловіддаюча поверхня і в них краще використовується тепло. При раціональній конструкції короткої мережі та наявності установок штучної компенсації реактивної потужності такі печі можуть працювати з високим коефіцієнтом потужності, що досягає 0,95, і мінімально вираженим явищем «мертвої» і «дикої» фаз.

Феросиліцій випускають у ківш, футерований шамотною цеглою або графітової плиткою, і потім розливають в злитки в чавунні виливниці або в чушки на розливальній машині конвеєрного типу [5].

### **1.5 Фізико-хімічні основи виробництва сплаву**

Задовільна робота феросплавної печі може бути забезпечена тільки при ретельній підготовці шихтових матеріалів.

Фракційний склад компонентів шихти повинен забезпечувати хорошу газопроникність колошника печі при максимально можливій однорідності шихтової суміші та оптимальної її провідності, що забезпечує глибоку посадку електродів при заданому електричному режимі.

При виробництві феросиліцію використовуються такі основні шихтові матеріали:

- джерело кремнезему – кварцит;
  - вуглецеві відновники кремнезему – коксовий горішок, напівкокс, малозольні марки кам'яного вугілля;
  - в якості розпушувача колошника (і як відновника) – тріска деревна;
- джерела надходження заліза в сплав: стружка сталева вуглецевих сталей (рідше окалина), марганцевий агломерат, залізна руда, відходи кременистих сталей.

В якості відновника при виробництві кремнію і його сплавів застосовують кокс, напівкокс, деревне вугілля та ін. До відновників пред'являються такі вимоги:

- низька електропровідність (високий електричний опір);
- висока реакційна здатність;
- достатня механічну міцність;
- низький вміст у золі шкідливих і шлакообразуючих оксидів;
- невисокий вміст летючих;
- постійна вологість;
- невисока вартість.

Найкращим відновлювачем є деревне вугілля, яке зменшує спікання шихти, що особливо важливо при виплавці високопроцентних сплавів кремнію і при роботі на закритих печах. Але внаслідок високої вартості деревне вугілля застосовують зазвичай лише при виплавці кристалічного кремнію і 90%-ого феросиліцію. Замість деревного вугілля в якості розпушувача шихти успішно застосовують тріску і інші деревні відходи. Перспективно застосування в якості відновників формованого коксу з газового і слабоспекаючого вугілля, коксу з бурого вугілля та інші, що володіють високою реакційною здатністю і електроопором.

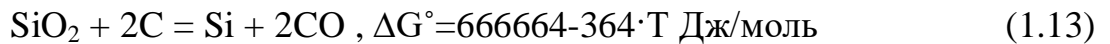
Найбільше застосування при виплавці феросиліцію отримав найбільш дешевий сорт відновника - горішок металургійного коксу (кокс-горішок), який є відходом при виробництві доменного коксу. Бажано використовувати коксик з максимальною реакційною здатністю, що має розвинену поверхню, високий питомий електричний опір і мінімальна кількість шкідливих і шлакообразуючих оксидів у золі.

В якості матеріалу, що містить залізо, використовують дроблену стружку вуглецевої сталі; чавунну стружку не застосовують внаслідок високого вмісту в ній фосфору. Стружку легованих сталей також не використовують, так як вона забруднює феросиліцій легуючими елементами.

В умовах електричної печі, відновлення кремнезему твердим вуглецем



протікає за сумарною реакцією :



Температура початку цієї реакції становить 1554°C.

Відновлення кремнезему здійснюється вуглецем і кремнієм з утворенням проміжних продуктів – монооксиду кремнію і карбїду кремнію. У печі також може відбуватися випаровування і дисоціація кремнезему. Згідно з деякими дослідженнями, відновлення кремнезему відбувається східчасто. Спочатку кремнезем відновлюється до монооксиду:



Монооксид кремнію при високих температурах є газоподібним речовиною і видаляється з зони реакцій разом з газами. Зустрічаючи на своєму шляху шматки коксу, монооксид кремнію взаємодіє з ним з утворенням карборунда:



Крім кремнію, при виплавці феросиліцію відновлюються та інші оксиди, що містяться в шихтових матеріалах. Оксид алюмінію і оксид кальцію є найбільш важковідновлюваними оксидами. Однак внаслідок високих температур в зоні електричних дуг відбувається часткове відновлення і цих оксидів.

Великий вплив на хід реакції відновлення кремнезему надає присутність заліза, яке, розчиняючи кремній, знижує його активність, поліпшуючи термодинамічні умови відновлення і скорочуючи втрати кремнію. Залізо також значно знижує температуру початку процесу відновлення (від 1530°C для сплаву з 90% Si до 1225°C для сплаву з 10% Si). Сприятливий вплив заліза визначається і тим, що воно легко руйнує карбїд кремнію :



і сприяє зрушенню реакції відновлення в бік утворення кремнію. Ця реакція починається з 1500°C і інтенсивно проходить в інтервалі 1500–1600°C.

Поряд з відновленням кремнезему в електропечі відбувається часткове відновлення домішок кварциту і золи відновників ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  та інші) до елементів або карбідів, які потім можуть руйнуватися залізом, кремнієм чи кремнеземом. Це підтверджується вмістом значних кількостей алюмінію, магнію, барію, фосфору в промислових сортах феросиліцію. Оксиди заліза, марганцю, хрому, фосфорний ангідрид відновлюються значно легше кремнезему, тому ці окисли, що містяться в шихтових матеріалах, відновлюються майже повністю.

Вхідні до складу шихтових матеріалів глинозем, оксиди кальцію, барію, магнію, які за фізико-хімічними умовами процесу не можуть бути повністю відновлені, ошлаковиваються кремнеземом. Оскільки найбільшу частину домішок становить глинозем, то він поряд з кремнеземом є головною складовою шлаку. При нестачі відновника в результаті руйнування гарнісажу шлак збагачується карборундом [4]–[6].

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Розрахунок шихтових матеріалів для виплавки ФС65

#### 2.1.1. Вхідні дані для розрахунку

Вхідні дані для розрахунку представлені в таблицях 2.1-2.4.

Таблиця 2.1. – Хімічний склад феросиліцію марки ФС 65

Кремній	Залізо	Si	Al	C	S	Cr	Mn	P
		не більше						
65	34	65,18	1,62	0,050	0,004	0,19	0,30	0,030

Таблиця 2.2 – Хімічний склад шихтових матеріалів, %.

Компонент шихти	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	Fe	P
Кварцит	96,5	0,3	1,1	0,1	1,4	-	-
Залізна стружка	-	-	-	-	-	94,0	0,03
Зола коксу	36,5	4,0	25,0	1,7	33,7	-	0,2
Технічний аналіз коксу	W=9,5%; C <sub>T</sub> =85,0%; A=11%; V=2,5%; S=1,5%						

#### 2.1.2. Розрахунок кількості кварциту

Розрахунок шихтових матеріалів ведемо на виплавку 1т металу.

1.Розрахунок необхідної кількості кварциту.

1.1. Необхідно внести кремнію у сплав:

$$1000 * 0,65 = 650 \text{ кг}$$

Таблиця 2.3 – Розподіл оксидів між продуктами плавки, %.

Оксид	Відновлюється	Перейде до шлаку
SiO <sub>2</sub>	98	2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55	45
CaO	45	55
MgO	20	80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	100	-

Таблиця 2.4 – Розподіл відновлених елементів, %.

Елемент	У сплав	Виноситься
Si	100	-
Fe	100	-
Al	85	15
Ca	70	30
Mg	60	40
P	50	50

1.2. Ця кількість кремнію складає SiO<sub>2</sub>:

$$650 * \frac{60}{28} = 1393 \text{ кг}$$

1.3. Необхідно кварциту:

$$\frac{1393}{0,965 * 0,98} = 1473 \text{ кг}$$

де 0,965 – вміст  $\text{SiO}_2$  в кварциті;

0,98 – ступень засвоєння кремнію.

1.4. Цією кількістю кварциту буде внесено:

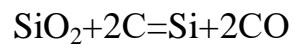
$$\text{Al}_2\text{O}_3: 1473 * 0,011 = 16,2 \text{ кг}$$

$$\text{CaO} : 1473 * 0,003 = 4,42 \text{ кг}$$

$$\text{MgO} : 1473 * 0,002 = 2,95 \text{ кг}$$

### 2.1.3. Розрахунок необхідної кількості відновлювача

Для відновлювання необхідної кількості кремнію за реакцією:



необхідно вуглецю:

$$\frac{650 * 24}{28} = 557,1 \text{ кг}$$

Необхідно коксу, з урахуванням того, що 10% його згорить на колошнику печі:

$$\frac{557,1}{0,85 * 0,9} = 728,2 \text{ кг}$$

де 0,85 – вміст вуглецю у коксі;

0,9 – коефіцієнт, що враховує втрати коксу на колошнику печі.

Цією кількістю коксу буде внесено золи:

$$728,2 * 0,11 = 80,1 \text{ кг}$$

де 0,11 – вміст золи у коксі.

Золю коксу буде внесено:

$$\text{SiO}_2 : 55,46 * 0,365 = 20,2 \text{ кг}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 : 55,46 * 0,25 = 13,8 \text{ кг}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 : 55,46 * 0,337 = 18,69 \text{ кг}$$

$$\text{CaO} : 55,46 * 0,04 = 2,2 \text{ кг}$$

$$\text{MgO} : 55,46 * 0,017 = 0,94 \text{ кг}$$

$$\text{P} : 55,46 * 0,002 = 0,11 \text{ кг}$$

Корегування насівки коксу.

Вуглець з коксу буде витрачатися на відновлення оксидів золи коксу та домішок кварциту:

1) На відновлення  $\text{SiO}_2$  золи коксу необхідно вуглецю:

$$20,2 \frac{24}{60} * 0,98 = 7,9 \text{ кг}$$

2) На відновлення  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  золи коксу необхідно вуглецю:

$$18,69 \frac{36}{160} * 0,99 = 4,16 \text{ кг}$$

3) На відновлення  $\text{Al}_2\text{O}_3$  золи коксу необхідно вуглецю:

$$(13,8 + 11,2) \frac{36}{102} * 0,55 = 5,25 \text{ кг}$$

де 0,55 – кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що відновлюється.

4) На відновлення  $\text{CaO}$  золи коксу необхідно вуглецю:

$$(2,2 + 3,05) \frac{12}{56} * 0,45 = 0,5 \text{ кг}$$

де 0,45 – кількість  $\text{CaO}$ , що відновлюється.

5) На відновлення  $\text{MgO}$  золи коксу необхідно вуглецю:

$$(0,94 + 2,04) \frac{12}{40} * 0,20 = 0,178 \text{ кг}$$

6) Всього додатково необхідно вуглецю:

$$7,9 + 4,16 + 5,25 + 0,5 + 0,178 = 17,98 \text{ кг}$$

7) Це складе коксу:

$$\frac{17,98}{0,85} = 21,15 \text{ кг}$$

8) Всього коксу:  $504,2 + 21,15 = 525,35 \text{ кг}$

Враховуючи вологість коксу (9,5%) необхідно коксу:

$$\frac{525,35}{(1 - 0,095)} = 580,46 \text{ кг}$$

Необхідно залізної стружки:

$$\frac{340}{0,94 * 0,99} 365,27 \text{ кг}$$

де 340 – кількість заліза,що необхідно додати зі стружкою;

0,94 – вміст заліза у залізній стружці;

0,99 – ступень засвоєння заліза.

#### 2.1.4 Розрахунковий склад сплаву

Внесено кремнію:

кварцитом: 650кг

$$\text{золою коксу: } 20,2 * 0,98 \frac{28}{60} = 9,2 \text{ кг}$$

де 0,98 – ступень засвоєння кремнію.

Всього: 659,2кг.

Внесено заліза:

стружкою: 340 кг

$$\text{золою коксу: } 18,69 * 0,99 \frac{112}{160} = 12,9 \text{ кг}$$

де 0,99 – ступень засвоєння заліза.

Всього: 352,9кг.

Внесено фосфору:

$$\text{стружкою: } 580,27 * 0,0003 = 0,17 \text{ кг}$$

де 0,0003 – вміст Р в залізній стружці.

$$\text{золою коксу: } 0,11 * 0,5 = 0,055 \text{ кг}$$

де 0,5 – коефіцієнт відновлення фосфору.

Внесено алюмінію:

$$(13,8 + 11,2) \frac{54}{102} * 0,55 * 0,85 = 6,18 \text{ кг}$$

де 13,8 – кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,що вноситься золою коксу;



11,2 – кількість  $Al_2O_3$ , що вноситься кварцитом;

0,55 - кількість  $Al_2O_3$ , що відновлюється в печі;

0,85 - кількість  $Al_2O_3$ , що відновившись переходить до сплаву.

Внесено кальцію:

$$(2,2 + 3,05) \frac{40}{56} * 0,45 * 0,7 = 1,18 \text{ кг}$$

Внесено магнію:

$$(0,94 + 2,04) \frac{24}{40} * 0,20 * 0,6 = 0,21 \text{ кг}$$

### 2.1.5 Розрахунковий склад металу та шлаку

Розрахунковий склад металу представлено в таблиці 2.5, а склад шлаку в таблиці 2.6.

Таблиця 2.5 – Розрахунковий склад металу

Елемент	кг	%
Кремній	659,2	65,05
Залізо	352,9	34,05
Алюміній	6,18	0,6
Кальцій	1,18	0,115
Магній	0,21	0,17
Фосфор	0,225	0,02
Всього	1019,89	100

Розрахунковий склад шихти, кг/т:

Кварцит                      1473

Кокс 580,46/525,35

Залізна стружка 365,2

Розрахунок кількості та складу шлаку:

з кварциту  $1019,4 * 0,965 * 0,02 = 19,67 \text{ кг}$

де 0,965 – вміст  $\text{SiO}_2$  в кварциті;

0,02 – коефіцієнт переходу  $\text{SiO}_2$  до шлаку.

з золи коксу  $525,35 * 0,11 * 0,365 * 0,02 = 0,42 \text{ кг}$

де 0,11 – вміст золи у коксі;

0,365 – вміст  $\text{SiO}_2$  у золі коксу;

Всього: 20,09 кг.

З  $\text{FeO}$ :

$$525,35 * 0,11 * 0,337 * 0,01 \frac{72}{160} = 0,08 \text{ кг}$$

де 0,337 – вміст  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  у золі коксу;

0,01 – коефіцієнт переходу  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до шлаку

З  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :

$$(13,8 + 11,2) * 0,45 = 11,25 \text{ кг}$$

де 0,45 – коефіцієнт переходу  $\text{Al}_2\text{O}_3$  до шлаку

13,8 – кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що вноситься золю коксу

11,2 – кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що вноситься кварцитом

З  $\text{CaO}$

$$(2,2 + 3,05) * 0,55 = 2,8 \text{ кг}$$

де 0,55 – коефіцієнт переходу  $\text{CaO}$  до шлаку

2,2 – кількість  $\text{CaO}$ , що вноситься золю коксу

3,05 – кількість  $\text{CaO}$ , що вноситься кварцитом

3 MgO:

$$(0,94+2,04)*0,8=2,38\text{кг}$$

де 0,8 – коефіцієнт переходу MgO до шлаку

0,94 – кількість MgO, що вноситься золюю коксу

2,04– кількістьMgO , що вноситься кварцитом

Таблиця 2.6 – Розрахунковий склад шлаку

Елемент	кг	%
SiO <sub>2</sub> + SiO	20,09	54,89
FeO	0,08	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,25	30,7
CaO	2,8	7,6
MgO	2,38	6,5
Всього	36,6	100

Розрахунок кількості газів

Летючі коксу:

$$525,35*0,025=13,2 \text{ кг}$$

де 0,025 – вміст летючих у коксі

Припускаємо, що весь кокс, що згорає на колошнику печі, окислюється до CO<sub>2</sub>. Тоді отримаємо CO<sub>2</sub>:

$$525,35 * 0,1 * 0,85 \frac{44}{12} = 163,7 \text{ кг}$$

де 0,1 – 10% коксу, що згорає на колошнику печі;

0,85 – кількість вуглецю у коксі.

Для цього необхідно кисню повітря:

$$525,35 * 0,1 * 0,85 \frac{32}{12} = 119,08 \text{ кг}$$

Припустимо, що при відновленні елементів весь вуглець окислюється до СО. Тоді отримуємо СО при відновленні:

1)  $\text{SiO}_2$  :

$$(1019,4 * 0,965 + 20,2) * 0,98 \frac{56}{60} = 918,2 \text{ кг}$$

де 20,2 – кількість  $\text{SiO}_2$  у золі коксу

0,98 – ступень відновлення кремнію

2)  $\text{FeO}_3$  :

$$18,69 * 0,99 \frac{84}{160} = 9,7 \text{ кг}$$

де 18,69 – кількість  $\text{FeO}_3$  у золі коксу

0,99 – ступень відновлення заліза

3)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  :

$$(13,8 + 11,2) * 0,55 \frac{84}{102} = 11,3 \text{ кг}$$

де 0,55 – ступень відновлення алюмінію

13,8 – кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що вноситься золю коксу

11,2 – кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що вноситься кварцитом

4)  $\text{CaO}$  :

$$(2,2 + 3,05) * 0,45 \frac{28}{56} = 1,18 \text{ кг}$$

де 0,45 – ступень відновлення кальцію

2,2 – кількість  $\text{CaO}$ , що вноситься золю коксу

3,05 – кількість  $\text{CaO}$ , що вноситься кварцитом

5)  $\text{MgO}$  :

$$(0,94 + 2,04) * 0,2 \frac{28}{40} = 0,42 \text{ кг}$$

де 0,2 – ступень відновлення магнію

0,94 – кількість MgO, що вноситься золюю кокс

2,04 – кількість MgO, що вноситься кварцитом

б) Всього CO: 940,8 кг

Матеріальний баланс виплавки ФС 65 представлено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Матеріальний баланс виплавки ФС 65

Задано		Отримано	
Кварцит	1473	Сплаву	1019,89
Кокс	580,46	Шлаку	36,6
Залізна стружка	365,2	Газів:	
Кисню з атмосфери	119,08	Летючі	13,2
		CO <sub>2</sub>	163,7
		CO	940,8
		Винос	2,286
		Вологи	55,14
Всього:	2299,2	Всього:	2231,5

Похибка розрахунку:  $\frac{2299,2 - 2231,5}{2299,2} * 100\% = 2,9\%$

З газами виноситься:

1) Алюміній:

$$(13,8 + 11,2) * 0,55 * 0,15 \frac{54}{102} = 1,09 \text{ кг}$$

2) Кальцію:

$$(2,2 + 3,05) * 0,45 * 0,3 \frac{40}{56} = 0,506 \text{ кг}$$

3) Магнію:

$$(0,94 + 2,04) * 0,2 * 0,4 \frac{24}{40} = 0,14 \text{ кг}$$

4) Фосфору:

$$0,11 * 0,5 = 0,55 \text{ кг}$$

Волога коксу:  $580,46 * 0,095 = 55,14 \text{ кг}$

де 0,095 – вміст води у коксі

## 2.2 Апаратурно-технологічна схема процесу

Процес виплавки феросиліцію заснований на відновленні кремнію з його діоксиду в кварц вуглецем коксу і вугілля та сплавці його з залізом сталеві стружки. Виплавка ведеться в руднотермічних печах безперервним процесом із закритим колошником, постійної завалки шихти (кварцит, кокс, вугілля, стружка, тріска) і періодичним випуском металу та шлаку в один футерований ківш. Шлак становить 57% від маси сплаву. Метал розливається на конвеєрних машинах або в плоскі виливниці. Після охолодження метал дробиться, сортується і відвантажується споживачам.

Феросиліцій ФС65 виплавляються у відкритих печах з знепилювання газів, що відходять у сухих рукавних фільтрах.

Для виплавки феросиліцію будують круглі печі з ванною, що обертається, відкриті печі потужністю 16,5–75 МВА. Печі працюють на електрода, які самі обпікаються. Робоча напруга складає зазвичай 150–210В при силі струму порядку 35–70 кА.

Плавку феросиліцію ведуть безперервним процесом. Нормальний хід технологічного процесу характеризується рівномірним газовиділенням по всій поверхні колошника, відсутністю ділянок, які спеклися, що потемнілі, та місцевих сильних виділень газу – «свищів», рівномірним сходом шихти навколо електродів і в трикутнику між електродом, стійкою Глибока посадка

електродів в шихті (відстань від торця електрода до подини печі повинна складати 500–700 мм), регулярно виходом при шкірному випуску сплаву невеликої кількості рідкоплинного шлаку, стійкого навантаження на електрод і рівномірною переробкою завантаженої шихти при нормальній питомій витраті електроенергії.

Розрахунок шихти для виробництва феросиліцію ведуть за умови розподілу оксидів в процесі плавки и при цьому допускається, Що сірка и фосфор Із стружки переходять в сплав, а сірка коксика випаровується.

Глибинна занурення електродів в шихту регулюється зміною електричного опору печі або, Що бажаніше, зміною робочої напруг. Для Зміни електричного опору печі, в якій виплавляють сплави кремнію, збільшують або зменшуються провідність шихтових матеріалів, змінюючи склад шихтової суміші або розмірі шматків шихти. Збільшення в шихтовій суміші кількості вуглецевого відновника або збільшення його розміру збільшують електропровідність шихти. Заміна частини рядового коксика ангарським напівкоксом з підвищеним електроопором, деревним вугіллям або добавка деревних відходів знижують її електропровідність.

Процес плавки відбувається головним чином в районі торців електродів, де в цій найбільш гарячій зоні печі під кожухом електрода утворюються своєрідні газові порожнини – тиглі, в яких и протікають реакції Відновлення кремнезему. При Гаряча ході печі ніжні Частина тиглів з'єднуються, утворюючи загальний тигель.

Нижня частина тигля є газовою порожниною. Відстань між торцем електрода и поверхні розплаву зазвичай складає біля 200 мм. Температура газів, що утворюються внизу, біля дуг, ці гази, проходячи через вище розміщені шари шихти, нагрівають їх. Проходження гарячого газу через холоднішу шихту веде до конденсації парів кремнію.

При виплавці феросиліцію для забезпечення рівномірного розподілу по колошнику газів, що відходять з печі, запобігання спіканню колошника і зниження втрат кремнію у відліт необхідно обертати ванну печі, а при роботі на

високопроцентних сплавах і «прошивати» шихту. Завалення шихти необхідно проводитись безперервно або часто невеликими порціями по-перше біля електродів. Завантаження зайвої шихти неприпустимо, оскільки збільшення стовпа матеріалів веде до зсуву плавильної зони вгору и порушеннях теплового режиму в зоні реакції. Недозавантаження печі шихтою веде до збільшення втрат тепла з газами що відходять і втрат кремнію у відліт.

У разі порушення шихтовки печі або неправильного ведення технологічного процесу можливий розлад ходу печі. Недолік відновника - закварцеваня печі веде до нестійкої посадки електродів і коливань навантаженості, тиглі звужуються, відбувається сильне спікання шихти, на колошнику спостерігаються часті «свищі», льотка сильно "газує", шлак стає густим, робочі кінці електродів сильно стоншуються і швидко коротшають.

Виплавка феросіліцію в печах з ванною, що обертається, має ряд технологічних особливостей. У цьому випадку об'єм газової порожнини під електродом зменшується в 3–4 рази в порівнянні з об'ємом при роботі з нерухомою ванною. Газова порожнина формується в основному з набігаючого боку електрода, а із збігаю чого – розвивається слабо. При обертанні ванни печі шихта «спахується» нерухомими електродами, ділянки, що спеклись, практично відсутні, що забезпечує збільшення активної зони більш ніж у два рази.

ФС65 виплавляють у відкритих печах потужністю 16,5 (6,5 22,5) МВА безперервним методом з постійним випуском розплаву. Ванну печей футерують вугільними блоками. Використання електродів, які самі обпікаються, із сталевим кожухом обмежено внаслідок переходу заліза кожуха в сплав.

Нормальний хід процесу характеризується наступними показниками:

1. рівномірним газовиділенням по поверхні колошника, відсутністю спікшихся ділянок та свищів;
2. рівномірним сходом шихти у електродів;
3. стійкої глибокої посадкою електродів не менше 1700 мм, від торця електрода до подини печі 500–800 мм;
4. регулярний вихід шлаку і сплаву.



Для рівномірного розподілу по колошника вихідних газів, запобігання спікання і утворенню «свищів» необхідно обертати ванну печі і періодично проводити прошивку шихти.

Кількість шихти залежить від кількості використаної електроенергії на 1 тону шихти становить 5300–5400 кВт·год. [8].

### **2.3 Технологія виплавки та розливки феросиліцію марки ФС65**

Рудною складовою шихти при виробництві ФС65 служать мінерали з високим вмістом кремнезему: кварц і кварцит.

Хороші кварцити містять 96–97%  $\text{SiO}_2$ , близько 1%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , близько 1% ( $\text{CaO}+\text{MgO}$ ) і не більше 0,02%  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Шкідливими домішками є оксиди алюмінію та фосфору; чим менше глинозему в кварці, тим менше буде шлаку, тим менше витрата електроенергії. Оптимальні розміри шматків кварциту: 25-80 мм. Дріб'язок при дробленні відсіюють.

Підготовлені шихтові матеріали зберігаються окремо в пічних бункерах. До подачі в пічні кишені вони повинні бути зважені і перемішані. У дозувальний візок з бункера зважують першим коксик, потім стружку, кварцит і в останню чергу відходи графітизації. Склад колоши шихти: 300 кг кварциту, 143,7 кг коксу, 5,7 кг залізної стружки.

Сировина для отримання феросплавів надходить на завод у залізничних вагонах, потім розвантажується і зберігається на відкритих і закритих складах. Далі шихта надходить в шихтовий двір плавильного цеху і розвантажується у відповідні засіки. Звідси грейферними кранами подається у прийомні бункера вузлів підготовки коксика, кварциту, стружки, відходів металів.

При підготовці до плавки коксового горішка проводиться його розсівання на фракції: менше 8 мм, від 8 до 20 мм, більше 20 мм. Кокс більше 20 мм дробиться на валкової дробарці і надходить на повторний розсів. Кокс розміром 8–20 мм по жолобу надходить у засіки, а фракція менше 8 мм, стрічковим транспортером подається в засіки.

При підготовці до плавки кварциту проводиться його розсівання на фракції 20–80 мм і більше 80 мм. Кварцит робочої фракції, 20–80 мм, по стрічковим транспортерам направляється в засіки, а дрібниця і крупний кварцит – в засіки. Кварцит розміром більше 80 мм у міру накопичення дробиться на щоківній дробильці, після чого грейферним краном подається на вузол сортування. Стружка для виплавки феросиліцію сортується на сортувальних барабанах. Стружка з витками більше 50 мм подається по жолобу.

Підготовлені шихтові матеріали грейферними кранами завантажуються в дозувальні бункери дозувальних вузлів печей. Зважені на автоматичних дозаторах компоненти шихти надходять за прямим бункеру на скіп. Скипами шихта подається в плавильний корпус і дозувальними візками подаються в пічні бункери. Завантаження шихти в печі здійснюється по труботечкам.

Перше перемішування коксикі і кварциту відбувається при висипанні шихти з дозувального візка в пічну кишеню, додаткове – при видачі шихти з кишені в приймальний бункер машини завалення. Завалюють шихту до електродів з діаметром конусів приблизно рівним двом діаметрам електродів.

Призначення конусів – зменшити втрати тепла, кремнію і підвищити концентрацію тепла під електродами. При безшлаковому процесі, під кожним електродом утворюється «тигель» стінками якого є розпечена полуспикшаюся шихта, днищем – розплав, а склепінням – електрод. Стінки тигля безперервно оплавляються, кремнезем відновлюється, кремній розчиняється в рідкому залозі, сплав пішов по каналах, нові порції шихти опускаються в зону реакцій. Конус шихти безперервно осідає, тому безупинно в міру осідання завантажують невеликими порціями шихту. Нормальний хід печі характеризується повільним опусканням електродів по мірі їх підгорання, рівномірним сходом шихти навколо електродів і виділенням язичків полум'я в центральній зоні колошника і по його поверхні, відсутністю «свищів», стійкої глибокою посадкою електродів і рівномірним виходом металу і шлаку.

Необхідно прагнути до збільшення розмірів тигля, до глибокої посадці електродів. Глибину занурення електродів в шихту регулюють зміною

електричного опору ванни печі або (що більш бажано) зміною робочої напруги. Для зміни електричного опору печі збільшують або зменшують електричну провідність шихтових матеріалів зміною складу шихтової суміші або розмірів шматків шихти. Збільшення кількості або крупності вуглецевого відновника в шихті підвищує її електричну провідність. Заміна частини рядового коксика ангарським напівкоксом з підвищеним електроопору, деревним вугіллям або добавка деревних відходів знижують її електричну провідність.

Процес плавки відбувається головним чином у електродів, де в цій найбільш гарячій зоні печі під кожним електродом утворюються своєрідні газові порожнини – тиглі (малюнок), оточені твердою і напіврозплавленою масою. На дні порожнини знаходиться розплав, що складається з шлаку, рідкого феросиліцію і частково розплавленої шихти. Порожнина заповнена іонізованими газами і парами, через які здійснюється електричний розряд. Температура в порожнині перевищує  $2300^{\circ}\text{C}$ . Шари шихти, навколишні цю зону, відновлюються, плавляться і замінюються новими порціями шихти, завантаженими у вигляді конусів у електродів. Таким чином утворюються області швидкого сходу шихти. Шари шихти, більш віддалені від електродів, нагріваються повільно; відновлення і плавлення цієї шихти відбуваються з малою швидкістю.

Випуск феросиліцію з печі відбувається періодично по мірі його накопичення. Залежно від потужності печі і марки виплавленого сплаву число випусків коливається від 4 до 5 за зміну. Тривалість розливання від 5 до 20 хвилин. Занадто часті випуски сплаву призводять до великих втрат тепла, а також зниження температури в районі випускного отвору. Це ускладнює вихід сплаву і шлаку і збільшує втрати при його випуску і розливанні. При занадто рідкісних випусках сповільнюється процес відновлення кремнезему, зменшується глибина занурення електродів в шихту і збільшуються втрати кремнію в ульот. Феросиліцій випускають у ківш, футероване алюмосилікатного (шамотним) цеглою або графітовою плиткою, і потім розливають на злитки в чавунні виливниці або в чушки на розливній машині

конвеєрного типу. Мульди розливної машини покривають вапняним молоком. На печах великої потужності сплав з льотки по довгому жолобу розливають пошарово в виливницю ємністю 1000 т, потім сплав охолоджують протягом п'яти днів, а розливку ведуть в іншу таку ж виливницю. Після закінчення випуску ківш зі сплавом викочується на візки в розливний проліт і знімається на розливну машину. Готова продукція зважується і складається в короби. На складі готової продукції завантаження відкритих вагонів металом проводиться мостовим краном [9].

### 3 КОНСТРУКЦІЙНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Розрахунок геометричних параметрів феросплавної печі

Вихідні дані для розрахунку наступні:

- тип феросплавної печі РКО-2.5.
- номінальна потужність трансформатора (S), кВ А – 2500.
- тип процесу – безшлаковий.
- сплав, що виплавляється, Fe-Si.

Приймаємо  $h_{c.lj} = 0,86$ .

1. Корисна потужність печі:

$$P_{кор} = \eta_{ел} \cos \phi \cdot S, \quad (3.1)$$

$$P_{кор} = h_{c.lj} \times S = 2150$$

2. Робоча корисна фазова напруга печі:

$$U_{кор} = c \cdot P_{кор}^n, \quad (3.2)$$

$$U_{кор} = 7,6 \times 2150^{1/2} = 7,6 \times 46,3 = 352$$

Приймаємо для розрахунку:

$$n=1/3, c=3,4 \quad (3.3)$$

Ліній напруга буде дорівнювати:

$$U_{лин} = \frac{U_{кор} \times \sqrt{3}}{h_{c.з.} \times \cos j}$$

$$U_{\text{лін}} = \frac{352 \times \sqrt{3}}{0,86} = 524,6 \text{ В}$$

Для вибору ступенів напруги пічного трансформатору слід взяти інтервал вторинних напруг при постійній потужності від 0,8 до 1,2  $U_{\text{лін}}$  з перепадом напруги від ступіні до ступіні 4–6 В.

$$U_{\text{мін}} = 0,8 \cdot U_{\text{лін}}, \quad (3.4)$$

$$U_{\text{мін}} = 0,8 \times 524,6 = 420 \text{ В}$$

$$U_{\text{макс}} = 1,2 \times U_{\text{лін}}$$

$$U_{\text{макс}} = 1,1 \cdot U_{\text{лін}} \quad (3.5)$$

$$U_{\text{макс}} = 1,2 \times 524,6 = 630 \text{ В}$$

3. Струм в електроді буде дорівнювати:

$$I_{\text{лін.макс}} = \frac{P_{\text{кор}}}{3U_{\text{кор}} \times 0,85}, \quad (3.6)$$

$$I_{\text{лін.макс}} = \frac{2150 \times 10^3}{3 \times 352 \times 0,85} = 2400$$

4. Робочий струм в електроді буде дорівнювати:

$$I_{\text{лін.роб}} = \frac{P_{\text{кор}}}{3U_{\text{кор}}}, \quad (3.7)$$

$$I_{\text{лін.роб}} = \frac{2150 \times 10^3}{3 \times 352} = 2036$$

5. Активний опір ванни:

$$R_g = \frac{U_{\text{кор}}}{I_{\text{лін.роб}}}, \quad (3.8)$$

$$R_k = \frac{352}{2036} = 0,17$$

6. Діаметр електрода:

$$d_{\text{ел}} = \frac{E\Pi_1}{R_g}, \quad (3.9)$$

$$d_{\text{кл}} = \frac{E\Pi_1}{R_k} = \frac{1,62}{0,17} = 9,5$$

Приймаємо діаметр електрода 750мм.

7. Перевіряється величина щільності струму в електроді, що самоспекається, вона не повинна бути вище допустимих щільностей струму для даного процесу:

$$j = \frac{4I_{\text{лін.мак}}}{\rho d_{\text{ел}}^2} \leq j_{\text{дон}}, \quad (3.10)$$

$$j = \frac{4 \times 2400}{75^2 \times 3,14} = 0,54 \leq 7$$

Приймаємо  $j = 12 \text{ A/cm}^2$

8. Проводиться перевірочний розрахунок:

$$h_{ел} = \frac{R_g}{R_g + r_{кц}}, \quad (3.11)$$

$$h_{ел} = \frac{0,17}{0,17 + 0,4} = 0,3$$

$$\cos j = \frac{r_{кц} + R_g}{\sqrt{(r_{кц} + R_g)^2 + x_{кц}^2}}$$

$$\cos j = \frac{0,4 + 0,17}{\sqrt{(0,4 + 0,17)^2 + 1,7^2}} = 0,31$$

9. Геометричні параметри печі знаходять по відношенню параметра, що розраховують, та діаметра електрода:

$$B^1 = \frac{B}{d_{ел}}, \quad (3.13)$$

10. Діаметр ванни на рівні вугільних блоків:

$$D = 5,15 \times 750 = 3862,5$$

11. Діаметр ванни на рівні колошника (вище вугільних блоків):

$$d_g = 5,6 \times 750 = 4200$$

12. Відстань між осями електродів:

$$K = 2,5 \times 750 = 1875$$

13. Висота ванни:



$$H_g = 1,8 \times 750 = 1350$$

14. Діаметр кожуха:

$$D_k = d_g + 2d_{\text{стін}}, \quad (3.14)$$

$$D_k = 4200 + 2 \times 750 = 5700$$

Або так як вісі електродів знаходяться на вершинах рівностороннього трикутника, то діаметр розпаду електродів знаходимо через діаметр кола, описаного навколо рівностороннього трикутника:

$$D_p = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot K, \quad (3.15)$$

Відстань між електродами і футеровкою для без шлакових процесів:

$$a_{\text{стац}} = 0,8 \times d_{\text{ел}}$$

### 3.2 Ознайомлення з видами та конструкцією феросплавних печей

Феросплавна піч типу РКЗ-16,5 застосовують для виплавки кременистих феросплавів, а також виробництва малофосфористого шлаку. Технічна характеристика феросплавної печі типу РКЗ-16,5 представлена в таблиці 3.1.

Конструктивно феросплавна піч (рис. 3.1) піч виконана трифазною із трьома самоспівливими електродами 3 круглого перетину, розташованими по вершинах рівностороннього трикутника, із круглою плавильною ванною. Футеровка ванни укладена в металевий кожух 9 із двома льоточними вузлами 10, піч закрита зверху секційним водоохолоджуємим склепінням 8.

Електроживлення піч отримує від пічних трансформаторів, розташованих в окремому приміщенні. Живлення від трансформаторів передається пакетами короткої мережі на гнучкі струмопідводи й потім на контактні щоби, притиснуті до електродів 3. Переміщення електродів здійснюється за допомогою гідропідйомників 6, закріплених на перекритті цеху, а дозоване опускання електродів (перепуск) здійснюється механізмами перепуску.

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика феросплавної печі типу РКЗ-16,5

Найменування параметра, одиниці виміру	РКЗ–16,5
Установлена потужність, МВ•А	16,5
Максимальний струм по фазі, до А	60
Число фаз, шт	3
Тип електрода	самоспільний
Кількість електродів, шт	3
Розмір електродів у перетині, мм	1200
Діаметр розпаду електродів, мм	3000
Хід електрода, мм	1200
Число контактних щік на електроді, шт	8
Діаметр кожуха ванни, мм:	8250
Розміни ванни печі, мм:	
– діаметр	6650
– глибина	2800
Робоча напруга, В	130÷204
Число льоток	2

Живлення гідравлічних пристроїв печі здійснюється від насосно-акумуляторної станції. Завантаження шихти у ванну печі провадиться системою

завантаження 4 через завантажувальні лійки 3 і кільцеві зазори навколо електрода.

Апаратура управління механізмами електропечі й контрольно-вимірювальних приладів зібрані на щитах, у шафах і панелях у спеціальному пультовому приміщенні.

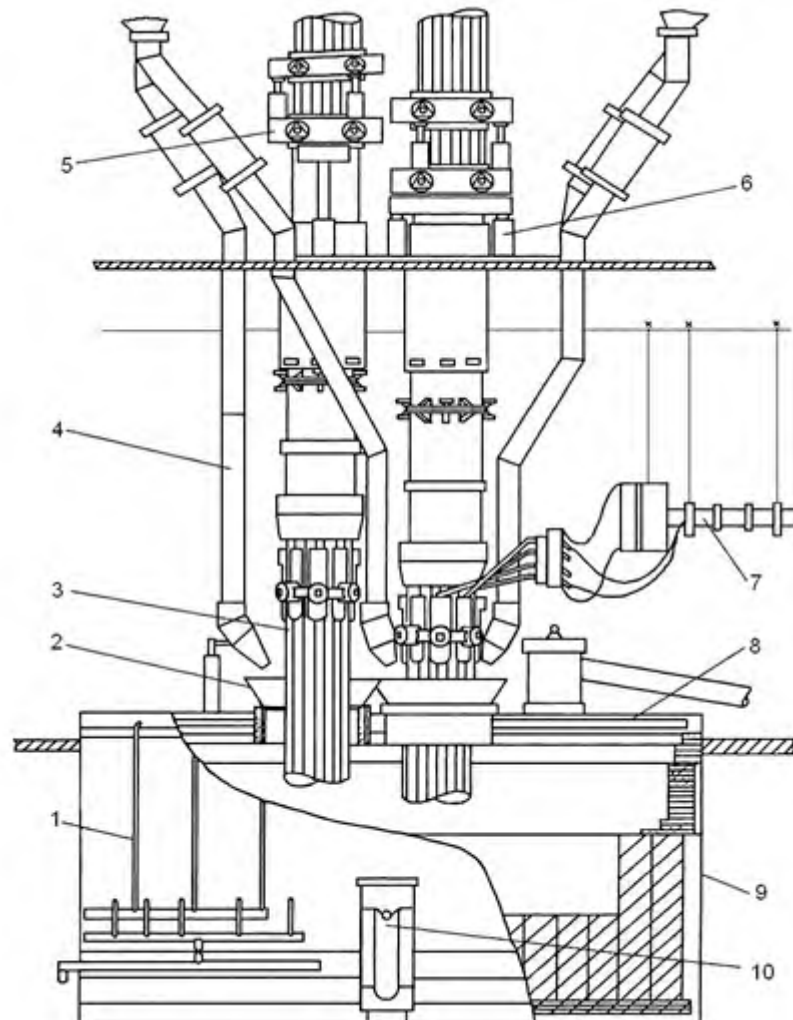


Рисунок 3.1 – Феросплавна піч типу РКЗ-16,5

Для збору й відводу газів, що виділяються з печі, слугує витяжною парасоль. З-під склепіння газу відсмоктуються газодувками через газозабірні стакани, а з-під парасоля – димососом. У системі газоочистки передбачено дві газодувки, одна із яких резервна.

Основними складовими частинами феросплавної печі типу РКЗ-16,5

(рис. 3.1) є: кожух з футеровкой 9; склепіння 8; електродотримач із струмопідвідом і механізмом перепуску 5; система водоохолодження 1; система завантаження 4; система гідроприводів.

Кожух виготовлений звареним і складається із трьох обичайок, виконаних зі сталевих листів. Днище кожуха - плоске; воно спирається на двотаврові балки, розташовані рівномірно на залізобетонному фундаменті.

У кожусі передбачено два діаметрально розташованих льоточних вузли, кожний з яких обладнаний жолобом для випуску розплаву з печі. Рівень шлакової льотки на 200 мм вище рівня льотки для металу. По периметру верхнього пояса кожуха приварені козирки, куди заливається вода для охолодження кожуха зрошенням; по периметру нижнього пояса приварений жолоб, де вода збирається після охолодження й відводиться через спеціальні патрубки. Ванна печі футерується вуглецевими блоками, алюмосилікатними й шамотними вогнетривкими матеріалами. Простір між внутрішньою поверхнею кожуха й цегельною кладкою заповнюється електродною масою, а на дно кожуха насипається (перед укладанням цегли) шамотна крупка.

Склепіння укриває колошник печі й забезпечує виробництво феросплавів у закритому режимі ведення плавки. Він складається з дев'яти плит (секцій), кожна з яких широким своїм кінцем спирається на верхню полицю кожуха, а в середній частині підвішується на ізольованих підвісках до цехового перекриття. Всі плити об'єднуються центральною плитою й притискаються до полиці кожуха за допомогою гвинтів через електроізолюючі азбестові прокладки.

У центральній частині склепіння виконані три отвори для проходу електродів, службовці одночасно для завантаження шихти в піч. Над цими отворами встановлені лійки, що направляють потік шихти, що надходить із трубозбігів системи завантаження.

У склепінні передбачені сім запобіжних клапанів, обладнаних кришками. Відвід газу з печі виконується через два отвори, до яких кріпляться газові стакани й похилі газоходи.

Після зборки склепіння виконують обмазку внутрішньої його поверхні

жароміцним бетоном, а потім, після установки на піч - обмазку зовнішньої поверхні й всіх з'єднань.

Склепіння прохолоджується проточною водою, для чого всі плити виконані порожніми; порожнини плит з'єднані між собою. Через патрубки виконується підведення й відвід води для підживлення охолодження центральної частини склепіння, підданої найбільшому нагріванню [10]–[12].

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

### **4.1 Охорона праці в феросплавному цеху: основні аспекти**

В феросплавному цеху на майданчику для нарощування електродів і на робочій площадці є небезпека ураження струмом людей при торканні кожухів і повітряних сорочок електродів і шин короткої мережі, біля горна печі при торканні шин, що йдуть до механізму для пропалювання льотки. Майданчик для нарощування електродів вистилають ізолюючими матеріалами (цеглиною, бетоном), між електродами на шарнірах встановлюють азбоцементні або прогумовані ширми.

Майданчик не огороджують, щоб людина при нарощуванні або перепуску електродів перебував у полі зору інших людей (наприклад, Дозувальник).

Плавильник, працюючий сталевим інструментом на колошником, повинен заземлювати його на сталевий кожух ванни. На сталеву заземлену поперечину слід спирати сталевий прут і при шурування випускного отвору.

Включення струму для пропалювання льотки повинно супроводжуватися автоматичним включенням червоної сигнальної лампи. Горновий при проживанні льотки повинен працювати, стоячи на ізолюючій майданчику (дерев'яної, цегляної).

Шкідливо діє на працюючих підвищена температура, джерелом якої є піч і випущений з печі рідкий сплав. Для захисту від випромінювання колошника застосовують екрануючі пристрої: набір вільно висячих металевих ланцюжків або двосторонні щити з теплоізоляційним прошарком. Такі щити можуть бути відсувається або повертаються на шарнірах.

Незважаючи на те, що потужні потоки повітря безперервно спрямовуються під витяжний парасоль печі, їх температура при русі через цех підвищується настільки, що на робочій площадці біля печі потрібні спеціальні джерела кондиціонування повітря.

Потрібний приплив повітря створюється спеціальними вентиляторами,

повітря пропускається через зволожувальні камери і гострими струменями, але зі швидкістю не більше 3 м/сек, виходить з повертаються патрубків. Крім того, в місцях застою повітря встановлюють аератори з пристосуванням для розбризкування. При цьому на колошниковій майданчику температура повітря становить 43–45°C при зовнішній температурі повітря 16–20°C.

Для відпочинку робітників в жарку пору року в електроплавильних цехах обладнані спеціальні кімнати, в яких підтримується постійно температура близько п'ятнадцяти градусів. Робочі феросплавних цехів забезпечуються остуженої, прокип'яченої і підсоленою газованою водою.

Систематично слід перевіряти запиленість повітря поблизу робочих місць, особливо в зимовий час, коли страх «протягів» спонукає закривати всі шляхи притоку повітря ззовні. Існуючі норми допускають вміст в 1 л повітря не більше 0,02 мг сірчистого газу, не більше 0,02 мг окису вуглецю і не більше 0,002 мг пилу. Плавильник феросплавів видається суконна спецодяг, валянки, крисаня, захисні (темні) окуляри, рукавиці. Такий одяг відмінно оберігає від випадкових опіків [13].

## **4.2 Шкідливі фактори феросплавного виробництва**

Сучасне виробництво характеризується наявністю різних шкідливих факторів (рис. 4.1) – фізичних, хімічних, біологічних, психофізіологічних, соціальних і механічних, характер дії яких повинен добре знати інженер щоб не допустити ушкоджень працюючих, уникнути травмування та розвитку професійних захворювань, тобто займатися «охороною праці» людини.

Шкідливі фактори, які, діючи на працівника, знижують його працездатність або призводять до різних захворювань, їх часто ще називають професійними хворобами. Варто зазначити, що межа між цими двома групами факторів досить умовна. При деяких умовах шкідливі виробничі фактори можуть стати небезпечними. Наприклад, підвищена вологість відноситься до несприятливих умов праці, вона може викликати різні захворювання дихальної

системи. Якщо людині доводиться в таких умовах працювати з електричним струмом, то це стає вже занадто небезпечно, а не просто шкідливо.

Функціонування системи управління охороною праці на всіх підприємствах незалежно від кількості працівників, а також у фізичних осіб, які використовують найману працю, передбачене ст. 13 Закону про охорону праці. СУОП покликана створити у кожному структурному підрозділі і на кожному робочому місці умови праці, які відповідають вимогам нормативно-правових актів, а також є підґрунтям для стабільного зниження рівня виробничого травматизму, аварій та професійних захворювань.

Роботодавець має забезпечити функціонування СУОП. Зокрема, серед іншого він організовує аудит охорони праці, лабораторні дослідження умов праці, оцінку технічного стану виробничого обладнання й устаткування, атестацій робочих місць на відповідність нормативно-правовим актам з охорони праці в порядку і строки, визначені законодавством, та за їх підсумками вживає заходів, щоб усунути небезпечні й шкідливі для здоров'я виробничі чинники.

Маркування небезпечних речовин проводиться згідно з рис. 4.2.

На підприємстві необхідно з метою створення сприятливих умов для працівників намагатися забезпечувати комфортну обстановку. Це стосується, насамперед, чистоти повітря у виробничих приміщеннях. Санітарно-гігієнічні служби розділяють основні шкідливі виробничі фактори на хімічні речовини та промисловий пил.

На будь-якому підприємстві працівників виявляється вплив шкідливих виробничих факторів відразу з кількох груп, тобто комплексне. Саме тому питання забезпечення захисту від негативного їх дії стоїть достатньо гостро у виробничій сфері.

Незважаючи на всі заходи, спрямовані на нейтралізацію шкідливого впливу факторів, неможливо досягти ідеальних умов праці. Це не дозволяють зробити особливості технологічних процесів, продукція та сировина для її виготовлення. Тому для керівників захист від шкідливих виробничих факторів



– це першочергове завдання. Керуватися при цьому необхідно наступними пріоритетами:

- Усунути небезпечний фактор або знизити ризик його впливу.
- Використовувати безпечні методи роботи.
- Здійснювати боротьбу з небезпечним фактором і його джерелом.
- Ефективно використовувати засоби індивідуального захисту.

Часто буває так, що всі вжиті заходи не можуть забезпечити повністю безпечні умови праці, в цих випадках без застосування ЗІЗ просто не обійтись. Серед них можна виділити наступні категорії, які найбільш поширені у використанні:

– Від вібрації можуть бути: рукавиці, надолонники, рукавички. Так як такий захист може знижувати ефективність праці за незручності роботи, то треба передбачати додаткові перерви.

– Навушники від шуму. Але вони можуть знижувати здатність людини орієнтуватися в просторі, провокувати головні болі через здавлювання.

– Респіратори і протигази. Тривалий час працювати в них дуже складно і незручно, тому слід шукати альтернативні засоби захисту.

Можна зробити висновок про те, що засоби індивідуального захисту, з одного боку, зменшують вплив шкідливих факторів, а з іншого – можуть створювати іншу небезпеку для здоров'я працівника.

Заходи безпеки спрямовані, насамперед, на те, щоб шкідливі виробничі фактори не надавали свого небезпечного впливу на людину. З цією метою на будь-якому підприємстві в обов'язковому порядку повинен проводитись інструктаж з безпеки. Дата проведення, зміст фіксуються у спеціальному журналі за підписом усіх інструктируємих і того, хто провів цей інструктаж [14] – [16].

# Види шкідливих факторів



## Хімічні

Токсичний пил, пара, газ.



## Фізичні

1. Параметри повітря у приміщенні (вологість,  $t$ ).
2. Вібрація.
3. Шум.
4. Нетоксичний пил, газ, пара.
5. Випромінювання.
6. Освітленість.



## Біологічні

1. Мікроорганізми, бактерії.
2. Інфекційні захворювання.



## Психофізіологічні

Фізичні та нервово-психічні перевантаження, пов'язані з тяжкою, монотонною працею.



Рисунок 4.1 – Шкідливі фактори виробничого середовища



Рисунок 4.2 – Маркування небезпечних речовин

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто призначення та хімічний склад феросиліцію марки ФС65, галузь його використання, вимоги до якості; проаналізовано вплив легуючого елементу кремнію на якість та властивості сталі.

2. Показано, що феросиліцію марки ФС65 виплавляють найбільш оптимальним вуглетермічним способом. Для проведення плавки застосовують відкриті рудовідновні феросплавні трьохфазні печі круглої форми потужністю 16,5 МВА. Для покращення техніко-економічних показників раціонально використовувати печі з ванною, що обертається. Завдяки цьому покращується газопроникність шихти та газодинаміка печі.

3. Встановлено суттєве підвищення ефективності виробництва феросиліцію шляхом повсюдного використання скрапу від розливних машин, шлакопереробки, переплавки в феросплавної печі відсівів феросиліцію, а також виплавка феросиліцію з частковою заміною дефіцитної сталеві стружки залізорудних окатишів, залізною рудою і окалиною ковальського виробництва. Основні завдання правильного обслуговування закритої печі зводяться до підтримки необхідного тиску під зведенням, забезпеченню рівномірного сходу шихти, запобіганню надмірному вибиванню газу через завантажувальні воронки і забивання пилом підсклепінного простору і газоходів печі.

4. Приведено розрахунок шихти для виплавки феросиліцію марки ФС65.

5. Розглянуто основні принципи охорони праці та техногенної безпеки в феросплавному цеху.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. *Актуальные проблемы и перспективы электрометаллургического производства* : теория и технология, эффективность использования минерально-сырьевых ресурсов, экология, экономические аспекты развития внутреннего и внешнего рынков : материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию ГметАУ и 75-летию кафедры электрометаллургии (г. Днепропетровск, 30.06–02.07.1999 г.). Днепропетровск : Системные технологии, 1999. 448 с.
2. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могиталенко В. Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб.; за ред. акад. НАН України В. Л. Найдека. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2016. 224 с.
3. Казачков О. І., Мосейко Ю. В., Позднякова О. А. Теорія і технологія феросплавного виробництва : навч.-метод. Посіб. для студентів спеціальності 6.050401 “Металургія чорних металів” . Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 153 с.
4. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник / Д. Ф. Чернега та ін.; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ: Вища школа, 2006. 503 с.
5. Колесник М. Ф. Металургія чорних металів (ведення до спеціальності): навч. посіб. для студ. спец. 6.090401 «Металургія чорних металів. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 124 с.
6. Кириченко О. Г., Лічконенко Н. В., Панова В. О. Фізико-хімічні процеси виробництва чорних металів в: навч.-метод. посіб. для здобувача ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія чорних металів». Запоріжжя: ЗНУ, 2019. 238 с.
7. Металл Украины. URL: <http://ukrmet.dp.ua> (дата звернення: 04.02.2023).
8. Гладких В. А., Гасик М. И., Овчарук А. Н., Пройдак Ю. С.

Ферросплавные электропечи: учебн. Днепропетровск: Системные технологии, 2007. 259 с.

9. Воденнікова О. С. Металургія чорних металів: конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія». Запоріжжя: ЗНУ, 2021. 144 с.

10. Воденнікова О. С. Сучасні проблеми металургії: конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів» та «Обробка металів тиском». Запоріжжя: ЗНУ, 2021. 76 с.

11. Украинская ассоциация сталеплавильщиков. Информационный портал о чёрной и цветной металлургии. URL: <http://uas.su/index.php> (дата звернення: 04.02.2023).

12. Воденніков С. А., Тарасов В. К., Воденнікова О. С. Конструкції агрегатів чорної металургії : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 192 с.

13. Вахонєва Т. М. Основи охорони праці в Україні : навч. посіб. Київ : ВД «Дакор», 2019. 508 с.

14. Бердій Я. І. Основи охорони праці : навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. Вид. 4-те перероб. і доп. Тернопіль : Навчальна книга-Богдан, 2014. 240 с.

15. Враховуємо небезпечні та шкідливі виробничі фактори. URL: <https://pro-op.com.ua/article/206-qqq-16-m6-13-06-2016-nebezpechn-ta-shkdliiv-virobnich-faktori> (дата звернення: 15.12.2022).

16. Шкідливі фактори. URL: <https://naurok.com.ua/nebezpechni-ta-shkidliiv-faktori-293483.html> (дата звернення: 15.12.2022).