МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М.ПОТЕБНІ

Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проєкт

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

на тему **Розробка технології одержання кристалічного кремнію**

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1362-м-з
спеціальності 136 Металургія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Металургія
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
І.В.Пересипко
(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н, доц. Кириченко О.Г.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент доц., к.т.н., доц. Нестеренко Т.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра____Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки___
Рівень вищої освіти____перший (бакалаврський)_____

Спеціальність _____136 Металургія _____
(код та назва)
Освітня програма _____Металургія_____
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри_____
«_____»_____20____року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

_____Пересипку Ігорю Вікторовичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка технології одержання кристалічного кремнію__
_____

керівник роботи _____Кириченко Олексій Геннадійович, к.т.н., доц._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року №1831-с_____

2 Строк подання студентом роботи _____25.05.2026_____

3 Вихідні дані до роботи __Розробити технологію виплавки кремнію кристалічного
_____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат; вступ; 1 Загальна частина; 2 Конструкційна частина; 3 Технологічна частина; 4 Охорона праці та техногенна безпека; Висновки; Перелік джерел посилання_____

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

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Загальна частина	Кириченко О.Г, доцент		
2 Конструкційна частина	Кириченко О.Г, доцент		
3 Технологічна частина	Кириченко О.Г, доцент		
4 Охорона праці та техногенна безпека	Кириченко О.Г, доцент		

7 Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, реферат	13.04-22.04.2026	
2	1 Загальна частина	23.04-30.04.2026	
3	2 Конструкційна частина	01.05-08.05.2026	
4	3 Технологічна частина	09.05-16.05.2026	
5	4 Охорона праці та техногенна безпека	17.05-23.05.2026	
6	Висновки, перелік джерел посилання	24.05-25.05.2026	

Студент _____ _____І.В.Пересипко_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ _____О.Г.Кириченко_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____Ю.О.Бєлоконь___
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 98 с., 23 табл., 9 рис., 23 джерела

ФЕРОСПЛАВНИЙ ЦЕХ, КРЕМНІЙ КРИСТАЛІЧНИЙ, РУДОТЕРМІЧНА ПІЧ, ШИХТА, ПЛАВКА, КІВШ, РОЗЛИВКА, ЧУШКИ

Мета роботи – розробка технології та розрахунок необхідної кількості устаткування для виробництва кристалічного кремнію.

В загальній частині наведено обґрунтування конструкції промислової будівлі, вибір типу печі та опис її конструкції; наведено розрахунки основних параметрів печі та необхідного обладнання, розміщеного в цеху.

В конструкційній частині наведений вибір конструкції основних виробничих агрегатів, описані основні елементи конструкції рудовідновлювальної печі РКЗ-16,5 та представлений режим роботи.

В технологічній частині наведено властивості та призначення кремнію, технологію виплавки та розливання, виконано розрахунок матеріального балансу виплавки Кр3.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» проведений аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища феросплавного цеху, запропоновані заходи щодо безпеки праці в цеху; розроблено освітлення та вентиляція; спроектовано побутові приміщення.

ЗМІСТ

Вступ 7
1 Загальна частина 9
1.1 Опис виробничої будівлі цеху 9
1.2 Розрахунок кількості печей у феросплавному цеху 9
1.3 Виробнича програма цеху 11
1.4 Опис цеху по прольотах 11
1.4.1 Відділення шихтопідготовки 11
1.4.2 Плавильний корпус 17
1.4.3 Склад готової продукції 22
1.4.4 Транспортні в'їзди цеху 23
2 Конструкційна частина 24
2.1 Обґрунтування вибору плавильного агрегату 24
2.2 Розрахунок основних параметрів печі 24
2.3 Характеристика обладнання 28
2.3.1 Технічна характеристика печей 28
2.3.2 Електричне обладнання 28
2.3.3 Механічне обладнання 31
3 Технологічна частина 38
3.1 Короткі відомості про фізико-хімічні властивості кремнію та його сполук 38
3.2 Властивості і застосування кристалічного кремнію 38
3.3 Технічні характеристики кристалічного кремнію 43
3.4 Рафінування кремнію 44
3.5 Характеристика сировини для виробництва кремнію 47
3.6 Фізико-хімічні умови відновлення кремнію 49
3.7 Розрахунок матеріального балансу для виплавлення Кр3 51
3.8 Технологія розігріву печі 62
3.8.1 Підготовка печі до розігріву 62
3.8.1.1 Підготовка електродів 62

3.8.1.2 Підготовка ванни печі 63
3.8.2 Розігрівання ванни печі і коксування електродів 63
3.9 Технологія виплавлення Кр3 65
3.9.1 Підготовка шихтових матеріалів до плавки 65
3.9.2 Режим роботи електродів 67
3.9.3 Ведення плавки 68
3.9.4 Випуск сплаву 70
3.10 Технологія розливки Кр3 72
3.11 Виготовлення ковшів з наливною футеровкою 74
4 Охорона праці та техногенна безпека 76
4.1 Техніка безпеки виробництва 76
4.1.1 Характеристика шкідливих і небезпечних виробничих факторів 76
4.1.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних факторів 78
4.1.3 Забезпечення електробезпеки 79
4.2 Виробнича санітарія виробництва 83
4.2.1 Природне та штучне освітлення 83
4.2.2 Вентиляція 85
4.2.3 Побутові і допоміжні приміщення 87
4.2.4 Засоби індивідуального захисту 88
4.3 Протипожежна безпека виробництва 88
4.3.1 Характеристика виробництва з вибухопожежної небезпеки 88
4.3.2 Профілактичні та протипожежні заходи 89
4.3.3 Засоби гасіння пожеж 91
4.3.4 Розрахунок штучного освітлення виробничої будівлі за методом коефіцієнта використання 94
Висновки 96
Перелік джерел посилання 97

ВСТУП

У металургії та інших технічних галузях широко використовуються феросплави та технічно чисті метали. Їх застосовують для розкислення й легування сталі, створення високолегованих сплавів з особливими функціональними властивостями, а також для виготовлення чавунів. Феросплавна промисловість налічує понад 150 видів і марок простих та складних феросплавів, що включають близько 25 хімічних елементів. До них належать більшість легких металів (Al, Ba, B, Ca, Mg, Sr, Ti), частина рідкісних і розсіяних металів (V, W, Mo, Nb, Ta, Sc), важких металів (Co, Mn, Ni, Cr), а також деякі неметали (Si, P, Se, Te та N).

Розвиток виробництва феросплавів можна поділити на два ключових періоди. На початку XIX століття виробництво феросплавів здійснювали переважно в доменних печах на основі руд. Проте на початку XX століття, з появою та розвитком електроенергетики, було започатковано отримання феросплавів в електропечах. На сучасному етапі більшість феросплавів виробляють у дугових електропечах із використанням вуглецю, кремнію та алюмінію як відновників.

Електроферосплавна галузь сьогодні є одним із найбільших споживачів електроенергії. Її частка у загальному використанні електроенергії в чорній металургії сягає приблизно 20%. Виробництво електроферосплавів залишається надзвичайно важливою складовою промисловості, перспективи якої тісно пов’язані з подальшим розширенням енергетичної інфраструктури.

Подальша успішність цієї галузі значною мірою залежить від вдосконалення технологій переробки руд та концентратів, а також від розвитку мінерально-сировинної та електроенергетичної бази. Окреме значення мають розробка й упровадження замкнених технологічних циклів для виплавлення феросплавів. Вони передбачають комплексне використання мінеральної сировини та продуктів виробництва, сприяючи більш ефективному використанню природних ресурсів та зменшенню шкоди для довкілля.

У кваліфікаційній роботі детально описано напрями вдосконалення існуючих технологій виплавлення крем'янистих сплавів, а також модернізації обладнання для

отримання феросплавів із максимальним рівнем механізації та автоматизації технологічних процесів.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Опис виробничої будівлі цеху

Промислова будівля складається з двох прольотів: пічного та розливного. Несучими елементами конструкції цеху є колони. Бічні стіни виконані з цегли, а торцеві — капітальні. У стінах розташовані віконні отвори, оснащені поворотними фрамугами, які також встановлені у верхній частині цеху для ефективної вентиляції.

В цеху функціонує наступне обладнання:

- у пічному прольоті: 4 закриті рудовідновлювальні печі типу РКЗ-16,5 та 2 крани грузопідйомністю Q – 10 т;

- у розливному прольоті: автоклав, 2 розливальні машини конвеєрного типу та 3 крани грузопідйомністю Q – 30/10 т.

1.2 Розрахунок кількості печей у феросплавному цеху

Кількість феросплавних електропечей, необхідна для проектованого цеху $N_п$, визначається залежно від запланованого обсягу виробництва феросплавів і номінальної потужності обраної печі. Вона розраховується за наступною формулою.

$$N_n = \frac{П_{ц.г}}{П_{п.г}} = \frac{30000}{8324} = 4 \qquad (1.1)$$

де $П_{ц.г}$ - заданий річний обсяг виробництва даного сплаву в цеху, т; $П_{п.г}$ - річна продуктивність печі при виплавці цього сплаву.

Річна продуктивність феросплавної електропечі визначається виразом

$$П_{п.г} = П_{п.с} \cdot \tau_ф = 25,3 \cdot 329 = 8324т \qquad (1.2)$$

де $\tau_ф$ - фактичний час роботи печі протягом року, діб.

Добова продуктивність феросплавної електропечі, як безперервної, так і періодичної дії, визначається потужністю пічного трансформатора та видом сплаву, який виготовляється. Розрахунок здійснюється за універсальною формулою:

$$П_{п.в} = \frac{24W \cdot Cos\phi \cdot К_и}{А} \quad (1.3)$$

$$П_{п.в} = \frac{24 \cdot 16500 \cdot 0{,}835 \cdot 0{,}931}{12190} = 25{,}3т$$

де: 24 - число годин на добу; W - встановлена потужність трансформатора, кВА; cosφ – середньозважений коефіцієнт потужності печі; $К_i$ - коефіцієнт використання потужності печі; А - питома витрата електроенергії при виплавці даного сплаву, кВт • год/т.

Зазвичай при обчисленні добової продуктивності феросплавних печей використовується заміна коефіцієнта $К_i$ на добуток трьох складових: коефіцієнта завантаження трансформатора за потужністю (К1), коефіцієнта використання трансформатора у часі (К2) та коефіцієнта, що враховує коливання напруги в мережі живлення (К3). Згідно з вимогами до енергосистем, усі споживачі повинні забезпечувати значення cos φ у межах 0,62-0,69. Питома витрата електроенергії при виплавці конкретного сплаву розраховується на основі найкращих показників роботи аналогових печей, які вже освоєні.

Розрахункова кількість печей у цеху округлюється до найближчого більшого цілого числа. При остаточному визначенні кількості печей у феросплавному цеху враховується, що це число має бути кратним двом і не перевищувати восьми. Вибір кількості печей, кратних двом, зумовлений зручністю одночасного розливу сплаву з двох печей на одній розливальній машині, а також можливістю забезпечення двох печей шихтою через один трак шихтоподачі.

1.3 Виробнича програма цеху

Коефіцієнт перерахунку Кр3 на базову тонну

$$К_{пер} = \frac{1000}{118,015} \cdot \frac{96}{96,506} = 8,43$$

де, 118,015 – кількість одержаного Кр3, кг;

96,506 – вміст кремнію у металі, %.

Витрата шихтових матеріалів для виплавки 1 базової тони металу

Кварцит: 100 · 8,43 = 843 кг

Відновник: 47,906 · 8,43 = 403,85 кг

Відходи власного виробництва: 80,425 · 8,43 = 677,98 кг

Електродна маса: 4,00 · 8,43 = 33,72 кг.

1.4 Опис цеху по прольотах

1.4.1 Відділення шихтопідготовки

Відділення шихтопідготовки феросплавного цеху призначене для зберігання, обробки та дозування шихтових матеріалів. У практиці існують два основних варіанти проектних рішень для організації шихтового господарства. Цех має закритий склад для власних потреб, тоді як матеріали, необхідні для роботи кількох цехів, зазвичай зберігаються на відкритому заводському складі.

Шихтове господарство цеху із централізованим забезпеченням шихтою, що обладнаний рудовідновлювальними печами, складається зі складових частин: відкритого підлогового складу сирих матеріалів (ССМ), закритого складу, корпусу підготовки матеріалів (КПМ), корпусу бункерів для підготовлених шихтових матеріалів (КШБ) та дозувальних відділень (ДВ).

Відкритий підлоговий склад сирих матеріалів використовується для створення необхідного запасу сировини, яка постачається з віддалених регіонів, а

також для зберігання рудних матеріалів із великою добовою витратою. На цьому складі матеріали зберігаються у штабелях, розвантажуються із вагонів за допомогою козлових кранів з грейферами, а потім транспортуються залізницею до шихтового відділення цеху.

При проектуванні сучасних феросплавних цехів з метою зберігання шихтових матеріалів передбачають три типи складів:

– закритий склад із грейферними кранами та залізничною колією, що проходить посередині приміщення;

– закритий ангарний склад без кранів, оснащений конвеєрною системою подачі й видачі матеріалів;

– відкритий склад із конвеєром для подачі сирих матеріалів та мостовим грейферним перевантажувачем, який виконує приймання, штабелювання та подачу матеріалів для подальшої обробки.

Для зберігання шихтових матеріалів у розглядуваному цеху передбачено закритий склад, оснащений грейферними кранами та залізничною колією, якій притаманна висока ефективність та відповідність сучасним виробничим вимогам.

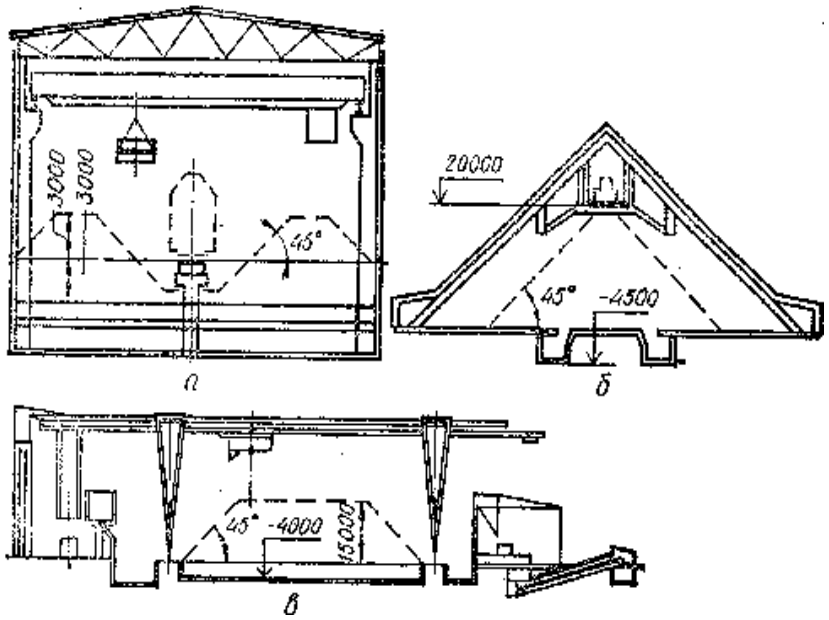


Рисунок 1.1 – Типи складів для зберігання шихтових матеріалів

У комплексі КПМ встановлено все необхідне сушильне, дробильне та

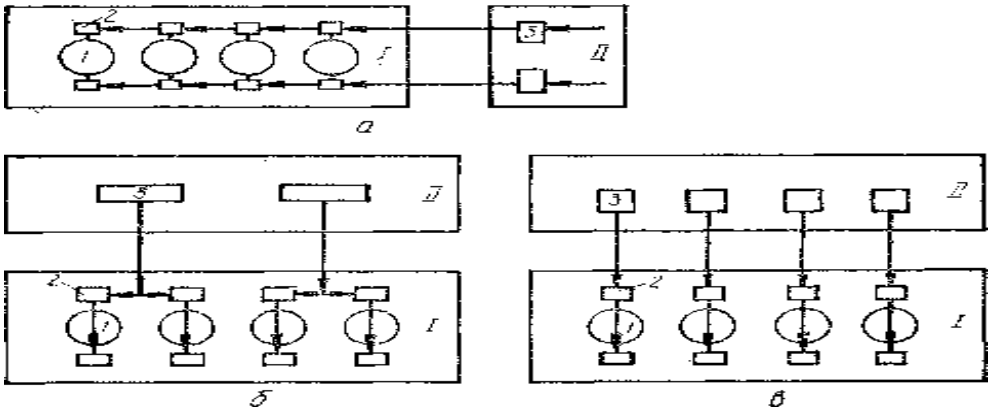
класифікаційне обладнання. Для дроблення коксу застосовуються чотиривалкові дробарки 13Д 900/700 з діаметром валків 900 мм, регульованою щілиною 0–50 мм та продуктивністю 35 т/год. Для подрібнення кварциту використовуються конусні дробарки КПД-500 із розвантажувальною щілиною 75 мм і продуктивністю 150 м³/год, а для дроблення стружки — стружкодробарки СМ-2 з щілиною 25 мм та продуктивністю 1,5–5 т/год. Сортування коксу здійснюється за допомогою вібраційного грохота ГВР-1А з продуктивністю 70 м³/год, а кварциту — на інерційному грохоті, здатному обробляти до 300 т/год. Окремо підкреслено важливість організації транспортних шляхів для відновлювача і рудного матеріалу: їх не можна перетинати, щоб уникнути змішування через можливий просип матеріалів при розриві стрічки.

На заводі впроваджено безперервне порційне дозування шихти. У цьому процесі задіюються порційні вагові автомати та барабанні змішувачі з обертами. Шихтові матеріали, заздалегідь підготовлені на відповідному складі, завантажуються в окремі дозувальні установки, що обслуговують кожну піч, і оснащені автоматичними дозаторами. Після цього компоненти шихти завантажуються у конвеєр або скіповий витяг і транспортуються до плавильного корпусу цеху для подавання в печі.

Розрахунок шихти на основі заданої маси провідного компоненту виконується спеціальним пристроєм управління, який також задає необхідне співвідношення компонентів у шихті. Система регулювання співвідношення забезпечує коректну роботу групи дозаторів, реагуючи на будь-які відхилення продуктивності провідного дозатора. У разі змін регулятор автоматично коригує продуктивність інших дозаторів для підтримання заданого співвідношення компонентів.

Усі компоненти шихти подаються на рухому конвеєрну стрічку, де формують шар змішаного матеріалу у заданому співвідношенні. Після цього суміш направляється до приймальних бункерів печей. Завдяки цьому процесу на етапі подавання шихта є вже доволі однорідною сумішшю із точним співвідношенням усіх компонентів.

У разі невеликих або середніх обсягів вантажопотоків шихти всі плавильні печі обслуговуються однією лінією подачі шихти. Для великих вантажопотоків така лінія забезпечує шихтою кожні дві печі. Існує три основних способи подачі дозованої шихти в пічні бункери: кільцевий, лінійний і скіповий (рисунок 1.2). При кільцевому та скіповому способах відділення шихтопідготовки розташовується паралельно до плавильного корпусу, тоді як у випадку лінійного способу воно організоване в одну лінію разом із плавильним корпусом. Однак ухвалене рішення передбачає використання лінійного варіанту подачі дозованої шихти.



а - лінійний; б - кільцевий; в - скіповий; I - плавильний корпус; II – відділення шихтопідготовки; I - електропіч; 2 -пічні кишені; 3 - вузол дозування.

Рисунок 1.2 – Варіанти подачі шихти, що дозує, у пічні бункери

За лінійною схемою матеріали, дозовані у безперервному режимі, спочатку надходять на горизонтальний конвеєр, далі транспортуються похилим конвеєром на шихтовий майданчик плавильного корпусу. Там вони перевантажуються на конвеєр, розташований уздовж цеху, від якого за допомогою плужкових скидачів спрямовуються безпосередньо в пічні бункери.

Кільцевий спосіб подачі шихти має свої переваги: він дозволяє скоротити довжину конвеєрних систем, зменшити кількість перевалок матеріалів та мінімізувати втрати під час транспортування. До того ж, він сприяє зниженню капітальних витрат на будівництво цеху на 13-15%. Готові шихтові матеріали транспортуються грейферними кранами у бункери для зберігання, звідки через

безперервні дозатори визначена кількість матеріалів подається на горизонтальний конвеєр. Далі вони передаються похилим конвеєром у плавильний корпус і, зрештою, човниковим конвеєром спрямовуються до пічних бункерів. Кожна група бункерів готової шихти обслуговує дві плавильні печі.

При використанні скіпової подачі, компоненти шихти дозуються у відділі підготовки, а далі передаються до плавильного цеху через скіповий витяг. Це забезпечує автоматичну подачу шихти безпосередньо до бункерів печей. Кожна плавильна піч підтримується окремою групою бункерів із готовою шихтою. Переміщення шихти конвеєрною системою супроводжується утворенням додаткових 3-10% коксового пилу (понад фракції менше 5 мм) через процес стирання. Також на стрічці конвеєра накопичується промаслена стружка і кокс, що спричиняє додаткові втрати в розмірі 4,5% та 3% відповідно.

При використанні конвеєрів для транспортування сипучих матеріалів через невеликий нахил стрічок (17°) та значну висоту галерей подачі, такі системи займають великі площі в цеху. Альтернатива у вигляді скіпової подачі дозволяє скоротити зайнятий простір, наблизивши склади шихти та дозувальне обладнання до плавильного корпусу.

Загальний запас шихтових матеріалів Q (у тоннах або кубічних метрах), необхідний для феросплавного цеху, обчислюється на основі добового споживання матеріалів та встановлених норм запасу за формулою:

$$Q = \mathrm{qc}_i \sum c_i K \tag{1.4}$$

$$Q_{\text{кварцит}} = 85{,}31 \cdot 20 \cdot 1{,}3 = 2218{,}06\text{т}$$
$$Q_{\text{відновлювач}} = 40{,}87 \cdot 20 \cdot 1{,}3 = 1062{,}62\text{т}$$
$$Q_{\text{відх.влас.вироб.}} = 68{,}61 \cdot 20 \cdot 1{,}3 = 1783{,}86\text{т}$$

де $\mathrm{qc_i}$ - добова витрата матеріалу по цеху, т або м^3; $\sum c_i$- нормативний запас матеріалу, добу; К = 1,2-1,4 - коефіцієнт нерівномірності надходження вантажів.

При встановленні в цеху однотипних печей добову витрату матеріалів вираховують з виразу:

$$\mathrm{qc}_i = \Pi_{\text{п.с.}} \cdot N_n \cdot q_i \tag{1.5}$$

$$qc_{i_{\text{Кварцит}}} = 25,3 \cdot 4 \cdot 0,843 = 85,31\text{т}$$
$$qc_{i_{\text{відновлювач}}} = 25,3 \cdot 4 \cdot 0,40385 = 40,87\text{т}$$
$$qc_{i_{\text{відх.влас.вироб.}}} = 25,3 \cdot 4 \cdot 0,67798 = 68,61\text{т}$$

де $П_{п.с}$ – добова продуктивність печі, т/добу; $N_п$ - кількість печей; q_i - витрата матеріалу на 1 т сплаву, т або м^3.

Згідно із загальним необхідним запасом шихтових матеріалів, проводять розрахунки для визначення розмірів складу. Основна задача полягає в обчисленні довжини складу, враховуючи задану ширину та висоту штабеля матеріалів.

Довжина закритого грейферного складу, який має ширину прольоту 30 м та висоту штабеля 3 м, визначається на основі відповідної формули:

$$L = \frac{\frac{Q}{2\gamma} - 72}{6(5h-6)} \quad (1.6)$$

$$L_{\text{кварцит}} = \frac{\frac{2218,06}{2 \cdot 1,6} - 72}{6 \cdot (5 \cdot 3 - 6)} = 11,5\text{м}$$

$$L_{\text{відновлювач}} = \frac{\frac{1062,62}{2 \cdot 0,6} - 72}{6 \cdot (5 \cdot 3 - 6)} = 15,07\text{м}$$

$$L_{\text{відх. власн. вироб.}} = \frac{\frac{1783,86}{2 \cdot 1,8} - 72}{6 \cdot (5 \cdot 3 - 6)} = 7,84\text{м}$$

де γ - насипна маса шихтового матеріалу, т/м^3; $Н_з$ - глибина засіки, що дорівнює 6 м.

Сипучі матеріали в ССМ завантажують за допомогою грейферних кранів.

Під час розрахунку кількості кранів враховують витрати часу кожного крана на подачу шихти для виготовлення 1 тонни сплаву, обсяги добового виробництва, а також плановий час роботи крана. Для визначення необхідної кількості кранів, необхідних для роботи однієї печі, використовується така формула:

$$п_{кр} = \frac{П_{п.с.} \cdot \tau_{уд}}{840} \quad (1.7)$$

$$n_{кр} = \frac{25,3 \cdot 23,15}{840} = 0,7$$

Прийнято $n_{кр} = 3$, $\tau_{уд}$ – час, що витрачається краном на подачу шихтових матеріалів для виплавки 1 т сплаву, т/хв; 840 - тривалість роботи крана на добу, хв.

Значення $\tau_{уд}$ обраховують виходячи з насипної маси шихти, місткості грейфера та тривалості однієї кранової операції з рівняння

$$\tau_{уд} = \frac{\gamma_{ш}}{V_{г}} \cdot k_{г} \cdot \tau_{0} \quad (1.8)$$

$$\tau_{уд} = \frac{30{,}86}{4} \cdot 0{,}75 \cdot 4 = 23{,}15$$

де $\gamma_{ш} = \sum \gamma_i \cdot r_i$ - насипна маса шихти, що витрачається на виплавку однієї тонни сплаву, т/м^3; γ_i-насипна маса компонента шихти, т; r_i - частка цього компонента в шихті; $V_г$ - об'єм грейфера, м^3; кг - коефіцієнт заповнення грейфера (0,75-0,8); τ_0 - тривалість однієї виконуваної краном операції, що становить в середньому 4 хв.

1.4.2 Плавильний корпус

Плавильний корпус є ключовою складовою феросплавного цеху, основним призначенням якого є розміщення та обслуговування електропечей, прийом і розливання готового сплаву, а також видалення шлаків. Конструкція корпусу зазвичай включає пічний проліт та розливний проліт.

До будівлі корпусу з боку пічного прольоту прилягає трансформаторна естакада. У цеху використовуються закриті рудовідновлювальні печі потужністю 16,5 МВА, обладнані системою уловлювання та мокрим очищенням відхідних газів. Розлив металу здійснюється з використанням конвеєрних машин. Шихта для печей постачається з окремого відділення шихтопідготовки. Процес дозування шихти є безперервним, а її подача реалізована за допомогою автоматизованої системи.

Пічний проліт виконує функцію розміщення та обслуговування плавильних електропечей, які встановлюються вздовж цеху за однією лінією. Ширина прольоту

становить 18 метрів, а сама конструкція виконана багатоярусною. На рівні нульової позначки знаходяться фундаменти печей, механізми переміщення металовозних візків, газоочисне обладнання, а також допоміжні приміщення.

На позначці 2,6 м розташовано суцільне перекриття для обслуговування льотки. Тут знаходяться пристрої для відкривання і закривання льотки, вузли підготовки льоткової маси, системи шламозбірників та приміщення для відпочинку працівників плавильної бригади.

Робочий майданчик для обслуговування печей, моніторингу технологічного і електричного режимів знаходиться на висоті 6,6 м. Він оснащений пультами управління (одне приміщення на дві печі), газоходами для відведення газів, системами вентиляції, платформами для завершення ремонтних робіт та приміщеннями інженерно-технічного персоналу.

Для обслуговування переміщень та регулювання електродів передбачений електродний майданчик на позначці 15,6 м. На рівні 19,8 м розташоване перекриття для установки пічних кишень, конвеєрної системи подачі шихти, монтажу вентиляційного обладнання, нарощування електродів і завантаження їх масою за допомогою мостового крана. На кожній печі передбачені отвори для здійснення транспортних операцій під час ремонту. Торцеві прорізи в перекриттях забезпечують безперебійне постачання електродної маси до печей.

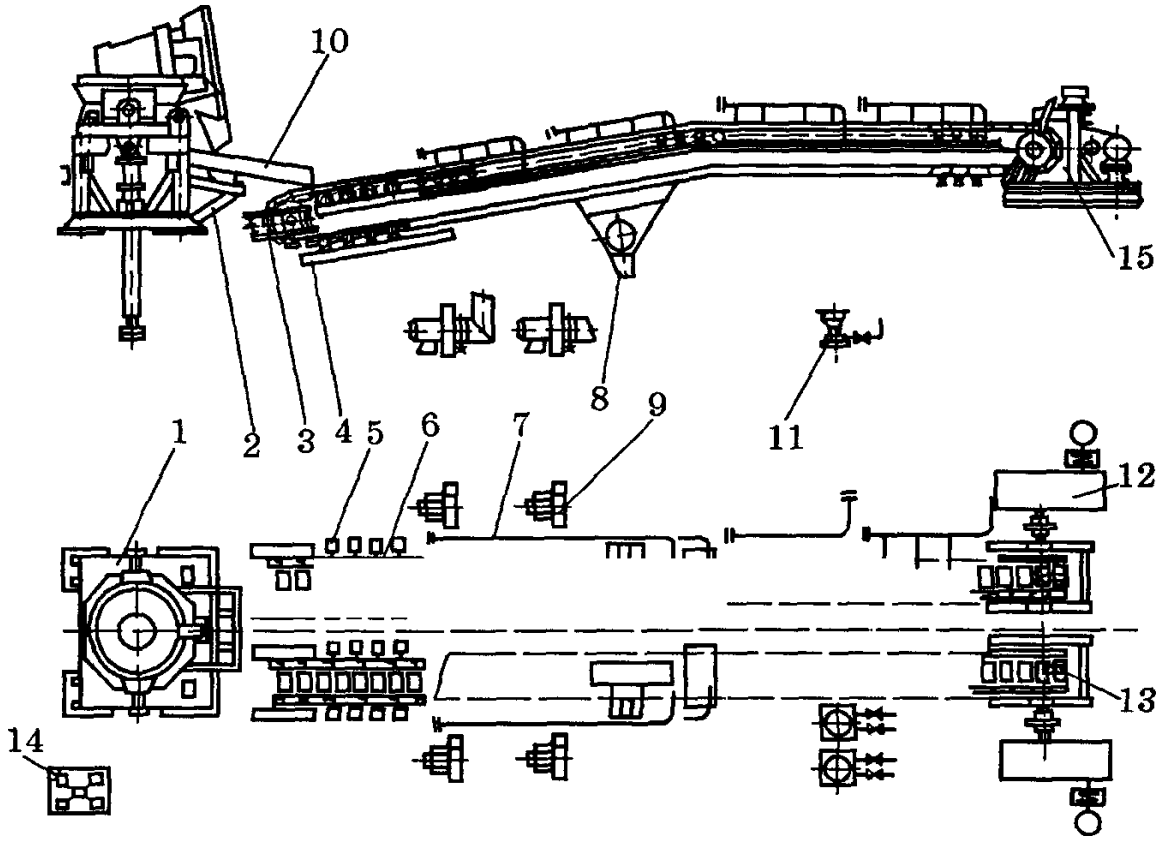
Розливний проліт виконує функцію прийому металу та шлаку з пічного прольоту, а також їх первинної обробки. Тут здійснюється розливання сплавів, їх передача на склад готової продукції, підготовка і подача розливного посуду до печей, а також поточний ремонт обладнання й забезпечення цеху необхідними матеріалами для стабільної роботи плавильного корпусу.

Ширина розливного прольоту становить 24 м і визначається залежно від насиченості обладнанням, кількості технологічних операцій з обробки сплаву та шлаку, а також кількості й обсягу розливного посуду. Для процесу розливання феросплавів використовуються конвеєрні розливні машини, конструкція яких зображена на рисунку 1.3.

Основними елементами машини є: кантувальний пристрій із ковшем та

жолобом, ланцюг конвеєра з опорними роликами, приводна станція, тічка, натяжна станція, обприскувач для нанесення вапняного розчину на внутрішні поверхні виливниць, а також системи для охолодження злитків та відсмоктування газів. Кантувальний пристрій розташований у межах розливного прольоту, тоді як головна частина машини разом із приводною станцією знаходиться на території складу готової продукції, де охолоджені зливки транспортуються по тічці до приймальних коробок.

Швидкість охолодження злитків залежить від марки феросплаву, тому для забезпечення оптимальних умов конвеєри розливних машин функціонують на трьох-чотирьох різних швидкостях.



1 – кантувальний пристрій; 2 – похила плита; 3 – натяжна станція; 4 – рама;
5 – ролики; 6 - ланцюг конвеєра; 7 – водоохолодження виливниць;
8 – обприскувач; 9 – димосос; 10 - розливний жолоб; 11 - система змащення;
12 - привід конвеєра; 13 - жолоб скидання; 14 – гідропривід;
15 - пристрій для вибивання чушок

Рисунок 1.3 – Конвеєрна машина для розливання феросплавів

У виробничому цеху встановлені конвеєрні машини для розливу продукції завдовжки 40 метрів, оснащені однією стрічкою. Для приймання готового сплаву, який випускається з печі, використовуються ковші з наливною футеровкою та цегляним облицюванням об’ємом 3 м³. На кожну піч передбачено три ковші: два перебувають у роботі, а один — у резерві.

Цегляна футеровка ковшів має низку недоліків, серед яких: швидке руйнування швів кладки, необхідність залучення висококваліфікованих мулярів, складність очищення від відкладень та висока собівартість процесу. Для подолання цих проблем і забезпечення механізації робіт із заміни футеровки запроваджується використання наливної футеровки на основі самотвердіючих сумішей. Це рішення сприяє здешевленню процесу та підвищенню міцності футеровки.

Транспортування ковшів до печей здійснюється за допомогою самохідних візків, які переміщуються рейковою колією. Шлях спроектовано як прямий, що забезпечує зручність та ефективність перевезення.

РОЗРАХУНОК ОБЛАДНАННЯ РОЗЛИВНОГО ПРОЛЬОТУ

Кількість розливальних машин розраховується на основі часу, потрібного для розливання однієї плавки (одного ковша), з урахуванням технологічних простоїв обладнання. Також визначається кількість мульд, необхідних для обслуговування однієї плавки:

$$\text{п}_{\text{уд}} = \frac{\text{т}_{\text{пл}}}{V \cdot \gamma_{\text{ж}} \cdot k_{\text{з.м}}} = \frac{3{,}5}{0{,}01 \cdot 2{,}33 \cdot 0{,}7} = 215 \qquad (1.9)$$

де V - об'єм однієї мульди, м^3 (для l = 40 м V - 0,01 м3,); $\gamma_{\text{ж}}$ - щільність сплаву, що розливається; т/м^3; $k_{\text{з.м}}$ - коефіцієнт заповнення мульди (0,7).

Час на розлив однієї плавки визначається з рівняння

$$\tau_{\text{р}} = \frac{l \cdot n_{\text{уд}}}{v_{\text{м}} \cdot \text{п}} = \frac{40 \cdot 215}{1{,}9 \cdot 420} = 10{,}8\text{хв} \qquad (1.10)$$

де $n_{уд}$ - кількість мульд, що забезпечують прийом металу однієї плавки, мульд/пл; $v_м$ - швидкість руху конвеєра машини, 1,2 м/хв; n - кількість мульд, що розташовуються на робочій довжині машини.

$$m_{пл} = \frac{П_{п.с}}{п_{в.с}} \cdot 1,2 = \frac{25,3}{8,7} \cdot 1,2 = 3,5т \quad (1.11)$$

$m_{пл}$ - маса однієї плавки, т; $П_{п.с}$ – добова продуктивність печі; $n_{в.с}$ - кількість випусків на печі на добу.

Кількість однострічкових машин для розливу визначають, враховуючи простої, що виникають протягом кожного циклу розливу. Ці простої включають заміну коробів, подавання та знімання ковшів (загалом 55-85% від загального часу розливу), згідно з формулою:

$$n_м = \frac{(1,55-1,85)\tau_р \cdot n_{в.с}}{\tau_{ном}} = \frac{(1,55-1,85) \cdot 10,8 \cdot 8,7}{22} = 1,3 \quad (1.12)$$

де $\tau_{ном}$ - номінальний час роботи машини на добу, що становить зазвичай 22 години; $n_{в.с}$ - кількість випусків на печі на добу.

Розливний проліт феросплавного цеху буде обладнано мостовими кранами із двома підйомними механізмами, призначеними для обертання розливного ковша. Кількість та вантажопідйомність кранів залежать від асортименту сплавів, які виплавляються, а також від потужності печей. Згідно з встановленими нормами, на одну електропіч має припадати від 0,3 до 0,5 крана, без урахування їхньої зайнятості на виконанні ремонтних робіт.

Зазвичай потреба в кількості розливних кранів у цеху визначається, беручи до уваги витрати часу крана на обробку одного ковша, а також кількість випусків сплаву упродовж доби. Розрахунок здійснюється за відповідною формулою.

$$N_{кр} = \frac{п_к \cdot t_{кр}}{1350} = \frac{8,7 \cdot 60}{1350} = 4 \quad (1.13)$$

де $п_к$ - число ковшів, що обробляються краном на добу (рівне числу випусків); $t_{кр}$ - витрати часу крана на обробку одного ковша, хв (в середньому близько 40-60 хв); 1350 - загальний час роботи крана на добу, хв.

РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ШЛАКОВОЗІВ

Кількість шлаку, що виробляється за добу

$$25,3 \cdot 0,032 \cdot 4 = 3,2т$$

де 25,3 - продуктивність однієї печі, т;

3,2% - кількість шлаку;

4 - кількість печей.

Необхідна добова кількість шлаковозів:

$$\frac{3,2}{32,93} = 0,1 \approx 1$$

де 32,93 – обсяг шлаковозу, м^3.

1.4.3 Склад готової продукції

Склад готової продукції представляє собою однопрольотну будівлю, розташовану паралельно плавильному корпусу, з яким він з'єднаний галереями для розливальних машин. У складі встановлено три мостові крани з вантажопідйомністю 15/5 тонн, а також обладнання для прийому, дроблення, сортування та пакування готових сплавів. Металеві зливки, що виходять із розливальних машин, потрапляють у контейнери об'ємом 2 м³, які розміщуються

на самохідних візках. Прийнято рішення про складування продукції кожної плавки в окремому контейнері.

НЕОБХІДНА КІЛЬКІСТЬ КОРОБІВ

$$l = 4 \cdot 12 = 48$$

де l – необхідна кількість коробів для складування однієї плавки;

4 – кількість печей у цеху;

12 – кількість розлитих ковшів.

Кожна розливна машина обладнана двома візками, що забезпечують безперервний процес прийому металу. Готова продукція накопичується у приймальних бункерах із об’ємом 6 м³. Подрібнення металу здійснюється за допомогою щокових дробарок, причому кількість дробарок відповідає кількості розливних машин [3].

1.4.4 Транспортні в'їзди цеху

Виробничий цех оснащений воротами з електричним приводом для автоматичного відкривання та закривання. Ворота мають відповідні габарити і додатково обладнані світловою та звуковою сигналізацією.

У цеху передбачено два залізничні в'їзди, що розташовані по його торцях, а також автомобільний в'їзд, який знаходиться в центрі цеху напроти складу готової продукції.

Залізничні в'їзди використовуються для транспортування до розливного прольоту цеху шлаковозів, думпкарів із піском, електродною масою, глиною та платформ для перевезення залишків ковшів.

Автомобільний в'їзд забезпечує задоволення внутрішніх потреб цеху.

2 КОНСТРУКЦІЙНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування вибору плавильного агрегату

Найбільш широке застосування отримали три основні відновники: вуглець (C), кремній (Si) та алюміній (Al). Відповідно, процеси отримання феросплавів називаються: вуглецевотермічний, силікотермічний та алюмінотермічний.

У даній кваліфікаційній роботі було обрано вуглецевотермічний процес, адже він є найбільш поширеним і економічно доцільним у випадках, коли відсутні жорсткі вимоги до вмісту вуглецю. Як відновник використовується коксовий горішок.

Важливою особливістю цього процесу є утворення газоподібного продукту реакції – оксиду вуглецю (CO), який легко видаляється із зони реакції, роблячи її практично незворотною. Сам процес відновлення супроводжується ендотермічними реакціями, через що для його успішного здійснення необхідно подавати значну кількість електричної енергії. З огляду на це, для проведення вуглецевотермічного процесу було обрано закриту рудовідновлювальну піч РКЗ-16,5 (рис. 2.1).

2.2 Розрахунок основних параметрів печі

ВИХІДНІ ДАНІ

Потужність пічних трансформаторів – 16 500 кВА;

Електроди, що самоспікаються;

Щільність струму на електродах – 5 А/см^2;

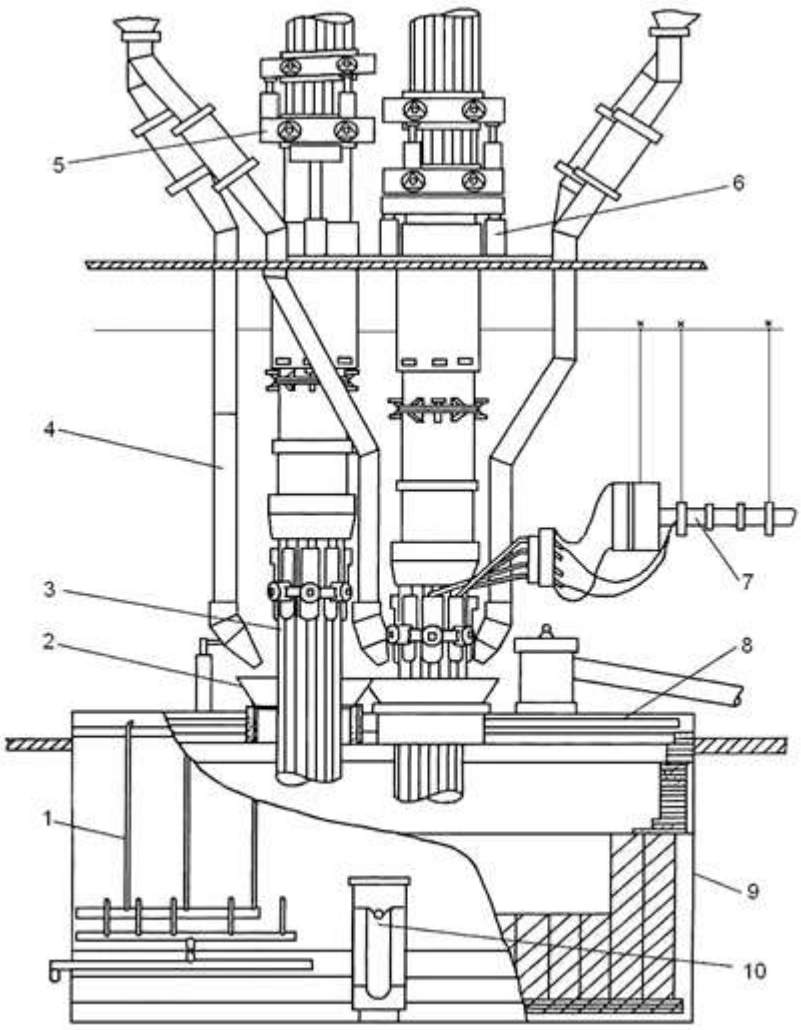
Щільність струму на контактних щоках – 1,5 А/см^2;

Процес безшлаковий.

Визначення електричних параметрів печі

Визначення робочих щаблів напруги

$$К_н = \sqrt[3]{P_{тр-ра}};\ К = 8{,}4 \dots 6 \qquad (2.1)$$



1 – система водоохолодження; 2 - завантажувальні лійки; 3 – електроди; 4 - система завантаження; 5 – електродотримач із струмопідвідом і механізмом перепуску система гідроприводів; 6 – гідропійомники; 7 – коротка мережа; 8 – склепіння; 9 – кожух з футеровкою

Рисунок 2.1 — Рудовідновлювальна електропіч РКЗ - 16,5

Вищий ступінь напруги

$$U_{\text{лв}} = 8{,}4\sqrt[3]{16500} = 8{,}4 \cdot 25{,}5 = 214\text{А} \qquad (2.2)$$

Нижчий ступінь напруги

$$U_{\text{лн}} = 6\sqrt[3]{16500} = 6 \cdot 25{,}5 = 153\text{А} \qquad (2.3)$$

Робочий ступінь напруги

$$U_{\text{лр}} = 7{,}2\sqrt[3]{16500} = 7{,}2 \cdot 25{,}5 = 184\text{А} \quad (2.4)$$

Робоча сила струму

$$I_{\text{лр}} = \frac{16500 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 183} = 51773\text{А} \quad (2.5)$$

Визначення діаметра електродів

$$d_{\text{эл}} = 2\sqrt{\frac{I_{\text{лр}}}{\pi\rho}} = 2\sqrt{\frac{51773}{3{,}14 \cdot 5}} = 114{,}9 = 1150\text{мм} \quad (2.6)$$

де ρ - щільність струму на електродах;

$d_{ел}$ = 1150 мм (округлення у велику сторону до 0).

Визначення геометричних розмірів робочого простору печі

Визначення діаметра розпаду електродів

$$d_р = 2{,}25\ d_{ел};\ d_р = 2{,}25 \cdot 1150 = 2588\ \text{мм} \quad (2.7)$$

Відстань від електрода до стінки печі $a = d_{ел}$; $a = 1150$.

Діаметр ванни внутрішній

$$d_{\text{вн}} = d_{\text{р}} + 2{,}5d_{\text{эл}} = 2588 + 2{,}5 \cdot 1150 = 5463\text{мм} \quad (2.8)$$

$$\sigma_{\text{ст}} = \text{азбест} + \text{зола} + \text{шлак} + \text{вуг.блок}$$
$$\sigma_{\text{ст}} = 10 + 65 + 280 + 550 = 850\text{мм} \quad (2.9)$$

Внутрішній діаметр кожуха

$$D_{кв} = 5463 + 2.\ 850 = 7163 \text{ мм}$$

Товщина кожуха печі

$$t_к = \frac{D_{кв}}{300} = \frac{7163}{300} = 23,8 \text{мм} \quad (2.10)$$

Прийнято $t_к = 24$ мм.

Діаметр кожуха зовнішній

$$D_{кн} = D_{кв} + 2t_к = 7163 + 2.24 = 7211 \text{ мм} \quad (2.11)$$

Глибина ванни

$$h_в = 2,5\ d_{ел} = 2,5 \cdot 1240 = 2875 \text{ мм} \quad (2.12)$$

При товщині кладки пода шамотної крупки, що складається з 100 мм і 13х65 шамотної цегли.

$$\sigma_{под} = 100 + 13 \cdot 65 + 550 = 2045 \text{мм}$$

Висота кожуха печі

$$H_к = h_в + \sigma_{под} = 2875 + 2045 = 4920 \text{мм} \quad (2.13)$$

Розрахунок контактних щік

Кількість щік n = 8. (Заводські дані)

$$I_щ = \frac{51773}{8} = 6472 \text{А} \quad (2.14)$$

Поверхня при ρ=1,5 А/см^2;

$$\varsigma_{щ} = \frac{I_{щ}}{\rho_{щ}} = \frac{6472}{1{,}5} = 4315\text{см}^2 \quad (2.15)$$

Ширина контактної щоки

$$b = \frac{\pi d_{эл}}{п} - 50 = \frac{3{,}14 \cdot 1150}{8} - 50 = 405\text{мм} \quad (2.16)$$

Висота контактної щоки

$$h = \frac{S}{b} = \frac{4315}{40{,}5} = 107\text{см} \quad (2.17)$$

2.3 Характеристика обладнання

2.3.1 Технічна характеристика печей

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики печей

Найменування параметрів	Параметри
Діаметр кожуха зовнішній, мм	7211
Висота кожуха, мм	4920
Глибина ванни до склепіння, мм	2875
Діаметр ванни, мм	5463
Діаметр електродів, мм	1150
Діаметр розпаду електродів, мм	2588

2.3.2 Електричне обладнання

ПІЧНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

Печі обладнані стандартними трансформаторами, які дозволяють перемикати рівні напруги під навантаженням за умови, що струм не перевищує номінальне значення. Температура води, яка використовується для охолодження трансформаторів, має залишатися в межах до 25°С. Для цього у конструкції трансформатора передбачено систему примусового охолодження масла.

Регулювання електричного режиму роботи печі здійснюється через зміну величини струму трансформатора шляхом переміщення електродів. Процес регулювання відбувається автоматично, але за потреби є можливість ручного управління. Кожен із ступенів трансформатора відповідає визначеній величині напруги, струму та потужності з боку низької напруги.

Перемикач трансформатора складається з кількох елементів: власне перемикача, який знаходиться в загальному баку трансформатора; контактора, розташованого в окремому баку, залитому трансформаторним маслом (цей бак не пов'язаний із маслом основного бака трансформатора); а також приводного механізму, закріпленого на стінці бака трансформатора. Бак контактора встановлено на стінці основного бака трансформатора.

Керування перемикачем здійснюється дистанційно. Приводний механізм оснащений двигуном змінного струму потужністю 400 Вт, який працює на напрузі 220-380 В при частоті 50 Гц. Також він має селективний індикатор положення перемикача, який живиться від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц.

Технічні характеристики стандартного трансформатора наведено нижче.

Маса трансформатора: маса виїмної частини – 10 000 кг; маса бака з арматурою – 2500 кг; маса масла – 5500 кг.

Пробивна напруга масла - не менше 20 кВ при експлуатації.

Однохвилинний додаток випробувального напруження при частоті 50 герц:

- обмотка ВН трансформатора – 31 кВ
- обмотка ПН трансформатора - 4,5 кВ
- обмотка реактора – 31 кВ.

Комплектація трансформатора:

- розширювачем для масла з масловказівником;
- вихлопна труба з мембраною, що діє при підвищенні тиску понад 0,5 атмосфер;
- термометричним сигналізатором;
- газове реле;

- маслоохолоджувачем;
- насосом із електродвигуном;
- електричним контактним манометром та сітчастим фільтром;
- адсорбером;
- катками з ребордами для пересування по колії 1524 мм.

КОРОТКА МЕРЕЖА

Коротка мережа використовується для подачі струму від виводів обмоток низької напруги трансформатора до рухомих контакторів струмопідведення електродотримачів. Вона виготовляється з жорстких пакетів мідних шин розміром 450х12 мм. Приєднання шин короткої мережі до виводів обмоток виконується за допомогою компенсаторів із гнучких мідних стрічок. Для забезпечення вертикального переміщення електродів зі струмопідведенням електродотримачів шинні мережі з'єднуються через гірлянди гнучких мідних кабелів.

З метою зменшення електричних втрат коротку мережу формують у вигляді шихтованих пакетів, у яких прямі та зворотні шини кожної фази розташовуються поперемінно. Поблизу печі ці пакети розгалужуються: прямі шини з'єднуються через кабельні гірлянди із струмопідведенням одного електродотримача, а зворотні — з іншим.

Таким чином, обмотки низької напруги трансформатора створюють трифазний трикутник на електродах. Пакети шин короткої мережі захищені від механічних пошкоджень та потрапляння сторонніх предметів сталевими листами товщиною 2 мм, встановленими зверху, знизу та збоку поблизу печі. Ці сталеві листи кріпляться безпосередньо до стяжок пакетів шин.

Передача струму від рухомих черевиків до контактних щок здійснюється неохолоджуваними мідними трубами діаметром 60/30 мм. Контактні щоки виготовляються з міді, загальна їх кількість становить вісім. Обслуговування та ремонт електроустаткування проводяться відповідно до графіка планово-попереджувальних ремонтів.

2.3.3 Механічне обладнання

КОЖУХ ПЕЧІ

Кожух печі має циліндричну форму і виготовлений із листової сталі марки Ст-3 завтовшки 24 мм. Конструкція кожуха є повністю зварною, оснащеною вертикальними та горизонтальними ребрами жорсткості для додаткової міцності.

СКЛЕПІННЯ ПЕЧІ

Піч РКЗ-16,5 має закрите склепіння, охолоджуване водою, виконане з металу та покрите вогнетривким матеріалом. Конструкція склепіння є роз'ємною і складається з 10 підвісних водоохолоджуваних зварних плит, оснащених завантажувальними воронками навколо електродів. Плити підвішуються до кришки печі за допомогою тяг із нержавіючої сталі діаметром 50 мм, які ізольовані від кришки. Центральна плита розділена на три окремі ізольовані секції, що охолоджуються і підтримуються водоохолоджуваними лапами, прикріпленими до торців плит.

Для виготовлення плит застосовується листова сталь марки Ст-3 товщиною 10 мм. Внутрішня порожнина для водяного охолодження має розмір 50 мм. Центральні секції плити виконано з литої міді, яка охолоджується водою через мідні труби, інтегровані в їх конструкцію, діаметром 60/30 мм. Плити зміцнюються штирями з дроту діаметром 8 мм, обгорнутими додатковим дротом діаметром 1 мм.

Нижня частина плит разом із завантажувальними воронками заповнюється вогнетривким бетоном товщиною 50 см, до складу якого входить глиноземистий цемент марки 700 і шамотний щебінь фракції 5–20 мм у пропорції 3:1. Суміш розводять водою до консистенції сметани. Верхня частина плит бетонується складом, що містить тонкомолотий кварцит і рідке скло зі щільністю 1,2 у співвідношенні 1:1.

ЕЛЕКТРОТРИМАЧ

Електродотримач складається з водоохолоджуваного кільця, контактних щік і натискних механізмів для цих щік. Кільце виготовляється з двох литих або зварних напівкілець, які шарнірно з'єднуються за допомогою бронзових втулок і двох сталевих пальців. Внутрішній діаметр кільця становить 1570 мм. У кожній контактній щоці встановлено натискний пристрій, що є невід'ємною частиною кільця. Цей механізм складається зі сталевої склянки, яка є єдиним цілим із кільцем, натискного штока, пружин, гайки та різьбової втулки. Регулювання сили натиску пружини здійснюється шляхом обертання різьбової втулки. Кільце та контактні щоки за допомогою підвісних конструкцій кріпляться до нижньої частини мантеля.

ГІДРОПІДЙОМНИКИ

Гідропідйомники застосовуються для вертикального переміщення електродів. Основними компонентами гідропідйомника є три плунжери, траверси та ущільнення.

Для запобігання перекосам електродів у верхній частині ущільнення встановлені напрямні ролики. Додатково, під парасолькою печі на спеціальних кронштейнах монтується ще один комплект напрямних роликів. У конструкції печей для усунення перекосів передбачені напрямні циліндри, забетоновані у перекриття на висоті +15,6 м.

Ключовим елементом гідропідйомника є плунжери, які забезпечують переміщення електродів. Вони вільно розташовуються на спеціальних склянках, закріплених на рамі ущільнення.

Три плунжери з'єднані між собою траверсою, яка також виконує функцію кріплення підвісного кожуха та пристрою для перепуску електродів.

Характеристика гідропідйомника

максимальна вантажопідйомність – 45 – 50 т

максимальний хід – 1500 мм

робочий тиск – 65 – 70 кг/см2

максимальний тиск – 100 кг/см^2

швидкість підйому – 0,5 м/хв.

робочий хід електрода – 800 – 1330 мм.

Переміщення здійснюється шляхом подачі оливи в плунжери гідропідйомника, які живляться від трьох маслонапірних установок, що функціонують паралельно. Для запобігання перевищенню ходу електродів у верхньому та нижньому напрямках встановлено кінцеві вимикачі. Вони автоматично відключають двигун маслонапірної установки, коли електрод досягає крайнього положення.

ФУТЕРУВАННЯ ПЕЧІ

Для футерування печей використовують такі вогнетривкі розчини: шамотний розчин, який застосовується для зв'язування шамотної цегли. Цей розчин готують із суміші меленого шамотного порошку та вогнетривкої глини в пропорції 3:1. Підготовка розчину здійснюється безпосередньо під час кладки печі, приблизно за годину до використання. Для заповнення швів між монтажними блоками застосовується вуглецева мастика або суміш графітового порошку з рідким склом. Перед нанесенням цю суміш нагрівають до отримання рідкої консистенції.

ПОРЯДОК ФУТУВАННЯ ПЕЧІ

На дно кожуха укладається азбестовий лист товщиною 15 мм. Бічні стінки кожуха печі обшиваються азбестовим листом, завтовшки 10 мм, який фіксується за допомогою рідкого скла. Потім насипається шар шамотної крупки товщиною 113 мм і злегка ущільнюється. Для контролю висоти цього шару використовується шамотна цегла, установлена на ребро як маяк. На крупку кладуть 13 рядів шамотної цегли марки Д-2, укладеної на плашку. Цегла розміщується насухо, щільно один до одного. Кожний ряд присипається мертелем, просіяним через сито з осередком 1х1 мм, який після цього ретельно розмітається віником. Зазор між цегляною кладкою і боковою поверхнею кожуха становить 100 мм.

Під час кладки кожних чотирьох рядів бічної стінки цей зазор заповнюється шамотною крупкою, просіяною через сито з осередком 3х3 мм. Горизонтальність кладки ретельно перевіряється на кожному ряду за допомогою дерев’яної рейки і рівня. На п'ятий ряд закладається одна термопара для вимірювання температури в центральній частині печі. Останні три ряди цегли в районі льотки кладуться на 700 мм вліво і вправо від осі, щільно прилягаючи до кожуха.

Після завершення укладання цегляної секції починається кладка вугільної подини. Вугільні блоки першого ряду розташовуються на вуглецевій мастиці під кутом 70° до осі льотки, без проміжків між ними. Вертикальні шви ретельно замазуються мастикою без надмірного витікання. Кожен новий блок щільно підганяється до попереднього за допомогою кувалди через дерев’яний брусок. По завершенню укладання першого ряду блоків викладається цегляне кільце з цегли Д-1 та Д-3, висота якого відповідає висоті нижнього ряду блоків. Зазор між цегляною кладкою і кожухом печі залишається рівним 100 мм. В районі льотки на відстань 700 мм ліворуч і праворуч цегла кладеться щільно до кожуха.

Верхній ряд вугільних блоків розташовується співвісно осі льотки. Кладка виконується аналогічно першому ряду, за винятком блоку Б-1, який виступає з отвору в кожусі на 200 мм. Після завершення укладання верхнього ряду блоків формується цегляне кільце аналогічно нижньому ряду, при цьому зазор шириною 100 мм між кожухом і кладкою заповнюють шамотною крупкою, крім області навколо льотки. У цьому місці, на 700 мм ліворуч і праворуч від блоку Б-1, цегла кладеться безпосередньо до кожуха.

Кладку нижнього ряду блоків обстановлення починають із встановлення льоткового блоку, після чого укладають інші елементи. Спочатку блоки розташовують насухо, щоб перевірити правильність їхнього положення в зоні льоткового вузла. Переконавшись у точності розташування нижнього ряду, блоки фіксують за допомогою мастики. Льотковий блок встановлюють на мастику, щільно прилягаючи до іншого блоку.

Цегляне футерування першого ряду блоків починають укладати з області навколо льотка. На відстані 700 мм вліво та вправо від льоткового блоку цеглу

кладуть до кожуха печі. Потім викладають три яруси арки над льотковим блоком і п'ять рядів укладеної на плашку цегли для вирівнювання футерування над цими елементами. Завершують футерування до рівня першого ряду блоків.

Між блоками та кладкою залишають проміжок 70-100 мм, який ущільнюють розігрітою подовою масою. Під час вирівнювання другого ряду блоків враховують перев’язку, яка повинна становити не менше 200 мм.

Після завершення укладання верхнього ряду блоків приступають до викладання цегляного кільця аналогічно нижньому ряду. У зоні льотків на відстані 700 мм вліво та вправо цеглу кладуть щільно до кожуха печі. Після закінчення кладки блоків обстановлення та льоткових вузлів виконують футерування цеглою марки Д-1, Д-2, Д-3 і Д-4, усього в 22 ряди.

Зазор між цегляною кладкою і кожухом печі становить 100 мм і заповнюється шамотною крихтою.

СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ ПЕЧІ

Охолодженню водою підлягають деталі та функціональні вузли, які взаємодіють із високими температурами:

- Контактні щоки попарно (12 підводів і 12 відводів). Разом з щоками охолоджуються рухливі та струмові труби.

- Кожне півкільце електродотримача із підвісками охолоджується окремо (всього 6 підводів і 6 відводів).

- Кільце мантеля з траверсою на кожному електроді охолоджується в комплексі (загалом 3 підводи і 3 відводи).

- Склепіння охолоджується через 7 підводів і 7 відводів. Охолодження проводиться одночасно для трьох плит і трьох контурів плит, а хрестовина – окремо.

- Воронки мають 9 підводів і 9 відводів на одну піч.

- Склянки газоходів обладнані двома підведеннями і двома відведеннями.

- Екрани на горні також охолоджуються.

- Центральні чотири труботічки обладнані 4 підводами та 4 відводами.

- Нерухомі черевики охолоджуються через 3 підводи і 3 відводи.

- Кожух ванни печі охолоджується із зовнішнього боку.

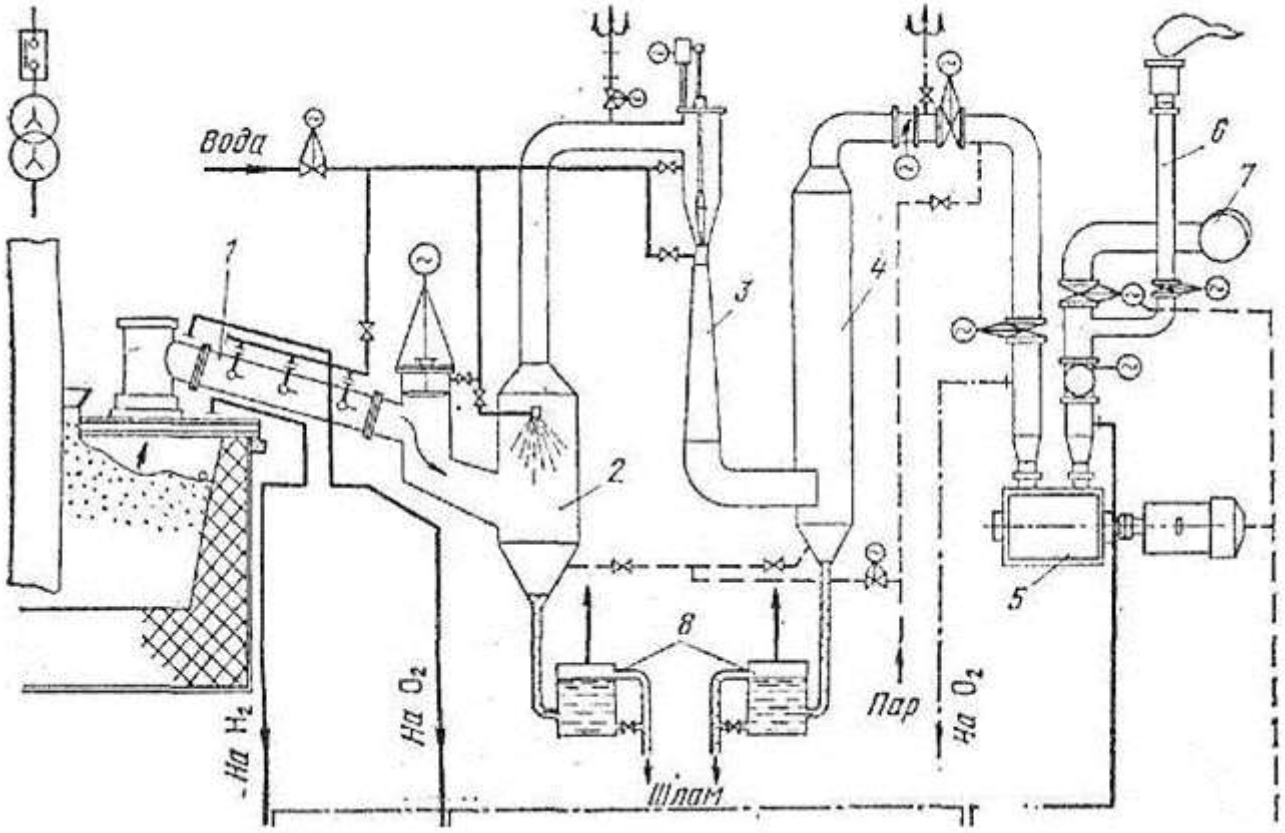
Для охолодження використовується технічна вода під тиском 2,5–3,0 атм. На кожній печі передбачено відведення води від центральної магістралі до напірного колектора, від якого ведуться труби з гнучкими шлангами, що забезпечують подачу води до необхідних вузлів. Для стабільної роботи печі потрібен постійний контроль за подачею та відведенням води, а також за її температурою. Температура відведеної води не повинна перевищувати 50–60°С. Труби для подавання та відведення води позначені відповідно до фаз та деталей.

У випадку зупинки циркуляції води в системі чи певних вузлах або елементах, піч негайно вимикається з подальшим оперативним усуненням неполадок у системі водоохолодження. Робота печі за наявності витоку води суворо заборонена, адже вкрай небезпечним є попадання води під склепіння, що може спричинити вибух. Для забезпечення безпеки на печі встановлено прилади моніторингу вмісту водню в газовій суміші під склепінням.

ГАЗООЧИЩЕННЯ

Система відведення та очищення газів (рисунок 2.2) складається з двох паралельних ліній, які функціонують у черговому режимі. Газ, що виділяється зі склепіння печі, потрапляє до похилого газоходу 1, який омивається водою, а далі – до скрубера 2. У цих елементах відбувається попереднє очищення газу від пилових домішок. На наступному етапі газ проходить через трубу Вентурі 3, яка забезпечує тонке очищення, і продовжує рух до краплевідокремлювача 4 для видалення залишків вологи.

Після очищення газ надходить у колектор 7 для подачі споживачеві, а його надлишок спрямовується на спалювання у свічці. Розрідження в системі створюється турбогазодувкою 5. Шлам, що утворюється в процесі очищення, накопичується у шламонакопичувачі 8. Тиск під склепінням підтримується на рівні 2–5 Па, а температура газу становить 500–600 °С. Первинний склад газу із закритих печей містить 0,01–0,1 кг/м³ пилу, тоді як після очищення його обсяг знижується до 0,01–0,03 г/м³.



1 – похилий газохід; 2 – скрубер; 3 – труба Вентурі; 4 – краплевідділювач; 5 – турбогазодувка; 6 – свічка; 7 – колектор; 8 – шламонакопичувач

Рисунок 2.2 – Схема газоочищення РКЗ-16,5

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Короткі відомості про фізико-хімічні властивості кремнію та його сполук

Кремній — хімічний елемент із сіро-сталевим кольором, атомною масою 28,09, температурою плавлення 1414 °C та температурою кипіння 2287 °C.

У сполуках із киснем кремній утворює два оксиди: SiO (монооксид кремнію) з високою пружністю пари та температурою кипіння 1890 °C і SiO_2 (кремнезем) з температурою плавлення 1713 °C. У взаємодії з вуглецем кремній формує карбід SiC (карбід кремнію), який залишається кристалічним при всіх температурах, характерних для виплавки феросиліцію.

Залізо в рідкому стані має необмежену розчинність з кремнієм, утворюючи ряд силіцидів заліза: Fe_3Si, FeSi, $FeSi_2$, Fe_3Si_2. Серед цих сполук найбільш міцним є FeSi, який плавиться при температурі 1410 °C.

3.2 Властивості і застосування кристалічного кремнію

Виплавлення кристалічного кремнію в рудно-відновлювальних електричних печах здійснюється шляхом реакції між оксидами кремнію й алюмінію та вуглецевим відновником за умов високих температур, що досягають 1800–2400 °C. Процес відновлення оксидів кремнію загалом можна описати таким рівнянням:

$$SiO_2+2C=Si+2CO$$

Вуглець як відновник характеризується рядом властивостей, завдяки яким він широко застосовується:

1. У ході відновлення вуглецем утворюється газоподібний продукт — монооксид вуглецю (CO). Постійне виділення цього газу сприяє зміщенню хімічної рівноваги реакцій у напрямку утворення металів.

2. Відновна здатність вуглецю зростає при підвищенні температури. Це дозволяє відновлювати оксиди металів різної складності й, за сприятливих умов, одержувати практично всі метали.

3. Матеріали на основі вуглецю (наприклад, металургійний кокс, деревне вугілля, низькозольні вугілля, пековий і нафтовий кокс тощо) доступні за ціною, що робить їх використання економічно вигідним.

Однак разом із перевагами вуглець має і деякі недоліки:

1. Під час відновлення оксидів можливі втрати металу та ускладнення процесу випуску сплавів із печі через утворення карбідів, зокрема карбіду кремнію (SiC).

2. Процес відновлення з застосуванням вуглецю вимагає значної кількості теплової енергії, особливо при високих температурах.

Водночас використання вуглецевих відновників частково компенсує потребу у додатковому теплі завдяки виділенню енергії при їх згоранні в реакціях окиснення:

$$2C+O_2=2CO+52832кал,$$
$$C+O_2=CO_2+94052кал$$

Відновлення SiO_2 вуглецем починається при температурі 1660°С. Це означає, що для запуску реакції необхідно витратити значну кількість теплової енергії, а також забезпечити високі температури в зоні, де відбуваються реакції. У ході цього процесу утворюється нижчий оксид кремнію SiO внаслідок таких реакцій:

$$SiO_{2(ж)} + C = SiO_{(газ)} + CO;$$
$$SiO_{2(ж)} + Si_{(ж)} = 2SiO_{(газ).}$$

Оксид кремнію SiO при температурі, необхідній для виплавки кристалічного кремнію, може перебувати в газовій фазі та розчинятися у шлаках.

Згідно з даними І. С. Куликова, рівноважна газова фаза над розплавленим кремнеземом при температурі 1728°С містить 45,9% SiO, 42,4% O_2, 5,1% SiO_2 та 6,6% О.

Під час контакту з кремнієм відбувається зростання концентрації SiO внаслідок реакції:

$$SiO_{2(ж)} + Si_{(ж)} = 2SiO_{(газ).}$$

Можливе відновлення SiO_2 та з газоподібної фази за реакціями:

$$SiO_{2(газ)} + C_{тв} = SiO_{(газ)} + CO,$$
$$SiO_{(газ)} + C = Si_{(ж)} + CO.$$

Чистий кремній має температуру кипіння 2617°С, і його концентрація в газовій фазі за умов плавлення кремнієвих сплавів не є суттєвим фактором. Проте утворення газоподібних оксидів спричиняє неповне вилучення кремнію з шихти в метал. При цьому у вихідних газах містяться частинки оксидів, що створює додаткові труднощі під час експлуатації закритих печей.

Газоподібний оксид кремнію (SiO) вступає у взаємодію з вуглецем відповідно до таких реакцій:

$$SiO_{(газ)} + C = Si_{(ж)} + CO,$$
$$SiO_{(газ)} + 2C = SiC_{(ТВ)} + CO.$$

У холодних зонах печі у верхній частині колошника йде реакція розкладання:

$$2SiO_{(газ)} = Si_{(ж)} + SiO_2.$$

Продукти розкладання SiO можна знайти на холодних ділянках електродотримача та у газоходах. Вони проявляються у вигляді коричневих, жовтих або інших мохоподібних відкладень та натіків.

Процес відновлення SiO_2 супроводжується утворенням карбіду кремнію (SiC), який формується в результаті хімічної реакції відновлення SiO_2 до SiC.

$$SiO_2 + 3C = SiC_{(тв)} + 2CO$$

можливо вже за 1605°C, тоді як температура початку реакції

$$SiO_{2(тв)} + 2C = Si_{(ж)} + 2CO$$

складає 1660°C.

Крім того, легко протікає і реакція:

$$SiO_{(газ)} + 2C = SiC + CO.$$

Утворення карбіду кремнію (SiC) у ваннах печей значно ускладнює процес відновлювального плавлення. Зокрема, на подові печі утворюється настил — гарнісаж, який перешкоджає сходу шихти. Це призводить до зменшення реакційної зони поблизу електродів, підвищення електропровідності шихти та інших негативних наслідків. Проте виникнення SiC є неминучим, адже в процесі відновлення оксиди спочатку перетворюються на карбіди, а вже потім на метали.

Карбіду кремнію властиво розкладатися за високих температур, зокрема при 2217°C і 1752°C, у реакції з оксидами кремнію.

$$SiC + 2SiO_2 = 3SiO + CO,$$
$$SiC + SiO = 2Si + CO.$$

Кремній має унікальні властивості та широке застосування в різних галузях промисловості. За температури понад 2800 °C карбід кремнію (SiC) розкладається на вуглець і кремній. Аморфний кремній бурого кольору отримують шляхом відновлення чистого діоксиду кремнію магнієм або алюмінієм. Натомість кристалічний кремній утворюється під час відновлення вуглецем кремнезему в електродугових печах. У процесі охолодження цей матеріал набуває кристалічної структури, що надає йому високої твердості, хоча і зберігає крихкість. Чистий кремній зазвичай має синюватий відтінок, який характерний для матеріалу, отриманого з печей під час їхнього ремонту; такий кремній має мінімальну кількість домішок. Водночас домішки алюмінію та кальцію надають йому сталевий блиск і відтінок.

У природі кремній у чистому вигляді не зустрічається. Температура плавлення діоксиду кремнію (SiO_2) становить 1710 °C. Цей хімічний елемент утворює з металами сполуки, які називаються силіцидами. Він також здатен руйнувати карбіди металів, утворюючи силіциди, при цьому виділяючи вільний вуглець у вигляді графіту.

Кристалічний кремній широко використовується у виробництві кремнемідних сплавів, синтетичного силуміну, крем'янистих бронз, легких алюмінієвих ливарних сплавів, а також знаходить застосування в хімічній промисловості та різних технічних галузях. Як легуюча добавка, він підвищує твердість, міцність і пружність сталі, одночасно знижуючи її в'язкість. Кремній також сприяє поліпшенню магнітних властивостей сталі і широко застосовується для легування електротехнічних сталей. Крім того, його використовують як ефективний розкислювач у спеціальних сплавах на основі кольорових металів.

Особливо чистий кристалічний кремній виготовляється із сировини найвищих сортів. Його виплавлення здійснюють згідно з вимогами стандарту ГОСТ 2169-69 (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад кремнію кристалічного за ГОСТ 2169-69

Марка кремнію	Хімічний склад, %				
	домішки, не більше				
	кремній, не менше	залізо	алюміній	кальцій	сума визначених домішок
КР00	99,0	0,4	0,4	0,4	1,0
Кр0	98,8	0,5	0,4	0,4	1,2
Кр1	98,0	0,7	0,7	0,6	2,0
Кр2	97,0	1,0	1,2	0,8	3,0
Кр3	96,0	1,5	1,5	1,5	4,0

Примітки:

1.Вміст кремнію встановлюється як різниця між 100% і сумою домішок, що визначаються.

2. У кремнії, призначеному для виробництва алюмінієвокремнієвих сплавів, допускається підвищений порівняно з нормами таблиці вміст алюмінію (без збільшення суми домішок, що визначаються).

3. У кремнії, призначеному для синтезу кремнійорганічних сполук, що містять титану не повинно перевищувати 0,3% (з відповідним збільшенням суми домішок, що визначаються).

3.3 Технічні характеристики кристалічного кремнію

Хімічний склад кремнію повинен відповідати нормам, зазначеним у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад кремнію

Марка	Кремній у межах, %	Масова частка, %					
		Не більше					
		Fe	S	P	Al	Mn	Mg
Кр3	96 – 99	0,27	0,01	0,02	0,25	0,3	0,01

Кремній виготовляють у вигляді гранульованих шматків масою до 25 кг та чушок масою до 45 кг. Частка дрібних фракцій, яка проходить крізь сито з отворами 20х20 мм, не повинна перевищувати 12% загальної маси партії. При формуванні партії допустима різниця в масовій частці кремнію між окремими плавками не може перевищувати 3%. Поверхня чушок і шматків кремнію повинна бути рівною, без явно виражених включень шлаку, піску або інших сторонніх матеріалів. На поверхні допускаються сліди використання протипригарних матеріалів.

Розмір шматків визначають за номінальними розмірами сторін квадратного осередку сітки у світлі.

Кремній постачається у вигляді партій, кожна з яких має складатися з продукції однієї чи кількох плавок однієї марки та супроводжуватися єдиним документом про якість. У процесі формування партії допускаються операції дроблення, змішування, сортування та розливання у багатошарові зливки з товщиною кожного шару не більше 50 мм. При цьому масова частка кремнію в кожній окремій плавці партії повинна відповідати встановленим показникам для даної марки кремнію.

Таблиця 3.3 – Дроблення кремнію за класами крупності

Клас крупності	Розмір шматків, мм	Масова частка продукту партії 5%	
		Над ґратами	Під ґратами
1	150 ÷ 315	10	10
2	50 ÷ 200	10	10
3	20 ÷ 100	10	10
4	10 ÷ 50	10	10
5	3,2 ÷ 20	10	10
6	3,2 ÷ 10	10	10
7	< 3,2	10	-
8	< 2	10	-

3.4 Рафінування кремнію

Під час виплавки кремнію оксиди Al_2O_3, CaO, MgO, TiO_2 та інші домішки, що містяться в кварциті, деревному вугіллі, нафтовому коксі, газовому вугіллі та електродах, не завжди відновлюються повністю. Невідновлені оксиди алюмінію та кальцію взаємодіють із кремнеземом, утворюючи шлаки, які залишаються у складі кремнію як у вигляді великих скупчень, так і у формі мікроскопічних включень.

У виробничій практиці як в Україні, так і за кордоном існує кілька способів очищення кремнію від домішок:

1. Окислення алюмінію та кальцію за допомогою вуглекислого газу, повітря або хлору.

2. Обробка кислотами, наприклад, сірчаною чи соляною, або їх сумішами.

3. Вилучення неметалічних домішок шляхом витримки кремнію у розплавленому стані, що дозволяє шлаковим включенням коагулювати та перейти в окрему фазу.

Шлак має щільність близько 2,8 г/см³, що трохи перевищує щільність чистого кремнію (2,4 г/см³). Температура плавлення шлаку становить приблизно 1450 °C— на 10 °C більше, ніж температура плавлення чистого кремнію. При температурі 1500 °C його в'язкість складає 25–30 пз. У рідкому стані дрібні частинки шлаку поступово коагулюють у більші прожилки й осідають на дно ковша чи виливниці через вищу щільність.

З огляду на ці властивості кремнію та шлаку, можливо здійснювати очищення кремнію від домішок шляхом відстоювання у міксерах-відстійниках із обігрівом або інших пристроях, які встановлюють під струмінь розплавленого кремнію при його виході з печі.

Основні підходи до рафінування полягають у наступному:

1. Очищення рідкого кремнію методом окислення домішок за допомогою агентів на основі повітря, кисню або галогенів у суміші з інертним газом чи іншими газовими середовищами, які містять кисень.

2. Очищення твердого кремнію: приводять обробку галогенами при високих температурах, термічну обробку в середовищі з воднем або розпилюють порошкоподібний кремній для очищення соляною чи сірчаною кислотою.

Запропоновано вдосконалити процес рафінування шляхом застосування більш простого апаратурно-технологічного способу очищення кремнію у газових ковшах. Перед початком роботи ківш розігрівають до температури 1100 °C і після цього розміщують під льотку печі для початку рафінування.

При випуску кремнію в ківш його температура становить 1550–1580 °C, а при виливанні з ковша — вже 1450–1480 °C.

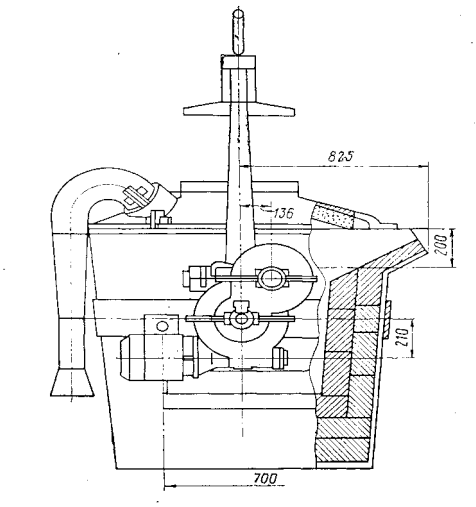


Рисунок 3.1 – Газовий ківш для рафінування кристалічного кремнію

Таблиця 3.4 – Результати рафінування кремнію у газовому ковші

Номер досліду	Вміст домішок, %					
	у вихідному кремнії			у кремнії після рафінування		
	Fe	Al	Ca	Fe	Al	Ca
1	0,42	0,41	0,66	0,46	0,16	0,27
2	0,42	0,41	0,66	0,57	0,22	0,39
3	0,50	0,72	-	0,52	0,30	0,36
4	0,60	0,28	0,81	0,59	0,25	0,21
5	0,44	0,14	0,48	0,54	0,14	0,17
6	0,34	0,30	1,0	0,48	0,19	0,46
7	0,40	0,21	1,07	0,38	0,23	0,63
8	0,44	0,20	0,79	0,28	0,12	0,31
9	0,44	0,20	1,06	0,45	0,14	0,32
10	0,34	0,17	0,76	0,22	0,12	0,27
11	0,36	0,34	0,85	0,22	0,10	0,25
12	0,75	0,41	0,76	0,74	0,11	0,31
13	0,81	0,17	0,46	0,93	0,09	0,28
14	0,91	0,29	0,53	0,62	0,15	0,28

У таблиці 3.4 представлено результати рафінування кремнію в газовому ковші, які демонструють, що ступінь очищення кремнію від алюмінію сягає близько 40%, а від кальцію — близько 60%. Водночас існуючий метод рафінування потребує подальшого вдосконалення для досягнення кращої ефективності процесу.

3.5 Характеристика сировини для виробництва кремнію

Сировиною для виробництва кристалічного кремнію служать породи, що містять кварц. Як відновник використовують різноманітні вуглецеві матеріали з низьким вмістом золи. Процес отримання кристалічного кремнію є безшлаковим, однак це можливо лише за умови плавки чистої сировини. Через те що в природному кварциті та в золі відновника наявні сторонні домішки, під час плавки утворюється 2–3% шлаку (від маси кремнію). Це погіршує процес плавлення, а присутність домішок у сировині негативно впливає на якість кінцевого продукту. Тому до чистоти вихідних матеріалів висуваються особливі вимоги.

Кварц є природною мінеральною формою кремнезему, яка вирізняється високою чистотою. У земній корі його поклади часто зустрічаються у формі пластів, гнізд, лінз або інших структурних утворень, складених неконсолідованими між собою кристалами різної величини. Щільність кварцу становить 2,59–2,65 г/см³, а твердість дорівнює 7.

Перед плавкою кварцовий пісок обов’язково підлягає спеціальній підготовці, що включає такі технологічні процеси, як брикетування чи виготовлення котунів. Завдяки необмеженим запасам кварцових пісків, низькому вмісту домішок і економічності, цей тип сировини вважається перспективним для виготовлення кристалічного кремнію.

Серед фізичних властивостей кварциту, які сприяють ефективній технології виплавки кремнію, варто виділити його високу механічну міцність, невелике водопоглинання та достатню термічну стійкість.

Для вибору вуглецевого матеріалу як відновника при плавці кремнію висуваються три ключові вимоги: висока відновлювальна здатність, значний електричний опір і низький вміст золи. Остання та її склад суттєво впливають на реакційну здатність відновника. Зокрема, сполуки оксиду кальцію та оксиду заліза сприяють підвищенню цієї здатності, тоді як присутність кремнезему чи глинозему її знижує. Через це важливо відсівати дрібні фракції вуглецевих матеріалів, які мають підвищений вміст золи із часточками піску та глини.

Окремо варто зазначити, що в золі деревного вугілля присутні лужні оксиди Na_2O і K_2O. Вони сприяють розрідженню шлаку, завдяки чому той легше виходить із печі разом із кремнієм. Проте водночас луги знижують температуру плавлення у печі, що може негативно позначитися на процесі.

Деревне вугілля вважається одним із найякісніших відновників, який відповідає багатьом важливим вимогам, необхідним для процесів плавки. Воно має низький рівень зольності (1,8–4,0%) і дуже незначну кількість оксиду заліза в золі (0,6–3,4%), що в перерахунку на його загальний вміст у деревному вугіллі складає 0,01–0,05% (це більш ніж удвічі менше, ніж у нафтовому коксі). Висока реакційна здатність деревного вугілля сприяє пришвидшенню відновлювальних реакцій, а великий питомий електроопір дозволяє використовувати глибоко посаджені електроди в шихті навіть при високій робочій напрузі.

Для виробництва кристалічного кремнію деревне вугілля повинно відповідати таким основним вимогам: зольність не вище 3%, вміст летких речовин до 20%, вологість під навантаженням не більше 10%, наявність саджанців і сторонніх домішок не більше 2%, а частка шматків менше 25 мм повинна становити не більше 5%.

Якість і властивості нафтового коксу значною мірою визначаються характеристиками вихідної сировини, а також швидкістю та умовами коксування. Через низьку реакційну здатність і високу електропровідність нафтовий кокс не використовується як повна заміна деревного вугілля. Зазвичай його додають у кількості до 25% від маси деревного вугілля з метою зменшення вмісту кальцію і алюмінію у виплавленому кремнії.

Молоде низькозольне кам'яне вугілля також застосовується у виробництві кристалічного кремнію. Це так звані газові вугілля, що характеризуються високим вмістом летючих речовин (30–37%), хорошою реакційною здатністю та значним електричним опором. Низькозольні газові вугілля підлягають механічному збагаченню, у результаті чого утворюється газовугільний концентрат (ГК). Окрім того, газове вугілля є економічно вигідним матеріалом завдяки своїй порівняно

низькій вартості. Нині розроблено методи хімічного збагачення таких вугілля, які дозволяють отримувати концентрати з рівнем оксиду заліза менше ніж 0,1%.

Ще одним матеріалом є торф'яний кокс, який виробляють шляхом випалу торфу при температурі 300–600 °C. Він містить 5–10% летючих речовин та 10–19% золи. У складі золи, зокрема, присутні такі компоненти: 33–35% SiO_2, 10–15% Fe_2O_3, 8–24% Al_2O_3, 32–38% CaO, 2,2–2,8% MgO. Торф'яний кокс можна використовувати для виробництва кремнію з низьким вмістом заліза, якщо попередньо очистити його від шкідливих домішок.

3.6 Фізико-хімічні умови відновлення кремнію

Якщо суміш кремнезему та вуглецю нагріти до певних температур, то між цими речовинами можуть відбуватися реакції за рівняннями:

$SiO_{2\ тв,\ ж} + 2C = Si_{\ ж} + 2\ CO_{\ газ}$ $\Delta G^o = 40095 - 87\ T$ (3.1)

$C_{тв} + Si\ ж = SiC_{тв} + 2CO_{\ газ}$ $\Delta G^o = -\ 6444 + 9\ T$ (3.2)

$SiO_{2\ тв,\ ж} + 3C_{\ тв} = SiC_{\ тв} + 2CO_{\ газ}$ $\Delta G^o = 33652 - 78\ T$ (3.3)

$SiO_{2\ тв,\ ж} + 2SiC_{\ тв} = 3Si_{\ ж} + 2CO_{\ газ}$ $\Delta G^o = 52983 - 105\ T$ (3.4)

Рівняння зміни стандартного ізобарного потенціалу використовують для визначення умов рівноваги системи за умови, що реагуючі речовини перебувають у стандартних станах. Такі умови реалізуються, наприклад, під час виплавки кристалічного кремнію, коли як шихта використовується чистий кварц. У цьому випадку шихта не містить заліза та інших металів, які могли б розчиняти кремній або руйнувати карбід кремнію, а також оксидів, здатних взаємодіяти з кремнеземом чи розчиняти його. Таким чином, у реакціях (3.1) – (3.4) змінюються лише кількісні співвідношення фаз, але їх якісний склад залишається незмінним. Кремнезем, вуглець, кремній та карбід кремнію перебувають у формі чистих речовин і відповідають стандартним станам згідно з рівняннями реакцій. Відновлення кремнію відбувається при майже атмосферному тиску, завдяки чому утворений оксид вуглецю також залишається у стандартному стані. Отже, припускаючи, що

ΔG^o дорівнює нулю, можливо розрахувати температуру, за якої реакція досягає стану рівноваги.

Температура початку реакції ($\Delta G^o = 0$), 1657 ^oC

Температура початку реакції ($\Delta G^o = 0$), 2727 ^oC

Температура початку реакції ($\Delta G^o = 0$), 1537 ^oC

Температура початку реакції ($\Delta G^o = 0$), 1847 ^oC

Реакції (3.1), (3.3) та (3.4) є ендотермічними, тому підвищення температури сприяє їх більш повному перебігу. Реакція (3.2), навпаки, має екзотермічний характер. Розрахована температура відповідає моменту, коли реакція починає відбуватись у прямому напрямку, тобто стартує процес розкладання карбіду кремнію з утворенням рідкого кремнію та твердого вуглецю. У випадку наявності заліза у складі шихти одночасно з відновленням кремнію починається утворення силіцидів заліза.

Таблиця 3.5 - Зміна стандартного ізобарного потенціалу при відновленні вуглецю кремнезему в присутності заліза або силіцидів заліза

№п/п	Рівняння реакції	Зміна стандартного ізобарного потенціалу, кДж	Температура Початки реакції ($\Delta G^o = 0$), ^oC
1	$SiO_{2\ тв,\ ж} + 2C_{тв} + 3Fe_{\ ж} = Fe_3Si_ж + 2CO_{газ}$	$\Delta G^o = 33652 – 86T$	1367
2	$4SiO_{2\ тв,\ ж} + 8C_{\ тв} + 5Fe_3Si_ж = 3Fe_5Si_{3ж} + +8CO_{газ}$	$\Delta G^o = 141050 – 333T$	1502
3	$2SiO_{2\ тв,\ ж} + 4C_{\ тв} + Fe_5Si_{3\ ж} = 5FeSi_{3\ ж} + 2C_{тв} + + FeSi_{\ ж} + 4\ CO_{газ}$	$\Delta G^o = 7446 – 168,5T$	1577
4	$SiO_{2\ тв,\ ж} + 2C_{\ тв} + FeSi_{\ ж} = FeSi_{2ж} + 2\ CO_{газ}$	$\Delta G^o = 38830 – 85.3T$	1637

Утворення силіцидів заліза, яке супроводжується зниженням ізобарного потенціалу, сприяє ефективнішому перебігу процесу відновлення кремнію (таблиця 3.5). У крайньому стовпці таблиці 3.5 вказані температури, при яких можливий початок відповідних реакцій. Аналіз цих даних у порівнянні з температурами

початку реакції відновлення кремнію за відсутності заліза свідчить, що присутність заліза або нижчих силіцидів заліза суттєво знижує температуру, необхідну для запуску реакції відновлення кремнію. Варто зауважити, що зі збільшенням вмісту кремнію у сплаві його вплив на подальше відновлення кремнію стає менш значним.

У процесі взаємодії кремнезему з вуглецем утворюється карбід кремнію, який, потрапляючи в зону дуже високих температур, може вступати у реакцію з кремнеземом. У результаті цієї взаємодії утворюється рідкий кремній та оксид вуглецю згідно з реакцією (3.4). Наявність заліза або нижчих силіцидів заліза значно сприяє протіканню цього процесу, спрощуючи взаємодію карбіду кремнію з кремнеземом і дозволяючи руйнації карбіду кремнію проходити при нижчих температурах, як наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Зміна стандартного ізобарного потенціалу при взаємодії карбіду кремнію із залізом або силіцидами заліза та кремнеземом

№п/п	Рівняння реакції	Зміна стандартного ізобарного потенціалу, кДж	Температура початку реакції ($\Delta G^o = 0$), ^oC
1	$2SiC_{тв} + SiO_{2\ тв,\ ж} + 9Fe_{ж} = 3Fe_3Si + 2CO_{газ}$	$\Delta G^o = 35084 – 105T$	1127
2	$8SiC_{тв} + 4SiO_{2\ тв,\ ж} + 15Fe_3Si_{ж} = 9Fe_5Si_{3\ ж} + 8CO_{газ}$	$\Delta G^o = 160477 – 377T$	1507
3	$4SiC_{тв} + 2SiO_{2\ тв,\ ж} + 3Fe_5Si_{3ж} = 15FeSi_{ж} + 4CO_{газ}$	$\Delta G^o = 89690 – 195T$	1647
4	$2SiC_{тв} + SiO_{2\ тв,\ ж} + 3FeSi_{ж} = 3FeSi_{2\ ж} + 2CO_{газ}$	$\Delta G^o = 49642 – 101T$	1797

3.7 Розрахунок матеріального балансу для виплавлення Кр3

РОЗРАХУНОК ШИХТИ ДЛЯ ПЛАВКИ Кр3

Розрахунок ведемо на 100 кг кварциту.

СИРОВИНІ МАТЕРІАЛИ:

Кремнійвмісні матеріали. У феросплавному виробництві використовують переважно доступні за ціною матеріали з високим вмістом кремнезему, такі як кварцит та кварц.

Кварцит, призначений для виплавки кремнієвих сплавів, має відповідати таким вимогам:

1) вміст SiO_2 повинен становити не менше 96,0% (в межах 96-99%);

2) вміст P_2O_5 допускається трохи більше 0,02%;

3) кількість небажаних шлакоутворюючих домішок (Al_2O_3, MgO, CaO) повинна бути мінімальною;

4) вологопоглинання кварциту повинно перевищувати 5%;

5) матеріал має бути механічно міцним, а під час дроблення й нагрівання утворювати мінімальну кількість дрібних частинок. Кварцит із наявністю вуглецю не підходить для плавки, адже під час нагрівання він розтріскується, що погіршує вентиляцію шихти.

Відновлювач. Для виробництва сплавів кремнію як відновник застосовують металургійний кам’яновугільний кокс, нафтовий і пековий кокс, а також деревне вугілля. Ефективний відновник повинен мати кілька важливих характеристик: високу реакційну здатність, низький вміст золи, летких речовин і вологи, достатню механічну міцність, високий електроопір, стабільний розмір шматків і доступну вартість.

Основним відновником є коксик, який отримують у вигляді відсіву під час виробництва металургійного коксу. Вміст фосфору в коксику не повинен перевищувати 0,06%. Окрім того, у його складі присутня шлакоутворююча зола, кількість якої варіюється в межах 8–15%.

Детальний склад вихідних матеріалів представлений у таблиці 3.7.

Приймаємо на підставі дослідних даних наступний розподіл оксидів у процесі плавки, а також розподіл відновлених елементів. Кремнезем відновлюється як до Si, так і SiO, який переходить в шлак.

Таблиця 3.7 – Склад вихідних матеріалів

Матеріали	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	P_2O_5	TiO_2	SO_3
Кварцит митий	99,00	0,13	0,55	0,15	0,10	0	0,07	0
Коксик сушений	0	0	0	0	0	0	0	0
Зола коксика	48,70	20,00	24,00	5,00	1,00	0,30	0	1,00
Залізна стружка	0	0	0	0	0	0	0	0,03
Електродна маса	0	0	0	0	0	0	0	0
Зола ел. маси	50,00	10,00	30,00	7,00	2,00	0	0	1,00
Матеріали	P	Fe	Mn	Si	C	Зола	Волога	Летючі
Кварцит митий	0	0	0	0	0	0	1,00	0
Коксик сушений	0	0	0	0	85,00	10,00	1,00	4,00
Зола коксика	0	0	0	0	0	0	0	0
Залізна стружка	0,03	2,00	0,40	88,00	0,24	0	5,00	4,00
Електродна маса	0	0	0	0	85,00	10,00	0	5,00
Зола ел. маси	0	0	0	0	0	0	0	0

Приймаємо наступний розподіл оксидів у процесі плавки:

Окисли	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	P_2O_5	MgO	SO_3	TiO_2
Відновлюється, %	98,00	99,0	80,0	40,0	100,0	0,0	100,0	0
Переходить у шлак, %	2,0	1,0	20,0	60,0	0,0	100,0	0,0	100

Приймаємо наступний розподіл відновлених елементів:

Елементи	Si	Fe	Al	Ca	P	S	SiO
Переходить у метал, %	100,0	95,0	90,0	85,0	50,0	0,0	0,0
Випаровується,%	0,0	5,0	10,0	15,0	50,0	100,0	100,0

* - Відновлюється, %:

до Si91,0

до SiO7,0

РОЗРАХУНОК ВІДНОВЛЮВАЧА

Потреба у вуглеці для відновлення оксидів кварциту розрахована у таблиці 3.8

Таблиця 3.8 – Кількість кисню, що виділяється при відновленні оксидів кварциту

Окисел	Зі 100 кг кварциту відновлюється, кг	При відновленні виділяється кисню, кг
SiO_2 до Si	90,09	48,048
SiO_2 до SiO	6,93	1,848
Fe_2O_3 до Fe	0,1287	0,039
Al_2O_3 до Al	0,44	0,207
CaO до Ca	0,06	0,017
Усього		50,159

Кількість кисню, що виділяється, зв’язується з оксидом вуглецю за рівнянням: $C + 1/2O_2 = CO$. Кількість вуглецю можна розрахувати за формулою $M = 2 \cdot 12 / 16$. Таким чином, для зв’язування кисню в оксид вуглецю необхідно використати вуглець у кількості 37,6191 кг.

Частина вуглецю, яка вводиться разом із коксиком, витрачається на відновлення оксидів золи коксика.

Розрахунок кількості кисню, що виділяється під час відновлення золи коксика, наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Кількість кисню, що виділяється при відновленні золи коксика

Окисел	Зі 100 кг коксу відновлюється, кг	При відновленні виділяється кисню, кг
SiO_2 до Si	4,432	2,364
SiO_2 до SiO	0,341	0,091
Fe_2O_3 до Fe	1,980	0,594
Al_2O_3 до Al	1,920	0,904
CaO до Ca	0,200	0,057
P_2O_5 до P	0,03	0,017
SO_3 до S	0,10	0,06
Усього		4,086

Кількість вуглецю необхідну для протікання відновлювальних реакцій розраховуємо аналогічно розрахунку вуглецю для оксидів кварциту.

Для відновлення цих оксидів потрібно вуглецю, кг: 3,065

З наявних в 100 кг коксу 85 кг вуглецю буде витрачено:

на відновлення оксидів золи, кг 3,065

на відновлення оксидів кварциту, кг 81,94

Кількість коксу, необхідне відновлення 100 кг кварциту визначаємо по формулі:

$C_{на\ кварцит} \cdot 100/C_{на\ відн.окислів\ кварциту}$, тоді кількість коксика необхідне відновлення 100 кг кварциту, кг: 45,913

За умови, що коксик згоряє на колошнику і витрачається на навуглецювання сплаву, %:

Маємо: 8

Кількість коксика необхідне відновлення 100 кг кварциту, кг: 49,906

Вуглець електродів бере участь у реакціях відновлення. Витрата електродної маси на 1т кварциту (при Кр3) дорівнює:

Кількість електродної маси, кг: 4,00

Електродна маса містить золу, оксиди якої також частково відновлюються.

Розрахунок кількості кисню, що виділяється при відновленні золи електродної маси, наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Кількість кисню, що виділяється при відновленні електродної маси

Окисел	З 4,0 кг електродної маси відновлюється, кг	При відновленні виділяється кисню, кг
SiO_2 до Si	0,182	0,097
SiO_2 до SiO	0,014	0,004
Fe_2O_3 до Fe	0,040	0,012
Al_2O_3 до Al	0,096	0,045
CaO до Ca	0,011	0,003
SO_3 до S	0,004	0,002
Усього		0,163

Для зв'язування кисню в окис вуглецю необхідно вуглецю, кг: 0,123.

Електродна маса вносить вуглецю, кг: 3,4.

Приблизно половина цього вуглецю витрачається на відновлення оксидів, що зменшує потребу в коксі на кг: 2,000.

Тоді загальна потреба коксу рівнятиметься різниці розрахованої кількості коксу та електродної маси:

Потреба в коксі на калошу, що містить 100 кг кварциту, кг: 47,906.

РОЗРАХУНОК СКЛАДУ СПЛАВУ

Таблиця 3.11 – Кількість елементів відновлених з кварциту, коксу та електродної маси

Елементи	Вноситься, кг			Усього, кг
	із кварциту	із золи	із золи ел. маси	
Si	42,042	0,991	0,085	43,118
Al	0,233	0,487	0,051	0,771
Fe	0,090	0,664	0,028	0,782
Ca	0,043	0,068	0,008	0,119
P	0	0,006	0	0,006
S	0	0,019	0,002	0,021

Таблиця 3.12 – Розподіл відновлених елементів

Елемент	Перейде в сплав, кг	В ульот, кг
Si	43,118	5,212
Al	0,694	0,077
Fe	0,743	0,039
Ca	0,101	0,018
P	0,003	0,003
S	0,000	0,021
Усього	44,659	5,370

Загальну вагу сплаву розраховуємо за кількістю кремнію, що перейшов у сплав:

Загальна вага сплаву, що містить Si, % 96 дорівнює, кг: 46,867.

Кожухи електродів, що самоспікаються, на 100 кг кварциту, вносять заліза, кг: 0,1.

Пруття для проколювання на 100 кг кварциту, вносять заліза, кг: 0,5.

Дані про склад та вагову кількість металу наведені в таблиці 3.13.

Кр3 містить 0,01% або 0,005кг.

Таблиця 3.13 - Склад і вагова кількість металу

Елементи	Вноситься, кг			Загальна вага	
	з кварциту, коксу та електродів	зі стружки	з кожуха та прутів	кг	%
Si	43,118	70,774	0,000	113,891	96,506
Al	0,694	0,000	0,000	0,694	0,588
Fe	0,743	1,608	0,600	2,951	2,501
Ca	0,101	0,000	0,000	0,101	0,086
P	0,003	0,024	0,000	0,027	0,023
C	-0,188	0,193	0,000	0,005	0,004
Mn	0,000	0,322	0,000	0,322	0,273
S	0,000	0,024	0,000	0,024	0,020
Усього				118,015	100,000

РОЗРАХУНОК СКЛАДУ І КІЛЬКОСТІ ШЛАКУ

Розрахунок кількості та складу шлаку виробляємо виходячи зі складу шихтових матеріалів, а також ступеня переходу елементів у шлак. У таблиці 3.14 наведено розрахунок складу та кількості шлаку.

Таблиця 3.14 - Склад та кількість шлаку

Окисел	Витрачається на утворення шлаку, кг				
	із кварциту	із золи коксу	із золи ел. маси	Усього	
				кг	%
SiO_2	1,980	0,047	0,004	2,031	70,480
Al_2O_3	0,110	0,230	0,024	0,364	12,632
FeO	0,001	0,009	0,0004	0,010	0,352
CaO	0,090	0,144	0,017	0,251	8,695
MgO	0,100	0,048	0,008	0,156	5,411
TiO_2	0,070	0,000	0,000	0,070	2,430
Усього				2,881	100,000

Кратність шлаку розраховуємо як відношення кількості сплаву до кількості шлаку: Кратність шлаку: 0,061.

КІЛЬКІСТЬ ГАЗІВ

Кількість вуглецю коксу і електродів, що спалюється на колошнику, встановлюємо як різницю внесеного і витраченого на відновлення вуглецю:

Згоряє вуглецю коксу та електродів на колошнику, кг: 5,098.

Для спалювання цієї кількості вуглецю знадобиться кисню, кг: 6,798.

Оскільки в повітрі міститься 77% азоту, то цьому колу кисню супроводжує азот, кг: 22,757.

Підсумовуючи кількість азоту та кисню визначаємо кількість повітря:

Усього буде витрачено повітря, кг: 29,555.

При окисленні вуглецю киснем повітря утворюється CO, кг: 11,896.

При окисленні вуглецю окислами кварциту утворюється CO, кг: 87,778.

При окисленні вуглецю окислами золи коксика утворюється CO, кг: 3,426.

При окисленні вуглецю окислами золи ел. маси утворюється CO, кг: 0,286.

Летючі та волога кварциту, коксика, ел. маси та стружки складуть, кг: 0,834.

Усього утворюється газів, кг: 136,976.

МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС

Матеріальний баланс процесу наведено у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Матеріальний баланс процесу

Надходження			Витрата		
Матеріали	кг	%	Продукти	кг	%
Кварцит	100,000	38,097	Сплав	118,015	44,831
Кокс	47,906	18,251	Шлак	2,881	1,094
Залізна стружка	80,425	30,640	Гази	136,976	52,034
Повітря	29,555	11,260	Ульот	5,370	2,040
Залізо кожуха та прутів	0,600	0,229	Нев'язка	-0,758	-0,288
Електродна маса	4,000	1,524			
Усього	262,485	100,000	Усього	263,243	100,000

ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС

Теплота окислення вуглецю до CO щодо реакції $C + 1/2O_2 = CO$ становить 2222 ккал/кг вуглецю.

При окисленні вуглецю коксику та електродів виділяється тепла, ккал: 98034.

ТЕПЛО ВІД ЕКЗОТЕРМІЧНИХ РЕАКЦІЙ

При утворенні силіциду заліза на 1 кг заліза виділяється тепла, ккал: 341,071.

Теплота утворення силіциду заліза становитиме, ккал: 1006,566.

При утворенні силікату Al_2O_3 на 1 кг Al_2O_3 виділяється тепла, ккал: 450,49.

Теплота утворення силікату Al_2O_3 становитиме, ккал: 163,9544.

При утворенні силікату CaO на 1 кг CaO виділяється тепла, ккал: 388,393.

Теплота утворення силікату CaO складе, ккал: 97,29888.

Усього в результаті екзотермічних реакцій виділяється тепла, ккал: 1267,8188.

ТЕПЛО, ЩО ВНОСИТЬСЯ ШИХТОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Тепло, що вноситься кварцитом при 25 ^{0}C, ккал: 420 .

Тепло, що вноситься коксиком при 25 ^{0}C, ккал: 239,5277.

Тепло, що вноситься залізною стружкою при 25 ^{0}C, ккал: 221,168.

ВИТРАТА ТЕПЛА НА ЕНДОТЕРМІЧНІ РЕАКЦІЇ

Дисоціювало до кремнезему, кг: 99,502.

При дисоціації кремнезему на 1 кг кремнезему виділяється тепла, ккал: 3433,33.

Для дисоціації кремнезему знадобилося тепла, ккал: 341624,7.

Дисоціювало глинозему, кг: 1,456.

При дисоціації глинозему на 1 кг глинозему виділяється тепла, ккал: 3855,88.

Для дисоціації глинозему знадобилося тепла, ккал: 5613,34.

Дисоціювало окиси Ca , кг: 0,167.

При дисоціації окису кальцію на 1 кг окису Ca виділяється тепла, ккал: 2708,93.

Для дисоціації окису Ca знадобилося тепла, ккал: 452,4.

Дисоціювало окису Fe ,кг: 1,117.

При дисоціації окису заліза на 1 кг окису Fe виділяється тепла, ккал: 1220.

Для дисоціації окису Fe знадобилося тепла, ккал: 1362,5.

Дисоціювало п'ятиокису P, кг: 0,0144.

При дисоціації п'ятиокису P на 1 кг п'ятиокису P виділяється тепла, ккал: 2535,21.

Для дисоціації п'ятиокису P потрібно тепла, ккал: 36,44.

Сумарна кількість тепла на дисоціацію оксидів, ккал: 349089.

Тепловміст кремнію при 1800^{0}C:

Тепловміст Si при 1800 ^{0}C, кал/кг: 542,1.

Тепловміст Fe при 1800 ^{0}C, кал/кг: 371,82.

Тепловміст FeSi при 1800 ^{0}C, ккал/кг: 532,5.

Тепловміст FeSi при 1800 ^{0}C, ккал: 62837,9.

Тепловміст шлаку при 1800^{0}C, ккал/кг: 514,8.

Тепловміст шлаку при 1800^{0}C, ккал: 1483,2.

ТЕПЛОВМІСТ ГАЗОПОДІБНИХ ПРОДУКТІВ

Опустимо, що гази залишають піч за середньої температури 600^{0}C. Для спрощення розрахунку приймаємо теплоємності всіх газів газоподібних продуктів рівними теплоємності окису вуглецю – основною складовою газоподібної фази:

Тепловміст 1м^3 при 600^{0}C, ккал: 194,5.

Тепловміст газоподібних продуктів, ккал: 21313,5.

ВТРАТИ ТЕПЛА КЛАДКОЮ ПЕЧІ

Загальна поверхня печі, м^2: 100.

Питомий тепловий потік, ккал·год/м^2: 1600.

Пекти втрачає тепла в годину: 160000.

Продуктивність печі, т/год: 0,8.

У перерахунку на кварцит, кг: 677,9.

Теплові втрати, ккал: 23603,1.

ТЕПЛОВІ ВТРАТИ КОЛОШНИКА

Приймаємо цю величину рівною, %: 10.

ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Різниця між статтями приходу та витрати тепла дорівнює, ккал: 409069,9 або 476 кВт-год.

ККД 0,87.

Витрата електроенергії на 100 кг кварциту, кВт·год: 546,7.

Витрата на 1т сплаву, кВт·год: 4632,8.

Тепловий баланс плавки Кр3 наведено у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Тепловий баланс плавки

Надходження			Витрата		
Стаття	ккал	%	Стаття	ккал	%
Електроенергія	470195,26	82,44	Дисоціація	349089,43	61,20
Окислення С до СО	98034,01	17,19	Тепло Ме	62837,87	11,02
Утворення силіцидів заліза та силікатів	1267,8	0,22	Тепло шлаку	1483,23	0,26
Внесено шихтовими матеріалами	880,70	0,15	Тепло газів	21313,53	3,74
			Втрати тепла кладкою	23603,09	4,14
			Втрати тепла через колошник	50925,24	8,93
			Ел. втрати та нев'язка	61125,38	10,72
Усього	570377,79	100,00	Усього	570377,79	100,00

3.8 Технологія розігріву печі

Графік підготовки до роботи після профілактичного ремонту або тривалого простою, спричиненого відсутністю сировини, електроенергії чи іншими обставинами, представлений у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 - Графік розігріву печі

Час простою печі, год	Час розігріву печі, год
1 – 4	0,5 - 1,5
4 – 8	1,5 – 3
8 – 16	3 – 5
16 – 32	5 – 7
32 – 48	7 – 9
48 – 64	9 – 11
64 – 80	11 – 13
80 – 96	13 - 15

У виняткових випадках старший майстер може скоригувати графіки розігріву печі, залежно від стану електродів і перебігу нагріву. Набір навантаження має здійснюватися поступово і рівномірно. Після виконання планово-попереджувального ремонту (ППР) печей перед першим випуском потрібно підготувати два спеціальних ковші, які повинні мати збільшені та знижені порівняно з типовими параметри носика. У випадку, коли після проведення ППР витрачено 200 тис. кВт·год і немає можливості здійснити випуск сплаву, піч варто зупинити для встановлення третього ковша. Роботи з випуску металу після цього необхідно продовжити із використанням кисню.

3.8.1 Підготовка печі до розігріву

3.8.1.1 Підготовка електродів

До зупинки печі на капітальний ремонт рівень електродної маси у кожухах електродів опускається до площини верхньої кромки контактних щік (при цьому порожнеча в кожухах становить 12,5 м). Після завершення капітального ремонту і охолодження електродів їх обрізають на висоті 200–300 мм від нижньої кромки

контактних щік. Перед початком розігріву печі здійснюють опускання всіх електродів до упору у спеціальну тумбу з цегли заввишки 0,7 м, викладену на подині печі. У кожухи завантажують електродну масу таким чином, щоб її рівень піднімався на 0,8–1,0 м вище верхньої кромки контактних щік. Для покращення видалення летких речовин із зони коксування електродної маси у кожухах роблять отвори діаметром 10 мм у шаховому порядку.

3.8.1.2 Підготовка ванни печі

Навколо кожного електрода на дні печі монтуються зварні обичайки діаметром 2200 мм і висотою 1300 мм, виготовлені з листової сталі товщиною 3 мм. Обичайки з'єднуються між собою трикутною конструкцією із сталевих листів товщиною 5–10 мм і висотою 500 мм. На дно печі в зоні трикутника між електродами та поблизу льоткового отвору укладається від 8 до 10 тонн низькосортного металу марки ФС45. По всій площі всередині печі рівномірно насипається шар коксу фракції 25×40 мм товщиною 200 мм. У металеві обичайки навколо електродів кокс засипається до рівня верхнього краю обичайок.

3.8.2 Розігрівання ванни печі і коксування електродів

Температурний режим розігріву печі передбачає поступове підвищення температури. Протягом першої доби температура під склепінням підтримується на рівні 100 °С. На другий день вона поступово зростає до 300 °С і стабілізується на цій позначці до кінця доби. На третьому етапі температурний режим досягає 400–500 °С і утримується добу. Четвертий день також передбачає стабілізацію температури в межах 400–500 °С протягом доби. Для ефективнішого утримання тепла всі отвори у склепінні печі закриваються. У разі перевищення встановлених температурних показників, піч автоматично відключається, а вибухові клапани відкриваються.

При спалюванні коксу у піч засипається шихта з навантаженням, яке зменшено на 15–18 кг у порівнянні з оптимальним обсягом коксу. Кількість

стружки в складі шихти регулюється старшим майстром відповідно до технологічних потреб. У міру нагрівання шихти її рівень постійно підвищують—додаючи порції вручну або за допомогою труботічок. Наприкінці четвертої доби рівень шихти має досягти нижнього краю вирв, після чого піч переводять у закритий режим роботи.

Струмовий режим також адаптується до етапів розігріву печі. У перший день струми в первинних обмотках трансформаторів складають 150–200 А при потужності до 3 МВт/год. На другий день струми збільшуються до 300–350 А, а потужність—до 3,5 МВт/год. У третій день показники струмів сягають 400–500 А при потужності до 4 МВт/год, а на четвертий — струми підтримуються в межах 500–600 А при потужності 4–5 МВт/год.

На момент переходу печі в закритий режим температура подини на шостому ряді цегляної кладки має бути не нижче ніж 80 °С. Температура подини та підсклепінного простору постійно контролюється і щогодини фіксується у пічному журналі. Рівень електродної маси в кожухах електродів також перевіряється щозмінно. До завершення другої доби розігріву маса підіймається до висоти 1,0–1,5 м від верхнього краю контактних щік і утримується до кінця всього процесу розігріву. Маневрування електродами при розігріві не здійснюється, за винятком ситуацій, які потребують втручання за вказівкою старшого майстра.

Після завершення етапу розігріву піч переводиться у режим роботи за схемою «трикутник/трикутник» згідно з письмовими розпорядженнями старшого майстра. На цьому етапі організовується перший випуск металу та здійснюється перехід на оптимальний технологічний режим роботи печі. Наступні перепуски електродів та виробничі цикли виконуються також за вказівками старшого майстра.

Розігрів печі вважається завершеним у разі стабілізації температури подини в межах 950–1000 °С і досягнення планової продуктивності протягом трьох послідовних діб. У разі виникнення відхилень від технологічного процесу внесення змін у режим розігріву здійснюється відповідно до розпоряджень старшого майстра. Перший випуск металу виконується за умов споживання не менше 150 тисяч кВт/год.

3.9 Технологія виплавлення Кр3

3.9.1 Підготовка шихтових матеріалів до плавки

Перед плавленням сировина проходить підготовчі етапи.

У випадку використання шматкової шихти підготовка зводиться здебільшого до досягнення потрібної фракції матеріалів шляхом їхнього подрібнення та просіювання. Кварцит подрібнюють за допомогою щокових і конусних дробарок, а вугілля й нафтококс обробляють валковими дробарками. Після дроблення матеріали піддають грохотуванню. Якщо передбачено миття кварциту, цей процес виконується у спеціальних барабанах, де одночасно відбувається й очищення.

Наявність дрібних часток відновника чи кварциту в шихті значно погіршує роботу печі: знижується забезпечення плавного сходу шихти та падає продуктивність агрегату.

Тому належна увага має приділятися якості підготовки шихти. Слід передбачити попереднє відсівання фракцій, що не потребують подрібнення, аби уникнути надмірного дроблення матеріалу.

Принципова схема підготовки сировини для виробництва кристалічного кремнію наведена на рисунку 3.1.

Кварцит, що надходить у шматках розміром до 300 мм, транспортується зі складу за допомогою грейферного крана в бункер 1, розташований у зоні сировини. Звідти матеріал пластинчастим живильником 2 переміщується на колосниковий грохот 3. Великі фракції кварциту з грохота потрапляють на подрібнення у щокову дробарку 4. Після подрібнення матеріал проходить через сепаратор 5 і стрічковим транспортером 6 подається на другий колосниковий грохот 7. Звідти великі шматки кварциту спрямовуються на подальше подрібнення в щокову дробарку 8, а дрібна фракція сортується на вібраційному грохоті. Тут відокремлюється велика фракція, тоді як дрібний матеріал за допомогою елеватора 9 подається в бункер. Коли дрібниці накопичується достатньо, її використовують для допоміжних потреб.

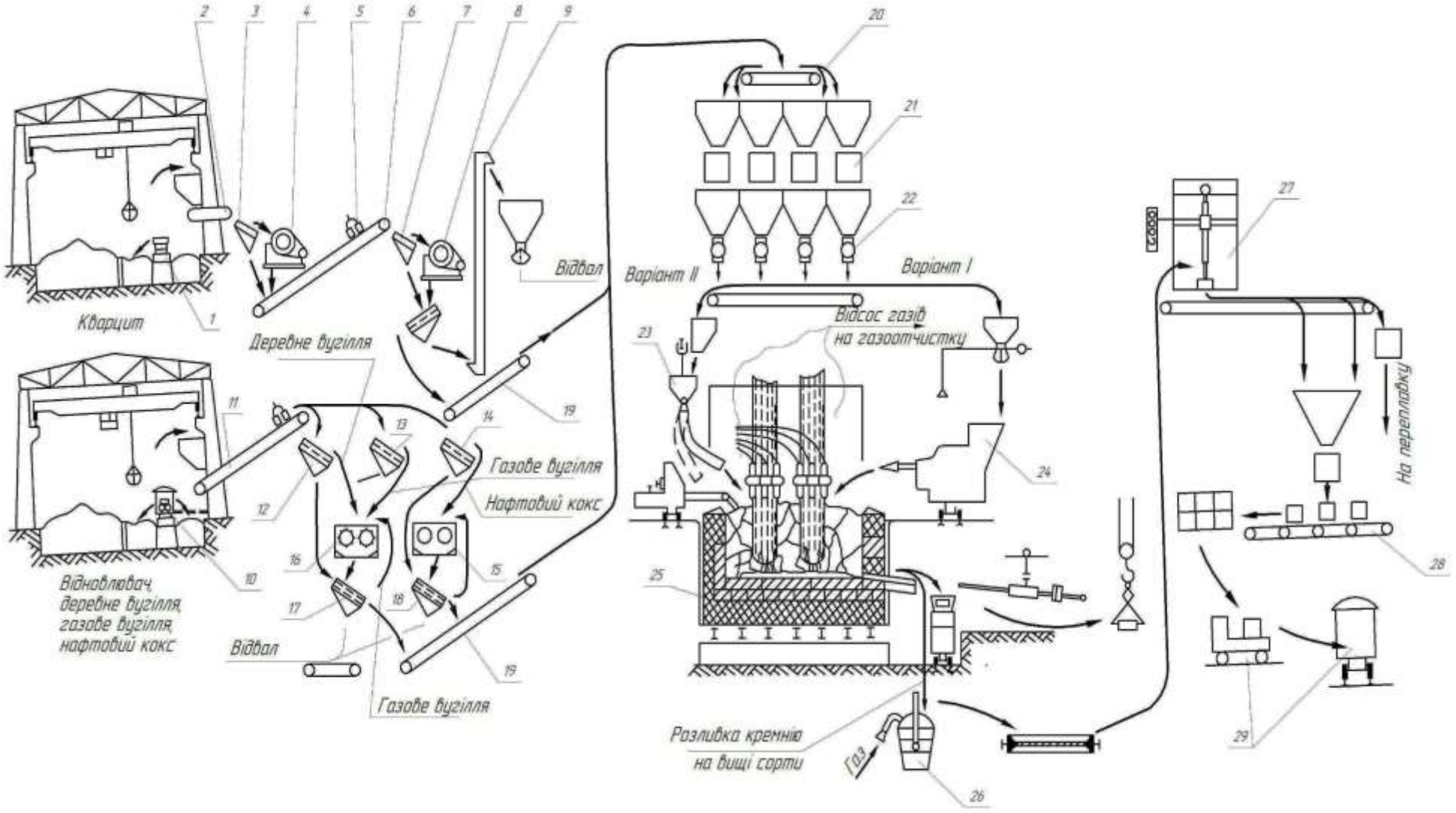


Рисунок 3.1 – Принципова технологічна схема виробництва кристалічного кремнію

Деревне вугілля, газове вугілля та нафтовий кокс по черзі завантажуються зі складу грейферним краном у бункер 10, розташований у складі. Звідти сировина стрічковим транспортером, оснащеним підвісним магнітним сепаратором, подається на грохоти, призначені для сортування зазначених матеріалів. На грохоті 12 відсіюється деревне вугілля з розміром шматків менше 80 мм, на грохоті 13 — газове вугілля з розміром менше 25 мм, а на грохоті 14 відокремлюється нафтовий кокс фракції менше 15 мм. Великі фракції, що залишаються на решітках грохотів, спрямовуються на дроблення: деревне і газове вугілля — у валковозубчасту дробарку 16, а нафтовий кокс — у валкову дробарку 15.

Малі фракції, які відсіюються на гуркотах 12, 13 і 14, додатково обробляються на грохотах 17 і 18. На грохоті 17 відділяється деревне вугілля робочої фракції розміром 5–80 мм, а газове вугілля сортується за розмірами 5–25 мм. На грохоті 18 нафтовий кокс ділиться на дрібну фракцію до 2 мм і велику — понад 15 мм. Відсіяні дрібні частинки потрапляють у бункери для відходів. Підготовлені відновники транспортуються стрічковим транспортером 19 до шихтового відділення.

Після аналізу хімічного складу матеріалів проводиться розрахунок шихти та складу колоші для подачі в піч. У виробничій практиці така порція шихти часто називається "замісом". Весь процес у шихтовому відділенні є автоматизованим. Рівень матеріалів у бункерах контролюється за допомогою датчиків, а лінії дозування, що взаємодіють зі збірними конвеєрами, мають можливість дистанційного управління. Всі операції з дозування перебувають під контролем диспетчерського пульта управління.

3.9.2 Режим роботи електродів

Виплавка кремнію здійснюється із застосуванням набивних самоспікних електродів діаметром 1200 мм. Для забезпечення стабільного та ефективного ходу технологічного процесу необхідно досягти оптимальної глибини занурення електродів, яка повинна становити 1500 мм. Процес перепуску електродів

виконується за участю плавильника. У разі відсутності системи автоматичного перепуску струмове навантаження на печах зменшується на 10–15% під час цього процесу. За перепуск електродів відповідає дистанційне управління з панелі, яка розташована в пульті керування піччю, при цьому використовується встановлений на печах пневматичний механізм перепуску.

Щодня перепуск електродів проводиться на величину 250–300 мм, враховуючи необхідність їх подовження та стан електродної маси під кільцем електродотримача. Для витрат електроенергії у 1000 кВт/год оптимальна величина перепуску становить 0,5–0,8 мм. Повторний перепуск електродів на 100 мм дозволяється здійснювати не раніше, ніж через 4 години після попереднього, і не пізніше ніж за 2 години до закінчення зміни. У разі використання пневмоперепуску час та величина визначаються індивідуально залежно від обставин.

Позаплановий перепуск допускається лише у виняткових випадках за письмовою вказівкою старшого майстра. У разі аварійних ситуацій процедура перепуску проводиться згідно зі спеціальним графіком, затвердженим старшим майстром.

У випадках відпалювання електрода на відстані 0–1000 мм від контактних щік здійснюється одноразовий перепуск на 300–500 мм відповідно до стану електродної маси. При цьому трансформатор печі переводиться на 11–17 ступінь напруги. Струмове навантаження на електродах має залишатися в межах номінального показника. У разі роботи на знижених щаблях напруги графік переходу до робочих щаблів та величина перепуску електродів визначаються старшим майстром індивідуально для кожної ситуації з урахуванням місця й характеру обриву.

3.9.3 Ведення плавки

Кремній марки Кр3 має вироблятися відповідно до стандарту ГОСТ 2169–69. Під час експлуатації обслуговуючий персонал безперервно контролює роботу печі, її механізмів, контрольно-вимірювальних приладів, систему охолодження та газовий режим печі. Шихтові матеріали подаються з дозувальних пристроїв через

систему транспортерів до пічних бункерів, які слід заповнювати не менше ніж наполовину. Завантаження шихти в піч здійснюється через завантажувальні воронки та текучі канали, які необхідно постійно утримувати заповненими. Шихта потрапляє в піч самопливом. Допущення проплавлення шихти у вирвах є неприпустимим, оскільки це може спричинити розгерметизацію робочого простору, збільшення температури під склепінням та підсмоктування повітря.

Затвори пічних кишень мають бути відкритими, а обслуговуючий персонал повинен стежити за постійним наповненням труботічок і лійок шихтою. Усунення зависання шихтових матеріалів у труботічках і бункерах проводиться виключно при вимкненій печі за участі щонайменше двох працівників. У разі проплавлення матеріалів у завантажувальних лійках, що свідчить про їх зависання у труботічках або бункерах, необхідно засипати утворену порожнину шихтою. Щоб уникнути потрапляння феросплавного газу до труботічки або бункера, де спостерігається зависання матеріалів, на склепінні печі, біля відповідної труботічки, повинні залишатися відкритими два аварійні клапани. Після усунення зависання шихти роботи проводяться шляхом шурування через шибер або спеціально вирізані отвори в місцях утворення завад. По завершенні операції отвори слід заварити. Коксик і сталеву стружку подають трубопроводами на плавильну платформу і, якщо необхідно, завантажують вручну в вирви.

Нормальне функціонування печі визначається такими ознаками:

1. рівномірне сходження шихти у завантажувальних лійках;

2. глибока стала посадка електродів при встановленій потужності печі;

3. робочий кінець електрода має знаходитися на відстані 900–1000 мм від подини при довжині електрода 2600–2700 мм;

4. максимальне використання потужності печі за наявної ступені напруги;

5. тиск під склепінням у межах 0,2–0,4 кгс/м² до +1 кгс/м², що вимірюється дифманометрами (від 1,96–3,92 до 9,8 Па);

6. температура газу під склепінням від 500 до 600 °С, що контролюється термопарами.

7. Стабільна кількість відхідних газів у межах 3000–4000 м³/год, яка визначається за допомогою витратомірів.

8. Постійний склад відхідних газів: 85–90% CO, трохи більше 15% CO_2, трохи більше 8% H_2, трохи більше 1% O_2 .

9. Розрядження на початку похилого газоходу не перевищує 40–80 кгс/м² (392–784 Па) та заміряється тягомірами.

10. Перепад розрядження на трубі Вентурі знаходиться в межах 1500–2000 кгс/м², вимірюється за допомогою тягомірів (14 700–19 600 Па)

11. Рівномірний вихід металу та шлаку відповідно до завантаження шихти й витраченого обсягу електроенергії.

У разі зупинки печей на ПВР, відсутності шихти, перерви постачання електроенергії або з інших причин категорично забороняється переплавляти шихту, обсяг якої менший за 1/3 місткості бункерів. Як тільки рівень шихти досягне показника 1/3 місткості бункерів труботічки, їх необхідно негайно перекрити за допомогою «очка Шмідта».

При зупинці печей на ПВР або під час ремонту пічних бункерів шихту з них слід переплавити. Після повного виходу шихти з бункерів труботічки мають бути оперативно перекриті «очком Шмідта».

3.9.4 Випуск сплаву

Хід роботи печі та показники плавки значною мірою залежать від правильного режиму випуску кремнію та якісного обслуговування горна. Якщо відбувається накопичення надлишку кремнію, процес відновлення кремнезему сповільнюється, ускладнюється посадка електродів і збільшуються втрати кремнію через випаровування. У зв’язку з цим рекомендується здійснювати випуск кремнію якомога частіше. Практичний досвід одного із заводів показав, що оптимальним рішенням є застосування безперервного випуску. Такий підхід забезпечує більш повний злив кремнію, сприяє стабільній і глибшій посадці електродів, у порівнянні

з періодичним режимом, що, своєю чергою, позитивно впливає на загальні показники плавки.

Кремній з печі випускають у міцний теплоізольований ківш. Температура металу при випуску є досить високою, щоб підтримувати кремній у рідкому стані. Відкриття льотки для випуску здійснюється за допомогою електричного пропалювання дугою.

Для цього використовується графітовий електрод діаметром 160 мм, який стаціонарно розташований на рівні льотки. Струм для пропалювання подається від шин короткої мережі третьої фази. Електрод закріплюється хомутами до контактної пластини, а струм підводиться через мідну або залізну шину, закріплену на корпусі печі. Увімкнення і вимкнення електричного пропалювання здійснюються через спеціальний роз'єднувач, яким зручно керувати за допомогою електроприводу. Управління процесом проводиться з пульта, розташованого на горновому майданчику. Для належного виходу металу з печі важливо утримувати легеневий отвір чистим від шлаку. Якщо отвір забивається шлаком або продуктами розкладання оксиду кремнію, його очищують пропалюванням електричною дугою. Процедура пропалювання має бути короткою, щоб запобігти пошкодженню вугільних блоків, збільшенню розміру льотки, а також надлишковому витрачанню енергії та графітових матеріалів.

При належному ході печі двох-трьох коротких пропалів тривалістю 15–20 хвилин під час однієї зміни зазвичай достатньо для підтримки в належному стані жолоба та легеневого отвору. Якщо льотка має отвір нормального діаметра (100–150 мм), не забита шлаком і метал виходить без перешкод, додаткове пробивання або пропалювання льотки не рекомендується. У ситуаціях, коли при нормальному функціонуванні печі метал перестає виходити через отвір, можна просто пробити льотку дерев'яною жердиною.

Під час нормальної роботи печі з металом також повинен регулярно виходити рідкий шлак. Потрібно забезпечити його повний вихід, оскільки накопичення шлаку всередині печі може порушити функціонування льотки і негативно вплинути на процес плавки.

Щоб уникнути забруднення готового продукту шлаком, струмінь кремнію при випуску потрібно спрямовувати в одну точку виливниці. Крім того, варто контролювати стан деталей льотки, насамперед парасольки та верхнього блочку, щоб уникнути осипання нальоту відгонів у метал.

Кремній, залитий у підігрітий ківш, після видалення шлаку переходить до етапу розливання. Зливки кремнію подрібнюють за допомогою пневматичного молота на ґратчастій поверхні. Роздроблений на шматки розміром 250–280 мм метал проходить крізь грати й потрапляє до приймальної лійки, звідки віброживильник подає його на стрічковий конвеєр. На конвеєрі уламки кремнію очищають від видимих залишків шлаку та бризок металу, що утворилися під час розливання. Очищені шматки скидаються з конвеєра в тічки й потім завантажуються в кюбелі. Далі кремній транспортується до електролізних цехів для виробництва силуміну або передається на склад для формування товарних партій із подальшим відвантаженням навалом або в дерев’яній упаковці.

Для перевірки якості виробленого кремнію під час його випуску кожні 30 хвилин відбирають проби безпосередньо зі струменя металу. Із цих проб формують середню пробу, яку відправляють до лабораторії для спектрального аналізу вмісту таких елементів, як залізо, алюміній і кальцій. Отримані результати аналізу дозволяють визначити марку кремнію, виробленого під час кожної плавки. Партії для відвантаження споживачам формуються залежно від марок, отриманих у результаті плавлення.

Після завершення процесів дроблення й очищення від сформованих партій також відбираються проби для проведення хімічного аналізу. На основі отриманих результатів аналізу встановлюється марка партії.

Якщо кремній запаковується в металеві бочки, то від обробного конвеєра він надходить для повторного дроблення до щокової дробарки. Після цього елеватор завантажує дроблений кремній у бункер-1, оснащений дозувальними затворами. Відміряні порції кремнію засипають у бочки, які після цього закривають кришками, ущільнюють, маркують та встановлюють на стелажі. За допомогою

електронавантажувача бочки перевозять на склад готової продукції й укладають у штабелі для подальшого зберігання або транспортування.

3.10 Технологія розливки Кр3

Кремній розливається на машинах розливних конвеєрного типу (рисунок 1.4) і складується на складі готової продукції.

Машини змонтовані на металоконструкціях будівель головного корпусу цеху та галереї розливальних машин.

Коротка характеристика розливальної машини:

- максимальна продуктивність

при безперервному розливанні…….34 т/год;

- Максимальна швидкість руху ланцюга конвеєра ……. 5 м/хв;
- Кількість конвеєрів ……1;
- Кількість мульд в ланцюзі ……210;
- Вага зливка при максимальному рівні заливки Кр3 …..45 кг;
- Вага машини з чавунними виливницями ……..103780 кг.

Рідкий метал із електропечі за допомогою електромостового крана транспортується у ковші до кантувального пристрою машини, який розташований у розливному прольоті цеху. Ківш встановлюється на траверсі, з'єднаній зі спеціальною рамою і гідроциліндрами кантувального механізму. Перекидання ковша виконується через систему гідроциліндрів і траверсу, забезпечуючи контрольовану подачу рідкої маси.

Під час повільного підняття штоків гідроциліндрів траверса починає повертатися, нахиляючи ківш, а метал рівномірним струменем переливається у заливальний жолоб. Цей жолоб має спеціальне футерування з вогнетривкої цегли, що допомагає підвищити його термостійкість. Далі метал потрапляє у виливниці (мульди), які переміщуються конвеєром машини.

Конструкція виливниць та нахил конвеєра спроектовані таким чином, щоб уникнути переповнення ємностей металом. Наповнені мульди поступово рухаються

спочатку похило, потім у горизонтальному положенні, доки не потрапляють до скидного жолоба машини.

На шляху транспортування металу система охолодження відіграє ключову роль. У першій половині руху конвеєра виливниці охолоджуються водою через спеціальні трубопроводи верхнього та нижнього охолодження. На горизонтальній частині до охолодження додатково залучається потужний струмінь повітря, що створюється за допомогою димососа.

Після проходження конвеєра ланцюг огинає зірочку приводної станції, і охолоджені чушки металу випадають із виливниць, спрямовуючись по скидному жолобу до спеціальних багаторазових коробів об’ємом 3 кубічні метри.

Для усунення залишків металу, приварених до стінок виливниць, на кінці конвеєра встановлений ударний механізм. Після очищення порожні виливниці повертаються у вихідну позицію перевернутими. На зворотному шляху їхні внутрішні стінки покриваються шаром вапняного молока, яке захищає поверхню від корозії та запобігає приварюванню рідкого металу. Сушка виливниць здійснюється за допомогою газових пальників після нанесення захисного шару.

Для зниження тертя між механізмами та дбайливого функціонування конвеєра використовується централізована система густого мастила, яка забезпечує постійне змащування всіх рухомих частин.

3.11 Виготовлення ковшів з наливною футеровкою

Процес виготовлення ковшів із наливною футеровкою включає два етапи. Спершу на футеровану цеглою подину ковша встановлюють стовпчики з вогнетривкої цегли марки ШАК-5 (по чотири стовпчики, кожен зі складеним пару цеглин), які розташовують горизонтально. Далі на ці стовпчики встановлюється спеціальний шаблон, який фіксується струбцинами. Ківш зі встановленим шаблоном розміщують на спеціальному візку та транспортують під жолоб змішувальної установки для заливки.

Для формування футеровки ковша використовуються такі матеріали: кварцитові заповнювачі й суміші, силікат натрію, білило порошкоподібне технічне та технічна вода. Після заповнення ковша сумішшю його викочують із зони установки та перевозять до ремонтної ями. Вилитий сумішшю ківш залишають на витримку протягом 24 годин, після чого з нього витягують шаблон, очищають його і змащують.

Після видалення шаблону проводиться перевірка якості наливної футеровки. Вона має бути монолітною, без тріщин, порожнин або ознак сповзання суміші. У разі відсутності дефектів ковш піддається сушінню під газовим пальником протягом 48 годин. Після завершення сушіння ківш готовий до подальшої експлуатації.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Техніка безпеки виробництва

4.1.1 Характеристика шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Виробництво кремнію супроводжується низкою небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких: рухомі машини та механізми, підвищені температури поверхонь обладнання, запиленість і загазованість повітря у робочій зоні, високий рівень шуму на робочому місці, електронебезпека, а також наявність розплавлених мас.

Гранично допустимі концентрації аерозолів у повітрі відповідають таким показникам:

- окис вуглецю – 20 мг/м³ (4-й клас небезпеки);
- двоокис кремнію – 1 мг/м³ (3-й клас небезпеки).

У процесі виробництва кремнію виділяються гази. Один із них, безбарвний та без запаху, потрапляючи до легенів, взаємодіє з гемоглобіном крові. Утворюється карбоксигемоглобін, який не здатний переносити кисень, що може призвести до задухи. Монооксид кремнію (SiO), осідаючи в альвеолах легенів, утворює цементуючі сполуки, які перешкоджають доступу кисню і провокують професійне захворювання – силікоз. Це може спричинити задишку, зниження працездатності та прискорене серцебиття у працівників.

Вапняний пил, контактуючи зі слизовими оболонками носа, ротової порожнини та очей, утворює сполуку $Ca(OH)_2$, яка провокує подразнення, сушить шкіру і може спричинити хімічні опіки. Інші види пилу також негативно впливають на органи дихання, викликаючи кашель, погіршення видимості та втрату орієнтації.

Під час виробничого процесу температура в робочій зоні може сягати близько 1600 °С, а повітря нагрівається вище 25 °С. Це призводить до значного потовиділення у працівників і втрати важливих для організму солей, що може викликати водно-сольове виснаження та негативно вплинути на серцево-судинну систему.

Окрім того, у холодні періоди року або при роботі на протягах зростає ризик розвитку простудних захворювань та гнійничкових уражень шкіри.

Обладнання та огородження, розташовані в безпосередній близькості до розплаву, зазнають значного нагрівання, що створює ризик отримання опіків при їх дотику.

У процесі плавлення, якщо дуга горить нестабільно (через надлишок відновника або низьке положення електродів), виникає високий рівень шуму. Додатковий шум утворюється також під час вантажно-розвантажувальних робіт, у разі пропалу льотки тощо. Підвищений рівень шуму може знижувати концентрацію уваги працівників і, відповідно, збільшувати ризики виробничих травм.

На рудовідновлювальній печі наявні елементи, що перебувають під життєво небезпечною напругою, зокрема пічний трансформатор, електродотримач, коротка мережа тощо. Контакт із цими елементами загрожує ураженням електричним струмом, наслідками якого можуть бути металізація шкіри, виникнення електричних знаків, фібриляція серця чи його зупинка.

У розливному прольоті краном переміщуються такі предмети, як вогнетривкі матеріали, короби, ковші з рідким металом або шлаком та інші вантажі. У разі неправильного стропування вантажів існує ризик їх падіння, що може спричинити травми різного ступеня тяжкості.

Додаткову небезпеку становлять можливі вибухи, які трапляються при контакті рідкого металу чи шлаку з водою або вологими предметами. Вибух здатен розкидати розплавлену масу на значні відстані, що створює ймовірність отримання серйозних опіків чи ураження вибуховою хвилею.

Пічний трансформатор охолоджується за допомогою олії, яка при перегріванні може спричинити пожежу. Особливо небезпечною є взаємодія олії з киснем: за наявності джерела відкритого вогню олія може спалахнути з ефектом займання.

Під час пропалу льотки електрична дуга випромінює значну кількість електромагнітних хвиль, зокрема ультрафіолетового випромінювання. Таке випромінювання негативно впливає на шкіру та особливо небезпечне для сітківки

ока, провокуючи хворобливе запалення (електроофтальмія). Хоча симптоми запалення зазвичай минають за 2–3 дні, тривалий вплив може спричинити серйозні ускладнення, зокрема розвиток катаракти.

4.1.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних факторів

У кваліфікаційній роботі пропонується низка заходів для усунення шкідливих і небезпечних факторів. З метою захисту повітряного середовища від забруднень запропоновано обладнати всі печі цеху системами мокрого очищення феросплавного газу.

Для забезпечення безпеки працівників необхідно надати засоби індивідуального захисту. Печі слід оснастити вентиляторами, які використовуватимуться під час обслуговування колошника печі, розчищення льотки, підготовки лотка та інших операцій.

Трансформатор печі має бути розміщений у спеціальному приміщенні, побудованому з цегли, з оснащеними воротами та гумовими ущільненнями. Шинопровід потрібно огородити металевою конструкцією заввишки 1,2 метра та встановити попереджувальний знак "Під напругою. Небезпечно для життя". Крім того, піч необхідно оснастити ключем-биркою, її кожух обов’язково заземлити. Для покращення комунікації передбачено звукову та світлову сигналізацію: зелене світло інформує про вимкнену піч, червоне – про ввімкнену; звуковий сигнал слід активувати при запуску печі. Додатково всі крани та самохідні візки пропонується обладнати звуковою сигналізацією, наприклад дзвінками. Крани мають також бути оснащені кінцевими вимикачами для обмеження висоти підйому вантажів, переміщення мосту та механізму візка.

Пульт управління піччю рекомендується розмістити в окремому приміщенні, яке слід обладнати кондиціонером, телефоном, автоматом із газованою водою, резервуаром з чаєм та підсоленою водою. Також на пульті управління необхідно розмістити плакати з правилами безпеки при обслуговуванні печі та нормативно-технічну документацію. На приміщенні камери трансформатора слід встановити

щит із пожежним інструментом, а в пульт управління обов’язково провести пожежну сигналізацію, пов'язану з пожежною охороною заводу.

Для запобігання вибухам потрібно організувати обов’язкове просушування технологічного обладнання. У пічному та розливному прольотах слід нанести білі лінії для позначення зон пішохідного руху, забезпечуючи чітке розмежування проходів.

4.1.3 Забезпечення електробезпеки

Щоб уникнути пожеж та вибухів, спричинених короткими замиканнями, перевантаженням чи іншими чинниками, пов’язаними з використанням електроустановок, необхідно правильно обирати обладнання, здійснювати його монтаж та дотримуватись встановлених правил експлуатації електромереж, машин, апаратів, а також засобів автоматизації та зв’язку.

Особливо небезпечним є електрообладнання, яке призначено для використання в зонах, де може утворюватися суміш горючих газів, парів або пилу з повітрям. Щоб уникнути перетворення такого обладнання на джерело займання паливних сумішей, впроваджена система заходів і вимог, встановлених Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), Правилами виготовлення вибухозахищеного та рудничного обладнання (ПІВРЕ), а також стандартами ССБТ.

Згідно з ПУЕ, усі горючі гази вважаються вибухонебезпечними за будь-яких температур довкілля. Горючий пил і волокна також визнаються вибухонебезпечними, якщо їх нижня концентраційна межа не перевищує 65 г/м³. Для правильного вибору електроустаткування необхідно першочергово визначити клас зони, в якій воно буде працювати.

Відповідно до ПУЕ визначено зону класу В-Іа. До цього класу належать приміщення, де при нормальних умовах експлуатації не утворюються вибухонебезпечні суміші горючих газів або парів легкозаймистих рідин (незалежно від нижньої межі концентрації займання), але вони можуть виникати внаслідок аварій або пошкоджень.

У рамках поставленого завдання обрано зону класу П-І: приміщення, де використовуються або зберігаються горючі рідини з температурою спалаху вище 61 °С.

Електробезпека на виробництві забезпечується через відповідні конструкції електроустановок, застосування технічних засобів і способів захисту, а також організаційні та технічні заходи. Конструкція електроустановок має відповідати умовам експлуатації, забезпечуючи захист персоналу від контакту зі струмопровідними частинами і запобігаючи проникненню всередину сторонніх предметів і води.

До основних технічних засобів захисту від ураження електричним струмом належать такі методи: захисне заземлення, занулення, вирівнювання потенціалів, використання малої напруги, електричний поділ мереж, захисне відключення, ізоляція струмопровідних частин (робоча, додаткова, посилена чи подвійна), компенсація струмів замикання на землю, огороджувальні пристрої, попереджувальна сигналізація, блокування, знаки безпеки та ізолюючі пристосування.

Серед найбільш поширених заходів технічного захисту виділяють захисне заземлення та занулення.

Захисному заземленню підлягають металеві частини електроустановок, доступні для дотику, які не мають інших засобів захисту, здатних гарантувати електробезпеку. Захисне заземлення або занулення необхідно виконувати в усіх випадках, коли номінальна змінна напруга досягає 380 В і вище або постійна напруга становить 440 В і більше; а також у приміщеннях з підвищеною небезпекою, особливо небезпечних місцях та у зовнішніх установках при номінальній змінній напрузі від 42 до 380 В та постійній — від 110 до 140 В.

Захисне заземлення застосовується в трифазних трипровідних мережах напругою до 1000 В із ізольованою нейтраллю, а також у мережах напругою понад 1000 В з будь-яким режимом нейтралі. Занулення використовується у трифазних мережах із заземленою нейтраллю напругою до 1000 В. Найчастіше це мережі з напругою 220/127, 380/220 і 660/380 В. У таких системах нейтраль джерела струму

(наприклад, трансформатора) під’єднується до заземлювача, розташованого поблизу джерела живлення. Захист людини від ураження електричним струмом у мережах із зануленням забезпечується завдяки тому, що при замиканні однієї з фаз на занулений корпус у ланцюгу цієї фази виникає струм короткого замикання. Цей струм активує захисні пристрої, такі як плавкий запобіжник або автоматичний вимикач, що спричиняє автоматичне відключення аварійної ділянки від мережі. Додаткове заземлення зануленого корпусу підвищує рівень безпеки, оскільки покращує умови для роботи нульового захисного проводу.

Організаційні та технічні заходи із забезпечення електробезпеки здебільшого включають належну підготовку персоналу: це навчання, проведення інструктажів та допуск до роботи з електроустановками лише тих осіб, які пройшли медичний огляд. Також важливим є виконання комплексу технічних заходів при роботах з відключенням напруги в діючих електроустановках або поблизу них, що передбачає замикання приводів, зняття запобіжників, повне від’єднання живильних ліній, встановлення огорож і попереджувальних знаків безпеки, а також накладення заземлень. Особливу увагу необхідно приділяти роботам на струмопровідних частинах під напругою або поблизу них. Такі роботи мають виконуватися за спеціальними нарядами бригадою мінімум з двох осіб, із обов’язковим організаційним наглядом, використанням відповідних засобів електрозахисту тощо.

Поряд із вищезазначеними заходами доцільно використовувати електрозахисні засоби та запобіжні пристрої, які доповнюють захисні механізми електроустановок. Застосування таких засобів необхідне через те, що під час експлуатації електроустановок можуть виникати ситуації, коли навіть найсучасніші захисні пристрої не забезпечують повної безпеки для людини.

Залежно від свого призначення, засоби захисту поділяються на три основні групи: ізолюючі, огороджувальні та допоміжні.

Ізолюючі засоби бувають основними та додатковими. Основні ізолюючі засоби оснащені ізоляцією, яка здатна тривалий час витримувати робочу напругу електроустановки. Завдяки цьому ними можна торкатися струмопровідних частин,

що перебувають під напругою. До основних ізолюючих засобів для робіт в електроустановках з напругою до 1000 В належать ізолюючі штанги, електровимірювальні та ізолюючі кліщі, діелектричні рукавички, інструменти з ізоляційними рукоятками та покажчики напруги. У разі робіт в електроустановках з напругою понад 1000 В використовуються оперативні й вимірювальні штанги, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги та інші засоби для виконання ремонтних робіт під напругою, зокрема ізолюючі сходи та майданчики.

Додаткові ізолюючі засоби мають слабші ізоляційні властивості й застосовуються лише як доповнення до основних засобів для посилення їхнього захисного ефекту. Наприклад, при роботах у електроустановках до 1000 В це діелектричні калоші, килимки, ізолюючі підставки, а при роботах з напругою понад 1000 В – діелектричні рукавички, боти, килимки та ізолюючі підставки.

Огороджувальні захисні засоби призначені для тимчасового огородження струмопровідних частин, що перебувають під напругою. До них належать захисні щити, бар’єри, клітки-огорожі та тимчасові переносні заземлення. Останні унеможливлюють виникнення напруги на відключеному обладнанні.

Допоміжні захисні засоби призначені для запобігання випадковому падінню з висоти (запобіжні пояси тощо), для безпечного підйому (спеціальні сходи та кігті), а також для забезпечення захисту від дії світлових, теплових, механічних або хімічних факторів електричного струму (захисні окуляри, щитки, рукавиці тощо).

Детальну характеристику умов праці представлено в таблиці 4.1.

4.2 Виробнича санітарія виробництва

4.2.1 Природне та штучне освітлення

Освітлення проектованого цеху включає природне та штучне світло. У випадках недостатності природного освітлення використовується комбіноване освітлення, яке передбачає одночасне застосування природного та штучного світла в світлий час доби.

Таблиця 4.1 - Шкідливі та небезпечні фактори при виплавці кремнію кристалічного

№ п/п	Фактор виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення ГДК, мг/м^3	Фактичне значення	3 класи - шкідливі та небезпечні умови та характер праці			Тривалість дії фактора, % за зміну	Примітка
				1 ступінь	2 ступінь	3 ступінь		
1	Шкідливі хімічні речовини 1 клас небезпеки марганцю оксиди (аерозолі конденсації) 2-3 клас небезпеки марганцю оксиди (аерозолі дезінтеграції) 3-4 клас небезпеки азоту діоксид вуглецю оксид	 0,05 0,3 2 20	 1,884 1,393 1,802 8,25	 1,18	 	 36,88 	 96,88 96,88 96,88 96,88	
2	Пил переважно фіброгенної дії	2	11,38			5,69	96,88	Містить 24,3% кремнію діоксиду
3	Шум, дБ	80	81	1			96,88	
4	Мікроклімат у приміщенні - температура повітря, ^{0}C - Швидкість руху повітря, м/сек - відносна вологість повітря, % -інфрачервоне випромінювання, Вт/м^2	 13 - 19 не більше 0,5 не більше 75 140	 20 0,38 41 1980	 	 1980	 	 96,88 581,28 96,88 96,88 50	
5	Тяжкість роботи. Динамічна робота - Потужність зовнішньої роботи за участю м'язів нижніх кінцівок та тулуба, Вт - те саме при роботі м'язів плечового пояса, Вт - маса підйому та переміщення вантажу, кг	 до 90 до 45 до 31	 205 215,1 32	 205 215,1 32	 	 	 78 	
6	Робоча поза Нахили тулуба та переміщення у просторі, більше 30^o	 до 101	Вільна 124	 124	 	 	 	
7	Увага (тривалість зосередженості), % до тривалості зміни	75	54,2					
8	Змінність	Нерегулярність змін	3-х змінна	3-х змінна				

Природне освітлення забезпечується через вікна, розташовані у бічних та торцевих стінах, а також через верхні світлові отвори, такі як фрамуги та ліхтарі.

Комбіноване освітлення надає перевагу завдяки рівномірному розподілу світла в приміщенні. Натомість бокове освітлення може створювати нерівномірність, яка особливо помітна між зонами біля вікон і далекими від них.

Штучне освітлення застосовується для забезпечення належної видимості на робочих поверхнях у темний час доби або при недостатньому природному світлі. Воно виконується за допомогою газорозрядних ламп типу ДРЛ 700, які забезпечують ефективне освітлення приміщення.

Переваги ламп ДРЛ полягають у високій світловій ефективності (до 55 лм/Вт), тривалому терміні служби (до 10 000 годин), компактності та стійкості до умов довкілля, за винятком екстремально низьких температур.

Серед основних недоліків варто відзначити домінування синьо-зеленого спектру в променях, що негативно впливає на передачу кольору. Це унеможливлює використання ламп у ситуаціях, де важливо розрізняти кольори чи обличчя людей. Також є обмеження щодо роботи лише на змінному струмі, необхідність використання баластового дроселя для підключення, тривалий час розгортання при включенні (приблизно 7 хвилин), а повторне запалювання після короткочасного переривання живлення можливе лише після охолодження лампи (близько 10 хвилин). Крім того, світловий потік має більші пульсації порівняно з люмінесцентними лампами, а до кінця терміну служби інтенсивність світла значно знижується.

Штучне освітлення є загальним локалізованим і організовано відповідно до розташування обладнання, що дозволяє забезпечити достатній рівень освітлення робочих місць (освітленість становить 200 лк).

Евакуаційне освітлення призначене для забезпечення безпечної евакуації людей у разі аварійного відключення основного освітлення. Його встановлено на сходах та основних проходах цеху, забезпечуючи освітленість на рівні 0,5 лк на підлозі проходів і сходах. У цьому освітленні використовуються лампи розжарювання типу НВ.

4.2.2 Вентиляція

Навколишнє повітря є механічною сумішшю газів, основними складовими якої є кисень, азот і водяна пара (волога). Повітря, яке не містить водяної пари, називають сухим, а те, що її містить – вологим.

Для комфортного самопочуття людини повітря повинно забезпечувати поглинання тепла та вологи, які організм виділяє під час нормальних фізіологічних процесів. Якщо ці умови не виконуються, самопочуття погіршується, а тривале перебування у такому середовищі може призвести до виникнення захворювань. Оптимальні умови для гарного самопочуття загалом включають температуру повітря 18–20 °C і відносну вологість 50–60%.

Рухливість повітря впливає на його здатність відводити тепло й вологу. Висока температура є одним із факторів, що негативно позначаються на якості повітря. Теплові потоки, які утворюються при зіткненні повітря з нагрітими поверхнями, особливо печами або розплавленим металом, значно збільшують температуру у верхній зоні приміщення. Таке променисте тепло нагріває все навколо, створюючи дискомфорт і небезпеку.

Особливу загрозу для працівників становлять оксид вуглецю та діоксид кремнію, які утворюються в процесі плавки. У приміщеннях із розплавленими матеріалами повітря через виділення тепла від печей має вищу температуру та меншу густину порівняно з зовнішнім повітрям. Ця різниця густин спричиняє природний теплообмін, який називається природною вентиляцією. Під час такого процесу тепле і легше повітря виходить через верхні отвори приміщення, а на його місце через нижні отвори заходить холодніше зовнішнє повітря.

Для природної вентиляції важливу роль відіграє вітер. У випадку, коли через різницю густин створюється гравітаційний тиск, дія вітру призводить до утворення додаткового вітрового тиску. Спільна взаємодія цих двох чинників забезпечує ефективну роботу природної вентиляції в приміщенні.

Природна вентиляція не завжди здатна забезпечити необхідний повітрообмін. У ситуаціях, коли потрібно точно видалити з приміщення певну кількість повітря і

замінити його свіжим у тому ж обсязі, застосовують механічну вентиляцію, яка поділяється на витяжну і припливну. Витяжні системи механічної вентиляції забезпечують виведення запиленого або загазованого повітря, очищуючи його від забруднень перед викидом в атмосферу.

Місцева витяжна вентиляція зазвичай облаштовується на горнових майданчиках печей і ефективно відводить гази, які утворюються безпосередньо під час випуску металу. У свою чергу, місцева припливна вентиляція спрямована на подачу свіжого повітря до горнових та плавильних майданчиків.

Системи припливної та витяжної вентиляції можуть працювати за необхідністю — їх активують чи вимикають працівники, які відповідають за обслуговування обладнання.

4.2.3 Побутові і допоміжні приміщення

Побутові приміщення розташовані у чотириповерховій будівлі. На першому поверсі знаходиться жіноча вбиральня, а другий і третій поверхи повністю відведені під побутові потреби. Четвертий поверх зайнятий офісними приміщеннями, де працюють інженерно-технічні працівники. Для зручності пересування між будівлями передбачена перехідна галерея, яка з'єднує побутовий корпус із плавильним цехом.

Усі побутові та допоміжні приміщення оснащені сучасною інженерною інфраструктурою, такою як внутрішній водопровід, каналізація, системи опалення і вентиляції, електричне освітлення та гаряче водопостачання. У приміщеннях передбачені необхідні зручності: вбиральні, душові кімнати, умивальники та гардеробні.

Гардеробні призначені для зберігання робочого, домашнього і вуличного одягу. Для цього обладнано спеціальні закриті індивідуальні шафи, кількість яких відповідає обліковому складу працівників. У вбиральнях встановлені фени для сушіння волосся, дзеркала та розетки для підключення електроприладів.

У душових кімнатах облаштовані групові кабіни, виготовлені із металевих каркасів, заповнених пластмасовими панелями. Вхід до кабін закривається водонепроникними розсувними шторами. Вони оснащені душовими сітками з індивідуальними змішувачами гарячої та холодної води, поличками для мила й губок, а також підніжками для миття ніг.

Вбиральня має кабіни розміром 1,2х0,9 м та висотою 2,2 м, встановлені на сталевих ніжках висотою 0,2 м. Двері відкриваються назовні. Усередині кабін розміщена підлогова чаша. Чоловічі вбиральні додатково обладнані настінними пісуарами. Перед входом до вбиралень облаштовані шлюзи з самозакривними дверима, які оснащені умивальниками з підведеною гарячою й холодною водою, а також електросушарками для рук. Для циркуляції повітря у вбиральнях використовується природна витяжна вентиляція. Додатково на першому поверсі є спеціально облаштовані кімнати для жіночої гігієни.

Для забезпечення працівників гарячим харчуванням на третьому поверсі адміністративно-побутового корпусу передбачено їдальню, яка функціонує цілодобово.

4.2.4 Засоби індивідуального захисту

Працівники, які обслуговують піч, повинні бути оснащені засобами індивідуального захисту. До таких засобів належать: суконний капелюх, куртка і штани, шкіряні черевики, текстолітова каска, шкіряні рукавиці, захисний щиток з оргскла, окуляри зі світлофільтром типу П-3 та респіратор типу «Пелюстка».

4.3 Протипожежна безпека виробництва

4.3.1 Характеристика виробництва з вибухопожежної небезпеки

Значну роль у реалізації заходів із забезпечення пожежної та вибухонебезпеки відіграє оцінка пожежної небезпеки виробничих процесів. Умови, які виникають під час пожеж у промислових будівлях, безпосередньо залежать від типу речовин,

що використовуються в цих об'єктах. Для розумного проектування таких споруд першочерговим завданням є визначення категорії пожежної небезпеки виробництва.

Відповідно до будівельних норм та правил (СНиП II-90-81), виробничі будівлі класифікуються на шість категорій небезпеки: А, Б, В, Г, Д, Е. У межах цього дослідження розглядається категорія Д, яка охоплює виробництва з непожежонебезпечними технологічними процесами, здебільшого пов’язаними з холодною обробкою.

Пожежна небезпека феросплавного виробництва зумовлена наявністю горючих газів у виробничих агрегатах, використанням кисню та застосуванням масляних трансформаторів. Трансформатори розташовуються поблизу печей з міркувань економічності та ефективності. При цьому струмоведучі елементи захищені від впливу теплового випромінювання за допомогою азбестових щитів.

Вимоги правил експлуатації електроустановок дозволяють розміщення в одній камері трьох однофазних трансформаторів. Такі камери обладнані стаціонарними установками пожежогасіння й автоматичною системою пожежної сигналізації. Установки пожежогасіння забезпечені дистанційним запуском, а сигналізація передає оповіщення на пульт управління печами. Гасіння пожеж у камерах трансформаторів здійснюється за допомогою повітряної піни.

Кисень є одним із найбільш хімічно активних елементів, що легко вступає у взаємодію з більшістю речовин. Реакції кисню часто мають екзотермічний характер. Підвищений вміст кисню в атмосфері значно підвищує ризик горіння звичайно горючих речовин, знижуючи температуру їхнього самозаймання та збільшуючи швидкість і ефективність вигоряння. У таких умовах навіть важкогорючі чи негорючі матеріали можуть стати горючими. Особливо небезпечними є масла й жири, які здатні легко самозайматися в кисневому середовищі під тиском. Якщо такі речовини потрапляють у вентиляційні клапани, редуктори або інші механізми, працюючі в кисневому середовищі, це може спричинити вибух.

4.3.2 Профілактичні та протипожежні заходи

Усі протипожежні заходи поділяються на інженерні та організаційні. До інженерних заходів належать раціональне планування будівель цеху, обладнання об’єктів протипожежною сигналізацією, блискавкозахистом та іншими засобами захисту.

Раціональність у проектуванні підприємств з точки зору пожежної безпеки регламентується нормами СНиП II-А.5-72 та СНиП II-М.2-72. Залежно від вогнестійкості, всі споруди класифікуються за п’ятьма ступенями: від I до V. Оскільки феросплавне виробництво належить до вибухопожежонебезпечних категорій, будівлі цеху мають відповідати I ступеню вогнестійкості, що забезпечує найвищий рівень стійкості до вогню. Висота будівлі визначена в межах чотирьох поверхів, при цьому всі основні конструктивні елементи виконані з негорючих матеріалів.

У будівлі передбачені умови для швидкої та безпечної евакуації людей у разі пожежі. Ширина евакуаційних шляхів і виходів (дверей і сходів) обчислюється за нормою 0,6 м на кожні 100 осіб. Максимальна довжина евакуаційних маршрутів від найвіддаленішого робочого місця до найближчого виходу не повинна перевищувати 75 метрів.

Для запобігання поширенню пожежі використовуються спеціальні протипожежні бар’єри – конструкції, які перешкоджають проникненню вогню та захищають від впливу теплової енергії. До таких бар’єрів належать протипожежні стіни, перекриття, а також завіси, двері та вікна, встановлені у їхніх отворах. Протипожежні стіни застосовуються для поділу будівлі на окремі відсіки з метою локалізації можливого вогню. Їх мінімальна межа вогнестійкості становить 2,5 години.

Також для обмеження поширення вогню використовують самоскидні покриття, збільшені площі скління, протипожежні зони та розриви між об’єктами. Для запобігання небезпеці пошкодження блискавкою передбачається блискавкозахист, який виконується згідно з вимогами СН 305-69. Захист

промислових будівель від ударів блискавки забезпечується за рахунок окремо встановлених стрижневих блискавковідводів. Кожен з них оснащений окремим заземлювачем перерізом 40 мм², який відводить електричний заряд в землю.

Електричні пристрої можуть спричиняти пожежі у випадках перевантаження проводів або короткого замикання. Щоб уникнути таких ситуацій, необхідно правильно підбирати, монтувати та експлуатувати електромережі та обладнання. Для мінімізації наслідків короткого замикання використовуються швидкодійний релейний захист, вимикачі та плавкі запобіжники.

Запобігти перевантаженню мережі можливо завдяки правильному вибору перерізу провідників, недопущенню підключення непередбачених споживачів та запобіганню перегріванню обладнання. Для захисту електроустановок від струмів перевантаження встановлюються плавкі запобіжники. Вони розмикають електричний ланцюг до того, як температура встигне досягти небезпечного рівня.

Швидке виявлення пожежі та оповіщення про неї забезпечується автоматичними системами пожежної сигналізації, що встановлюються у виробничих приміщеннях. Вони включають сповіщувачі, які реагують на дим, підвищення температури або полум’я, передаючи сигнал приймальній станції. Система автоматично активує світлове й звукове оповіщення про небезпеку.

Також важливу роль відіграють організаційні заходи із забезпечення пожежної безпеки. Згідно з типовими правилами, кожне підприємство розробляє загальнооб’єктові та спеціальні цехові інструкції з пожежної безпеки.

На підприємствах організовуються добровільні пожежні дружини для проведення профілактичної роботи та гасіння пожеж. Вони діють відповідно до положень, затверджених Міністерством внутрішніх справ.

Керівник підприємства наказом формує пожежно-технічну комісію, до складу якої зазвичай входять: головний інженер, начальник пожежної охорони, технолог, інженери й фахівці з техніки безпеки. Основними завданнями комісії є виявлення та усунення пожежонебезпечних недоліків у технологічних процесах, сприяння органам пожежного нагляду та проведення навчально-роз’яснювальної роботи серед співробітників.

Усі працівники підприємств проходять обов’язковий первинний, а також повторний інструктаж із питань пожежної безпеки безпосередньо на робочому місці відповідно до затвердженої програми.

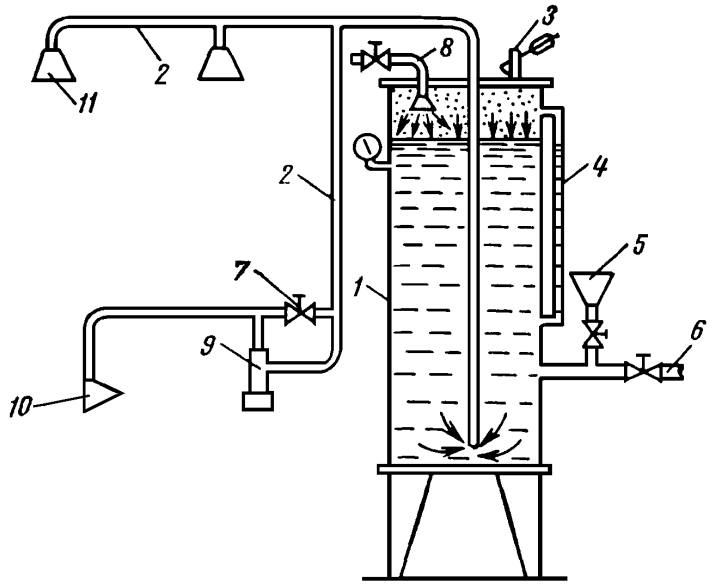
4.3.3 Засоби гасіння пожеж

Гасіння пожеж передбачає припинення процесу горіння шляхом механічного, фізичного або хімічного впливу. Найбільш ефективним і поширеним способом боротьби з вогнем є використання води, яка здатна загасити більшість пожеж. Важливо приймати заходи для ліквідації осередку загоряння на початковому етапі, забезпечуючи подачу води у такій кількості, яка дозволить швидко локалізувати пожежу.

Подачу води організовують по всій території підприємства за допомогою пожежного водопроводу, який розраховується для забезпечення необхідного обсягу води під відповідним тиском протягом трьох годин.

Для гасіння невеликих осередків пожежі, спричинених займанням твердих матеріалів та горючих рідин на площі до 1 м², використовуються ручні пінні вогнегасники марки ОХП-10, а також ручні вуглекислотні вогнегасники марок ОУ-2, ОУ-5 і ОУ-8. Вуглекислота, яка не проводить електричний струм, особливо ефективна для ліквідації пожеж електроустановок і займань електропроводів. Проте її не можна використовувати для гасіння речовин, які горять без доступу повітря.

У камері трансформатора для запобігання можливим пожежам встановлено стаціонарний вогнегасник, розроблений за конструкцією Л. В. Іванова. Його схема наведена на рисунку 4.1.



1 – резервуар; 2 – трубопровід для подачі розчину; 3 – запобіжний клапан;
4 – трубка контролю рівня розчину; 5 – вирва для заливання піноутворювача;
6 – трубопровід для подачі води; 7 – вентилі ручного керування установкою;
8 – трубопровід для подачі повітря; 9 – датчик з легкогорючою діафрагмою;
10 – генератор; 11 - спринклерний зрошувач

Рисунок 4.1 - Схема модернізованого апарату Л. В. Іванова

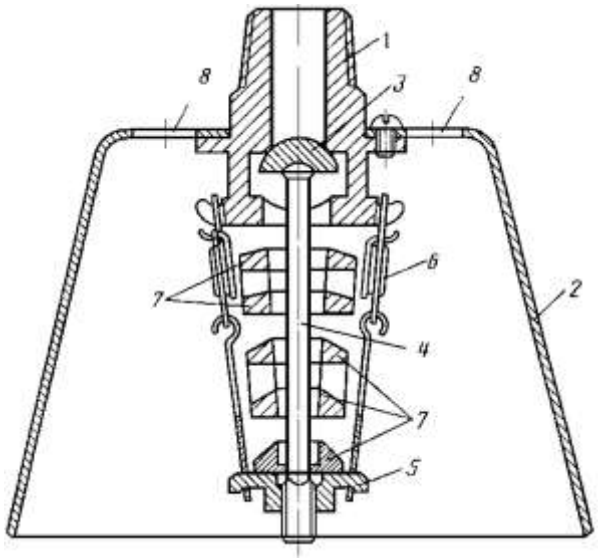
Місткість апарата заповнена приблизно на 75% розчином піноутворювача ПО-1 із концентрацією 4%, над поверхнею якого знаходиться стиснене повітря, що надходить через трубопровід 8. Через інші трубопроводи, з якими з'єднаний апарат, подача здійснюється до пінних зрошувачів ОПС (рисунок 4.2) та генераторів багаторазової піни ГВП-100.

За підвищення температури в приміщенні починають плавитися легкоплавкі елементи теплових замків зрошувачів. Це дозволяє розчину потрапити на діафрагми зрошувачів, де він утворює повітряно-механічну піну. Процес створення піни триває доти, доки весь об’єм розчину не буде витіснений стисненим повітрям із апарата.

У випадку появи відкритого полум'я або стрімкого підвищення температури в зоні, яка захищається, активується датчик із легкоплавкою

мембраною 9. Це одразу відкриває доступ розчину до генератора багаторазової піни ГВП-200, що дозволяє негайно розпочати процес гасіння.

На рисунку 4.2 показано пінний спринклерний зрошувач ОПС. Він складається із насадки-розпилювача діафрагмового типу, яка включає штуцер, дифузор та тепловий замок. Розчин піноутворювача, що потрапляє до зрошувача, виходить через отвір у штуцері 1 і розпорошується на діафрагми 7, формуючи п'ять віялоподібних струменів. Верхні три діафрагми спрямовують струмінь на стінки дифузора 2, створюючи в його верхній частині область розрядження. Унаслідок цього через шість отворів 8 відбувається підсмоктування повітря з навколишнього середовища.



1 – штуцер; 2 – дифузор; 3 – клапан; 4 – шток; 5 – натяжна гайка; 6 – теплові замки; 7 – діафрагми; 8 – отвори для підсмоктування повітря

Рисунок 4.2 - Схема спринклерного зрошувача ОПС

Під час перемішування повітря із розчином утворюється повітряно-механічна піна, яка далі розпилюється струменями, створеними двома нижніми діафрагмами. Мінімально допустимий тиск розчину перед пінним зрошувачем складає 1,5 кг/см², а робочий тиск дорівнює 3,0 кг/см². Інерційність теплового замка зрошувача ОПС становить 1,8 хвилини. При робочому тиску витрата розчину сягає 3,5 кг/с. Площа зрошення одним пінним зрошувачем залежить від висоти його встановлення і може бути визначена відповідно до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Площа зрошення ОПС

Висота розташування зрошувача, м	2	4	6	8	10	12
Площа зрошення, м^2	13	17	21	23	24	25

4.3.4 Розрахунок штучного освітлення виробничої будівлі за методом коефіцієнта використання

Визначення потрібного потоку ламп у кожному світильнику [14]

$$\Phi = \frac{EkSz}{N\eta} = \frac{75 \cdot 1{,}65 \cdot 10836}{240 \cdot 0{,}4} = 27936 \text{лм} \qquad (4.1)$$

де E - задана мінімальна освітленість, лк; k – коефіцієнт запасу; S - освітлювана площа, м^2; z - відношення $E_{ср}$:$E_{мін}$; N – кількість світильників; η - коефіцієнт використання у частках одиниці.

Згідно Ф обрано стандартну лампу типу ДРЛ 700. Технічні характеристики обраного типу ламп представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні дані ламп ртутних дугових високого тиску з виправленою кольоровістю

Тип лампи	Потужність, Вт	Напруга на лампі,	Струм лампи, А		Світловий потік, лм після 100 год горіння	Розмір, мм		Тип цоколя
			робітник	пусковий		D	L	
ДРЛ700	700	140	5,45	12,00	35000	152	368	E40

Визначення числа світильників у ряду

$$N = \frac{\Phi}{\Phi_1} = \frac{27936}{35000} = 0{,}80 \quad (4.2)$$

Визначення індексу приміщення

$$i = \frac{AB}{h(A+B)} = \frac{258 \cdot 42}{27{,}7(258+42)} = 1{,}5 \quad (4.3)$$

де A, B, h – відповідно, довжина, ширина та висота будівлі.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеної роботи була розроблена технологія виробництва кристалічних кремнієвих матеріалів, які мають широку сферу застосування.

Запропонована технологічна схема виробництва сплаву Кр3 забезпечує такі переваги:

- зменшення витрат електроенергії на 10% від початкового рівня;

- скорочення використання самоспікальних електродів завдяки зменшенню участі вуглецю в процесах відновлення;

- повна автоматизація шихтового відділення, що дозволяє оптимізувати робочу силу та скоротити штат на 15 осіб.

Разом із цим, нова технологія має певні недоліки:

- збільшене споживання охолоджувача (пом'якшеної технічної води);

- завищене навантаження на газоочисні споруди через підвищений обсяг відхідних газів.

Загалом інвестиції в цей напрямок виробництва є економічно виправданими. Зростання обсягів випуску продукції сприятиме швидшій окупності витрат на придбання, монтаж обладнання та витратні матеріали. Крім того, збільшення частки легованого металу, виробленого в електропечах та кисневих конверторах, відкриває додаткові перспективи для галузі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Гасік М. І., Гладких В. А. Проектування електрометалургійних цехів. Київ; Донецьк : Вища школа, 1987. 144 с.

2. Тонкий Є. Г., Макаров В. Я. Закриті феросплавні печі. Донецьк : Промінь, 1968. 31 с.

3. Сучасні проблеми металургії. Наукові труди. – Том 6. Прогресивні енерго- та ресурсозберігаючі технології та обладнання в електротермії феросплавів. Дніпропетровськ : Системні технології, 2003. 376 с.

4. Інструкція з експлуатації, футерування та пуску закритих печей для виплавки крем'янистих сплавів ІЕ 144-ф-28-90.

5. Зубов В. Л., Гасік М. І. Електрометалургія феросиліція. Київ : Системні технології 2002. 705с.

6. Технологічна інструкція ТІ 144-ф-21-03. Виробництво феросиліцію в закритих печах.

7. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник для металург. спец. вищ. навч. закл. / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський [та ін.] ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

8. Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Київ : Наука, 2005. С. 45−48.

9. Пеккер О. М., Мінаєв В. І. Модернізація промислових печей. Київ : Техніка, 1987. 182с.

10. Комов І. Г. Охорона праці чорної металургії. Київ : Техніка, 1986. 192с.

11. Гапоненко О. Д., Савостін Д. З. Правила безпеки для підприємств та організацій металургійної промисловості. Дніпропетровськ : Промінь, 1970. 352 с.

12. Краснов Л. М. Охорона праці. Дніпропетровськ : Промінь 1981. 190с.

13. Державні санітарні правила "Підприємства чорної металургії" ДСП 3.3.1.038-99.

14. Наказ МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

15. Наказ МОЗ України «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони» 14.07.2020 № 1596.

16. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги.

17. ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вібраційна безпека. Загальні вимоги.

18. ДСТУ 3038-95 Гігієна. Терміни та визначення основних понять.

19. ДСТУ ГОСТ 12.4.221:2004 Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты. Общие технические требования (ГОСТ 12.4.221-2002, IDT).

20. НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безопасной эксплуатации электроустановок (ДНАОП 1.1.10-1.01-97).

21. СНиП 2.01.02-85*. Протипожежні норми (Діє ДБН В 1.1-7-2002) (2.01.02-85*).

22. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.

23. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.