

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

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

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

рівень вищої освіти Другий магістерський рівень

(другий (магістерський) рівень)

на тему _____ Технологічні особливості виготовлення металургійного карбиду кремнію _____

Виконав: студент 2 курсу, групи 6.1361-МКМ

Пшенична Анна

Олександрівна
(ПІБ)


(підпис)

спеціальності

136 Металургія

(шифр і назва)

спеціалізація

6.1361.МКМ

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

металургія кольорових металів

(шифр і назва)

Керівник Скачков

В.О

(прізвище та ініціали)


(підпис)

Запоріжжя - 2023 року

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти другий магістерський рівень
другий (магістерський) рівень

Спеціальність 136 металургія
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма кольорова металургія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕТБ

Ю.О. Белоконь

“ 13 ” 12 2022 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ**

Пшенична Анна Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Технологічні особливості виготовлення металургійного карбіду кремнію

керівник роботи (проекту) Скачков Віктор Олексійович д.т.н.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ” 2022 року № -

2. Строк подання студентом роботи (проекта) 04.12.2022

3. Вихідні дані до роботи (проекта) Металургійний карбід кремнію, кокс, пісок кремнієвий, тирса, піч Ачесона

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат. Вступ. Загальна частина. Технологічна частина. Практична частина. Охорона праці та техногенна безпека. Висновки. Перелік посилань.

Керівник проекту (роботи)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Креслення, презентаційний матеріал 11 слайдах (на 11 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Розділ 1	Скачков В.О., професор	<i>В.О. Скачков</i>
Розділ 2	Скачков В.О., професор	<i>В.О. Скачков</i>
Розділ 3	Скачко В.О., професор	<i>В.О. Скачков</i>
Розділ 4	Скачков В.О., професор	<i>В.О. Скачков</i>
Нормоконтроль	Белоконь Ю.О. завідувач кафедри	<i>Ю.О. Белоконь</i>

7. Дата видачі завдання 10.09.2022

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	29.09.- 12.10.2022	
2	Реферат	12-16.10.2022	
3	Розділ 1	29.09.- 11.10.2022	
4	Розділ 2	30.10.- 07.11.2022	
4	Розділ 3	17-31.11.2022	
5	Розділ 4	24-31.11.2022	
6	Висновки	04.12.2022	

Студент *А.О. Пшенична* (підпис) А.О. Пшенична (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) *В.О. Скачков* (підпис) В.О. Скачков (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пшенична А.О. «Технологічні основи виробництва металургійного карбіду кремнію».

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 136 - Металургія, науковий керівник д.т.н., професор В.О. Скачков. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М.Потебні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, 2022.

Представлено основні властивості та застосування карбіду кремнію, види та властивості карбіду кремнію, способи його виробництва та економічна оцінка цих способів. Наведено питання отримання карбіду кремнію, опис технології дільниць, сировинні матеріали та їх підготовку, організації виробництва карбіду кремнію, представлено технологічне обладнання та його характеристики. Наводяться заходи щодо охорони техніки безпеки та охорони навколишнього середовища..

Ключові слова: КАРБІД КРЕМНІЮ, ПІЧ АЧЕСОНА, КОКС, ПІСОК КРЕМНІЄВІЙ, ШИХТА, ТИРСА.

ANNOTATION

Pshenichna A.O. "Technological basis of production of metallurgical silicon carbide".

Qualification work for obtaining a master's degree of higher education in the specialty 136 - Metallurgy, scientific supervisor, PhD, professor V.O. Skachkov Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebny of Zaporizhzhia National University, Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technogenic Safety, 2022.

The main properties and applications of silicon carbide, types and properties of silicon carbide, methods of its production and economic evaluation of these methods are presented. The question of obtaining silicon carbide, a description of the technology of the sites, raw materials and their preparation, the organization of silicon carbide production, technological equipment and its characteristics are presented. Measures for safety and environmental protection are given.

Key words: SILICON CARBIDE, ACHESON FURNACE, COKE, SILICON SAND, CHARGE, SAW.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ, СТРУКТУРИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ЗАСТОСУВАННЯ КАРБІДУ КРЕМНІЮ.....	10
1.1 Методи одержання карбіду кремнію	10
1.2 Кристалічна структура карбіду кремнію.....	15
1.3. Види карбіду кремнію	17
1.4. Механізми спікання та ущільнення карбіду кремнію.....	21
1.5. Властивості карбіду кремнію	27
Висновки до розділу	28
2. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КАРБІДУ КРЕМНІЮ	29
2.1. Особливості процесу карботермічного відновлення кремнезему з утворенням карбіду кремнію.....	29
2.2 ... Технологічні основи синтезу SiC методом Ачессона	31
2.3. Загальний опис технологічного процесу.....	36
2.4 Сировинні матеріали для виробництва карбіду кремнію.....	37
2.5. Підготовка компонентів шихти та теплоізоляції	39
2.6 Технологічні особливості пічного відділення.....	41
2.7. Структура технологічних ділянок	44
Висновки до розділу	47
3 ПРАКТИЧНА ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛУРГІЙНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЮ.....	48
3.1 Загальний опис цеху з виробництва карбіду кремнію.....	48
3.2. Розміщення технологічного обладнання по ділянках.....	49
Висновки до розділу	55
4. Охорона праці пічної ділянки цеха	56
4.1. Правила технічної експлуатації і техніки безпеки.....	56

4.2. Безпека технологічного процесу, рівня його механізації	57
4.3. Потенційно небезпечні і шкідливі фактори промислової сфери.....	58
4.4. Захист від впливу небезпечних та шкідливих факторів.....	60
4.5. Промислова санітарія.....	61
4.5.1. Планове рішення будинки і споруди.....	61
4.5.2. Опалювання и вентиляція.....	62
4.5.3. Освітлення.....	63
4.5.4 Санитарно-бытовые помещения.....	64
4.5.5. Мери пожежної безпеки.....	65
4.6. Розрахунок вентиляції для видалення надлишкової теплоти.....	66
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	70

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасне матеріалознавство спрямовано на створення нових методів отримання високоміцних матеріалів конструкційного та металургійного призначення. До таких матеріалів можна віднести нові розробки на основі карбіду кремнію. Карбід кремнію представляється високотемпературним конструкційним матеріалом і має високі функціональні характеристики: високу температуру плавлення, низьку щільність, високі механічні властивості, стійкість до окислення та знесення, високу хімічну активність у розплавах металів та сплавів. Ці властивості забезпечують використання SiC як матеріал деталей газових турбін, поршневих двигунів і теплообмінників, а також у металургійних технологіях для розкислення та легування сплавів.

Винахід в 1885 методу електричної плавки отримав розвиток метод Ачесона. Використання металургійної практики методу Ачесона дозволило організувати великомасштабне виробництво порошку карбіду кремнію [1]. В даний час карбід кремнію у великих обсягах виробляється в Китаї та Україні. У Європі найбільшими підприємствами з виробництва карбіду кремнію є: ESK Ceramics, Saint-Gobain, HC Starck та інші.

Відомі та використовуються інші методи виробництва карбіду кремнію: карботермічне відновлення оксидів кремнію, спрямоване на отримання чистих надтонких кристалів β -SiC для напівпровідникової промисловості; одержання волокон α -SiC та β -SiC мікронних розмірів при взаємодії кремнію та порошку вуглецю при температурі 1900–2100 оС. Домішки алюмінію і бору використовують як активуючих добавок при виробництві пластинчастих кристалів SiC.

Плазмохімічний синтез є найпоширенішим методом одержання високодисперсних порошків. Метод заснований на застосуванні низькотемпературної плазми, що генерується в процесі дугового, тліючого, високо або надвисокочастотного розрядів.

Порошки карбіду кремнію можна отримати шляхом високотемпературного синтезу. Цей метод було відкрито 1967 року А.Г. Мержановим, І.П. Боровинський та В.М. Шкірі [21]. Метод високотемпературного синтезу ділять на два режими: пошарове горіння та об'ємне горіння.

Кристали SiC, отримані у процесі синтезу за способом Ачесона, складаються з трьох модифікацій: гексагональної, тригональної та кубічної. Атомна структура карбіду кремнію складається з sp^3 гібридизації атомних орбіталей, що утворюють тетраедри з атомами Si або C у просторовому центрі, оточені чотирма іншими атомами [22].

Карбідокремнієві матеріали умовно можна розділити на дві групи: комірчасті матеріали, до них відносяться - керамічно зв'язаний карбід кремнію (CSiC), рекристалізований карбід кремнію (RSiC), реакційно-пов'язаний карбід кремнію (RBSiC); щільні матеріали з карбіду кремнію, що включають силицированний (реакційно-спечений) карбід кремнію (SiSiC), твердофазно-спечений карбід кремнію (SSiC), рідкофазно-спечений карбід кремнію, гарячепресований (HPSiC) і гаряче пресований ізостатично.

Об'єкт дослідження: фізико-хімічні особливості процесу отримання металургійного карбіду кремнію

Предмет дослідження: технологія процесу одержання металургійного карбіду кремнію

Мета роботи. Метою дослідження є проведення аналізу способів отримання карбіду кремнію. Надати оцінку термодинамічних та технологічних особливостей отримання металургійного карбіду кремнію в умовах синтезу по методу Ачесона, представити технологію промислового отримання металургійного карбіду кремнію.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан виробництва та використання металургійного карбіду кремнію.

2. Дослідити фізико-хімічні та технологічні особливості виробництва металургійного карбіду кремнію.

3. Розглянути раціональні шляхи розробки технології та організації виробництва карбіду кремнію.

Методи дослідження: термодинамічний аналіз в системі Si-O-C, хімічний та гранулометричний аналіз сировинних компонентів та реакційної шихти.

Наукова новизна отриманих результатів:

- встановлено механізми високотемпературного синтезу карбіду кремнію.

- розроблено раціональні шляхи виробництва металургійного карбіду кремнію.

- встановлено механізми хімічних реакцій у процесі отримання зеленого та чорного карбіду кремнію.

Практична цінність роботи. Проведено розрахунок шихтових матеріалів для отримання феросплавів на основі металургійних відходів. Розроблено технологію отримання металургійного карбіду кремнію методом Ачесона у стаціонарних печах.

Апробація результатів роботи: результати досліджень, які включено до кваліфікаційної магістерської роботи, доповіли на конференції кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки.

Відомості про публікації: основні результати роботи викладені в збірці магістерських робіт і статей, і 1 тезах конференцій.

Структура і об'єм роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 49 найменувань, викладена на 74 сторінках машинописного тексту, включаючи 3 рисунків, 11 таблиці.

1 Аналіз методів отримання, структури, властивостей та застосування карбіду кремнію.

1.1 Методи отримання карбіда кремнія

Використання методу Ачесона забезпечило організацію крупномасштабного виробництва всіх видів карбіда кремнія [1]. Карбід кремнію в досить великих обсягах виробляється в ряді країн, таких як Китац і Україна.. Найбільш широко розробляються і застосовуються методи отримання карбіду кремнію зеленого, чорного і металургійного:

- карботермічне відновлення диоксиду кремнія;
- модифікований процес отримання порошків β -SiC [2];
- е випадку і в α і β -SiC мікронних діаметрів взаємод;
- методи з первинним алюмінієм і поверхнею в активних речовинах, які присутні в кристалі SiC.

Алюміній посилює ріст карбіду кремнію в напрямку $\{0001\}$ і уповільнює ріст кристалів перпендикулярно до напрямку $\{0001\}$. Бор посилює зростання кристалів перпендикулярно до напрямку $\{0001\}$ [3].

Волокна карбіда кремнія вміст (мас.%) 0,04-0,45 Al; 0,4-0,8 B; 0,4-0,8 Ni; 0,3-3,6 Si[4]. Більшість із цих примесей присутні на зовнішній поверхні волокон карбіда кремнія. Реакційно-іспечений карбид кремнія вперше отриманий з високим вмістом основного компонента та пористістю 2% В 1973 р. Прохазка [5] вперше синтезував твердофазнопечений карбид кремнія (SSiC) з достатньою високою щільністю. В роботі [6] на основі β -SiC показані механізми ущільнення α -SiC з використанням добавок бору та вуглероду при температурі 2100 К. В 1981 р. запропонований варіант легування SiC складається з Al_2O_3 та AlN [7]. Можливо, методом рідкофазного синтезу SiC з оксидами і з наявними значеннями. В роботі [8] приводяться до результатів спекання β -SiC до щільного стану при

температурі 2400 К. Як домішки використовувалися оксид ітрію і $\text{Al}(\text{OH})_3$, який при розкладанні утворює оксид алюмінію. Успішне рідкофазне спікання нітриду кремнію з добавками по системі $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ забезпечило розробку комплексу матеріалів на основі $\alpha\text{-SiC}$ і $\beta\text{-SiC}$ [9]. У роботі [10] спікання карбіду кремнію успішно провели у рідкій фазі AlN з оксидом ітрію або оксидом алюмінію. Пізніше в роботах [11] показаний процес синтезу карбіду кремнію з добавками в системі $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-AlN}$, при цьому реалізується процес придушення реакції розкладання при спіканні в атмосфері надлишкового тиску азоту. Найчастіше в процесі рідкофазного синтезу карбіду кремнію використовуються добавки у вигляді систем $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ та $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-AlN}$.

Отримання монокристалічного карбіду сублімаційними методами запропонував Дж. Лелі [12]. Метод [12] найбільше підходить для отримання напівпровідникових монокристалів карбіду кремнію. Він полягає у випаровуванні полікристалічного SiC при температурі 2500-2600°C з подальшою конденсацією на випадкових зародках.

Протягом багатьох років метод Лелі був єдиним промисловим способом отримання кристалів для напівпровідникової промисловості. Недоліком цього методу є утворення великої кількості зародка. Це призводить до надлишку дрібних кристалів. Використання затравок дозволяє вирощувати монокристали великого розміру. 1979 року В.Ф. Цветковим та Ю.М. Таїровим запропоновано модифікований метод Лелі [14]. Сутність методу полягає у фізичному транспорті парів з наступною конденсацією пересиченої пари, що виникає під час сублімації синтезованого карбіду кремнію на монокристалічну затравку. Сублімаційне зростання залежить від низки факторів, найважливішими є конструкція самого тигля та розподіл температури у ньому. Полікристалічний карбід кремнію знаходиться в зоні високих температур 2100-2000 К.

Пари надходять на холоднішу кристалу-затравку, на поверхні якої і відбувається кристалізація. Розмір кристала поступово збільшується за рахунок багаторазового бічного нарощування. На відміну від методу Лелі, нагрівач може бути виконаний з графіту з прямим пропусканням струму або струмами високої частоти, що нагріваються [15].

Золь-гель метод набув широкого поширення наприкінці 1970 р., коли почали розроблятися нові низькотемпературні методи отримання оксидної кераміки на основі діоксиду цирконію, оксиду алюмінію, діоксиду кремнію [16]. Основною перевагою використання методу золь-гель синтезу є можливість отримання високочистого продукту з однорідною мікроструктурою. Такого результату неможливо було досягти відомими методами обробки. Це зумовлено високою температурою плавлення, випаровуванням та кристалізацією.

Використання золь-гель методу є особливо ефективним для синтезу нанорозмірних порошоків. Золь-гель метод успішно може застосовуватися до виробництва плівок і волокон. Золь-гель процес включає дві основні стадії: гідроліз та поліконденсацію. Перша стадія починається з приготування кварцового скла за допомогою змішування відповідного вихідного компонента, води та взаємного розчинника з утворенням розчину. Гідроліз призводить до утворення груп SiOH, які згодом конденсуються з утворенням силоксанових зв'язків SiOSi. Силікагель призводить до жорсткої, взаємозалежної тривимірної мережі, що складається з полімерних ланцюгів [17]. Видалення розчинника реалізується за допомогою сушіння. Внаслідок цього процесу відбувається усадка з утворенням ксерогелі. Ця фаза обробки сильно впливає мікроструктуру кінцевого компонента.

Золь-гель метод отримання порошоків SiC є досить дорогим порівняно з іншими методами, особливо методом Ачесона. Частинки, отримані за

допомогою метода золь-гель, досить пористі за рахунок виділення газів у ході карбонізації та карботермічного відновлення.

Плазмохімічний синтез є найпоширенішим методом одержання високодисперсних порошків. Метод заснований на застосуванні низькотемпературної плазми, що генерується в процесі дугового, тліючого, високо- або надвисокочастотного розрядів. Частинки порошку, отримані цим методом, є монокристали розмірами від 10 до 200 нм. Процес характеризується високою швидкістю зародка утворення твердої фази при малих швидкостях зростання. При високій температурі плазми усі вихідні речовини переходять у газоподібний або вінізований стан. Наявність іонів призводить до великих швидкостей взаємодії та малого часу реакцій.

Авторами статті [18] досліджено можливості одержання нанодисперсних порошків карбїду кремнію в умовах плазмохімічних процесів із водневим відновленням тетрахлориду кремнію.

У цьому процесі використовувалася аргонна електродуга та азотна мікрохвильова плазма. Отримано однофазні порошки кубічної модифікації з характерним розміром частинок 20 – 120 нм. Різновидом плазмохімічного синтезу є газофазний процес із використанням нагрівання реакційної суміші. При використанні цього методу виключається забруднення суміші та контроль процесу, у тому числі контроль за гомогенним утворенням зародків. У роботі [19] запропоновано спосіб отримання нанокристалічних порошків Si, Si₃N₄ та SiC за допомогою лазерного синтезу. Порошки отримували піролізом газоподібного силану (SiH₄) з використанням вуглекислотного лазера. При цьому частинки порошку карбїду кремнію мали розміри 18-26 нм. У ході експерименту показано, що зерна нанопорошків мають сферичну форму та вузький розподіл за розмірами. Отримати наночастинки необхідної стехіометрії можна за допомогою

додакового короткочасного випалу в контрольованому газоподібному середовищі.

Хімічне осадження з парової фази. Хімічне осадження з парової фази - хімічна реакція утворення карбіду кремнію методом піролізу газоподібного реакційного середовища. Даний метод дозволяє отримувати як плівкові структури, так і покриття на зернистих матеріалах та нановолокна. У методі осадження з парової фази використовуються силан та вуглеводні, як вихідні реагенти, а газом носієм є водень. Процеси хімічного осадження проводять у умовах зниженого тиску. Для активації процесу використовуються один із відомих методів – термічний, фотохімічний, лазерний, плазмовий.

У роботі [20] доведено, що при температурі 1400 К виходять рівноосні, квазісферичні та агломеровані частинки SiC з коіплексу силану – ацетилену в атмосфері азоту. Середній розмір частинок порошку становить 0,1-0,2 мкм, а максимальний розмір агломерату становить близько 0,3 мкм. За допомогою цієї технології можливе одержання плівкових структур, проте утруднена можливість отримання гомогенних структур.

Метод самопоширюваного високотемпературного синтезу - СВС. Порошки карбіду кремнію можна отримати за допомогою високотемпературного методу синтезу (СВС). Метод відкрито 1967 року групою вчених - А.Г. Мержановим, І.П. Боровинський та В.М. Шкірі [21]. У методі високотемпературного синтезу виділяють два режими: пошарове та об'ємне горіння. Форма вихідних компонентів може бути у вигляді порошку або у вигляді спресованої таблетки. Ініціювання процесу проводиться за допомогою підведення короткочасного теплового імпульсу із формуванням хвилі горіння. З цією метою можливе використання рівномірного нагрівання для запуску екзотермічної реакції горіння.

Спосіб СВС є реакцією горіння з локалізацією тепловиділення в шарі. Теплова енергія передається від шару до шару теплопередачі. Температура

хвильового фронту має досить високий рівень значень до 2000-4000 К. При реалізації процесу об'ємного горіння весь зразок нагрівають у контрольованому режимі, доки реакція не пройде

одночасно і рівномірно за обсягом зразка. Цей режим називають режимом термічного вибуху. Перевагами методу є велика швидкість протікання реакції; незначні енергетичні витрати; простота обладнання; висока продуктивність; хороша чистота кінцевого продукту.

1.2 Кристалічна структура карбїду кремнію.

Кристали SiC, отримані в процесі синтезу за методом Ачесона, передаються рядом модифікацій: гексагональної, тригональної та кубічної. Структура карбїду кремнію складається з sp^3 гібридизації атомних орбіталей, що утворюють тетраедри з атомами Si або C в просторовому центрі і оточені чотирма іншими атомами [22]. У тетраедрах вуглецеві атоми утворюють закриті упаковки паралельних шарів, а атом кремнію знаходиться в порожнинах тетраедра між шарами. Ці шари послідовно можуть повторюватися: ABC, ABC або AB, AB із кубічною або гексагональною щільною упаковкою. Відповідно до розташування атомів кремнію і вуглецю карбїд кремнію поділяється на α -SiC і β -SiC. У карбїді кремнію α -SiC виділяються структури з гексагональною та тригональною щільною упаковкою, а β -SiC - структури з кубічною упаковкою. Упаковки однакових шарів розрізняються за відстанями один щодо одного. Різні упаковки в карбїді мають схожі властивості за однакової щільності (3,21 г/см³). В даний час у карбїду кремнію виділяється до 180 різних політипів. Рамсделл ввів позначення для різних політипів карбїду кремнію. Перше число в позначенні політипа вказує на кількість вуглецевих шарів. Літера показує тип сингонії: C – кубічна сингонія, H – гексагональна, R – ромбоєдрична [22]. Політипи, які найчастіше зустрічаються, позначаються 3C, 2H, 4H, 6H та 15R. Кубічною формою карбїду кремнію (3C) належить β -

SiC, всі гексагональні та ромбоєдричні політипи – α -SiC. Форму β -SiC зазвичай називають «низькотемпературної модифікацією» [22]. Механізм формування та термодинамічна стабільність різних політипів карбиду кремнію до кінця не вивчені.

Види політипів визначаються температурою, кількістю домішок, газовою атмосферою та процесом кінетичного зростання кристалів карбід кремнію. Політипи 2H-SiC стабільні нижче 1700 К. Добавка до 0,4 % C – стабільні в інтервалі температур між 1700 і 1900 К. У роботі [23] показано, що 4H стабільно нижче 1900 К, а 6H – вище 2100 К. Алюміній стабілізує 15R - вище 2200К. При температурі вище 2400 К 4H-SiC стабілізується політип за рахунок заміщення Si на Al в решітці SiC [24]. У роботах показано, що α -SiC кристалізується в основному у вигляді 6H політипа. При додаванні менше ніж 0,1% Al стабілізується 15R політип, при більшій кількості Al стабілізується вже 4H політип.

У роботі [25] показано відсутність зв'язку між вмістом домішок та формуванням структури кристалів SiC. Однак у цьому випадку стабілізується гексагональна кристалічна структура карбиду кремнію. При спіканні в атмосфері N₂ стабілізуються 3C та 2H політипи карбиду кремнію.

Фостер у роботі [26] показав можливість отримання карбиду кремнію з різними видами політипів методом карботермічного синтезу нітриду кремнію у присутності рідкої фази.

У процесі спікання порошку α -SiC зі спекаючими добавками формується матеріал із мікроструктурою гексагональної «правильної» форми. При спіканні порошку β -SiC з добавками у системі Y₂O₃-Al₂O₃ формується структура SiC з неправильною формою. У процесі $\beta \rightarrow \alpha$ фазового переходу SiC відбувається посилене зростання зерен у напрямку осі «X», що призводить до подовження α -SiC-зерен та зміцнення матеріалу [3].

У межах зерна може існувати різне число політипів. Вільна енергія різних політипів близькі, це призводить до кристалізації SiC у цій суміші метастабільних фаз.

1.3. Види карбіду кремнію

Керамічно пов'язаний карбід кремнію – CSiC. Керамічно зв'язаним називають матеріал, зерна карбіду в якому пов'язані оксидними або нітридними фазами, або якщо зерна нітриду кремнію пов'язані вторинним карбідом кремнію. Пористість таких матеріалів може становити до 20%об. Основними компонентами CSiC-матеріал є грубі порошки карбіду кремнію, глина або оксиди SiO₂ або Al₂O₃. Керамічно зв'язаний карбід кремнію використовуються як цегла у вогнетривких печах, або як абразивні диски. Нітрид кремнію пов'язаний карбідом кремнію спікається при температурі 1700 K у присутності повітря. При цьому нітрид кремнію переходить в оксинітрид кремнію, який CSiC матеріалі з добавкою Al₂O₃ утворює сіалон, пов'язаний з SiC [1].

Рекристалізований карбід кремнію – RSiC. Рекристалізований карбід кремнію виходить в результаті вільного спікання крупнодисперсного порошку SiC у вакуумі при температурі 2500 K. RSiC являє собою пористий карбід кремнію, в якому найбільш повно реалізуються специфічні властивості карбід кремнію. Рекристалізований карбід кремнію є керамічним матеріалом високої чистоти. Він характеризується лише транскристалітним руйнуванням. Це забезпечує високий коефіцієнт тріщиностійкості.

У роботі [29] представлений процес отримання рекристалізованого карбіду кремнію з пористістю 16% та міцністю при згинанні до 100 МПа. Цей карбід кремнію застосовується для умов тривалого циклічного навантаження при температурах до 1650 K. Отримати методом рекристалізації виробу з SiC із щільністю, близькою до теоретичної, неможливо. Матеріал характеризується щільністю 2,70. Зниження

пористості даного класу матеріалу можна досягти шляхом додаткового процесу ущільнення методом багаторазового просочення заготовок розчинами полікарбосиланів та полівінілсиланами з подальшою карбонізацією та утворенням вторинного карбїду в порах [41].

Основним застосуванням виробів із RSiC з підвищеною щільністю є порцелянова промисловість. Садкові термостійкі елементи для печей – стопки, плити, капсули, труби роликового пода дозволяють успішно експлуатувати їх. Рекристалізований SiC з покриттям із Si₃N₄ або на зв'язці з Si₃N₄ широко використовується як футерування алюмінієвих електролізерів, оскільки має більш високу стійкість до окислення при впливі рідкого алюмінію і кріоліт-глиноземного розплаву в порівнянні з вуглецевими вогнетривами. Широкого поширення набули карбїд окремі нагрівачі з SiC, які застосовуються в електричних печах опору, що мають робочі температури до 1700 К. Для тривалої роботи нагрівачів в атмосфері окислення необхідно досягати високої щільності при вмісті основної фази (SiC) близької до 100%.

Реакційно-пов'язаний карбїд кремнію – RBSiC. Синтез RBSiC-матеріалів включає формування заготовок із суміші частинок SiC ($d_{0,5} = 5-10$ мкм) та вуглецю. Пористі заготовки просочують рідким Si, при температурі 1800-1900 К відповідно до реакції:



Спікання відбувається за рахунок осадження вторинного карбїду кремнію SiC(2), що зв'язує зерна первинного карбїду кремнію SiC(1). Мікроструктура RBSiC характеризується наявністю зерен SiC(1), покритих фазою SiC(2), із вмістом залишкового кремнію [31]. Кількість кремнію, необхідне отримання SiC(2) суворо розраховується за формулою (1.1). У процесі спікання RBSiC-матеріалів найчастіше використовують таке співвідношення компонентів (% об) - 90 SiC і 10 Si. Залишковий кремній знижує високотемпературні властивості, тому до складу кремнію вводять легуючі добавки, такі як 2%

Мо. MoSi_2 , що утворюється, більш хімічно стабільний при підвищених температурах. RBSiC -матеріали мають високу пористість до 20% об.

Перевагою таких матеріалів є практично повна відсутність усадки, що дозволяє одержувати вироби різної конфігурації та складності. Найчастіше метод реакційного зв'язування використовують при виробництві великогабаритних виробів з карбиду кремнію (RBSiC) та нітриду кремнію (RBSN).

Сильоціований карбід кремнію – SiSiC . Цей метод нагадує метод RBSiC . Відмінність полягає в тому, що надлишок кремнію проникає в заготовлю, реагує з вуглецем і утворює $\text{SiC}(2)$ -вторинний із заповненням усіх пір [32]. Вперше матеріал SiSiC отриманий методом просочення розплавом або парами кремнію вуглецевмісних матеріалів - графіту, деревного вугілля, пекового або нафтового коксу, сажі. Як тимчасові пластифікатори використовували формальдегідні смоли, декстрин, порошок бакеліту. Просочення кремнієм заготовок проводилося при 2150 К у вакуумі або в атмосфері Ar .

Цей метод виявився технологічнішим за метод гарячого пресування, і на його основі отримують 80 % всієї технічної кераміки на основі SiC . Дослідження механічних і теплофізичних властивостей кераміки SiC показало, що вони істотно залежать від щільності ущільнених виробів. При дослідженні залежності меж міцності від температури встановлено, що в інтервалі до 1300 К SiSiC не змінюється. Вище 1300 К з появою розплаву вільного кремнію кераміка починає розміцнюватися і повністю втрачає міцність при 1700 К. Завдяки високому рівню фізико-механічних властивостей SiC -кераміки, вироби з неї знаходять широке застосування в різних вузлах тертя та ущільненнях різного класу насосів переробки нафти, газу в хімічній промисловості та ядерній техніці.

Гарячепресований карбід кремнію - HPSiC . У процесі гарячого пресування прикладений тиск забезпечує підвищене ущільнення матеріалу. Тиск, що додається до матеріалу, пригнічує внутрішній тиск пір, допомагаючи зменшити пористість, без істотного збільшення розміру зерен. Тому метод гарячого пресування широко використовується для отримання кераміки на основі карбиду та нітриду кремнію. Однак через високі виробничі витрати метод гарячого пресування зазвичай не використовується для отримання матеріалів на основі SiC . Метод гарячого пресування призводить до формування однорідної мікроструктури з вищими механічними властивостями.

Недоліком гарячого пресування є високі виробничі витрати, пов'язані з вартістю оснащення високощільного графіту. Ще одним недоліком гарячого пресування є обмеження одержуваних виробів за формою та геометричними розмірами. Чистий карбід кремнію, без спечених добавок, не має достатньо високої пластичної деформації до температури розкладання і може мати щільність, близьку до теоретичної, лише за спеціальних умов процесу пресування. У процесі гарячого пресування тиск обмежується величиною 9,35 МПа та температурою спікання 2600 К. Ці умови визначаються стійкістю графітової форми [1].

Після гарячого пресування часто проводилася термообробка, що призводить до зниження концентрації напруги та підвищення в'язкості руйнування [27]. Одночасне гаряче пресування може наводити до анізотропної орієнтації витягнутих SiC -зерен, анізотропії механічних властивостей та зношування матеріалу.

1.4. Механізми спікання та ущільнення карбиду кремнію

Процес спікання відбувається шляхом масопереносу матеріалу за високої температури і іноді високому тиску. Рушійною силою при

твердофазному спіканні є зниження вільної поверхневої енергії частинок, що реалізується дифузією атомів при транспортуванні речовини з обсягу зерен із заповненням пори, або за рахунок перебудови частинок у поровий простір [33]. Перший етап твердофазного спікання визначається зближенням частинок з метою збільшення дифузійних контактів, що збільшує усадку матеріалу. На другому етапі спікання відбувається переведення відкритої пористості в закриту та зменшення її приблизно до 10 % про. Завершальний етап спікання спрямований на зменшення закритої пористості, до 3-5% об.

На мікроструктуру та ущільнення матеріалу впливають температура спікання, вихідний розмір зерен карбїду кремнію та прикладений у процесі спікання тиск. Останніми роками підтверджено, що неоднорідності в щільності формованих заготовок і великий розмір часток SiC перешкоджають можливості повністю ущільнюватися [33]. При твердофазному спіканні зростання зерен домінує над ущільненням, особливо без використання будь-яких добавок, що полегшують процес спікання. Це унеможливує повне ущільнення матеріалу. При спіканні єдиним механізмом масоперенесення є дифузія атомів у твердому стані, самодифузія дуже низька і чистий карбїд кремнію неможливо спекти до теоретичної щільності.

Перші три етапи спікання – поверхнева дифузія, дифузія решітки від поверхні частинок у міжзерний перешийок, перенесення пари через заростання перешийка без ущільнення матеріалу. Ущільнення полікристалічної кераміки відбувається в основному за рахунок дифузії за межами зерен та дифузії грат від меж зерен. Прохазка вперше отримав матеріали на основі β -SiC [34], а потім α -SiC вільним спіканням без тиску та з добавкою до 2 % бору та вуглецю.

Автор роботи [34] стверджував, що ущільнення SiC-матеріалу відбувається внаслідок підвищення межі розчинності бору в карбїді кремнію, який відповідно до правила Шаффера становить не менше 0,2% мас. Замість бору також можна використовувати інші його з'єднання, наприклад B₄C [35].

У процесі твердофазного спікання відбувається заміна кремнію в ґратах карбіду кремнію бором, створення дефектної структури, що підвищує об'ємну дифузію. Вуглець взаємодіє з оксидною плівкою (SiO_2), на частинках SiC-порошку, відновлюючи її. Перевищення вмісту вуглецю призводить до інгібування зростання зерен SiC та отримання мікроструктури із зернами округлої форми. Часто крім добавок бору та вуглецю для ущільнення використовують алюміній та його сполуки, а також берилій та його сполуки [36].

Ще одним способом підвищення низької самодифузії SiC та отримання щільного карбідокремнієвого матеріалу є утворення рідкої фази між зернами SiC при температурі спікання. Такий метод отримав назву «рідкофазне спікання». Утворена рідка фаза зменшує шлях дифузії карбіду кремнію при масоперенесенні атомів і заповнює пори.

Рідкофазно-спеченими називають матеріали, мікроструктура яких представлена зернами твердої фази із заповненими просторами між ними другою фазою. У деяких випадках рідка фаза може зникати до завершення спікання, або бути присутнім у вигляді включення у твердій фазі при отриманні твердого розчину (система типу $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-AlN}$), шляхом кристалізації з рідкої фази, або за рахунок випаровування. Таке явище називають перехідним рідкофазним спіканням, воно проходить у два етапи:

- 1) перехідне рідкофазне спікання;
- 2) твердофазне спікання.

Оскільки рідка фаза присутня тільки під час спікання і не залишається в матеріалі у вигляді другої фази, його часто класифікують як твердофазноспечений карбід кремнію. Прикладом може бути спікання карбіду кремнію, легованого Al і C, або з добавкою Al_2O_3 [37]. Тиск, прикладений у процесі спікання, підвищує ущільнення SSiC і LPSSiC-матеріалів, не впливаючи на швидкість зростання зерен. При твердофазному спіканні швидкість дифузії на межі зерен залежить від коефіцієнта дифузії D_t та товщини межі двох зерен карбіду кремнію δt . У рідкофазно-спеченому

матеріалі швидкість масоперенесення визначається коефіцієнтом дифузії δt атомів розчиненої в рідкій фазі речовини і товщиною шару рідкої фази між двома частинками карбїду кремнію, який, як правило, набагато більше δt .

При спіканні LPSSiC-матеріалів знижуються виробничі витрати і формується щільніша мікроструктура. Матеріали, що володіють такою мікроструктурою, характеризується вищими значеннями міцності, твердості та опором зносу. Основна відмінність між мікроструктурами SSiC і LPSSiC полягає в тому, що твердофазноспечені матеріали складаються з кристалічних зерен з розділеними межами, а в рідкофазноспеченому матеріалі є друга фаза на межах зерен. SSiC матеріали характеризуються переважно транскристалітним руйнуванням. Рівень міцності LPSSiC значно вищий, ніж у SSiC-матеріалів. Наявність другої фази в LPSSiC-матеріалі може бути і недоліком, особливо якщо вона є склоподібною і знижує високотемпературні властивості, такі як міцність, повзучість і опір втоми [38].

Для спечення карбїду кремнію та подальшого ущільнення потрібні високі температури. При спеченні карбїду та нітриду кремнію необхідно використовувати добавки для повного ущільнення матеріалу. Додаток тиску сприяє інтенсифікації ущільнення та знижує температуру спікання. Використовуючи узагальнені результати прогнозування термодинамічної та хімічної сумісності компонентів у процесі створення композиційних матеріалів визначено, що найбільш відповідними добавками, що активують спікання, є наступні оксиди – Al_2O_3 , BeO , Y_2O_3 , La_2O_3 , CaO , MgO , ZrO_2 .

Вільне спікання карбїду кремнію реалізується без застосування тиску. Висока міцність ковалентного зв'язку та низький коефіцієнт самодифузії унеможливили вільне спікання карбїду кремнію без активуючих добавок. Головною перевагою цього спікання в порівнянні з іншими є те, що матеріали можна набувати будь-якої геометричної форми в широкому діапазоні розмірів без застосування додаткової механічної обробки, на

відміну від методу гарячого пресування. Однак у даного методу існують недоліки:

1) ущільнення є більш технологічно складним процесом, що супроводжується значною усадкою;

2) реакції взаємодії SiC з оксидами призводять до розкладання карбідів та значної втрати маси при спіканні.

Такі реакції завжди спостерігаються при спіканні SiC з оксидними добавками, переважно за рахунок розкладання Al_2O_3 і SiO_2 . У роботах [9, 39] стверджується, що при використанні підсипки, що складається з суміші грубодисперсних порошоків Al_2O_3 і SiC, можна поліпшити ущільнення при вільному спіканні. Однак, тривалий час представлялося складним досягти високої густини SiC-матеріалів при вільному спіканні з використанням підсипки. Вінн та ін. у роботі [40] застосовували рідкофазне спікання α -SiC порошку з добавками алюмоіттрієвого гранату із суміші компонентів Y_2O_3 та Al_2O_3 . Ними виявлено, що додавання Al_2O_3 в грубодисперсний порошок SiC, що використовується як підсипка, збільшує щільність спеченого матеріалу з 92% до 98%, що пов'язано з дифузією Al_2O_3 в зразках. Вони припустили, що при використанні підсипки можна гарантувати досить високий парціальний тиск SiO і Si у зразках, тому реакція між ними та летючими субоксидами ітрію та алюмінію буде проходити з утворенням рідкої фази, відбулася металізація поверхні. Основа цього шару складалася з ітрію, кремнію та алюмінію.

У роботі [41] отримані LPSSiC-матеріали з використанням як добавки і як підсипки оксидів Y_2O_3 і Al_2O_3 з метою зменшення розкладання SiC. Авторами виявлено, що лише зміна кількості Al_2O_3 у порошок підсипки впливає на ущільнення та втрату маси при спіканні. Матеріали, у яких рідка фаза багатша Al менш пористі. Досягнення низької пористості відбувається за рахунок надлишку Al порошку підсипки.

Автори [41] дійшли висновку, що склад порошку підсипки впливає на випаровування летких сполук у процесі ущільнення. Гранд із співавторстві

[42] проводили рідкофазне спікання карбїду кремнію з добавкою 7,5% мас. евтектичного складу системи $Y_2O_3 - Al_2O_3$, з використанням як підсипання порошку SiC- Al_2O_3 . Характерну втрату маси в результаті такого спікання не спостерігали, проте встановлено, що в процесі спікання YAG частково розкладається з випаром Al_2O_3 збагачуючи рідку фазу оксидом ітрію. У цьому випадку застосування підсипки для спікання не є ідеальним варіантом, оскільки склад порошку при спіканні з підсипанням впливає на склад міжзеренної фази матеріалу. При цьому виявлено, що при зростанні парціального тиску монооксиду вуглецю вдається знизити розкладання при вільному спіканні матеріалів у системі SiC- Al_2O_3 - Y_2O_3 .

Метод гарячого ізостатичного пресування карбїду кремнію.

У процесі гарячого ізостатичного пресування тиск на заготовку створюється газовим середовищем. При цьому ущільнена заготовка укладена в металеву еластичну форму. У процесі гарячого ізостатичного пресування початковий тиск газу підтримується компресором, у цей час як зразок нагрівається до температури спечення. Тиск газу поступово збільшується до заданого значення.

Перевагою НІР є використання об'ємного пресування, а також можливість отримання більш складних геометричних форм. У разі твердофазного спікання без тиску потрібна висока температура та довга витримка для ущільнення матеріалу. У роботі [43] показано, що використання НІР дозволяє ущільнити SSiC-матеріал за температури нижче 1700 оС, що призводить до формування структури з малим розміром зерен ($d_{0,5} = 150$ нм). Широке застосування процеси НР та НІР знайшли у виробництві соплових вкладишів ракетної техніки, у двигунобудуванні (лопатки турбін, елементи турбонаддува), при виготовленні керамічних підшипників кочення, в інструментальній промисловості (ріжучі елементи). Газофазне спікання карбїду кремнію.

Метод газофазного спікання схожий на НІР, процес спікання також поділяється на два етапи: 1) початкова стадія спікання, коли у зразку

формується закрита пористість; 2) тиск газу збільшується вище тиску всередині часу, що призводить до заростання останніх до повного зникнення. Різниця між HIP і GPS в тому, що тиск, який використовується в GPS нижче, ніж при HIP. У GPS тиску газу знаходяться в межах 0,1-10 МПа, HIP тиску газу - 10-400 МПа. Перевага GPS над HIP полягає в тому, що можна отримувати вироби з більшим діапазоном розмірів.

У роботі [44] зазначено, що спікання зразків із засипкою корунду ефективніше і призводить до високої щільності. Методом GPS отримано матеріал на основі карбїду кремнію з добавкою 30 мас. гідроксигідрогеля, з метою синтезу його в YAG у процесі спікання. Спікання з витримкою 30 хв. при тиску аргону проводили в інтервалі температур 1973 - 2200 К у складі матеріалу немає залишкового Y_2O_3 або Al_2O_3 . Визначено, що YAG синтезується, починаючи з 1473 К. У матеріалі крім YAG у вихідних компонентів SiC, Y_2O_3 , Al_2O_3 у спеченому при 1673 К залишилася велика кількість вільного Y_2O_3 та Al_2O_3 . Автори роботи [45] припустили, що у матеріалах, що містять понад 15% мас. С, а потім до температури 2150 К YAG втрата маси збільшується до температури 1050 К реакції розкладання пригнічені. Це пояснюється тим, що процес розкладання домінує при 2150 К.

1.5. Властивості карбїду кремнію

Карбїд кремнію є високотемпературним конструкційним матеріалом і має ряд переваг: високу температуру плавлення, низьку щільність, високий рівень модуля пружності та міцності, хороший опір повзучості, стійкість до окислення та зносу. Ці властивості забезпечують використання SiC як матеріал деталей газових турбін, поршневих двигунів і теплообмінників, а також для виготовлення несучих компонентів, що працюють при високих температурах. Великим недоліком SiC є низька в'язкість руйнування в межах 2-3 МПа для щільного SiC-матеріалу при температурах до 1500 К [27]. Широке поширення у промисловості SiC отримав завдяки своїй високій

твердості – 20...27 ГПа. За даними діаграми стану Si-C карбід кремнію немає конгруентної точки плавлення. У закритій системі при тиску 1 МПа SiC розкладається за температури на графіт і рідкий Si. У відкритій системі карбід кремнію розкладається при 3000 ± 40 К на газоподібний кремній та залишки графіту [1]. Карбід кремнію є хорошим напівпровідником, з забороненою шириною зоною близькою до 3 еВ для гексагональної і 2,2 еВ для кубічної структури. У процесі синтезу у структурі карбиду кремнію виникають у невеликих кількостях (0,04–0,80 % мас.) донорні та акцепторні домішки. Навіть у «особливо чистому» порошку є певна кількість домішок.

Порошок марки "UF15SiC" фірми H.C. Starck містить: до 0,03% мас. Al, 0,01% мас. Ca та 0,05 % мас. Fe. Така невелика кількість домішок може негативно впливати на ширину забороненої зони матеріалу, спеченого з цього порошку, а також на електричні властивості. Також на частинках карбиду кремнію є шар оксиду SiO₂. Дрібнозернистий ($d_{0,5} = 0,5$ мкм) порошок UF15SiC може містити до 1,5% мас. оксиду кремнію. Для технічної промисловості порошки можна вважати хімічно чистими. Карбідокремнієві матеріали можуть бути отримані з використанням добавок, що спікають. Спікання також супроводжується зростанням частинок та формуванням міцного зчеплення між сусідніми частинками з метою утворення монолітного матеріалу. Карбідокремнієві матеріали умовно можна розділити на дві групи:

- пористі матеріали, до них відносяться – керамічно-пов'язаний карбід кремнію (CSiC), рекристалізований карбід кремнію (RSiC), реакційно-пов'язаний карбід кремнію (RBSiC);

- щільні матеріалів з карбиду кремнію, що включають – силіцований (реакційно-спечений) карбід кремнію (SiSiC), твердофазно-спечений карбід кремнію (SSiC), рідкофазно-спечений карбід кремнію, гарячепресований (HPSiC) та гаряче ізостатично пресований .

Висновки до розділу

1. Проведено всебічний аналіз методів одержання карбіду кремнію. Встановлено методи, які застосовуються для дослідного отримання зразків карбіду кремнію, монокристалічного карбіду кремнію та серійного великотоннажного виробництва.
2. Подано механізми проведення основних технологічних операцій у процесі виробництва карбіду кремнію, доведено особливості проведення цих операцій для різних способів отримання виробів з карбіду кремнію.
3. Наводяться основні властивості карбіду кремнію, сфери застосування різних видів карбіду кремнію.

2 ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КАРБІДУ КРЕМНІЮ

2.1. Особливості процесу карботермічного відновлення кремнезему з утворенням карбіду кремнію

Термодинамічний аналіз процесу карботермічного відновлення кремнезему показує, що цей процес відбувається з активною участю газоподібних оксидів кремнію. Процес, що виникає в однокомпонентній системі газ – дисперсна кристалічна фаза, полягає у зміні тиску насиченої пари над поверхнею кристалічних частинок.

Швидкість процесу залежить від рівня дисперсності твердої фази. Підвищення швидкості процесу можливе за рахунок збільшення поверхні випаровування оксиду кремнію та використання вуглецевого відновника з високою адсорбційною здатністю та розвиненою поверхнею.

З урахуванням особливостей процесу карботермічного відновлення кремнезему запропоновано схему фізико-хімічного відновлення оксиду кремнію до карбіду, яка наводиться на рис. 2.1.

При використанні дрібних та добре перемішаних компонентів шихти первинною взаємодією є твердофазна контактна взаємодія (1) діоксиду кремнію з вуглецем ($\text{SiO}_{2(\text{T})} + \text{C}_{(\text{T})}$). Результатом якого при температурі 1500 К утворюються газоподібні монооксиди кремнію та вуглецю, а при температурах вище 1800 К - карбід кремнію. Карбід кремнію також утворюється за рахунок взаємодії газоподібного монооксиду кремнію з твердим вуглецем (2). Ця взаємодія є провідним у відновлювальному процесі.

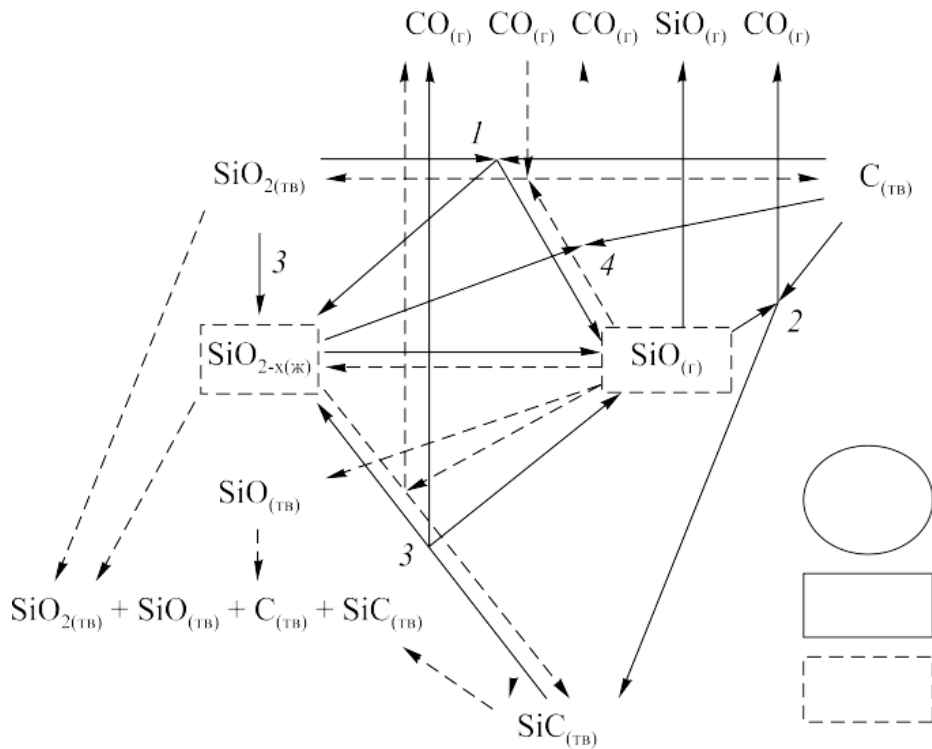


Рисунок 2.1. Структурна схема процесу вуглеродотермічного синтезу карбіду кремнію

З аналізу особливостей нанорозмірного порошку карбіду кремнію [46,47], що осаджується у вигляді огранених частинок, впливає, що їх утворення йде за механізмом пар – кристал та температурних залежностей складів газоподібних конденсованих продуктів синтезу в інтервалі температур 2000 – 4000 К .

Характерною особливістю процесів газифікації діоксиду кремнію є утворення як проміжний продукт летючого монооксиду кремнію. У зоні, обмеженої температурним інтервалом 3200 - 2800 К, з досить великою ймовірністю можна припускати перебіг процесу карбідоутворення при взаємодії пар кремнію і ціановодню в газовій фазі. Крім цього, на поверхні сформованих надмалих частинок карбіду активно протікають сорбційні процеси, що призводять до насичення їх технологічними газами та газоподібними продуктами синтезу. У зоні, обмеженій інтервалом температур 2800 - 2000 К, відбувається азотування частинок карбіду

кремнію, вміст азоту в якому є функцією температури загартування і, тривалості азотування частинок, що утворилися в потоці.

Розглянута технологія дозволяє отримувати продукти у вигляді нанопорошків із мінімальною кількістю поверхневих дефектів та регульованим комплексом властивостей.

Отриманий у такий спосіб високодисперсний карбід кремнію може бути використаний у металургії, у виробництві вогнетривів та кераміки.

2.2 Технологічні основи синтезу SiC методом Ачессона

Найбільш поширеним методом вирощування монокристалів карбиду кремнію є метод сублімації. Цей метод застосовується для отримання абразивного матеріалу, металургійного карбиду кремнію та для вирощування монокристалів, призначених для напівпровідникової електроніки. Схема технології заснована на перенесенні матеріалу від гарячого джерела (шихти) до затравки, що знаходиться за нижчої температури. Як джерело використовується шихта, що являє собою подрібнений карбідокремнієвий порошок. Сублімаційне зростання реалізується в діапазоні температур 2100-2900К. Основною проблемою при отриманні SiC є відсутність у нього рідкої фази, а також високі температури синтезу (рис. 2.2) [48].

Запатентований Ачессон спосіб отримання SiC є основою його промислового виробництва [49]. За цим методом до двоокису кремнію додають малозольний кокс і проводять термообробку, пропускаючи струм через вугільні електроди та сердечник (рис 2.4). Температура процесу становить 2200-2900 К. Керн набирають зі шматків прожареного коксу.

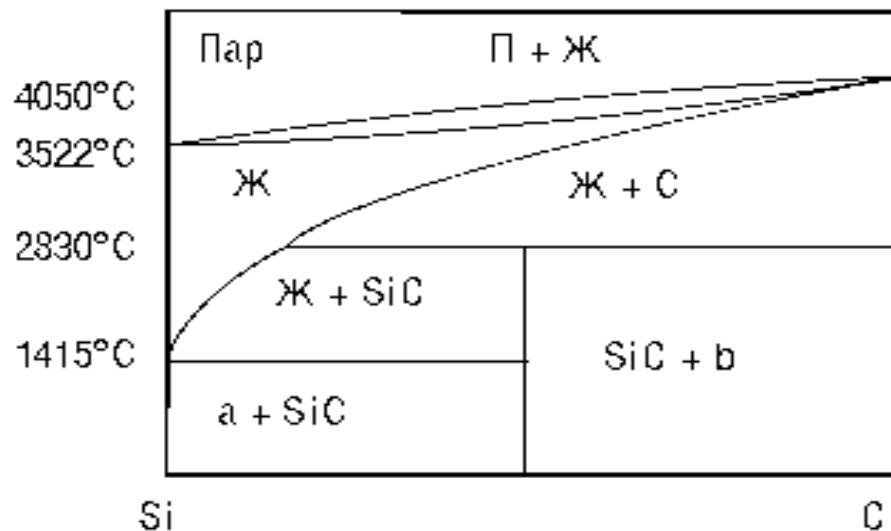
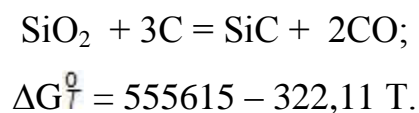


Рисунок 2. 2 – Схема діаграми стану системи Si – C.

У більшості випадків тривалість процесу становить приблизно 40 годин. При такій обробці утворюється велика кількість неконтрольованих домішок. В окремих випадкових зонах можуть утворюватися монокристалічні пластинки SiC з поперечними розмірами, що не перевищують 10-15 мм.

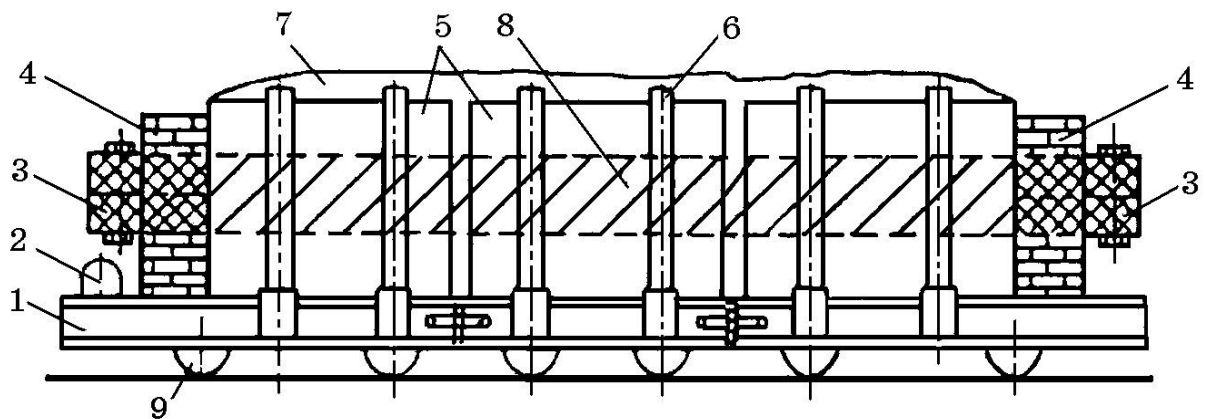
В електрометалургії кремнію та крем'янистих феросплавів карборунд представляє інтерес як проміжний продукт у складному фізико-хімічному процесі виплавки кремнію технічної чистоти, силікокальцію, феросиліцію, силікоалюмінію та ін. Штучний карбід кремнію одержують відновленням SiO₂ вуглецем. Процес у загальному вигляді може бути реакцією:



Розрізняються два види SiC – чорний та зелений карбокорунд. Обидва види промислового продукту одержують в електричних печах. Як нагрівач використовується викладається з прожареного коксу - керн, через який пропускається електричний струм. Як шихта використовується суміш, що складається з вуглецевого відновника та кварцового піску. Для отримання

зеленого карбіду кремнію до шихти додають хлорид натрію, що знижує шкідливий вплив деяких шихтових домішок. Шкідливий вплив на процес синтезу карбіду кремнію глинозем, який потрапляє в шихту з кварцовим піском у вигляді глини. Тому кварцові піски піддаються ретельному промиванню. Залишки глини, і навіть зола відновників за умов процесу можуть утворювати комплексні карбіди типу Al_4SiC і Al_4CSi_4 . При високих температурах Al_4SiC_4 може дисоціювати з утворенням SiC , $Al_{газ}$, $C_{тв}$. Тиск пари $Al_{газ}$ над системою $Al_4SiC_4-SiC-C_{тв}$ залежить від температури.

Поодинокі потужність печі опору становить 4000-4500 кВт. Пекти являє собою самохідну платформу, на кінцях якої розміщені струмопідвідні вугільні електроди. Дно платформи засипається поверненням, кварцовим піском, потім викладається шматковим нафтовим коксом нагрівач у вигляді керна. З боків та зверху керна засипається реакційною шихтою (рис. 2.3).



- 1 – візок; 2 – механізм пересування печі; 3 – вузол струмопідведення;
 4 – торцеві стінки; 5 – знімні щити; 6 – наполегливі стійки; 7 – шихта;
 8 – керна; 9 – колісні пари

Рисунок 2.3 Пересувна електрична піч опору для синтезу карбіду кремнію

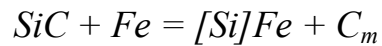
У піч завантажують 70 тонн шихти та 3200–4500 кг керна. Піч підключається до пічного трансформатора. Процес отримання карбокорунду контролюється витратою електроенергії. Для печі із встановленою

потужністю трансформатора 3500 кВт процес вважається закінченим, якщо витрата електроенергії становить 65–70 МВт×год. Охолоджується піч протягом 24-32 годин, потім проводиться її розвантаження. Усереднений хімічний склад продуктів процесу синтезу представлено табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Середній хімічний склад продуктів одержання карбокорунду методом Ачесона

Продукт	Si	SiO ₂	SiC	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
SiC, кусковий	0,17	0,12	97,82	0,92	0,48
Аморф	0,16	9,21	71,54	0,78	0,82
Зростки		13,45	70,11	1,33	0,69
Шихта		45,40	11,14	0,30	0,55
Сілоксікон		35,14	36,50	3,60	0,52
Спеки		42,14	5,32	5,32	0,41
	CaO	MgO	C	NaCl	П.п.п.
SiC, кусковий	0,30	0,26	--	--	--
Аморф	0,74	0,47	15,15	0,55	0,50
Зростки	4,60	0,25	0,03	0,46	--
Шихта	1,00	0,47	31,50	8,78	0,90
Сілоксікон	2,30	0,30	14,65	6,98	--
Спеки	9,35	0,19	19,50	20,0	--

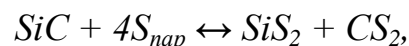
Кусковий SiC направляють на подальшу переробку для отримання абразивного зерна різних класів, а «ростки», що містять до 70% SiC, використовують при виплавці феросиліцію, виробництві вогнетривких мас, у складі вуглецевих мас для електродів, що самовипалюються, та інших цілей. Карбід кремнію, що вводиться в шихту для виплавки феросиліцію, порівняно легко руйнується металевим залізом за реакцією:



Ця реакція може протікати доти, доки вміст кремнію в сплаві не досягне 23-24% з утворенням силікокарбіду $Fe_5Si_3C_x$, що знаходиться в рівновазі з карбідом кремнію.

Кусковий SiC направляють на подальшу переробку для отримання абразивного зерна різних класів, а «ростки», що містять до 70% SiC, використовують при виплавці феросиліцію, виробництві вогнетривких мас, у складі вуглецевих мас для електродів, що самовипалюються, та інших цілей. Карбід кремнію, що вводиться в шихту для виплавки феросиліцію, порівняно легко руйнується металевим залізом за реакцією:

Промислове виробництво карбіду кремнію супроводжується виділенням великого обсягу газоподібних продуктів хімічних реакцій. Відповідно до конструкції печі та способу її завантаження CO, що утворюється по реакції $SiO_2 + 3C = SiC + 2CO$ повинен окислитися до CO_2 . Однак з деяких причин має місце неповне окислення CO до CO_2 , і частина CO надходить у навколишнє середовище. Сірка, що міститься у вуглецевих відновниках, переходить у газоподібну фазу у вигляді різних сполук. При температурі вище 1200 К SiC може взаємодіяти з парами сірки а також із галогенами з утворенням шкідливих сполук за реакцією:



Синтезований за методом Ачессона SiC застосовується для виготовлення абразивного інструменту, використання як розкислювача або лігатури у виробництві сталі.

2.3 Загальний опис технологічного процесу

У пічному прольоті встановлені печі ПКСД-1 стаціонарного типу. У пічному прольоті передбачено чотири відділення для завантаження, що складаються з трьох бункерів для шихти теплоізоляції, коксу для керна та основної шихти.

Бункери призначені для шихтування завантаження печей. Завантаження реалізується пневмо-вакуумним завантажувачем ПВР-40.

Для розвантаження печей передбачено три ділянки. На цих ділянках передбачені знімні витяжні зонди та система зрошення водою для прискорення охолодження спеченої маси силосикону, аморфу та карбіду кремнію.

Для видалення газів, що виділяються, в процесі ходу печі передбачені змінні парасольки, які підключаються до системи газоочищення та пиловловлення.

У прольоті підготовки сировинних матеріалів передбачено два приямки для зберігання нафтококсу об'ємом по 840 м³, два приямки для зберігання тирси об'ємом по 840 м³, один приямок для зберігання кварцового піску обсягом 840 м³ і один приямок для зберігання повернень від виробництва карбіду кремнію об'єм.

У прольоті передбачено залізничне полотно та наскрізний проїзд для автотранспорту.

2.4 Сировинні матеріали для виробництва карбіду кремнію

Промисловість випускає карбід кремнію трьох типів, які відрізняються кольором, вмістом основного компонента – карбіду кремнію та вмістом домішок. Основні властивості карбідів представлені в таблиці 2.2.

Сировинними матеріалами для виробництва металургійного карбіду кремнію являються: нафтовий кокс; кварцовий пісок; тирса; повернення виробництва карбіду кремнію.

Таблиця 2.2 Хімічний склад основних марок карбіду кремнію.

№	Масова частка	Чорний карбід кремнію, %	Зелений карбід кремнію, %	Металургійний карбід кремнію, %
1	SiC, не менш	96,0	97,5	88
2	C, не менш	0,6	0,4	-
3	Fe, не менш	0,5	0,4	-

В технології карбіду кремнію кокс відіграє роль відновника оксидів кремнію. Кокс повинен відповідати наступним властивостям, що наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Марки коксу та основні функціональні властивості

№	Назва параметрів та розмірність	Марки коксу		
		КНКЭ	КС 8	КС 0
1	Волога, %	< 3	< 3	< 3
2	Летючих, %	< 6,5	< 9,0	< 11,5
3	Золи, %	< 0,3	< 0,6	< 0,8
4	Сірки, %	< 0,3	< 0,6	< 0,8
5	Дрібниці фракції, мм			-
6	< 25	4	-	-
7	< 8	-	10	-
8	Стирання, %	< 13	-	-
9	Дійсна густина після прожарювання 1300°C протягом 5 годин, г/см ²	2,08-2,13	2,08-2,13	-

Основною сировиною для виплавки металургійного карбіду кремнію є кварцовий пісок. До кварцового піску пред'являються вимоги, подані у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 Хімічний склад кварцового піску для одержання карбіду кремнію

№	Назва хімічних елементів	Масова частка, %	
		1	2
1	SiO ₂	Не менш 98	Не менш 98
2	Fe ₂ O ₃	-	Менш 0,35
3	Al ₂ O ₃	-	Менш 0,45
4	Глиняста складова	Менш 2,0	-
5	Волога	Менш 5,0	Менш 5,0
6	Дрібниця фракції, мм		
7	Менш 0,25	Менш 5,0	-
8	Менш 0,315	-	Менш 10,0
9	Менш 0,22	-	Менш 2,0

Як компонент теплоізоляційної шихти використовується тирса. Тирса повинна задовольняти наступним вимогам: повинна бути з листвяних порід дерев; вміст золи не повинен перевищувати 6%; вологість тирси нижче 3%; максимальний лінійний розмір частинок нижче 15 мм.

З метою зниження фінансових витрат та економії сировинних ресурсів у технології виробництва карбіду кремнію використовуються власні повернення від виплавки карбіду.

Вимоги до повернень карбіду кремнію повинні задовольняти певні умови: фракційний склад повернення карбіду кремнію не повинен містити частинок розміром більше 2,5 мм.

На завантаження одного циклу роботи печі необхідні компоненти та їх кількість, які представлені у таблиці 2.5.

Виробничі запаси коксу, піску та тирси завозяться автотранспортом і засипаються через тічки у підземні приямки для зберігання.

Таблиця 2.5 Види сировини та їх кількість для завантаження однієї печі

№	Найменування компонентів	На одне завантаження, т	Запас на 10 днів, т
1	Піску	94	940
2	Тирса	22	220
3	Повернення	16	220
4	Коксу	130	1300

2.5 Підготовка компонентів шихти та теплоізоляції

Неділова деревина з підземного приямка для постійного зберігання подається краном на ділянку підготовки тирси. Деревина подається на виробничу ділянку у підготовленому вигляді для переробки на машині дроблення. Робочі вручну подають її в завантажувальний пристрій машини для подрібнення. Тирса з машини дроблення подається через проміжний бункер шнековим живильником в сушильний барабан. Просушена тирса шнековим живильником подається в бункери на ділянки приготування шихти та теплоізоляції.

Пісок завозиться грейфером з приямка постійного зберігання на ділянку підготовки піску і засипається в бункер завантаження. З бункера завантаження пісок подається по транспортеру в машину для відмивання. Відмитий пісок подається транспортером в сушильні барабани і просушується до остаточної вологості трохи менше 3%.

Склад виробничих повернень складає аморф та силіоксикон. Повернення завозяться з ділянок розвантаження печей заводським транспортом, переважно автотранспортом, і подаються на ділянку підготовки повернень. На ділянці підготовки проводиться дроблення на молотковій дробарці. Дроблене повернення транспортером передається на валкову

дробарку у вигляді порошку з розмірами частинок не більше 2,5 мм. Після дроблення повернення пневмо-вакуумним навантажувачем подається до бункеру на ділянку отримання шихти.

Великокусковий кокс із підземного приймка для зберігання грейфером завантажується в проміжний бункер, з якого кокс транспортером передається на переробку. Шматки з розміром понад 50 мм повертаються на молоткову дробарку. Шматки з розміром -50 ... +25 мм відбираються і транспортером подаються в бункери пічної ділянки для формування керна .

Фракції менше 25 мм подаються на валкову дробарку. З дробарки кокс подається транспортером на гуркіт. Фракції понад 0,5 мм і менше 2,5 мм подаються пневмо-вакуумним навантажувачем у бункер шихти, а менше 0,5 мм – у бункер теплоізоляції, розташовані на ділянці приготування шихти та теплоізоляції.

З бункера через дозатор шнековим живильником тирса подається в змішувач. З бункера піску через дозатор пневмо-вакуумним навантажувачем пісок подається до змішувача. З бункера повернень через дозатор повернення пневмо-вакуумним завантажувачем подаються до змішувача. З бункера шихти кокс через дозатор пневмо-вакуумним завантажувачем подається до змішувача.

Зі змішувача шихта подається пневмо-вакуумним завантажувачем у бункери готової шихти, встановлені на пічній ділянці.

Теплоізоляційна шихта

З бункерів піску та коксу теплоізоляційного через дозатори пісок та кокс подаються пневмо-вакуумним завантажувачем до змішувача. З бункера через дозатор тирса шнековим живильником подаються до змішувача.

Після приготування теплоізоляційна шихта пневмо-вакуумним завантажувачем подається у 4 бункери, що знаходяться на пічній ділянці.

2.6 Технологічні особливості пічної ділянки

Завантаження печі.

Складання печі полягає в установці торцевої стінки, установці днища з транспортного візка. Торцева стінка встановлюється краном. Днище завозиться під піч на залізничній каретці. З залізничній каретці гідродомкратами днище піднімається в установче місце печі. Під днище підводяться поперечні балки, на які днище опускається залізнична карета звільняється і перекочується на вільне місце.

Після установки торцевої стінки проводиться підключення до електрошин короткої мережі, які виходять в зону трансформатора. Підключення виконується стяжними болтами.

Проводиться перевірка та закладення щілин між стінками печі, днищем та торцевими стінками. Зазори між днищем та піччю закриваються відпрофільованими вставками з термостійкого матеріалу.

З бункера теплоізоляційна шихта пневмо-вакуумним завантажувачем ПВР-40 засипається і пневматичним трамбуванням утрамбується на днищі печі до заданої висоти 600 мм.

Встановлюються опоки, які з бокових каналів засипаються теплоізоляційною шихтою. Ізоляція ущільнюється пневматичним трамбуванням. У центральну частину опок засипається шихта, яка ущільнюється пневматичним трамбуванням. Після цього забираються опоки та встановлюється за шаблонами комплект інших опок.

Після встановлення нових опок понад бічних стін засипається із застосуванням ПВР-40 та пневматичним трамбуванням ущільнюється теплоізоляція. У центральну опоку засипається грейфером і пневматичною трамбуванням ущільнюється кокс керна. У два бічні канали засипається із застосуванням ПВР-40 і пневматичною трамбуванням ущільнюється шихта.

Опоки виймаються та встановлюється комплект нових опок.

Уздовж стінок печі ПВР-40 засипається і пневматичною трамбуванням трамбується теплоізоляція. У центральну частину засипається ПВР-40 шихта. Опки виймаються та встановлюється комплект нових опок.

Уздовж бічних стінок ПВР-40 засипається і пневматичною трамбуванням утрамбується теплоізоляція. У центральну опоку та бічні опки засипається ПВР-40 і пневматичною трамбуванням трамбується шихта. У два канали, що залишилися, грейфером засипаються і пневматичною трамбуванням трамбуються два керни. Опки виймаються та встановлюється інший комплект опок.

Вздовж стінок печі засипається ПВР-40 і пневматичним трамбуванням трамбується теплоізоляція. У центральну частину ПВР-40 засипається і пневматичною трамбуванням утрамбується шихта.

Опки виймаються і засипається ПВР-40 і пневматичною трамбовкою втрамбується теплоізоляція до верху стін печі. Над піччю краном встановлюється парасолька та підключається до вентиляційної системи.

Хід печі

Трансформатор підкочується рейковим шляхом до електрошин печі, готової до проведення пічного режиму.

Стяжними болтами реалізується підключення вторинної обмотки трансформатора до електрошин короткої мережі.

Проводиться тепловий режим процесу. Тривалість режиму становить до 40 – 45 годин. Режим проводиться на печі, закритій пересувною парасолькою витяжної вентиляції.

Вивантаження печі

Охолодження печі під парасолькою одну добу. Парасолька знімається та встановлюється над іншою піччю, готовою до проведення режиму.

Охолодження до температури верхніх шарів теплоізоляції не вище 250 0С без парасольки – до однієї доби.

Відбирає сипучу частину теплоізоляції протягом однієї зміни реверсивним пневмо-вакуумним розвантажувачем ПВР-40 з подачею в бункер теплоізоляції.

Після відбору теплоізоляції вручну звільняються графітові електроди торцевих стін печі від коксу керна. Торцева стінка краном знімається та встановлюється на підготовленому майданчику.

Потім проводиться відстиківка днища з частиною садка, що залишилася, на транспортний віз і перевозиться на ділянку розвантаження.

Транспортний візок встановлюється під днище печі. Гідродомкратами днище піднімається. Забираються поперечні балки і днище опускається на віз.

На ділянці розвантаження проводиться охолодження спеклої садки протягом чотирьох діб з зрошенням водою. Тривалість циклу поливу від 3 до 10 хвилин, випаровування вологи протягом 9 – 10 хвилин, кількість циклів поливу 20 – 25 разів. Загальна витрата води 25-30 м³ на одну піч.

Виготовляється ручне розбирання із застосуванням ручного інструменту аморфу та сілоксікону, які затарюються у короби. Короби заводським транспортом (автомобілем) передаються на ділянку підготовки повернень.

Ручне розбирання спеченого садка проводиться протягом однієї доби.

У ручну розбивається спечений карбід кремнію і із застосуванням кранових захватів затарюється у короби. Заводським транспортом (автомобілем) короби перевозяться на ділянку розбраковування карбіду кремнію.

Прографітований кокс керна грейфером затарюється у заводський транспорт (автомобіль) і вирушає на ділянку підготовки коксу.

Звільнене днище встановлюється на транспортний віз і монтується на іншу, підготовлену для завантаження піч.

Розбраковування карбіду кремнію

Карбід кремнію дробиться на молотковій дробарці і транспортером передається на валкову дробарку. З валкової дробарки карбід кремнію передається на електромагнітний барабанний сепаратор.

Магнітна фракція пневмо-вакуумним розвантажувачем відправляється в бункер магнітної фракції.

Немагнітна фракція карбіду кремнію пневмо-вакуумним розвантажувачем передається на гуркіт. Фракції з різним гранулометричним складом пневмо-вакуумними навантажувачами ПВР-40 подаються до бункера готової продукції.

2.7. Структура технологічних ділянок

Структура та склад обладнання ділянок виробництва карбіду кремнію представлені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 Склад, обладнання та характеристики технологічних ділянок

№	Найменування ділянок та призначення	Площа покриття (м ²)	Загальна площа, (м ²)	Примітка
1	Приямок зберігання кварцового піску	168*1	168	1980 т на місяць
2	Приямок зберігання нафтококсу	168*2	336	2715 т на місяць
3	Приямок зберігання деревини	168*2	336	358 т на місяць
4	Приямок зберігання повернень	84*1	84	462 т на місяць
5	Ділянка підготовки коксу	357,3	357,7	Дробарка СМ 421
6	Ділянка підготовки піску	238,2	238,2	Грохот ГР 115
7	Ділянка підготовки тирси	238,2	238,2	Рубільна машина МРЕГ 300-75 Сушило барабанне

				Шнековий живильник (2 шт)
8	Ділянка підготовки повернень	238,2	238,2	Дробарка молоткова СМ 421/2 Дробарка валкова СМК-88 Грохот СМ 742 Сепаратор електромагнітний валкового типу ЕВС-36/50 Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР-40 Транспортер
9	Ділянка підготовки шихти	268	268	Дозатор АВДІ-425 Змішувач СМК-126 Шнековий живильник Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР-40 (4 шт)
10	Ділянка підготовки теплоізоляції	238,2	238,2	Дозатор АВДІ-425 Змішувач СМК-126 Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР-40 (3 шт) Шнековий живильник
11	Ділянка №1 Завантаження печей	270	270	Піч ПКСД-1 Бункер шихти Бункер керна Бункер теплоізоляції Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР-40 (3 шт)
12	Ділянка №2 Завантаження печей	270	270	Піч ПКСД-1 Бункер шихти Бункер керна Бункер теплоізоляції Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР-40 (3 шт)

13	Ділянка №3 Завантаження печей	270	270	Піч ПКСД-1 Бункер шихти Бункер керна Бункер теплоізоляції Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР- 40 (3 шт)
14	Ділянка №4 Завантаження печей	270	270	Піч ПКСД-1 Бункер шихти Бункер керна Бункер теплоізоляції Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР- 40 (3 шт)
15	Ділянка №1 Розвантаження печей	162	162	Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР- 40. Ручний інструмент Кранові захоплення Грейфер
16	Ділянка №2 Розвантаження печей	162	162	Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР- 40. Ручний інструмент Кранові захоплення Грейфер
17	Ділянка № 3 Розвантаження печей	162	162	Пневмо-вакуумний навантажувач ПВР- 40. Ручний інструмент Кранові захоплення Грейфер
18	Трансформаторне відділення	1080	1080	Трансформатор
19	Ділянка підготовки товарного карбиду кремнію.	268	268	Дробарка молоткова СМ 421/2 Дробарка валкова СМК-88 Сепаратор електромагнітний валкового типу ЕВС- 36/50 Транспортер Пневмо-вакуумний

				навантажувач ПВР-40 (2шт)
20	Ремонтна ділянка	390	390	

Висновки до розділу

1. Всебічно розглянуті сировинні матеріали, властивості та технологія їх підготовки. Особливу увагу звернено на технологію підготовки шихти.

2. Запропоновано балансову схему утворення карбіду кремнію на основі дослідження фізико-хімічних взаємодій в твердой и газообразной фазах.

3. Розглянуто питання підготовки пічної ділянки в цілому та печі особливо: завантаження печі, хід печі, вивантаження готової продукції.

4. Докладно розглянуто структуру ділянок цеху, запропоновано склад технологічного обладнання по кожній ділянці та їх функціональні особливості.

3 ПРАКТИЧНА ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛУРГІЙНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЮ

3.1 Загальний опис цеху з виробництва карбіду кремнію

Для організації промислового виробництва металургійного карбіду кремнію пропонується будівництво нового цеху з розмірами: довжина – 240 м, ширина – 44 м, висота – 18 м. У цеху передбачається виділити два прольоти. Проліт для зберігання та підготовки сировинних матеріалів (проліт П1) з шириною 24 м. Проліт для встановлення печей та робіт із завантаження, розвантаження та розбракування продукції (проліт П2) шириною 20 м. Передбачається естакада для пересувного пічного трансформатора шириною 6 м.

У пічному прольоті розташовані чотири печі ПКСД-1 із габаритними розмірами 22x5,4x3,8 м.

У складі сировинних матеріалів прольоту П1 розташовані підземні прямки для зберігання сировинних матеріалів та ділянки з підготовки піску, тирси, повернень, шихти, теплоізоляції та коксу.

Для завантаження в підземні прямки сировинних матеріалів передбачені завантажувальні тічки, які розташовані в отворах між колонами вздовж стіни ряду А.

Всі завантажувальні тічки повинні закриватися кришками, які піднімаються під час вивантаження сировини з автомобіля у підземні прямки.

У прибудові до пічного прольоту на відкритій естакаді встановлено пічний трансформатор, який має можливість пересуватися рейковою колією. Пересування трансформатора передбачено на возі, де змонтований електропривод.

У будівлі до ділянок розвантаження печей (для зрошення садки печей при охолодженні) та до ділянки підготовки піску (для його відмивання) має

бути підведений трубопровід холодної води. На ділянках завантаження печей ПКСД-1 передбачити встановлення системи пожежогасіння.

Відпрацьована вода зливається у заводську систему каналізації.

Для роботи сушильних барабанів на ділянках підготовки піску, підготовки тирси та підготовки коксу повинен бути підведений трубопровід природного газу.

Обидва прольоти А та Б повинні бути забезпечені загальною витяжною вентиляцією. Для утилізації оксиду вуглецю має бути поставлена система допалювання, яку необхідно спроектувати індивідуально під печі ПКСД-1.



Технічні служби, необхідні для організації, управління та контролю виробництва карбїду кремнію:

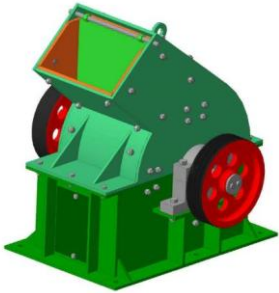


- 1) служба головного технолога: бюро підготовки виробництва; технологічне бюро; конструкторське бюро.
- 2) служба головного енергетика: бюро теплоенергетика; бюро електротехнічне; бюро АСУ та зв'язку; заводська АТС.
- 3) служба аналізу та контролю: бюро технологічного контролю; лабораторія спектрально-хімічного аналізу
- 4) служби підготовки виробництва: відділ постачання; відділ збуту; виробничий відділ; канцелярія; відділ кадрів.
- 5) економічні служби: планово-фінансовий відділ; бухгалтерія.




3.2. Розміщення технологічного обладнання по ділянках

Типи та марки основного обладнання, його застосування та технологічні характеристики представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Марки, технологічні характеристики та застосування основного обладнання з виробництва металургійного карбіду кремнію

№	Назва обладнання та марки	Застосування обладнання, кількість одиниць	Продуктивність обладнання, розмірність	Потужність обладнання	Примітка
1	Машина МРЕГ 300-75	Дроблення деревини (1 шт)	16-20 м ³ /час	75 кВт	
2	Сушило барабанне СГМ45	Сушіння тирси (1шт) Сушіння піску (1 шт) Сушіння коксу (1 шт)	15 т/час		
3	Дробарка молоткова СМ 421/2 (1шт)	Дроблення коксу (1шт) Дроблення повернень (1шт)	10-24 т/ч	55 кВт	

		Дроблення товарного карбіду кремнію			
4	Гуркіт Гр 115	Гуркіт коксу (1шт)	7 м ³ /ч		
5	Гуркіт СМ-742	Гучіння повернення (1 шт) Гучіння коксу (1шт)	7 м ³ /ч		
6	Дробарка валкова СМК-12	Дроблення коксу (1шт)	25 м ³ /ч	30 кВт	
7	Дробарка валкова СМК-88	Дроблення коксу (1шт) Дроблення повернення (1шт) Дроблення товарного	25 м ³ /ч	30кВт	

		карбїду кремнїю (1 шт)			
8	Сепаратор електромагнїтн ий валкового типу ЕВС-36/50	Магнїтна сепарація повернень (1 шт) Магнїтна сепарація товарного карбїду кремнїю (1 шт)			
9	Дозатор АВДІ- 425	Приготування теплоїзоляційної шихти (3 шт) Приготування шихти (4 шт.)			
10	Змішувач СМК-126	Змішування шихти(1шт) Змішування теплоїзоляції (1 шт)	35 м ³ /ч	40 кВт	
11	Пристрій для відмивання	Відмивання піску (1 шт)	20 т/ч	5,5 кВт	

	піску ХСД 2610)				
12	Шнековий живильник БКВ-160	Ділянка підготовки тирси (2шт) Ділянка підготовки шихти (1шт) Ділянка підготовки теплоізоляції (1шт)	10 т/ч	15 кВт	
13	Пневно- вакуумний навантажувач ПВР-40	Ділянка підготовки коксу (1шт) Ділянка підготовки піску (1шт) Ділянка підготовки повернень (1шт) Ділянка підготовки шихти (1шт) Ділянка підготовки теплоізоляції (1шт) Ділянка №1			

		завантаження печей (3шт) Ділянка №2 завантаження печей (3шт) Ділянка №1 розвантаження печей (1шт) Ділянка №2 завантаження печей (1шт) Ділянка №3 завантаження печей (1шт) Ділянка підготовки товарного карбіду кремнію (2шт)			
--	--	--	--	--	--

Організація змінної роботи цеху має важливе загальновиробниче, технологічне, економічне та соціальне значення. Для виконання поставлених завдань розробляється цикловий графік роботи основного обладнання. Точне виконання циклового графіка забезпечує випуск якісного карбіду кремнію обсягом планового випуску готової продукції.

Висновки до розділу

1. Подано особливості роботи та структури цеху. Позначено технологічну логістику, загальне розміщення ділянок та обладнання.
2. Надається розподіл технологічного обладнання, наводяться основні характеристики обладнання, кількісний склад.
3. Розглянуто загальну організацію виробничої роботи цеху та пічної ділянки по кожній печі. Розроблено циклограму роботи пічної ділянки за кожною зміною на місячний період.
4. Наведено результати щодо заходів захисту навколишнього середовища та безпеки праці на робочих місцях.

4. Охорона праці пічної ділянки цеха

4.1. Правила технічної експлуатації і техніки безпеки

Безперебійну роботу діючого обладнання пічної ділянки забезпечують постійним наглядом і доглядом за механізмами, а також сучасному якісному проведенню профілактичного ремонту.

Для забезпечення безпеки обслуговування пічного обладнання необхідно загороджувати струмоведучі елементи бар'єрами від ураження струмом при дотику до обладнання, який знаходиться під напругою внаслідок поломки, проводять заземлення цього обладнання за допомогою ізоляційних вставок.

При обслуговуванні пічок потрібно слідувати наступними правилами техніки безпеки:

1. Використовувати постійно засоби індивідуального засобу;
2. Знаходитись в спеціально відведених місцях для роботи;
3. Виконувати вимоги до режиму пиття;
4. Постійно керуватися та відповідати вимогам інструкцій.

4.2. Безпека технологічного процесу, рівня його механізації

Під час ходу печей завантажуючи та вивантажуючи робочі переміщаються на безпечну відстань. Обслуговування стану робочим дозволяється тільки за дозволом майстера.

Ступінь механізації промислового процесу визначається шляхом встановлення числа робочих, зайнятих обслуговуванням машин, механізмів, до загальної кількості працівників на площадці. Повне представлення про рівень механізації праці можна визначити за формулою:

$$B = \frac{M}{M + R} \cdot 100, \% \quad (4.1)$$

де M – сума чоловіко-часів механізованої праці,

$$M = 144 + 129,6 + 194,4 = 468;$$

R – сума чоловіко-часів ручної праці, $R = 86,4 + 88,2 = 174,6$.

$$\hat{A} = \frac{144 + 129,6 + 194,4}{194,4 + 144 + 129,6 + 86,4 + 88,2} \cdot 100 = 73\%.$$

Таблиця 4.1. Рівень механізації праці робочих пічної площадки

Професія робітників	Штат, чол.	Кількість відроблених чоловіко-часів, суткі			Ступінь механізовано ї праці, %
		Вручну	При допомозі машин	Всього	
Оператор	8	-	144	144	100
Загрузчики	12	86,4	129,6	216	60
Слюсарі- механіки	18	88,2	194,4	282,6	15

4.3. Потенційно небезпечні і шкідливі фактори промислової сфери

Потенційно небезпечними і шкідливими факторами промислової сфери можна назвати: теплові відділення, шум, вібрація, електричний струм, електромагнітне поле

Для перерахованих факторів негативного впливу на організм чоловіка розроблені допустимі концентрації (ПДК). Вплив перерахованих шкідливих факторів з перевищенням норм ПДК призводить к виникненню професійних захворювань.

Найбільш небезпечним промисловим фактором є іонізуюче випромінювання безпосередньо чи опосередковано спричиняючи іонізацію навколишнього середовища, таблиця 4.2.

Використання в промисловості обладнання генерую чого електромагнітні вібрації, супроводжуються виникненням в оточуючій середі електромагнітних полів. При перевищенні допустимих рівней вплив електромагнітного поля для людини, може виникнути професійне захворювання. Захист від електромагнітних полей створені установками високої частоти.

Слухова система людини може сприймати звуки з частотою до 20 кГц. Надмірний шум впливає на здоров'я робочих і призводить до підвищення травматизму, зниженню робото здібності, підвищує втому. Довгостроковий вплив шуму може привести до часткової або повної втрати слуху.

Таблиця 4.2. Фактори промислового (трудового) процесу

Завантажувач-навантажувач

№ п/п	Фактори промислової середовища і трудового процесу	Дозволено (ПДК, ПДУ)	Фактичний	III клас – шкідливі і небезпечні умови і характер праці			Час дії фактора, %, за смену
1.	Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ : I клас небезпеки _____ II клас небезпеки _____ III-IV клас небезпеки _____						
2.	Пил фіброгенного діяння, мг/м ³	6	19,1		3,2		100
3.	Вібрація (загальна і локальна), дБ						
4.	Шум, дБА	80	81	1			
5.	Інфразвук, дБ						
6.	Ультразвук, дБ						
7.	Неонізоване випромінювання: -радіочастотний діапазон, В/м -діапазон промисл. частоти, кВ/м -оптич. діапазон (лаз. випром.), Вт/м ²						
8.	Мікроклімат в кімнаті: - температура повітря, °С - швидкість руху повітря,	26-15	28				90

	м/сек - відносна вологість повітря, % - інфрачервоне випромінювання, Вт/м ²	0,1-0,2 55 140	<0,3 32 80	2			100
9.	Температура навколишнього повітря (під час роботи на відк. повіт.), °С літом взимку						
10.	Атмосферний тиск						
11.	Тяжіння і напруга праці	97000	156660				

Кількість фактичного впливу факторів промислової середовища і трудового процесу не перевищує допустимі значення.

Проходжуючи через людину електричний струм, являється головним пошкоджуючим фактором при електромагнітизмі. Відповідно до ГОСТ 12.1.038 – 82, встановлені допустимі значення струмів, приходящих через людину при нормальному і аварійному режимі роботи електричних установок. Збільшення тривалості протікання струму через людину збільшує тяжкість ураження. Електричний струм в тілі людини визначає перетворення електричної енергії поглиненого в організмі в інші типи ,та виконує теплову та біологічну дію..

Ступінь ураження при електротравмі залежить від: від робочого місця напруги електроустановки; супротив тіла людини, путь струму в тілі людини; тривалість впливу електричного струму; умови навколишнього середовища та фізичний стан людини

4.4. Захист від впливу небезпечних та шкідливих факторів

присутність всіх небезпечних і шкідливих факторів промислової середи визначає розробку заходів захисту від їх негативного впливу

Інженерні рішення, забезпечення механізації і автоматизацію промислових процесів, герметизацію обладнання, що є джерелом виділенням шкідливих речовин, а також рішення, дозволяючи безпечно для працівників експлуатувати технологічне обладнання, приведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Комплексний захист від впливу небезпечній і шкідливих факторів

Небезпечний і шкідливий фактор (допустиме значення)	Розроблений захисний пристрій	Тип пристрою	Місто встановлення
Рухаючі частини технологічного обладнання і полоса	Захисні кожухи, перила, огорожі	Стаціонарні, переносні	Окремі вузли обладнання і інш. технологічні лінії
Електромагнітне поле (20 В/м)	Захисні екрани	Стаціонарні, переносні	Перед джерелом випромінювання
Іонізуюче випромінювання (0,0072 А/кг)	Рамку приводів виготовляють з матеріалів поглинання або екранізуючих це випромінювання; захист відстанню і часом	Стаціонарні, переносні	Перед джерелом випромінювання
Шум (80 дБ)	Захисні екрани, звукоізолюючі кабінки	Стаціонарні переносні	Пости керування станом АПР
Теплове випромінювання	Ізоляція всіх тепловиділяючих деталей Обладнання,	Стаціонарні, переносні	-

(140 Вт/м ²)	спеціальними теплоізоляційними матеріалами		
Електричний струм (не більше 0,01 А)	Ізоляція всіх провідників електричного струму і токоідущих деталей, заземлення обладнання	Стаціонарні, переносні	Місце встановлення: обладнання або проведення ремонтних робіт
Технологічний пил і ін виділення газів в атмосферу	Система витягу і вентиляції індивідуальні засоби захисту (респіратор)	Стаціонарні переносні	Технологічні ділянки забрудненої атмосфери

4.5. Промислова санітарія

4.5.1. Планове рішення будинки і споруди

Створення здорових безпечних умов праці починаючи з правильного вибору місцевості для розміщення підприємства (СН и П2.04.05-86 «Санітарні норми і правила проектування промислових підприємств»).

Металургійний комбінат відноситься до II класу підприємств, з розмірами захисно-санітарної зони не менше 500 метрів.

Об'єм промислового приміщення на одного працівника повинен складати не менше 15 м³, площа 4,5 м². Працівники прокатного цеху на одного працівника відповідають нормам.

В складі кожної ділянки маються допоміжні приміщення і пристрої, які діляться на 5 груп: санітарно-битові приміщення и пристрої, приміщення громадського питания, приміщення медичного профіля, культурного обслуговування, приміщення управління і громадських організацій.

Відстань від робочих місць, розташованих в не опалювальному приміщенні до побутового корпусу не повинно перевищувати 300-500 метрів.

4.5.2. Опалювання и вентиляція

З категорій виконуваних робіт з тяжкості, характеристики виробничих приміщень з надлишків явного тепла, з урахуванням періодів року (теплих, холодних, перехідних) таблиця 4.4. можна встановити відповідно до вимог санітарних норм, параметрів повітряного середовища для робочої зони виробничих приміщень. Згідно з ГОСТом працю робітників на стані можна охарактеризувати як середньої тяжкості (категорія II б). Создание и поддержание допустимых параметров воздушной среды в рабочей зоне является сложной задачей, решение идет в следующих направлениях: рациональное размещение оборудования, внедрение более рациональных технологических процессов, рациональная тепловая изоляция оборудования, рациональная вентиляция и отопление, использование средств индивидуальной защиты.

Таблица 4.4. Оптимальні параметри мікроклімата

Сезон	Категорія робіт	Температура повітря, °С	Вологість повітря, %	Швидкість руху повітря м/с
Холодна перехідна, температура < +10°С	Середньої тяжкості II б	17-19	60...40	0,3
Теплий, температура + 10 °С і вище	Середньої тяжкості II б	20-22	60-40	0,4

Трудова діяльність людини завжди протікає в окремих умовах. В даний час і допустимі і оптимальні параметри мікроклімату зведені в ГОСТ 12.1.005-88, ССБТ.

4.5.3. Освітлення

Висвітлення у виробничих будівлях може здійснюватися природним та штучним світлом. При недостатності природного освітлення зазвичай використовується спільне освітлення. Природне освітлення на північній ділянці здійснюється через вікно у бокових стінах та через верхні світлові отвори. Природні освітлення нормують за допомогою коефіцієнта природного освітлення (КЕО).

$$\lambda_n = \lambda \cdot m \cdot c, \quad (4.2)$$

де $\lambda^{\text{III}} = 3$ – значення КЕО (%), визначення з урахуванням характеру зорових робіт;

$m = 0.9$ – коефіцієнт світового клімату;

$c = 0,75$ – коефіцієнт сонячного клімату

Природне освітлення для VII розряду буде равно:

$$\lambda^{\text{VII}} = \lambda^{\text{III}} \cdot m \cdot c = 3 \cdot 0,9 \cdot 0,75 = 2,025 \%$$

Для нормального естественного освещения в цехе очищают стекла от пыли и грязи, копоти не реже 4 раза в год.

Также используются искусственное освещение с помощью ламп накаливания и газоразрядных ламп, таблица 4.5. Особенности прокатного производства обуславливают изготовление светильников в закрытом исполнении. Искусственное освещение подразделяют на рабочее, аварийное и эвакуационное. Необходимость наличия аварийного освещения связана с тем, что отклонение рабочего освещения может привести к длительному нарушению технологического процесса. Эвакуационное освещение предназначено для безопасной эвакуации людей. Нормирование производственного освещения осуществляется согласно СН и П II-4-79.

Таблица 4.5. Нормовані значення КЕО при природному та штучному освітленні

Найменування відділення, ділянки, робочого місця	Розряд зорової роботи	Система загального освітлення, освітленість		Аварійне освітлення, ЛК	
		При люмінесцентних лампах, лк	При лампах розжарювання, лк	Для продовження робіт	Для евакуації лк
Піч	VII	200	75	5% освітлення	от 0,5

На пічній ділянці застосовують світильники з лампами розжарювання та ДРЛ (дугова, ртутна лампа високого тиску), а також світильники з люмінесцентними лампами

4.5.4. Санитарно-бытовые помещения

Для задоволення санітарних та побутових потреб працюючих у проекті передбачається наявність санітарно-побутових приміщень та пристроїв, до яких належать: гардеробні, курильні кімнати, умивальники, дешеві приміщення для прийому їжі, здоровпунктів, а також деякі приміщення та пристрої для сушіння, знешкодження та знешкодження, прання та чищення спецодягу та спецвзуття та ін. В основу вибору та кількості загальних та спеціальних побутових приміщень та пристроїв покладено санітарну характеристику виробничого процесу. Залежно від характеру та ступеня впливу на робітників усі виробничі процеси поділені на чотири групи. На пічній ділянці виробничий процес можна зарахувати до II групи, тобто. до процесів, що протікають за несприятливих метеорологічних умов з виділенням вологи, пилу, променистого тепла, використання струму високої напруги.

Кількість тих чи інших санітарно-побутових пристроїв визначається за таблицями СНіПШ-92-76, виходячи з розрахункової кількості осіб на один пристрій (душеву кабінку, кран в умивальник тощо). До санітарно-побутових приміщень відносяться: вбиральні для зберігання одягу, вмивальні та душові, вбиральні, приміщення особистої гігієни, пункти харчування. Гардеробні застосовують для зберігання вуличного, домашнього та робочого одягу. У сталеплавильному цеху гардеробні обладнані шафами кількість яких дорівнює кількості працюючих у всіх змінах з урахуванням тимчасових працюючих та практикантів. Висота всіх шаф у плані цеху – 165 см, ширина – 50 см, глибина – 50 см. Ширина походу між шафами 1,5 м. Умивальні розміщують в окремих приміщеннях, суміжних з вбиральнями, або в

вбиральні. У цеху знаходиться кілька умивальників із розрахунку 1 на 15 осіб. Передбачені додаткові умивальники з душовими сітками та підведенням теплої води (напівдуш): один напівдуш на кожних 15 працюючих біля печі за зміну. Напівдуші розміщують поблизу робочих місць, від останніх їх відокремлюють екранами з водостійких матеріалів. Туалети розміщують на відстані, що не перевищує 75 м від найбільш віддаленого робочого місця. Курильні приміщення визначають із розрахунку 0,03 м² на одного працюючого в найбільш численній зміні, але не більше 9 м². Здравпункт розміщується в гарячекатаному цеху, як особливо небезпечному щодо травматизму, на відстані 100 м-коду. Пункти живлення: заводська їдальня-доготівкова та буфети на привізних напівфабрикатах, що розміщується в будинках побутових приміщень.

4.5.5. Мери пожежної безпеки.

Відповідно до будівельних норм і правил (ОНТП 24-86) виробничі будівлі поділяються на категорії. Відповідно до цього цех гарячої прокатки відноситься до категорії Г. Категорія Г - вогнетривкі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор та полум'я; тверді, рідкі та газоподібні речовини, які спалюються або утилізуються як паливо.

Безпосередньо на виробничій ділянці пожежна безпека забезпечується розробкою евакуації персоналу, наявність засобів сповіщення про пожежу, засобів пожежогасіння (сокири, багри, лопати, ящики з піском вогнегасники).

На ділянці встановлені протипожежні перешкоди, які являють собою перекриття стіни, вікна та двері, що не згоряють, виконані з матеріалів, які згоряють за час не менше 1,2 години. Пожежний зв'язок існує телефонний та електричний. Найбільш надійно працює ЕПС, яка буває автоматична і не автоматична. Не автоматична встановлюється у місцях постійного перебування людей у разі пожежі цей зв'язок наводиться вручну.

Автоматичний зв'язок встановлюється у тих місцях, де не завжди присутні робітники. Аналіз пожеж показує, що основними причинами виникнення є несправності теплових агрегатів, технологічного обладнання, електричних установок, розряди статичної та автоматичної електрики. Процес гасіння речовин, що горять, зводиться до активного впливу на процес горіння в зоні реакцій і досягається застосуванням вогнегасних засобів: пари, піни, твердих порошоків, вогнегасників. Вогнегасні речовини при введенні в зону горіння гальмують хімічну реакцію окислення, дисоціюють на іони, які

вступають у реакцію з іонами палаючої речовини і пригнічують горіння.

Для гасіння пожежі застосовують: порошкові вогнегасники ОП-5 - призначені для гасіння загорання легкозаймистих і горючих рідин, електроустановок, що знаходяться під напругою, вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 – призначені для загорання різних речовин та матеріалів, за винятком тих, що можуть горіти без доступу повітря. Їх можна застосовувати для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою не понад 1000 В.

4.6. Розрахунок вентиляції для видалення надлишкової теплоти

У термічному відділенні прокатного цеху об'ємом 5000 м³ для нагрівання табору встановлено дві нагрівальні печі з поверхнею тепловиділяючої площею 6 м². Температура всередині печі $t_{вн} = 12000\text{С}$. Стінки печей цегляні із шамоту ізольовані діатановою цеглою товщиною $\delta_1 = 461$ мм. Кожух печі із сталі товщиною $\delta_2 = 3$ мм. Продуктивність печі 55,6 кг/сек. Початкова температура видобутого з печі металу $t_{поч} = 11700\text{С}$. На момент вивезення з відділення метал остигає до $t_{кон} = 11620\text{С}$. Температура зовнішнього повітря $t_{нар} = 200\text{С}$. Температура повітря у відділенні $t_{від} = 250\text{С}$. Температура повітря $t_{ух} = 300\text{С}$. Найдем общее тепловыделение в термическом отделении в течении часа. Основні джерела теплоти - нагрівальні печі і остигає метал (іншими джерелами нехтуємо).

Тепловиділення від нагрівальних печей визначається за формулою:

$$Q_{п} = R (t_{вн} - t_{от}) \cdot S, \text{ Вт} \quad (4.3)$$

где R – коефіцієнт теплопередачі стінок печі, дж/(м²сК); S – сумарна площа тепловиділяючих поверхонь, м².

Коефіцієнт теплопередачі стінки печі, визначається за формулою:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4.4)$$

где α_1 и α_2 – коефіцієнти тепловіддачі на внутрішній та зовнішній поверхнях печі (вони відповідно рівні 14 и 9,3 Дж/(м²сК));

λ_1 и λ_2 – коефіцієнти теплопровідності шамотної цегли та кожуха печі (вони відповідно дорівнюють 0,93 та 7,0 Дж/(м²сК)).

Тогда:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{14} + \frac{0,461}{0,93} + \frac{0,003}{7} + \frac{1}{9,3}} = 1,48 \text{ Дж}/(\text{м}^2\text{сК}).$$

Тепловиділення від нагрівальних печей:

$$Q_{\text{п}} = 1,48 (1200 - 25) \cdot 6 = 10434 \text{ Дж/с.}$$

Знаходимо тепловиділення від остигаючого металу:

Пусть $C = 0,14 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, тоді:

$$Q_{\text{м}} = 55,6 \cdot 0,14(1170 - 1162) = 62,2 \text{ Дж/с.}$$

Далі загальна кількість теплоти, що виділяється у відділення від нагрівальних печей та металу, що остигає:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{м}} = 10434 + 62,2 = 10496 \text{ Дж/с.}$$

Приймаємо втрати тепла через огороження будівлі відділення, що дорівнює 20% загального надходження теплоти. Тоді, надмірна кількість теплоти:

$$Q_{\text{изб}} = Q_{\text{общ}} \cdot 0,8 = 10496 \cdot 0,8 = 8397 \text{ Дж/с.}$$

Кількість повітря, яке необхідно ввести для видалення надлишкової теплоти:

$$V_{\text{воз}} = \frac{3600 \cdot Q}{C_{\text{в}} \cdot (t_{\text{yx}} - t_{\text{нар}})}, \text{ м}^3 / \text{ч} \quad (4.6)$$

где $C_{\text{в}}$ – об'ємна теплоємність повітря, кДж/м³К.

$$V_{\text{âиç}} = \frac{302291}{1,256 \cdot (30 - 20)} = 24068 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

Находимо кратність повітряобміну:

$$K = \frac{V_{\text{воз}}}{V_{\text{пом}}}, \quad (4.7)$$

где $V_{\text{пом}}$ – об'єм термічного віділення, м³;

$$\hat{E} = \frac{24068}{5000} = 4,8,$$

Отже повітря в приміщенні обмінюється приблизно 5 разів на годину.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Наводяться основні властивості карбіду кремнію, сфери застосування різних видів карбіду кремнію. Встановлено методи, які

застосовуються для дослідного отримання зразків карбїду кремнїю, монокристалїчного карбїду кремнїю та серїйного великотоннажного виробництва.

2. Подано механїзми проведення основних технологїчних операцїй у процесї виробництва карбїду кремнїю, доведено особливостї проведення цих операцїй для рїзних способїв отримання виробїв з карбїду кремнїю.

3. Всебїчно розглянутї сировиннї матеріали, властивостї та технологїя їх підготовки. Особливу увагу звернено на технологїю підготовки шихти. Докладно розглянуто структуру дїлянок цеху, запропоновано склад технологїчного обладнання по кожнїй дїлянцї та їх функцїональнї особливостї.

4. Подано особливостї роботи та структури цеху. Надається розподїл технологїчного обладнання, наводяться основнї характеристики обладнання, кїлькїсний склад.

6. Наведено результати щодо заходїв захисту навколишнього середовища та безпеки працї на робочих мїсцях.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Riedel R. Handbook of ceramic hard materials. 1st ed. Weinheim: Wiley–VCH, 2000. Vol. 2. P. 683–748.
2. Prochazka, S. Final Report SRD 72 –171. General Electric, Schenectady, New York, 1972. P.215.
3. Kistler–De Coppi P.A., Richarz W. Phase transformation and grain growth in silicon carbide powders. International journal of high technology ceramics, 1986. Vol. 2, № 2. P. 99–113.
4. Meier B., Hamminger R., Nold E. Characterization of SiC–platelets. *Microchimica Acta*, 1990. Vol. 101, № 1–6. P. 195–205.
5. Prochazka, S. Sintering of silicon carbide, Technical Report 73 CRD325, General Electric Co, 1973. P.123.
6. Coppola, J.A. Silicon carbide powder compositions Hawler H.A Murtry Mc., Patent C.H. U.S. № 4123286. Опубл. 31.10.1978. – 5 с.
7. Raffeniello, W. Fabrication and characteristics of SiC–AlN alloys W. Raffeniello, K. Cho, A.V. Virkar J. Mater. Sci. 1981. V. 16. P. 3479–3488.
- 8 Omori, M. Pressureless sintering of SiC Omori M., H. Takei J. Am. Ceram. Soc. 1982. Vol. 65. P. 92.
- 9 . Pature, N.P. In Situ–Toughened Silicon Carbide N.P. Pature J. Am. Ceram. Soc. 1994. Vol. 7, № 2. P. 519–523.
10. Lee, R.R. Fabrication, Microstructure, and Properties of SiC–AlN Ceramic Alloys R.R. Lee, W.C. Wei ,Ceram. Eng. Sci. Proc. 1990. Vol . 11. P. 1094. 291
11. Chia, K.Y. Silicon carbide bodies having high toughness and fracture resistance and method of making same K.Y. Chia, W.D.G. Bocker, R.S. Storm U.S. Patent № 5298470. Опубл. 29.03.1994
12. Shur Ed.M. SiC Materials and Devices Ed.M. Shur, S. Romyantsev, M. Levinstein – Vol. 11. – Singapore: World Scientific, 2007. – 334 p.
13. Vodakov, Y.A. Epitaxial growth of silicon carbide layers by sublimation „sandwich method" (I) growth kinetics in vacuum Yu.A. Vodakov, E.N. Mokhov,

M.G. Ramm, A.D. Roenkov *Kristall und Technik*. – 1979. – Vol. 14. – № 6. – P. 729-740.

14. Агеев О.А. Беляев, Н.С., Болтовец, В.С., Киселев, Р.В., Конакова, А.А. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение. Харьков: ИСМА, 2010. 532 с.

15. Nishino, S. Production of largearea single crystal wafers of cubic SiC for semiconductor devices S. Nishino, J.A. Powell, H.A. Will *Applied Physics Letters*. – 1983. – Vol. 42. – №. 5. – P. 460-462.

16. Rodeghiero, E.D. Sol–gel synthesis of ceramic matrix composites / E.D. Rodeghiero, E.P. Giannelis *Materials Science and Engineering: A* – 1998. – Vol. 244. – №. 1. – P. 11-21.

17. Klein, L.C. *Kinetics of the so/gel transition* L.C. Klein, G.J. Garvey *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1980. – Vol. 38. – P. 45-50.

18. Торбов, В.И. *Плазмохимический синтез нанодисперсного карбида кремния* . Торбов В.И., Балихин И.Л., Берестенко В.И Торбова, О.Д., Гребцова О.М., Гуров С.В., Куркин Е.Н *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2008. №. 9. – С. 93-98.

19. Хаггерти Д. Индуцируемые лазером химические процессы Д. Хаггерти, Кеннон У.. – М: Мир, 1984. – 309 с.

20. Kavecký, Š. Silicon carbide powder synthesis by chemical vapour deposition from silane acetylene reaction system Kavecký Š., Janeková B., Madejová J, Šajgalík P. *Journal o' f the European Ceramic Society* 2000. Vol. 20. №. 12. P. 1939-1946.

21. Мержанов, А.Г., Боровинская И.П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез тугоплавких неорганических соединений А.Г. Мержанов, И.П. Боровинская *Доклады АН СССР*. – 1972. – Т. 204. – С. 366-369.

22. Yajima, S. Development of a silicon carbide fibre with high tensile strength/S. Yajima, J. Heyashi, M. Omori, K. Okamura *Nature*. 1976. Vol. 261. P. 683–685.

23. Inomata, Y. Relation between growth temperature and the structure of SiC crystals grown by sublimation method Y. Inomata, Z. Inoue, M. Mitomo, H. Suzuki // *Yogyo–Kyokai–Shi*. 1968. V. 76. P. 313–319.
24. Shaffer, P.T.B. Problems in silicon carbide device development P.T.B. Shaffer *Mater. Res. Bull.* 1969. V. 4. P. 13–24.
25. Knippenberg, W.F. Growth Phenomenon in Silicon Carbide Knippenberg W.F. *Philips Research Reports*. 1963. V. 18, № 3. P. 161–274.
26. Foster, D. Densification of Silicon Carbide with Mixed Oxide Additives, PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne. 1996
27. Chen, D. Role of the grain-boundary phase on the elevated-temperature strength, toughness, fatigue and creep resistance of silicon carbide sintered with Al, B and C D. Chen, M.E. Sixta, X.F. Zhang, L.C. De Jonghe, и др. *Acta Materialia*. 2000. V. 48. P. 4599–4608.
28. Гаршин, А.П. Конструкционные карбидокремниевые материалы / А.П. Гаршин, В.В. Карлин, Г.С. Олейник, В.И. Островерхов Л.: Изд. Машиностроение. 1975. – 152 с.
29. Ogawa, H., Yasuda A., Shibata N., Ikuhara Y. et al. *Ceram. Forum int.* 1997. V. 74, №4. P.199–203. 30. Chakrabarti, O.P. Influence of free silicon content on the microhardness of RBSiC O.P. Chakrabarti, P.K. Das, J. Mukerji // *Ceram. Forum Int.* 1997. V. 74, № 2. P. 98–101.
32. Sangsuwan, P. Reaction-bonded silicon carbide by reactive infiltration / P. Sangsuwan, J.A. Orejas, J.E. Gatica, S.N. Tewari ets. *Industrial & engineering chemistry research*. 2001. V. 40, № 23. P. 5191–5198.
33. Rahaman, M.N. *Ceramic processing and sintering* / M.N. Rahaman 2nd ed. N.Y.: New York–Basel: Marcel Dekker Inc. 1996. P. 32–36.
34. Prochazka, S. Sintering of Silicon Carbide, in *Ceramics for High Performance Applications* S. Prochazka, J.J. Burke Columbus, OH: Metals and Ceramic Infomation Center. 1974. P. 239–252.
35. Murata, Y. Densification of SiC by addition of BN, BP and B₄C, and correlation to their solid solubilities Y. Murata, R.H. Smoak *Proceedings of*

International Symposium on Densification and Sintering, Oct, 1978.: Hakone Japan, Somiya, S. and Saito, S. eds, Gakujutsu Bunken, Tukyā–Kai, Tokyo. 1979. P. 382–399.

36. Coppola, J.A. Metod of producing high density silicon carbide product J.A. Coppola, R.H. Smoak US Patent № 4080415. Опубли. 21.3.1978. – 3с.

37. Suzuki, K., Pressureless sintering of SiC with addition of Al₂O₃, in SiC Ceramics, vol. 2 K. Suzuki, S. Somiya, Y. Inomata London: Elsevier. 1991. P. 163–182.

38. Rahaman, M.N. Ceramic processing and sintering / M.N. Rahaman 2nd ed. N.Y.: New YorkBasel: Marcel Dekker Inc. 1996. P. 620–624.

39. Cutler, R.A. Ceramic materials and components for engines. R.A. Cutler, T.B. Jackson, V.J. Tennery Proceedings of the Third International Symposium.: Westerville, OH: The American Ceramic Society. 1989. P. 309–318.

40. Winn, E.J. Role of the Powder Bed in the Densification of Silicon Carbide Sintered with yttria and alumina additives E.J. Winn, W.J. Clegg J. Am. Ceram. Soc. 1999. V. 82. №. 12. P. 3466–3470.

41. Pujar, V.V. Densification of liquidphase-sintered silicon carbide V.V. Pujar, R.P. Jensen, N.P. Padture Journal of Materials Science Letters. 2000. V. 19. P. 1011–1014.

42. Grande, T. Effect of Weight Loss on Liquid-Phase-Sintered Silicon Carbide T. Grande, H. Sommerset, E. Hagen, K. Wiik, M–A. Einarsrud J. Am. Ceram. Soc. 1997. V. 80, №. 4. P. 1047–1052.

43. Vassen, R. Processing and Properties of Nanograin Silicon Carbide / R. Vassen, D. Stover Journal of the American Ceramic Society. 1999. V. 82, №. 10. P. 2585–2593.

44. Hue, F. Analysis of the Weight Loss During Sintering of Silicon-Carbide Whisker-reinforced Alumina Composites F. Hue, Y. Jorand, J. Dubois, G. Fantozzi Journal of the European Ceramic Society. 1997 V. 17. P. 557–563.

45. Shinoda, Y. Super plasticity of Silicon Carbide Y. Shinoda, T. Nagano, H. Gu Journal of the American Ceramic Society. 1999. V. 82, №. 10. P. 2916–2918

46. Полях О.А., Руднева В.В. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния: монография: в 3-х т. Т. 1. Микро кремнезем в производстве карбида кремния. – М.: Флинта: Наука, 2007. – 248 с.
47. Руднева В.В., Галевский Г.В., Юркова Е.К. Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2009. № 3. С. 3
48. Massalski T. B. Binary Alloy Phase Diagrams. -Ohio: American Society for Metals, Metals Park, 1986.