

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Кораблебудівний навчально-науковий інститут

(повне найменування інституту, назва факультету)

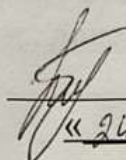
Кафедра матеріалознавства і технології металів

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

О.М. Дубовий



«24» грудня 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

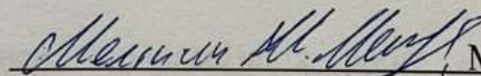
на здобуття вищої освіти «магістр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Дослідження технології і процесів структуроутворення

композиційної кераміки з порошку SiC»

Виконав: студент 6 курсу, групи 6131м

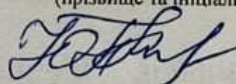


М. О. Мельник

(прізвище та ініціали)

Керівник д-р техн. наук, професор

(прізвище та ініціали)



Ю. О. Казимиренко

(прізвище та ініціали)

м. Миколаїв – 2024 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет кораблебудівний навчально-науковий інститут

Кафедра матеріалознавства і технології металів

Освітньо-кваліфікаційний рівень другий (ступінь магістра)

Спеціальність 132 – Матеріалознавство

Освітня програма «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент Карпеченко А. А.

" ____ " _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Мельнику Максиму Олександровичу

1. Тема роботи «Дослідження технології і процесів структуроутворення композиційної кераміки з порошку SiC»

керівник проекту (роботи) д.т.н., доцент, професор каф. Матеріалознавства і технології металів Казимиренко Юлія Олексіївна

затверджені наказом вищого навчального закладу від 12.11.2024 р. №1185-уч

2. Термін подання роботи 19.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи літературні джерела, інструкції та методики, ТУ на матеріали, річна програма виготовлення виробів – 10000 шт.

4. Перелік питань, що належать розробці (найменування розділів)

1. Перспективи застосування та технології виготовлення композиційної кераміки з порошку SiC

2. Аналіз процесів структуроутворення карбідокремнієвої кераміки на кремнеземистих зв'язках

3. Вибір та модернізація обладнання. Організація робіт на дільниці з виготовлення карбідокремнієвої кераміки.

4. Розробка стартапу проєкту виробництва композиційної кераміки з порошку SiC на вітчизняному малому підприємстві.

5. Охорона праці, довкілля на виробничій дільниці з виготовлення карбідокремнієвих матеріалів.

Висновки. Список використаних джерел.

Додатки

5. Перелік презентаційних матеріалів і креслеників. 1. Актуальність застосування карбідокремнієвої кераміки. 2,3. Ґрунтовний аналіз технологій виготовлення карбідокремнієвих матеріалів. 4. Характеристики вихідних матеріалів. 5. Технологічна схема виготовлення виробу. 6. Особливості процесу структуроутворення матеріалу. 7. Конструкторська розробка. 8. Економічна ефективність розробки. **Кресленик.** Насос (СК).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	проф. Казимиренко Ю. О.	01.11.2024	01.11.2024
2	проф. Казимиренко Ю. О.	05.11.2024	05.11.2024
3	проф. Казимиренко Ю. О.	10.11.2024	10.11.2024
4	проф. Казимиренко Ю. О.	15.11.2024	15.11.2024
5	проф. Казимиренко Ю. О.	15.11.2024	15.11.2024

7. Дата видачі завдання 01.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Перспективи застосування та технології виготовлення композиційної кераміки з порошку SiC	13.11.2024	вик
2	Дослідження процесів структуроутворення карбідокремнієвої кераміки на кремнеземистих зв'язках	22.11.2024	вик
3	Вибір та модернізація обладнання. Організація робіт на дільниці з виготовлення карбідокремнієвої кераміки	29.11.2024	вик
4	Фінансовий план впровадження результатів розробки	05.12.2024	вик
5	Охорона праці, довкілля на виробничій дільниці з виготовлення карбідокремнієвих матеріалів	11.12.2024	вик
6	Складання висновків	14.12.2024	вик
7	Оформлення списку використаних джерел інформації та додатків	14.12.2024	вик
8	Складання та переклад анотації	14.12.2024	вик
9	Виконання графічної частини (1 креслення формату A1 і слайд-презентація)	14.12.2024	вик
10	Перевірка на плагіат		
11	Попередній захист		

Студент магістратури

_____ М. О. Мельник

Керівник роботи _____

д.т.н., професор Ю. О. Казимиренко.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота «Дослідження технології і процесів структуроутворення композиційної кераміки з порошку SiC» на здобуття вищої освіти за спеціальністю 132 – матеріалознавство, освітньо-професійна програма «Композиційні та порошкові матеріали, покриття».

Робота присвячена розвитку технологій виготовлення функціональної композитної карбідокремнієвої кераміки.

Мета роботи – ґрунтовний аналіз технологій та дослідження процесів формування структури і властивостей композиційної кераміки з порошку SiC на кремнеземистих зв'язках.

Об'єкт досліджень: процеси формування структури і властивостей спеченої кераміки з порошку SiC за участю кремнеземистих зв'язок.

Методи досліджень: методи оптичної мікроскопії та комп'ютерної металографії, аналіз діаграм стану, системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу

Апробація роботи: результати були представлені на III Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій» (24-26 вересня 2024 р.) у Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків та опубліковані у вигляді тез:

Казимиренко Ю. О., Мельник М. О. Розвиток технологій та застосування стеклокомпозитів і керамічних матеріалів у суднобудуванні та енергетичному машинобудуванні. Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій : Матеріали III Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції. 2024. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (24-26 вересні 2024 р.). С. 4-5

Робота написана на 65 сторінках машинописного тексту, містить 19 рисунків, 13 таблиць, додатки і список використаних джерел з 36 найменувань.

Ключові слова: карбідокремнієва кераміка, дисперсна фаза, кремнеземисті зв'язки, рідиннофазне спікання, структура.

ABSTRACT

Qualification work "**Research of technology and processes of structure formation of composite ceramics from SiC powder**" for higher education in the specialty 132 – materials science, educational and professional program "Composite and powder materials, coatings".

The work is devoted to the development of technologies for the manufacture of functional composite silicon carbide ceramics.

The purpose of the work is a thorough analysis of technologies and research of the processes of formation of the structure and properties of composite ceramics from SiC powder on silica bonds.

Object of research: the processes of formation of the structure and properties of sintered ceramics from SiC powder with the participation of silica bonds.

Research methods: methods of optical microscopy and computer metallography, analysis of state diagrams, computer-aided design and engineering analysis systems

Approbation of the work: the results were presented at the III International Scientific and Practical Internet Conference "Topical Issues of Chemistry and Integrated Technologies in Crisis Situations" (September 24-26, 2024) at O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, Kharkiv and published in the form of abstracts:

Kazymirenko Y. O., Melnyk M. O. Development of technologies and application of glass composites and ceramic materials in shipbuilding and power engineering. Actual issues of chemistry and integrated technologies in crisis situations: Materials of the III International Scientific and Practical Internet Conference. 2024. Kharkiv: O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy (September 24-26, 2024). pp. 4-5

The work is written on 65 pages of typewritten text, contains 19 figures, 13 tables, appendices and a list of used sources from 36 titles.

Key words: silicon carbide ceramics, dispersed phase, silica bonds, liquid-phase sintering, structure.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНОЇ КЕРАМІКИ З ПОРОШКУ SiC	10
1.1. Характеристика і застосування композиційної кераміки з порошку SiC	10
1.2. Кристалічна будова SiC	13
1.3 Методи отримання порошку SiC	16
1.4. Аналіз технологій виготовлення композиційної кераміки з порошку SiC	19
1.4.1. Рекристалізовані матеріали з порошку SiC	19
1.4.2. Гарячепресовані матеріали з порошку SiC	21
1.4.3. Карбідокремнієві матеріали на зв'язках	22
1.4.4. Біо-SiC матеріали	25
1.4.5. Наноструктурізовані карбідокремнієві матеріали	26
1.5. Висновки до розділу 1, аналіз проблемних питань та постановка завдань досліджень	28
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ КАРБІДОКРЕМНІЄВОЇ КЕРАМІКИ НА КРЕМНЕЗЕМІСТИХ ЗВ'ЯЗКАХ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБУ	30
2.1. Вибір технології і методи дослідження	30
2.2. Вибір і дослідження вихідних матеріалів	32
2.2.1.. Порошок SiC	32
2.2.2. Пластифікатор	34
2.2.3. Кремнезем	35
2.3. Складання технологічної схеми виготовлення карбідокремнієвої кераміки на кремнеземистій зв'язці	36
2.3.1. Виготовлення шлікеру	38
2.3.2. Формування пресовки на кремнеземистій зв'язці	38

2.3.3. Високотемпературна обробка заготовки	39
2.3.4. Глазурування поливою	39
2.3.5. Контроль якості виробу на етапах після спікання та глазурування	40
2.4. Аналіз процесів структуроутворення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці	40
2.5 Висновки до розділу 2	43
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ. ОРГАНІЗАЦІЯ РОБІТ НА ДІЛЬНИЦІ З ВИГОТОВЛЕННЯ КАРБІДОКРЕМНІЄВОЇ КЕРАМІКИ	44
3.1. Вибір і модернізація обладнання	44
3.2. Модернізація обладнання	46
3.3. Організація виробництва на дільниці з виготовлення карбідокремнієвих виробів	47
3.4 Висновки до розділу 3	48
РОЗДІЛ 4. ФІНАНСОВИЙ ПЛАН ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБКИ	49
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ДОВКІЛЛЯ НА ВИРОБНИЧІЙ ДІЛЬНИЦІ З ВИГОТОВЛЕННЯ КАРБІДОКРЕМНІЄВИХ МАТЕРІАЛІВ	56
5.1. Заходи щодо охорони праці на виробничій дільниці	56
5.2. Заходи щодо охорони навколишнього середовища при виробництві керамічних матеріалів	58
5.3. Висновки до розділу	59
ВИСНОВКИ	60
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ	61
ДОДАТКИ	65

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

КМ – композиційні матеріали

КТЛР – коефіцієнт термічного лінійного розширення

СВС – самопоширений високотемпературний синтез

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія

Пористі матеріали з порошку SiC:

CSiC – керамічно зв'язаний SiC

RSiC – рекристалізований SiC

RBSiC – реакційно зв'язаний SiC

Щільні матеріали з порошку SiC:

SiSiC – реакційно спечений SiC

SSiC – твердофазно спечений SiC

HPSiC – гарячепресований SiC

мас. % – масові відсотки

мол. % – молярні відсотки

$t_{пл}$ – температура плавлення, °C

$t_{кип}$ – температура кипіння, °C

$t_{сп}$ – температура спікання, °C

t_g – температура склування, °C

$f, d, c, \alpha, \beta, \gamma$ – параметри елементарної комірки, нм

SiC' – первинний SiC

SiC'' – вторинний SiC

ВСТУП

Актуальність теми. Застосування композиційної карбідокремнієвої кераміки у сучасному двигунобудуванні, інструментальній промисловості, військовій техніці зумовлено комплексом унікальних експлуатаційних властивостей, таких як жаростійкість, жароміцність, вогнетривкість, теплофізичні характеристики, хімічна інертність та опір до окиснення. Це дає змогу виготовляти з неї теплові трубки, футеровки високотемпературних реакторів, елементи двигунів, ріжучий інструмент тощо. Проте через низьку технологічність порошків тугоплавких сполук на виробництві виникають труднощі, пов'язані з формуванням заготовок, їх спіканням до високої щільності та механічною обробкою. Тому для інтенсифікації фізико-хімічних процесів в технологіях застосовуються оксидні (Al_2O_3 , Y_2O_3 , CeO_2 , BeO) та безоксидні (B, C, B_4C , BN, BP, AN) активатори та сполучники у вигляді кремнеземистих, алюмосилікатних, високогліноземистих, нітридокремнієвих та комбінованих зв'язках, які дають змогу знизити температуру спікання (випалу) і підвищити тріщиностійкість кераміки, зокрема в умовах вібрацій і термічних навантажень.

Мета роботи полягає у ґрунтовному аналізі технологій та дослідженні процесів формування структури і властивостей композиційної кераміки з порошку SiC на кремнеземистих зв'язках.

Завдання досліджень:

1) на підставі аналітичного огляду літературних джерел порівняти технології виготовлення перспективних видів композиційної кераміки з порошку SiC;

2) розробити технологічну схему виготовлення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці і дослідити особливості формування його структури;

3) розробити організаційні заходи на виробничій дільниці, обрати та удосконалити обладнання для технологічних операцій;

4) розробити стартап проєкту виробництва композиційної кераміки з порошку SiC на вітчизняному малому підприємстві;

5) розглянути заходи щодо охорони праці та довкілля на виробничій дільниці з виготовлення карбідокремнієвих матеріалів з порошку SiC.

Об'єкт досліджень: процеси формування структури і властивостей спеченої кераміки з порошку SiC за участю кремнеземистих зв'язок.

Методи досліджень: методи оптичної мікроскопії та комп'ютерної металографії, аналіз діаграм стану, системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу.

Інформаційну базу досліджень наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених з фізико-хімічних основ та перспективних технологій створення неорганічних, зокрема керамічних матеріалів.

Апробація результатів досліджень : результати були представлені на III Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій» (24-26 вересня 2024 р.) у Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків та опубліковані у вигляді тез:

Казимиренко Ю. О., Мельник М. О. Розвиток технологій та застосування склокомпозитів і керамічних матеріалів у суднобудуванні та енергетичному машинобудуванні. Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій : Матеріали III Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції. 2024. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (24-26 вересні 2024 р.). С. 4-5

РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНОЇ КЕРАМІКИ З ПОРОШКУ SiC

1.1. Характеристика і застосування композиційної кераміки з порошку SiC

Композиційна кераміка на відміну від монолітної кераміки являє собою переважно безпористий матеріал, у матриці якого рівномірно розташовані дисперсні включення, які гальмують зростання тріщин під час руйнування, надають абразивних та інших спеціальних властивостей. Композиційна кераміка на основі карбіду кремнію застосовується як :

- конструкційна кераміка, з якої виготовляються окремі деталі для газотурбінних двигунів і двигунів внутрішнього згорання, теплообмінних апаратів, атомних реакторів: для цього виду кераміки є важливими високі твердість, границя міцності при осьовому стисканні, термо- і зносостійкість, стійкість до окиснювальня, вязкість руйнування;
- терموкераміка, з якої виготовляються електроди для металургійної промисловості, теплові трубки, футеровки високотемпературних реакторів: для цього виду кераміки перевага надається її жаростійкості, жароміцності, термостійкості, термостійкості, хімічній інертності та опору окисненню при температурах до 1500 °С, низькому коефіцієнту термічного лінійного розширення (КТЛР), високому коефіцієнту теплопровідності;
- електрокераміка, з якої виготовляються інтегральні системи, конденсатори, вібратори, нагрівачі, транзистори, фільтри, сонячні батареї тощо, для якої важливі додатковий коефіцієнт електронів (у порівнянні з металами) та велика ширина забороненої зони (різниця енергій між дном провідності й верхом валентної зони)
- ядерна кераміка, з якої виготовляються ядерне паливо, футерування, екрануючі елементи (зокрема панелі), поглиначі

випромінювання та нейтронів: цей вид кераміки повинен відповідати вимогам жароміцності, жаростійкості, вогнетривкості, проте ядерне керамічне пальне характеризується високою радіоактивністю, а екрануючі панелі та поглиначі випромінювання – радіостійкістю;

- інструментальна кераміка, з якої виготовляються ріжучий, абразивний та прес-інструмент, для якої властиві високі значення зносостійкості, теплопровідності, коефіцієнта тертя тощо;

- біокераміка, з якої виготовляються ендопротези і протези кісткової тканини, що зумовлюється її нетоксичністю та біологічною сумісністю.

Застосуванню, розробці нових видів та покращенню функціональних властивостей присвячено чимало наукових праць [1-11], які висвітлюють розробки науковців вітчизняних наукових шкіл. Систематизація науково-технічних джерел інформації [1-12], присвячених особливостям структури, властивостей карбідокремнівих матеріалів в залежності технологій їх отримання, наведена у вигляді табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Типи матеріалів на основі SiC

Типи матеріалів на основі SiC	Загальна характеристика технології
Монокристалічні матеріали [1, 6, 12]	Газотранспортні реакції, в результаті яких спостерігається вільне зростання кристалів SiC. Перекристалізація через рідиннометалеві розплави, пересублімація через газову фазу, дисоціаційне випаровування
Рекристалізовані матеріали [6, 11]	Технологія не передбачає використання зв'язок та активуючих добавок, спікання порошку SiC відбувається і в діапазоні температур 2100...2300 °С, в результаті чого утворюється високопористий (20-40 %) полікристалічний матеріал
Гарячепресовані матеріали [6, 7, 10]	Застосовується технологія гарячого пресування з тиском 15-20 МПа і спіканням в діапазоні температур 1900...2100 °С у присутності активаторів

Типи матеріалів на основі SiC	Загальна характеристика технології
Реакційно-спечені матеріали [6, 7, 9]	Застосовується технологія просочення парами або розплавом кремнію попередньо сформованої заготовки, яка складається з первинного SiC і вуглецевого матеріалу; в результаті хімічних реакцій під час спікання утворюється вторинний SiC
Силіцьовані графіти [1, 2]	Високотемпературна обробка графітів розплавленим або газоподібним кремнієм, в результаті якої утворюється вторинний SiC, який заповнює пори вуглецевої основи
Піролітичні матеріали (покриття) [12]	В результаті газофазних реакцій на нагрітих підкладках відбувається синтез графіту
Матеріали на кремнеземистих зв'язках [6, 7, 19]	Застосовується технологія спікання суміші, яка складається з порошку SiC і кремнезему
Матеріали на глиноземистих зв'язках [6]	Застосовуються технології відпалу (спікання) заготовок, сформованих із сумішей порошку SiC з вогнетривкими глинами, мулітом, корундом
Матеріали на нітридокремнієвій та нітридоалюмінієвій зв'язках [7, 8]	Технологія ґрунтується на процесі азотування під час спікання порошку SiC з доданням до шихти вільного кремнію або алюмінію
Матеріали на комбінованих зв'язках [8]	Процес ґрунтується на технології відпалу у вуглецевих засипках, які містять SiC і C, через яку проникають кисень і азот повітря, що приводить до утворення у засипці вторинного SiC і оксинітрида Si (Si_2ON_2)
Неспечені матеріали [6]	Технологія ґрунтується полімеризації органічних (фенол-формальдегідних) та неорганічних (алюмофосфатних) зв'язок під час термообробки при невисоких температурах гетерогенних композицій за участю порошку SiC
Біо-SiC матеріали [5, 7]	Технологія ґрунтується на піролізі натуральної деревини в інертному середовищі з наступним просоченням при високих температурах кремнієвмісних речовин
Наноструктурізовані матеріали [3, 5, 6]	В технологіях застосовуються нанопорошки SiC або спеціально підготовлені нанопорошки оксидних евтектичних складів

Джерело: складено автором

1.2. Кристалічна будова і властивості SiC

З'єднання SiC мають переважно ковалентний тип хімічного зв'язку. Через міцну і енергетичну стійкість зв'язку гібридизованого sp^3 з тетраедричною просторовою конфігурацією кристали SiC за фізичними і міцнісними властивостями наближаються до алмазів [12]. Частка іонної складової порядку складатиме 10 %. Монокристали SiC леговані киснем і літієм та домішками елементів V групи: це азот, фосфор, арсен, сурма, вісмут, тому мають зелене забарвлення та *n*-тип провідності. Монокристали, леговані елементами III групи (бором, алюмінієм, галієм, індієм) та елементами II групи (берилієм, магнієм, кальцієм), які є акцепторами, мають *p*-тип провідності та блакитне або чорне забарвлення). Електропровідність *n*-типу є властивою для монокристалів, стехіометричний склад яких відхиляється у бік збільшення Si з надлишком вуглецю *p*-типу. Саме ковалентний зв'язок зумовлює високі значення твердості та температуру плавлення SiC.

Карбід кремнію кристалізується у двох основних модифікаціях:

- кубічний SiC (β -SiC) зі структурою сфалериту (типу цинкової обманки – аналог структури алмаза), утворюється при температурах нижче 1700 °C;
- гексагонально щільноупакований (α -SiC) утворюється при температурі понад 1700 °C і має гексагональну ґратку і кристалічну структуру типу вюрциту (здвоєна щільно упакована).

Особливість кристалічної будови SiC зумовлена наявністю певної кількості кристалічних структур, об'єднаних у політипи, тобто варіації SiC, які є ідентичні у двох вимірах [13]. Політипи побудовані з одних і тих же самих шарів з різною послідовністю чергування, тому їх можна розглядати як шари, складені у певній послідовності. Параметри ґратки у площині шару є незмінними, у напрямку, перпендикулярному шару є різними, між найбільшими шарами відстані є кратними. Позначаються політипи цифрою і

латинською літерою: цифра вказує на кількість шарів у елементарній комірці, літера – на тип комірки, тобто nH означає структуру з примітивною гексагональною коміркою та n -шаровим періодом повторюваності вздовж осі c , а nR – структуру з примітивною ромбоєдричною ґраткою (Рамсдела) і n -шаровим періодом повторюваності вздовж осі c . Залежність політипного стану SiC від температури наведена на рис. 1.2, де рівноважні умови існування графічно визначаються зоною I, а нерівноважні умови – зоною II.

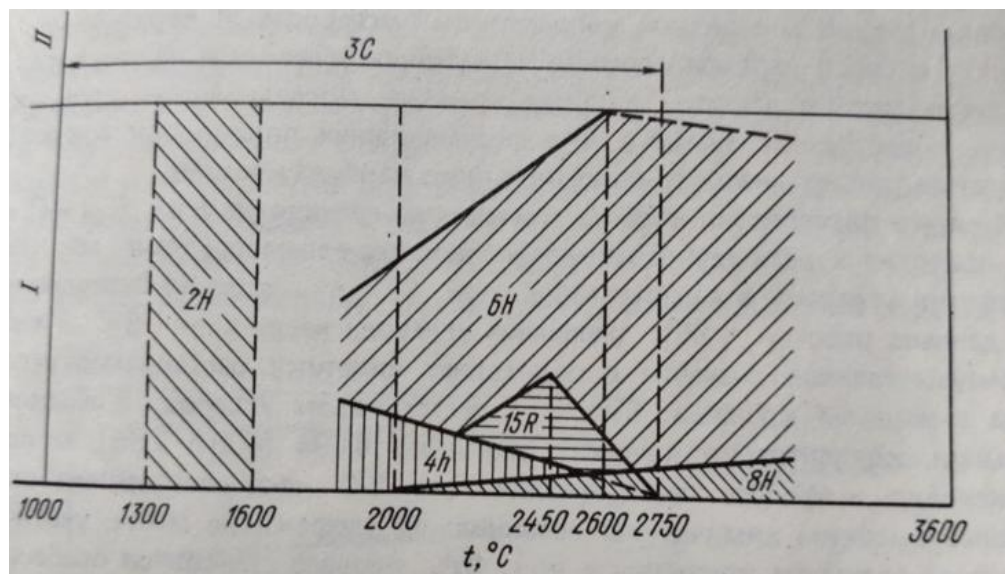


Рис. 1.1. Залежність політипного стану SiC від температури [13]:

2H – β -SiC (параметри решітки: $a = 0,3076$ нм, $c = 0,5048$ нм);

6H – α -SiC (параметри решітки: $a = 0,3081$ нм, $c = 1,5117$ нм);

8H – α -SiC (параметри решітки: $a = 0,3079$ нм, $c = 2,0147$ нм);

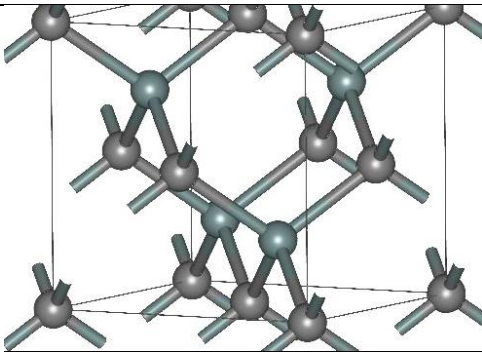
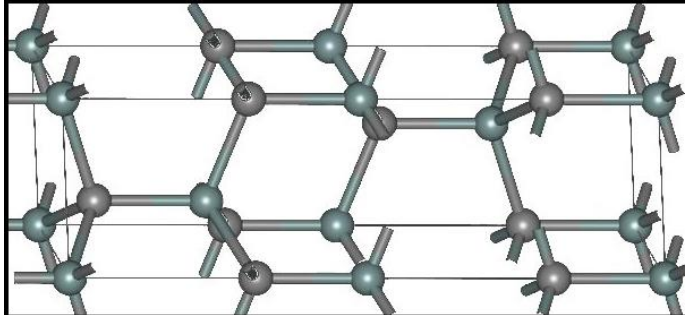
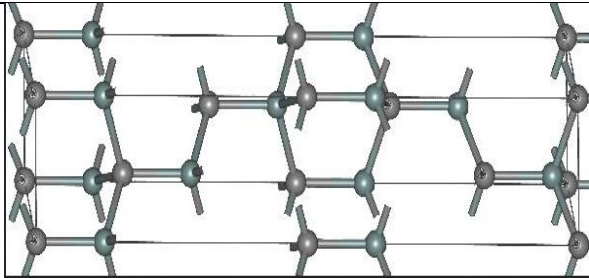
3C – β -SiC (параметри решітки: $a = 0,43596$ нм, $c =$)

15R – α -SiC (параметри решітки: $a = 0,3080$ нм, $c = 3,7817$ нм)

Зображення комірки певного політипу SiC наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Політипи SiC

Політип SiC	Зображення комірки
3C-(β -SiC)	
4H-SiC чотирьохшарова модифікація з чергуванням шарів <i>B ABCB ABCB</i>	
6H-(α -SiC) шестишарова модифікація з чергуванням <i>...B ABCACB ABCACB A</i>	

Джерело: складено автором за [13]

Карбід кремнію (хімічна формула SiC) – бінарна неорганічна сполука кремнію з вуглецем, ефективне застосування якої зумовлено такими властивостями як:

- температура плавлення – 2830 °С, що відносить його до тугоплавких з'єднань;
- твердість за Моосом – 9,1...9,5, мікротвердість – 33...36 ГПа, за твердістю SiC поступається лише алмазу і нітриду бору (BN);
- термічна, хімічна, радіаційна стійкість.

Аналіз літературних джерел [13] дав змогу визначити показники хімічної стійкості SiC, які наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Показники хімічної стійкості SiC

Хімічно активне середовище	Характер взаємодії
Жаростійкість	Окислюється за температурами вище за 800 °C
Мінеральні кислоти будь-яких концентрацій, зокрема плавикова кислота	Не реагує
Ортофосфорна кислота	Хімічно взаємодіє
Суміш нітратної і плавикової кислот	Реагує за температурами вище 200 °C
Водяна пара	Реагує вище за температур 1300...1400 °C за реакцією $\text{SiC} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SiO}_2 + \text{CH}_4$
Азот	Не реагує до температур 1100 °C
Водень і вуглецевий газ	Інертний
Хлор	Втрачає стійкість при порівняно низких температурах, розкладаючись за реакціями: $\text{SiC} + 2\text{Cl}_2 = \text{SiCl}_4 + \text{C}$ при 100 °C; $\text{SiC} + 4\text{Cl}_2 = \text{SiCl}_4 + \text{CCl}_4$ при 1000 °C
Сплавлення з їдкими і вуглецевими лугами і перекисами	Розкладається з утворенням силікатів

Джерело: складено автором

1.3. Методи отримання порошку SiC

Розвиток сучасних технологій отримання тугоплавких неметалевих порошків спрямований на підвищення виробничих показників, екологічності порошкової продукції, розширення можливостей отримати більш широкий спектр дисперсних речовин за розміром, формою та стехіометричним складом.

Проблемним питанням технологій отримання порошків SiC присвячено наукові дослідження вітчизняних вчених [6, 7, 10, 12-14], на підставі ґрунтовного аналізу яких складено аналітичний огляд, наведений у табличній формі (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Аналіз технологій отримання порошку SiC

Ідентифікаційні ознаки технології	Характеристика
Самопоширений високотемпературний синтез (СВС)	
Сутність методу	Реакція горіння з локалізацією тепловиділення у шарі з наступною теплопередачею до наступного шару. Ініціатором процесу є лазерний промінь або короткочасний тепловий імпульс (електроіскровий розряд тощо)
Переваги методу	Велика швидкість протікання реакції, незначні енергетичні витрати, простота обладнання, висока продуктивність, хімічна чистота порошку
Недоліки технології	Складність і необхідність контролю фізико-хімічних процесів на протязі всього технологічного циклу
Лазерний синтез	
Сутність методу	Піроліз газоподібного силану (SiH_4) з використанням CO_2 -лазера. Отримати наночастинки необхідної стехіометрії можна за допомогою додаткового короткочасного випалу в контрольованому газоподібному середовищі
Переваги методу	Можливість отримувати нанопорошки сферичної форми з розміром 18...26 нм
Недоліки методу	Низька селективність процесу
Хімічне осадження з парової фази (Chemical vapor deposition)	
Сутність методу	Хімічна реакція утворення SiC з газоподібного реакційного середовища. Вихідними реагентами є силан (SiH_4) і вуглеводні реагенти, як газ застосовується водень
Можливості методу	Отримання нанопорошків, наноплівоч, віскерів. Середній розмір порошку складатиме 100...200 нм,

Ідентифікаційні ознаки технології	Характеристика
	максимальний розмір агломерату не перевищує 300 мкм
Недоліки технології	Неможливість отримання гомогенних структур
Взаємодія SiO₂ з вуглецем	
Сутність методу	Полікристалічний SiC отримують в електричних печах при температурі 1800...2300 °С за хімічною реакцією $\text{SiO}_2 + 3\text{C} = \text{SiC} + 2\text{CO}$
Переваги методу	Доступність і порівняно низька вартість вихідної сировини: кварцового піску (високої хімічної чистоти), коксу (антрациту); для підвищення проникності іноді вводиться деревна тирса, для кольору поварена сіль
Недоліки методу	Низька хімічна чистота і нестабільність стехіометричного складу
Отримання аморфних порошків SiC з рисової лузги	
Хімічний склад рисової лузги, мас. %	SiO ₂ – 22,24; С – 35,77%; О – 36,59 %; Н – 5,05; N – 0,32. Рисова лузга складається з целюлози, лігіната і мінеральної складової, яка містить 92-97 % SiC
Сутність методу	Під час здрібнення лузги руйнується нерозчинна плівка з'єднань SiC; частка вуглецю і домішок видаляються через хімічну обробку розчинами, які містять 10 % HCl і 15 % HAc. Проте одночасно з видаленням частки органічної складової рисової лузги до розчину переходять продукти, які містять оксиди Mg, Ca, Fe, Al. Після просушування лузга термічно обробляється (T=500-300K) у відновлювальному середовищі, поки не встановиться співвідношення C/SiO ₂ =3:1. Технологічний цикл закінчується піролізом (T= 1800...2100 K) у середовищі аргону
Переваги технології	Використання природної сировини, можливість отримання аморфних порошків SiC
Недоліки технології	Низька продуктивність технологічного процесу, складність обладнання, обмеженість за контролем фракційного складу порошку

Джерело: складено автором

1.4. Аналіз технологій виготовлення композиційної кераміки з порошку SiC

1.4.1. Рекристалізовані карбідокремнієві матеріали

Процес збиральної рекристалізації для керамічних порошкових матеріалів полягатиме в укрупненні зеренної структури у полікристалічному матеріалі, що зумовлюється поатомною міграцією межзерених границь під час вільного спікання крупнозернистого порошку SiC, як це схематично показано на рис. 1.3.

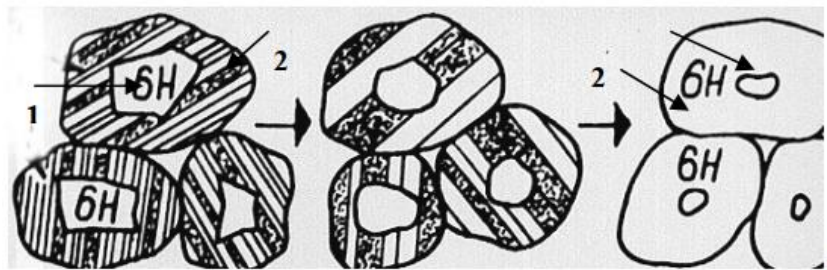


Рис. 1.3. Схематичне зображення розвитку процесу збиральної рекристалізації протягом вільного спікання порошку SiC [11]

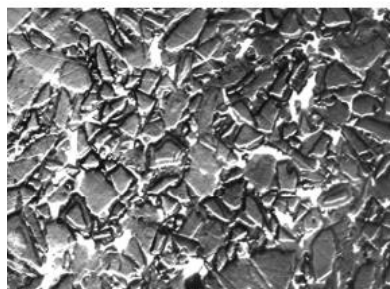
У спечених карбідокремнієвих матеріалах спостерігається міграція внутрізеренної границі поділу всередину затравочних частинок, до повного поглинання [11]. Розмір зерна R є функцією від часу спікання при певній температурі

$$R = k \cdot t^n,$$

де k – функція температури; $n = 0,5$ – для нормального росту зерен; $n = 0,25$ – для аномального росту зерен.

Мікроструктуру зразків самопов'язаного SiC, спеченого у вакуумі при температурах 1800 °C (а) і 2400 °C (б) наведено на рис. 1.4. Процес відбувається за механізмом твердофазного спікання і не передбачатиме використання активуючих додатків та зв'язок: це не дає можливості отримувати високощільні безпористі матеріали. Матеріал має щільність

2,7...3,16 г/см³, залишкова пористість складатиме 20...40 %. Отримання високощільного композиту можливе лише шляхом подальшого просочення спеченого керамічного каркасу полікарбосиланами і полівінілсиланами з подальшою карбонізацією та утворенням вторинного SiC, чому присвячено дослідження авторів робіт [3, 7, 10, 11]. В таблиці 1.5 наведено аналітичний огляд технології виготовлення рекристалізованих карбідокремнієвих матеріалів.



а



б

Рис. 1.4. Мікроструктура самов'язаного SiC, спеченого при температурах: а – 1800 °С; б – 2400 °С

Таблиця 1.5

Аналітичний огляд технології виготовлення рекристалізованих карбідокремнієвих матеріалів

Ідентифікаційні ознаки технології	Характеристика
Сутність технології	Технологія ґрунтується на процесі твердофазового спікання ($t = 2100...2300\text{ }^{\circ}\text{C}$) крупнозернистого порошку SiC у вакуумі
Приклади виробів	Вогнетривкі вироби для печей з температурою до 1600 °С, трубки, фарфорова промисловість
Особливості структури матеріалу	Високопористі (20...40 %) полікристалічні матеріали
Переваги технології	Високотехнологічний процес виготовлення вогнетривких фарфорових виробів
Недоліки технології	Неможливість отримання високощільних безпористих виробів

Джерело: складено автором

1.4.2. Гарячепресовані карбідокремнієві матеріали з порошку SiC

Застосування методу гарячого пресування для отримання композиційних матеріалів на основі порошку SiC розширює можливості формування майже безпористих матеріалів в діапазоні температур 1950...2050 °С, використовуючи тиск 5...10 МПа у парах кремнію. Мікроструктуру такого матеріалу наведено на рис. 1.5; аналіз технології – у табл 1.6.

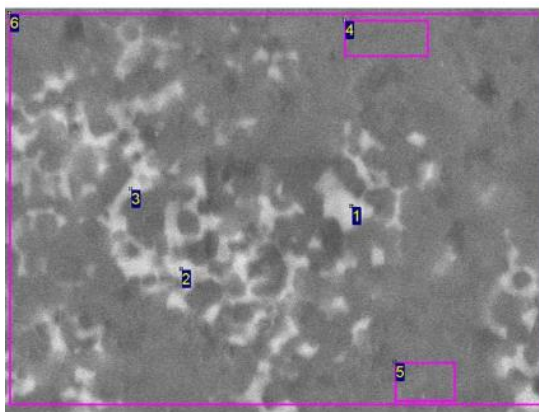


Рис. 1.5. Мікроструктура у глибині зразку матеріалу SiC–10C
($t = 1980\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 10\text{ МПа}$, $\tau = 30\text{ хв}$) з наступним просоченням парами Si
[19]

При твердофазному спіканні процес зростання зерен (рекристалізації) має пріоритет над ущільненням формовки, спостерігається дифузія атомів між зернами у твердому стані та низька інтенсивність механізму самодифузії.

Таблиця 1.6

Аналітичний огляд технології виготовлення гарячепресованих
карбідокремнієвих матеріалів

Ідентифікаційні ознаки технології	Характеристика
Сутність технології	Технологічний цикл отримання матеріалу поєднує у собі процес пресування розігрітого порошку з подальшим його спіканням (випалом). Процес відбувається у графітовій прес-формі, можливе

Ідентифікаційні ознаки технології	Характеристика
	застосування ізостатичного гарячого пресування
Приклади виробів	Вироби циліндричної форми, диски
Особливості структури матеріалу	Формування керамічно пов'язаного CSiC, де зерна SiC пов'язані вторинним SiC''
Переваги технології	Можливість отримувати високощільні вироби з 97 % щільністю від теоретичної
Недоліки технології	Висока вартість графітової оснастки, використання разових прес-форм

1.4.3. Карбідокремнієві матеріали на зв'язках

Більшість карбідокремнієвих матеріалів на зв'язках за структурою являють собою гетерогенні композиції, у яких зерна SiC зацементовані зв'язками, хімічний склад і фізико-механічні властивості яких відрізняються від основної фази. Застосування зв'язок (металевих, кремнеземістих, гліноземістих, нітридокремнієвих, нітридоалюмінієвих, комбінованих), сприятиме утворенню механізму рідиннофазного спікання з формуванням майже безпориної структури. Тобто в процесі рідиннофазного реакційного спікання формування міжчасткових контактів визначається транспортом карбону через кремнієвий розплав і хімічними реакціями, за якими утворюється вторинний SiC(SiC'') [6]. Матеріали на зв'язках отримуються за відомими технологіями, характерними для всіх керамічних матеріалів [16, 17], які включають у себе операції дозування порошкових компонентів заданого гранулометричного складу, змішування зі сполучниками, грануляцію шихти, формування заготовок, просушування та спікання. Технологія повинна забезпечувати рівномірний розподіл частинок за умовами їх змочуваності матеріалами зв'язки. Для карбідокремнієвих композиційних матеріалів триботехнічного призначення використовуються нікелеві [15] та полімерні види [8] зв'язок. Важливою умовою при виборі зв'язок є відсутність активної хімічної взаємодії з тугоплавкими частинками

SiC. Застосування металевих зв'язок знижує крихкість карбідокремнієвих матеріалів, утворення композиту відбувається в процесі міжфазної взаємодії за контактних кутів змочування, близьких до нульових. На рис. 1.6 наведено мікроструктуру (СЕМ) взаємодії (TiB₂-SiC)-Ni (а) і розподіл у складі композиту частинок SiC (б) [15]. Зона взаємодії має двофазну структуру з утворенням силіцидів Ni, її глибина становить близько 60 мкм. На рис. 1.7 наведено мікроструктуру (СЕМ) зони взаємодії (TiB₂-SiC)-(Ni-20Cr) (а) з розподілом Si (б).

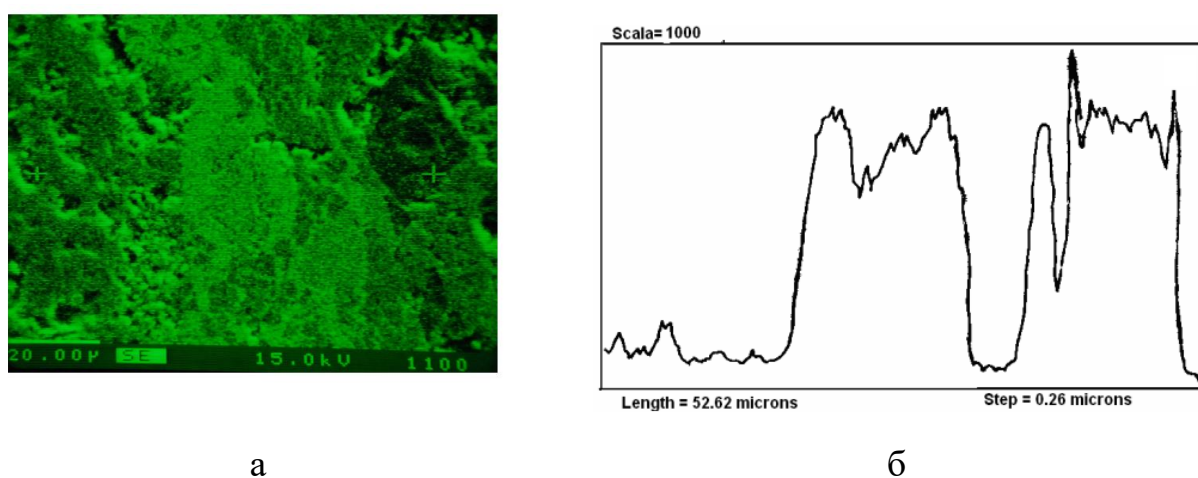


Рис. 1.6. Мікроструктура взаємодії (TiB₂-SiC)-Ni (а) і розподіл у складі композиту частинок SiC (б) [15]

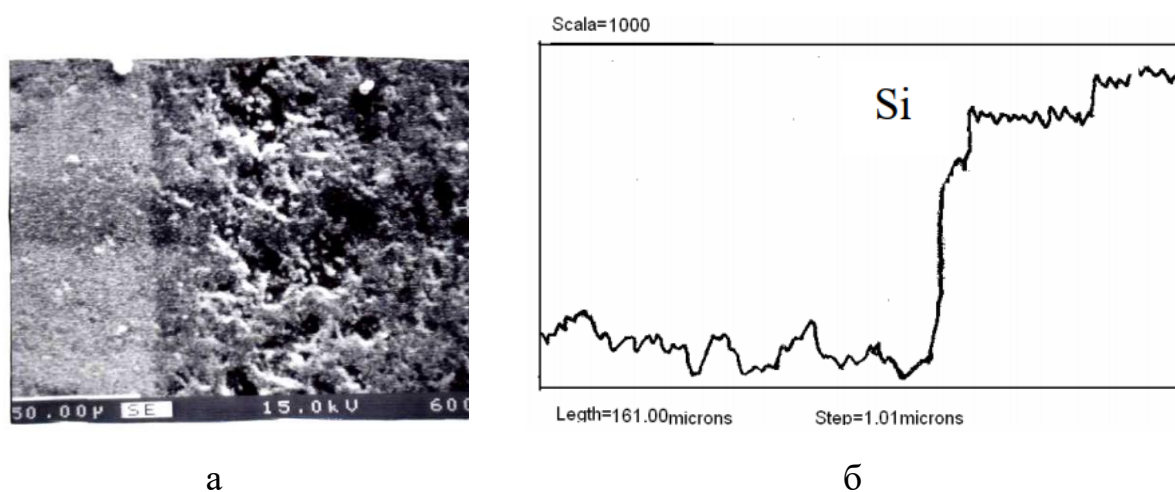


Рис. 1.7. Мікроструктура (СЕМ) зони взаємодії (TiB₂-SiC)-(Ni-20Cr) (а) з розподілом Si (б)

В роботі [8] розглянуто виготовлення дисперсних карбідокремнієвих матеріалів на полімерних зв'язках, для чого застосовано епоксидно-діанову смолу ЕД-20, епоксидовмісний розбавлювач ДЕГ-1, твердник поліетил поліамін. Використання порошків SiC різного гранулометричного складу ($d_1 = 5...7$ мкм, $d_2 = 125...200$ мкм, $d_3 = 2000...2200$ мкм) сприятиме більш щільному пакуванню твердих тугоплавких зерен у складі композиту. Встановлено, що SiC має слабку адсорбційну активність при утворенні епоксидного гелю, що зумовлює перебіг екзотермічної реакції твердіння. Узагальнений досвід стисло висвітлено у табл. 1.7.

Таблиця 1.7

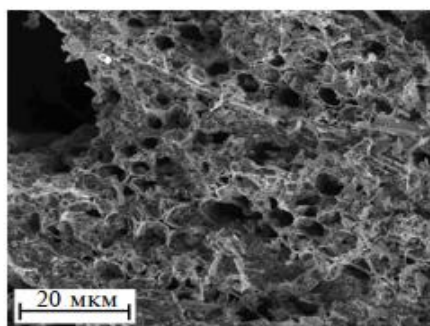
Аналітичний огляд технології виготовлення карбідокремнієвих матеріалів на зв'язках

Ідентифікаційні ознаки технології	Характеристика
Сутність технології	Технології ґрунтуються на умовах рівномірного перемішування компонентів і забезпечення змочуваності тугоплавких частинок SiC рідкою фазою
Приклади виробів	Інструментальні вироби, конструкційні деталі двигунів, теплообмінних апаратів, жаростійкі вироби
Особливості структури матеріалу	Малопористі гетерогенні композиції, у яких зерна SiC зацементовані зв'язками (металевими, кремнеземістими, гліноземістими, нітридокремнієвими, нітридоалюмінієвими, комбінованими)
Переваги технології	Можливість отримувати вироби як простої, так і складної конфігурацій, зниження температури спікання (термічної обробки) за рахунок рідиннофазного спікання
Недоліки технології	Висока інтенсивність усадочних процесів (25...40 %)

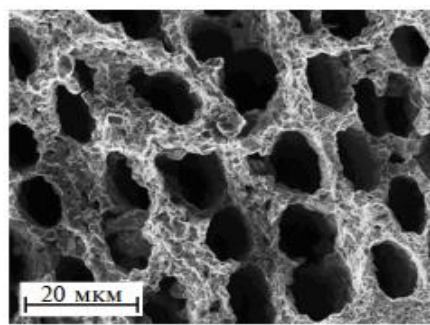
Джерело: складено автором

1.4.4. Біо-SiC матеріали

Синтез біоморфних карбідокремнієвих матеріалів вважається новітньою тенденцією у технологіях керамічних композиційних напівпровідникових матеріалів біологічного походження [5]. Технологічний процес включатиме у себе стадії піролізу, який розкладає органіку деревини (горіху, груші), в результаті чого залишається вуглецевих пористий каркас який далі просочується при високих температурах (1500...2100 °C) розплавом або паром силіцію (Si), монооксиду силіцію (SiO), органічними кремнієвими сполуками. В результаті створюється SiC/C композит, структура якого складається з SiC-матриці, політип монокристалів якої залежить від температури синтезу, та залишкового аморфного вуглецю. При температурах 1550 °C формується 3C-політип; зростання температури синтезу приводить до формування як 3C так і 6H-SiC, при температурі 2100 °C частка 6H-SiC-політипу збільшується. Вид пористої структури формується залежно від використання певного виду листвяної деревини; розмір каналів може змінюватися від 4 до 100 мкм. На рис. 1.8 наведено скануючі електронні знімки, зроблені автором статті [5], зразків біоморфного SiC, виготовлених з деревини горіху та груші. В табл. 1.8 виділені переваги, недоліки та обмеження розглянутої технології.



а



б

Рис. 1.8. СЕМ-знімки морфології поверхні зразків біоморфного SiC, виготовленого з деревини [5]:

а – горіха *Juglans regia*; б – груші *Pyrus domestica*

Аналітичний огляд технології виготовлення Біо-SiC матеріалів

Ідентифікаційні ознаки технології	Характеристика
Сутність технології	Технологія ґрунтується на піролізі натуральної деревини в інертному середовищі з наступним просоченням при високих температурах кремнієвмісних речовин
Приклади виробів	Високотемпературні фільтри для розплавлених металів і вихлопних газів, нагрівальні елементи, теплообмінники
Особливості структури матеріалу	Мікропориста монокристалічна SiC-матриця і залишковий аморфний вуглець.
Переваги технології	Можливості застосування відходів деревини та екологічність технології
Недоліки технології	Низька продуктивність технологічного процесу, що ускладнюється застосуванням певних порід листвяних дерев
Обмеження технології	Умови утворення SiC/C-композиту: співвідношення компонент $\text{Si/C} < 2,33$

Джерело: складено автором

1.4.5. Наноструктуровані карбідокремнієві матеріали

Більшість технологій отримання наноструктурованих матеріалів можна поділити на два види: у одних використовуються оксидні порошки евтектичних складів, у інших – нанодисперсні порошки SiC [3, 6]. Аналітичний огляд технології виготовлення наноструктурованих карбідокремнієвих матеріалів наведено у табл. 1.9

Аналітичний огляд технології виготовлення наноструктурованих
карбідокремнієвих матеріалів

Ідентифікаційні ознаки технології	Характеристика
Сутність технології	В технологіях застосовуються нанопорошки SiC або спеціально підготовлені нанопорошки оксидних евтектичних складів
Приклади виробів	Інструментальна промисловість, керамічні бронепанелі
Особливості структури матеріалу	Безпориста ультра- і нанокристалічна структура
Переваги технології	Можливість отримувати вироби з підвищеною твердістю та тріщиностійкістю
Недоліки технології	Через високий ступінь агрегації порошоків знижується кількість міжчасткових контактів, що вимагатиме застосування спеціалізованих методів їх змішування

Джерело: складено автором

На рис. 1.9 наведено електронну мікрофотографію наноструктурованого SiC

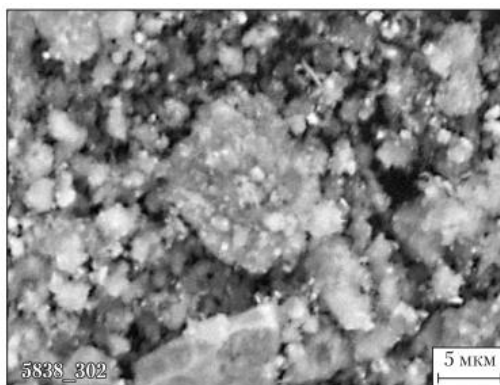


Рис. 1.9. Електронна мікрофотографія наноструктурованого SiC [3]

При використанні в технологіях нанопорошків оксидних евтектичних складів необхідно дотримуватися умов їх спеціальної підготовки: змішування протягом тривалого часу, механоактивації спільно з безкисневими сполуками. В процесі спікання відбуваються процеси кристалізації

ультрадисперсних фаз евтектики, що у свою чергу, сприятиме зниженню температури спікання. Якщо у технології застосовується нанодисперсний порошок SiC, то це дає змогу досягти максимально щільного пакування частинок, консолідація яких під час спікання забезпечує майже безпористу структуру матеріалу.

1.5. Висновки до розділу 1, аналіз проблемних питань і постановка завдань досліджень

1. Виконано всебічний аналіз застосування композиційної кераміки з порошку SiC у техніці; проаналізовано сучасний досвід розвитку технологій спеціальних видів кераміки. Надано характеристику основним типам карбідокремнієвих керамічних матеріалів.

2. Наведено загальну характеристику кристалічної будови SiC та проаналізовано його поліморфні модифікації за політипами; розглянуто показники міцності і хімічної стійкості SiC до агресивних рідких та газоподібних середовищ.

3. Проаналізовані прогресивні технології отримання порошку SiC; визначено їх переваги і недоліки.

4. Проаналізовані сучасні технології отримання рекристалізованих, гарячепресованих, наноструктурованих карбідокремнієвих матеріалів, матеріалів на зв'язках, біо-SiC матеріалів; визначено переваги і недоліки технологій, особливості структуроутворення, наведено приклади виробів.

На підставі проведено огляду літературних джерел, визначено, що на сучасних підприємствах при виготовлення теплових трубок, футеровок високотемпературних реакторів, елементів двигунів та інших відповідальних деталей через низьку технологічність порошку SiC (текучість, пресуємість, спікаємість тощо) виникають труднощі з отриманням високощільних безпористих виробів та їх механічною обробкою. Тому для інтенсифікації фізико-хімічних процесів в технологіях застосовуються активатори та

сполучники у вигляді органічних і неорганічних зв'язок, які дають змогу знизити температуру спікання (випалу) і підвищити тріщиностійкість кераміки, зокрема в умовах вібрацій і термічних навантажень.

Мета роботи полягає у ґрунтовному аналізі технологій та дослідженні процесів формування структури і властивостей композиційної кераміки з порошку SiC на кремнеземистих зв'язках.

Завдання досліджень:

1) на підставі аналітичного огляду літературних джерел порівняти технології виготовлення перспективних видів композиційної кераміки з порошку SiC;

2) розробити технологічну схему виготовлення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці і дослідити особливості формування його структури;

3) розробити організаційні заходи на виробничій ділянці, обрати та удосконалити обладнання для технологічних операцій;

4) розробити стартап проєкту виробництва композиційної кераміки з порошку SiC на вітчизняному малому підприємстві;

5) розглянути заходи щодо охорони праці та довкілля на виробничій ділянці з виготовлення карбідокремнієвих матеріалів з порошку SiC.

Об'єкт досліджень: процеси формування структури і властивостей спеченої кераміки з порошку SiC за участю кремнеземистих зв'язок.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ КАРБІДОКРЕМНІЄВОЇ КЕРАМІКИ НА КРЕМНЕЗЕМІСТИХ ЗВ'ЯЗКАХ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБУ

2.1. Вибір технології і методи дослідження

Карбідокремнієві композиційні матеріали на кремнеземистих зв'язках отримують шляхом спікання порошку SiC з кремнеземом SiO₂. Такі матеріали матимуть наступні фізико-механічні властивості [6]:

- щільність матеріалу: 2300...2650 кг/м³;
- термостійкість: 20/1000 °С;
- коефіцієнт теплопровідності: $\lambda = 8,5$ (при 500 К)...7,2 (при 1300 К)
- модуль пружності: $E = 36...37$ ГПа;
- робочі температури експлуатації виробів: 1150...1250 °С.

Виходячи з нескладної форми та розмірів виробу (рис. 2.1) для формування заготовки обрано метод заливки термопластичного шлікера у форму з наступним пресуванням у гідропресах під невеликим тиском (4...6 кПа) і спіканням при температурі 1620...1650 К (1347...1377 °С) у середовищі аргону або продуктів згоряння органічного палива. Вимоги до технології сформульовані у табл. 2.1.



Рис. 2.1. Виріб [20]

Таблиця 2.1

Вимоги до технології виготовлення виробу

Критерії	Вимоги
Формування заготовки	- ущільнення шихти - рівномірний розподіл компонентів
Консолідація матеріалу	- спікання звязки - створення умов для протікання дифузійних процесів у рідкій фазі
Вимоги до структури	Здатність чинити опір розвитку тріщин в умовах термоциклічних навантажень
Конкурентноспроможні аналоги	Гаряче пресування порошку SiC у графітовій прес-формі (виготовленій з термічно необробленого графіту) з наступним просоченням парами Si. В процесі спікання ($t = 1700 \dots 2050 \text{ }^{\circ}\text{C}$) під тиском ($P = 25 \dots 30 \text{ МПа}$) відбувається утворення вторинного SiC і перекристалізація SiC через кремнієвий розплав. Отримані матеріали мають майже безпористу структуру і 5...15 % вільного Si у карбідокремнієвій матриці
	Реакційно спечені «самов'язані» матеріали з утворенням вторинного (SiC'') карбїду кремнію, який утворює зв'язку, що цементує зерна первинного (SiC') карбїду кремнію

Теоретичні передумови, методи і засоби, які застосовуються у роботі для проведення теоретичних і експериментальних досліджень, стисло висвітлені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Методологія постановки досліджень

Об'єкт досліджень	Теоретичні передумови, методи і засоби
Дослідження гранулометричного складу порошків	Методи оптичної мікроскопії [21] Методи комп'ютерної металографії [22]
Дослідження процесів структуроутворення при спіканні карбідокремнієвих заготовок у	Аналіз діаграм стану [16, 23] Уявлення про поліморфні модифікації кремнезему [23]

Об'єкт досліджень	Теоретичні передумови, методи і засоби
кремнеземистих зв'язках	Уявлення про рідиннофазне спікання керамічних сумішей [12, 24] Уявлення про термодинамічні процеси пластифікації полімерів [29]
Побудова геометричної моделі	Системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу [25]
Фінансовий аналіз проєкту	Методологія фінансового аналізу інженерних розробок [26]

2.2. Вибір і дослідження вихідних матеріалів

Для формування карбідокремнієвих заготовок в роботі обрано порошок SiC чорний і пластифікатор поліетіленгліколь, для утворення кремнеземистої зв'язки – кварцовий фракційний пісок.

2.2.1. Порошок SiC

Карбід кремнію чорний – універсальний та високоефективний матеріал (виробництва Запорізькій абразивний комбінат) з густиною $3,21 \text{ г/см}^3$, хімічний склад якого складається з мас. % не менше: SiC – 96,0 %; C – 0,6 %; Fe – 0,5 %. Оптична мікрофотографія порошку SiC наведена на рис. 2.2.



Оптична мікрофотографія порошку SiC (54C), $\times 40$

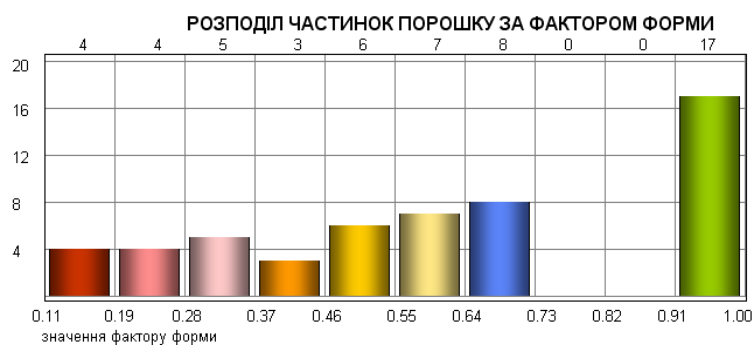
Результати обробки мікрофотографії методом комп'ютерної металографії наведено у вигляді гістограм розподілу порошків за розміром у напрямку X і Y, фактором його форми (рис. 2.2), що дає можливість проаналізувати гранулометричний склад обраного порошку SiC.



а



б



в

Рис. 2.2. Гістограми розподілу порошку SiC:

а – за розміром у напрямку X; б – за розміром у напрямку Y;

в – за фактором форми

Дослідні частинки матимуть форму, максимально наближену до сферичної з фактором форми 0,7 – 1,0. Середній розмір частинок фракції становить 30...40 мкм у напрямку X і 25...50 мкм у напрямку Y. Застосування порошку середньої тонкості сприятиме запобіганню агломерації під час формування. В роботі [6] визначено, що розмір зерен від 1,2 мкм до 60 мкм забезпечують високі значення діелектричної проникності

2.2.2. Пластифікатор

Головним призначенням пластифікатору є зниження в'язкості шлікеру щоб забезпечити формування заготовки з малопластичних порошкових матеріалів. У сучасній практиці застосовують гомогенні і негомогенні види пластифікаторів [16], вміст якого у складі шлікеру становить 15...60 % по об'єму і 5-20 % по масі. Традиційно у технологіях керамічних матеріалів застосовуються негомогенні пластифікатори, які вводяться до складу порошкової суміші під час змішування або подрібнення. Це парафін, стеарін, бджолиний віск, які у масовій кількості від 5 до 15 % вводяться до складу шлікерів задля формування певної пористої структури фільтрів, випаровувачів, матеріалів для капілярного транспорту. Проте через погано сумісність з більшістю речовин їх використання обмежено. Конкуренцію парафіну, стеарину, бджолиному воску становлять пластифікатори на основі полімерів, желатину, термореактивних смол

На відміну від відомих технологій в роботі пропонується застосовувати поліетіленгліколь [poly(ethylene oxide)] USP – нейтральний водорозчинний полімер ($\text{HOCH}_2\text{--}[\text{--CH}_2\text{OCH}_2\text{--}]_n\text{--CH}_2\text{OH}$ густиною 1,127 г/см³ (при 20 °) і наступними властивостями:

- молярна маса – $44,05n + 18,02$ г/моль
- густина – 1,127 г/см³ (при 20 °C)
- температура плавлення $t_{\text{пл}} = 57,5$ °C
- температура кипіння $t_{\text{кип}} - > 325$ °C
- розчинність (вода) – 50 мг/мл

Залежно від молекулярної маси поліетіленгліколь може бути у вигляді в'язкої рідини, гелеподібної або твердої речовини. В технологіях виготовлення твердих сплавів він застосовується як розчин у спирті і на масу формувального шлікеру становить не більше 2 мас. % [17]. Переваги його використання полягатимуть у тому, що він не взаємодіє із сумішшю порошків і видаляється повністю в процесі її спікання у атмосфері водню або при гарячому пресуванні.

2.2.3. Кремнезем

Кремнезем (діоксид силіцію SiO_2) є однією зі складових осадових порід, яка накопичується у вигляді піску або знаходиться в зцементованому стані (у вигляді піщаника) [24]. У природі SiO_2 може знаходитися як у аморфному стані, так і у декількох поліморфних модифікаціях, послідовність яких схематично наведена на рис. 2.3.

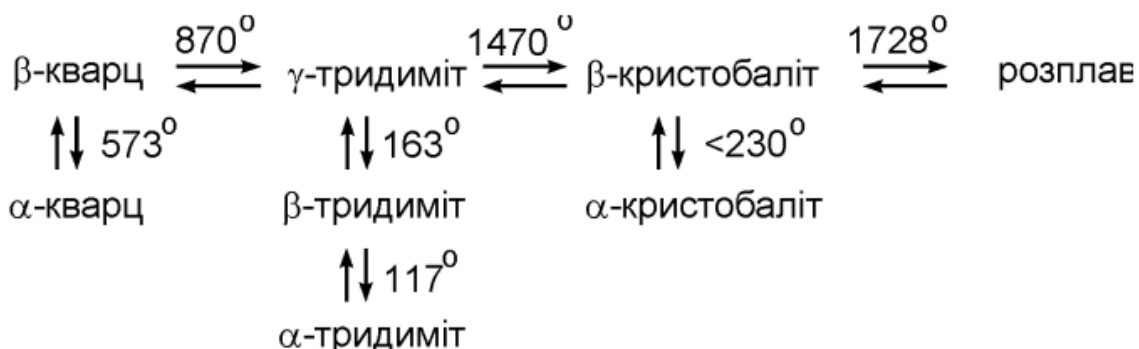


Рис. 2.3. Схема поліморфних перетворень модифікацій кремнезему [24]

Специфічні властивості природних і синтетичних матеріалів (зокрема що містять різні форми кремнезему, силікати, алюмосилікати) зумовлені природою силасанового зв'язку (Si-O), який вважається ковалентно-іонним з переважною часткою ковалентного зв'язку. Міцність зв'язку Si-O (452 кДж/моль) є суттєво більшою за міцність зав'язків Si-Si (222 кДж/моль) і Si-H (318 кДж/моль), що зумовлює побудову ланцюгу Si-O-Si-O-Si , який покладено в основу хімічних уявлень про силіцій. На рис. 2.4 наведено світлину кварцового фракціонованого піску з Вінницького родовища.

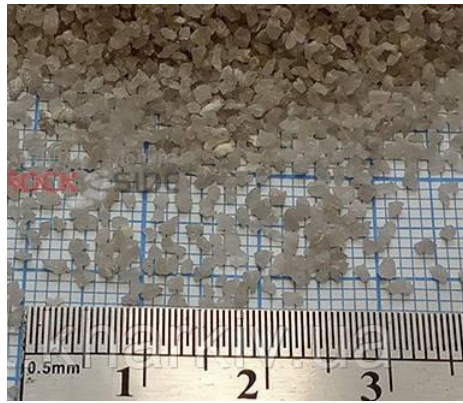


Рис. 2.4. Кварцовий фракціонований пісок з Вінницького родовища

Кварцовий фракціонований пісок з насипною щільністю $1300...1500 \text{ г/см}^3$ є мономінеральним і має кристалічну структуру; його твердість за шкалою Мооса становить 7 (10 у алмаза) [24], у воді не розчиняється. У склад дослідної вибірки входять фракції дрібнозернистого ($d = 0,1...0,8 \text{ мм}$, середнього $d = 0,8...1,6 \text{ мм}$ і крупного $d = 1,6 \text{ мм}$); середня питома поверхня складатиме $400 \text{ м}^2/\text{г}$. Кварцовий пісок складається з більш ніж 90 % уламків кварцу, має добру обкатану форму зерен. Місця добути є характерними для платформних районів, де пісок утворюється в умовах жаркого клімату; 30-38 % від обсягу всього видобутку кварцового піску використовується для виробництва скла. Точка плавлення чистого кварцу становить 1760°C [24], проте через вміст домішок суміші мають нижчу температуру плавлення (близько 1728°C).

Твердість і механічні властивості матеріалу визначаються характеристиками частинок SiC і міцністю міжчасткових контактів у структурі; електропровідність – властивостями зв'язки.

2.3. Складання технологічної схеми виготовлення карбідокремнієвої кераміки на кремнеземистій зв'язці

В роботі запропоновано технологічну схему виготовлення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці (рис. 2.4).

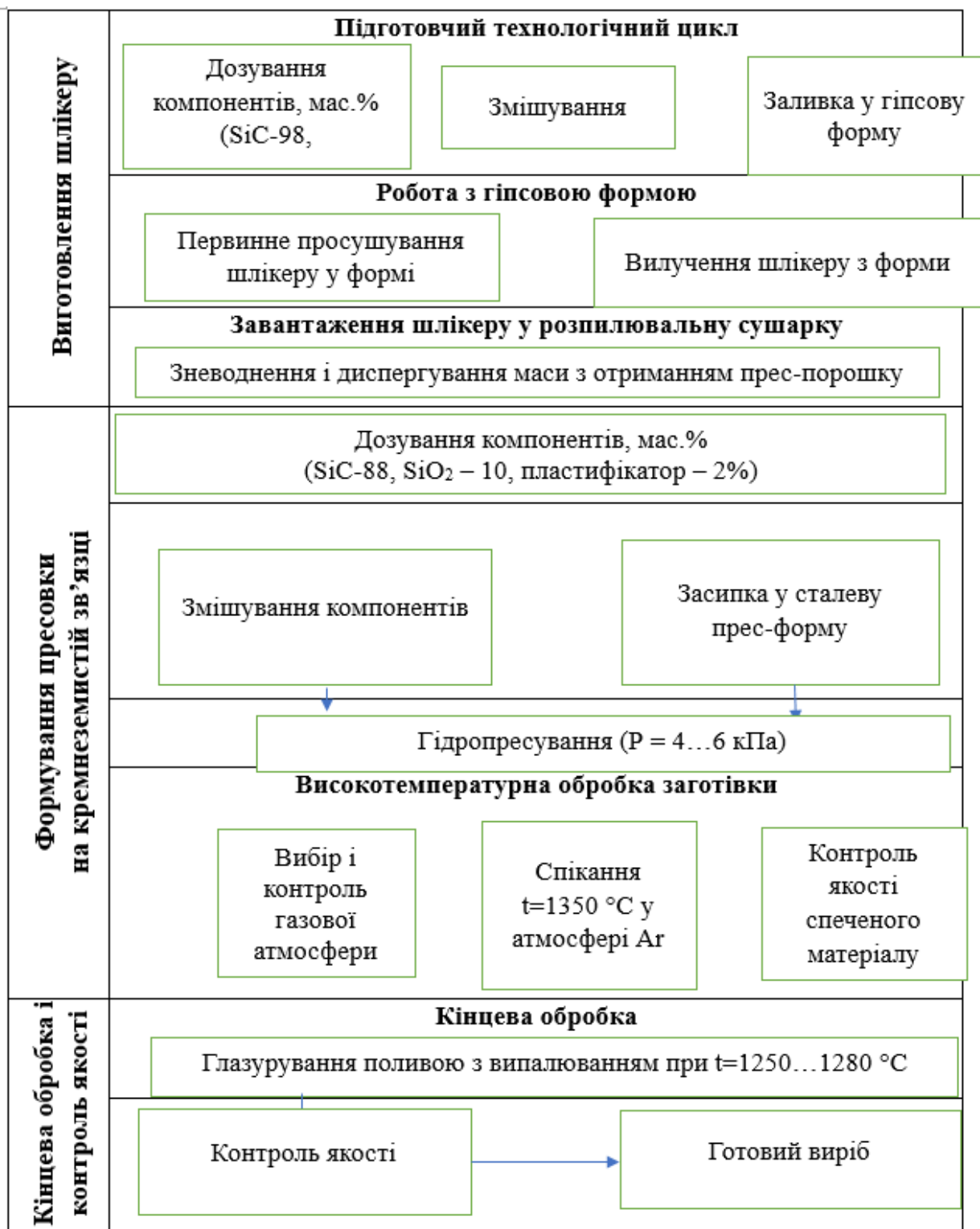


Рис. 2.4. Технологічна схема виготовлення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці
[складено автором]

2.3.1. Виготовлення шлікеру

Важливим технологічним етапом є виготовлення шлікеру. Дозування компонентів для приготування шлікеру здійснюється масовим способом з використанням аналітичних ваг GR200(210 г/0,1 мг) 1-го класу точності.

Виготовлення шлікеру відбувається «мокрим способом»: навішення SiC змішується зі спиртовим розчином поліетиленгліколю задля запобігання агломерації сипучих компонентів. Для змішування порошку SiC з пластифікатором рекомендується використовувати змішувач V-типу марки ZS-V2, особливістю якого є наявність 2-х каналів руху, що дає змогу використовувати в технології додаткові активатори і вводити їх до складу шлікеру.

Метою первинного сушіння, яке здійснюється на повітрі з температурою 20...40 °C є видалення залишкової вологи з шихти після «морого змішування». Шлікер заливається у пористу гіпсову форму будь-якої конфігурації з об'ємом 1-3 дм³ і висушується у природних умовах до вологості 40...45 %.

Підсушений шлікер завантажується у розпилювальну сушарку з температурою в середині ≈ 80 °C, у якій відбувається його зневоднення і здійснюється диспергування маси з метою отримання прес-порошку. У випадках конгломерації частинок (з утворенням більш крупних з розміром більш ніж 50 мкм) рекомендується виконувати операцію ручного просіювання на ситах. Застосування розпилювальної сушарки підвищує ефективність і рентабельність технологічного процесу і скорочує виробничі площі.

2.3.2. Формування пресовки на кремнеземистій зв'язці

Першим етапом формування пресовки на зв'язці є виготовлення формувальної суміші з отриманого прес-порошку SiC з кварцовим піском. Дозування здійснюється масовим способом у масовому співвідношенні 88 % SiC і 10 % SiO₂ з додаванням у суміш пластифікатору спиртовим розчином

поліетиленгліколю задля рівномірної змочуваності та рівномірного розподілу компонентів. Для змішування компонентів можна використовувати змішувач V-типу марки ZS-V2.

Процес пресування здійснюється на гідропресі. Формувальна суміш завантажується у прес-форму з нержавіючої сталі (марки 10X18H9T). Тиск пресування становить 4...6 кПа. Застосування гідравлічного пресу дає змогу при мінімальних зусиллях видалити повітря з пор і знизити вологість заготовки.

2.3.3. Високотемпературна обробка заготовки

Спикання сформованих заготовок здійснюється в атмосфері аргону при температурі 1350 °C [16]. Використання інертного середовища сприятиме гальмуванню небажаних процесів, таких як руйнування поверхневого шару і суттєва втрата ваги, які відбуваються у водні [32].

Для спикання можна використовувати муфельну піч TEFIC з азотно-аргоною атмосферою і номінальною температурою до 1700 °C, для контролю якої застосовується дуплексна термопара типу N; швидкість підйому температури – до 30 °C/хв.

В роботі рекомендується використовувати поетапне нагрівання заготовок зі швидкістю підйому температури 20 °C/хв з витримкою по 30 хв на кожному з температурних етапів: 400 °C, 800 °C, 1350 °C. Це сприятиме утворенню склофази, заповненню склофазою пор між частинками SiC та запобіганню її передчасної рекристалізації.

2.3.4. Глазурування поливою

Глазурування поливою здійснюється для згладжування поверхневих дефектів і виключення залишкової пористості. Ефект аналогічний процесу емалювання. Полива (глазур) являє собою шар скловидного покриття товщиною 0,1...0,3 мм у вигляді суспензії з силіцид-оксидної композиції, зокрема на основі стекол системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [34]. Температура

розплавлення поливи збігається з інтервалом спікання керамічного виробу, то при випалюванні шихта перетворюється на склоподібне покриття. Полива надає керамічним виробам водонепроникненість, оберігає від хімічного впливу кислот, лугів, мастил. Після глазурування вироби зазнають короткочасного випалювання (протягом 25-30 хв) при температурі 1250...1280°C.

2.3.5. Контроль якості виробу на етапах після спікання та глазурування

Контроль якості виробу включає у себе:

- візуальний контроль виробу з метою виявлення тріщин та поверхневих дефектів;
- вимірювання геометричних розмірів
- тестування методом гідростатичного зважування на визначення уявної густини і відкритої пористості, яка не повинна перевищувати 1 %.

2.4. Аналіз процесів структуроутворення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці

В процесі підвищення температури SiO_2 утворює склофазу (SiO_2 частково розм'якшується), яка робить процес спікання більш інтенсивним. Формування структури матеріалу відбувається за механізмами рідиннофазного спікання. Склофаза рівномірно розподіляється між зернами SiC , локалізується на межах, що обмежує рекристалізаційні процеси (росту зерен). Наявність пластифікатора у формувальній суміші сприятиме не тільки зменшенню тертя порошку о стінки сталеві прес-форми та бічного тиску, а й сприятиме більш міцному зчепленню частинок. При використанні іншої атмосфери спікання ніж водень, поліетиленгліколь не видаляється повністю, а сприятиме зниженню температури початку склування [28]. Як вважає автор роботи [29] нерівномірний розподіл склофази між зернами SiC може

призвести до усадкових деформацій з утворенням дефектів матеріалу. Атмосфера Ar посилює фазове перетворення $\beta \rightarrow \alpha$ (чого не спостерігається у інших середовищах) шляхом утворення більш витягнутих зерен, що зумовлено тим, що в діапазоні температур 600...700 °C порошок SiC набуває певних пластичних властивостей [17]. В процесі спікання протікають хімічні реакції з утворенням парів SiO_2 і Si, які за дифузійними механізмами проникають у пористу заготівку. Для аналізу процесів взаємодії частинок SiC з кремнеземом і полімерним пластифікатором в роботі було використано діаграма стану системи Si–C [16] (рис. 2.5), діаграма стану діоксиду силіцію [24] (рис. 2.6) та уявлення про термодинамічні процеси пластифікації полімерів [29]. Реперні точки для аналізу процесів наведено у табл. 2.2.

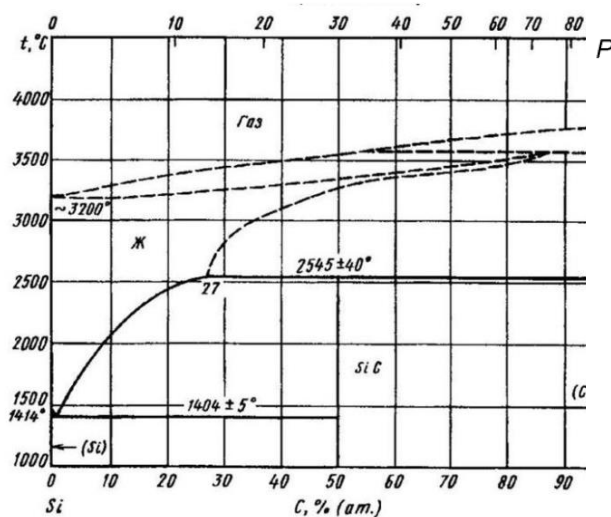


Рис. 2.6. Діаграма стану діоксиду силіцію [24]

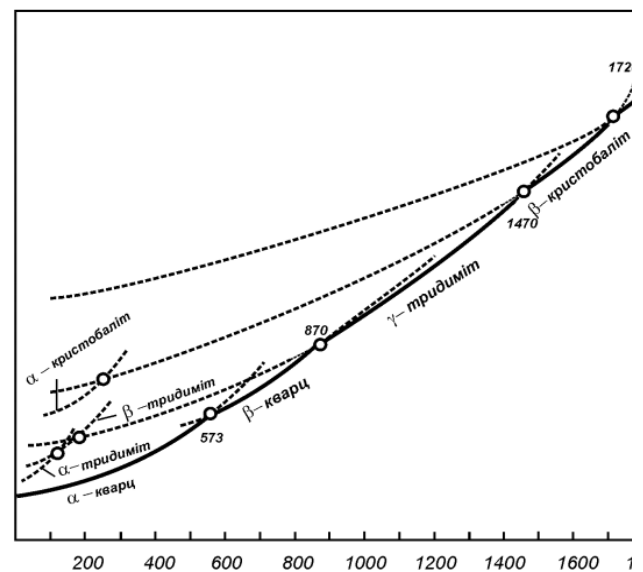


Рис. 2.5. Діаграма стану системи Si–C [16]

Таблиця 2.2

Реперні точки для аналізу процесу спікання

Процес	$t_{\text{пл}} \text{ SiC}$	$t_{\text{пл}} \text{ SiO}_2$	$t_{\text{кіп}}$ пластифікатора	t_g	$t_{\text{сп}}$
Температура процесу, °C	2730	1760	325	490	1350

Джерело: складено автором за посиланнями [24, 29]

В роботі не наводиться власних результатів досліджень мікроструктури і фазового складу спечених зразків. Проте в дослідженнях аналіз особливостей процесів структуроутворення зорієнтований на результати роботи [30], у якій автори ретельно розглядають особливості структури спечених матеріалів з порошку SiC на склокристалічній зв'язці, що є наближеним до предмету досліджень аналогом. В роботі автор досягли зниження температури спікання з 1800 °С до 1150...1550 °С шляхом застосування у якості зв'язки натрій-кальцій алюмосилікатного скла, ефективність використання якої пояснюються змочуванням і переміщенням частинок SiC «в розм'якшеній склофазі під дією теплових коливань» [30]. Як видно з мікрофотографій, наведених на рис. 2.7 зразки матимуть пористу структуру без розвинутої склофазы, що зумовлює слабкий механічний зв'язок компонентів між собою. Підвищення температури сприятиме утворенню на поверхні поділу SiC–зв'язка дрібних кристалів з розміром до 10 мкм, які чинять опір процесу спікання і «розпушують» структуру. Кераміка стає більш щільною, але збільшуються проміжки між фазами, що знижує тріщиностійкість матеріалу в умовах термоциклічних навантажень.

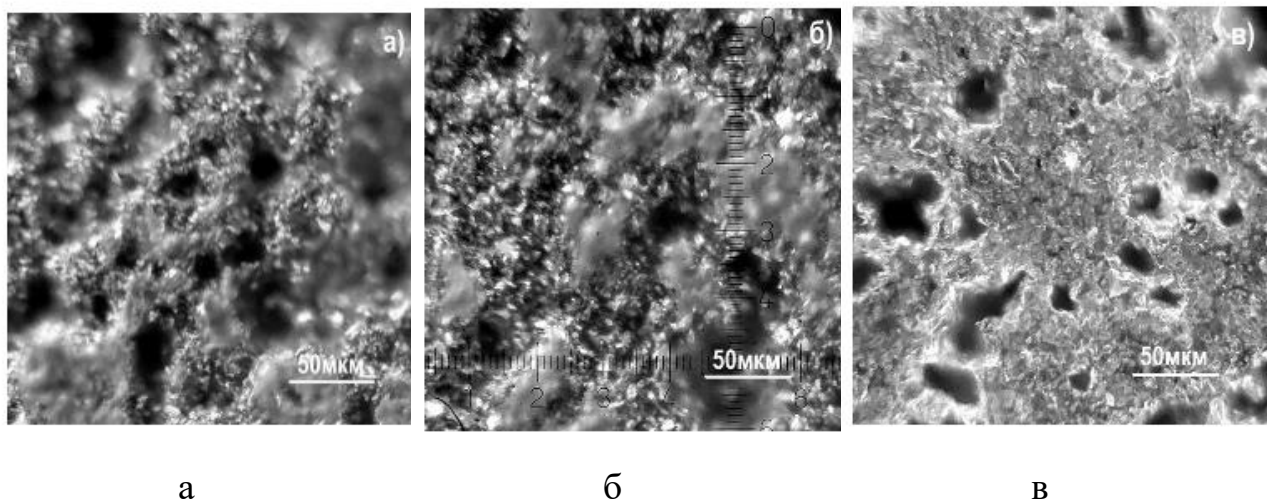


Рис. 2.7. Мікроструктура карбідокремнієвої кераміки 50% SiC: 50 %

SiO₂ після спікання при температурах:

а – $t_{\text{сп}} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $t_{\text{сп}} = 1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$; в – $t_{\text{сп}} = 1550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [30]

2.5. Висновки до розділу 2

1. Для формування заготовки обрано метод заливки термопластичного шлікера у форму з наступним пресуванням у гідропресах під невеликим тиском (4...6 кПа) і спіканням при температурі 1620...1650 К (1347...1377 °С) у середовищі аргону.

2. Для формування карбідокремнієвих заготовок в роботі обрано порошок SiC чорний і пластифікатор поліетилєнглїколь, для утворення кремнеземистої зв'язки – кварцовий фракційний пісок з Вінницького родовища.

3. Запропоновано технологїчну схему виготовлення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці, яка складається з етапів виготовлення шлікеру, формування пресовки на кремнеземистій зв'язці зі спіканням заготовки у атмосфері аргону з кінцевою її обробку глазуруванням поливою для виключення залишкової пористості. Пропонується виконувати подвійний контроль якості після спікання та глазурування з визначенням уявної густини та відкритою пористості методом гідростатичного зважування.

4. Встановлено особливості процесу структуроутворення матеріалу: при температурі близько 490 °С починається процес розм'якшення SiO₂, який при взаємодії із залишками поліетилєнглїколю утворюють рідку фазу, яка рівномірно розподіляється між зернами SiC і стягує їх у щільний каркас. В процесі спікання протікають хімічні реакції з утворенням парів SiO₂ і Si, які за дифузійними механізмами проникають у пористу заготовку.

РОЗДІЛ 3. ВИБІР ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ. ОРГАНІЗАЦІЯ РОБІТ НА ДІЛЬНИЦІ З ВИГОТОВЛЕННЯ КАРБІДОКРЕМНІЄВОЇ КЕРАМІКИ

3.1. Вибір технологічного обладнання

Вибір основного обладнання здійснюється на підставі розробленої у розділі 2 технологічної схеми (рис. 2.4) виготовлення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці, яка визначає технологічну послідовність, технологічні режими і умови, які необхідно забезпечити на виробництві.

Таблиця 3.1

Технологічні характеристики основного обладнання

Обладнання	Характеристики	Призначення
 Змішувач ZC-V2	Двоканальний змішувач ✓ з робочим об'ємом 0,2 л ✓ Ефективне завантаження 0,7 кг ✓ Потужність 0,25 кВт ✓ Частота обертів 24 об/хв ✓ Габарити: 320×225×330 мм	• Змішування порошку SiC з пластифікатором • Змішування порошоків для подальшого пресування
Прес гідравлічний ПГ-60 ВТК-891200011	• Номінальне зусилля – 6 тс • Максимальний хід – 100 мм • Відкритий штамповий простір – 200...100 мм • Потужність електродвигуна – 5,5 кВт • Харчування – 380 В • Маса нетто – 750 кг	Холодне пресування суміші порошоків SiC і SiO₂

Обладнання	Характеристики	Призначення
		
Розпилювальна сушарка Nano Spray Dryer B-90 HP 	Потужність 1500 Вт Потік повітря 80...160 л/хв Максимальна температура на вході 120 °C Потужність нагрівача 1400 Вт Вага 65 кг Габаритні розміри 58×150×55 см	Сушіння та диспергування шлікеру
Азотно-аргонова атмосферна муфельна піч TEFIC з атмосферою 1700 °C 	Максимальна/робоча температура 1700/1600 °C Нагрівальний елемент MoSiO₂ Термопара В тип Може з'єднувати атмосфери: усі інертні гази, Ar, N₂, CO₂, водяна пара Максимальна ступінь вакууму (-0,1) МПа Габарити: 150×100×100 мм	Спикання карбідокремнієвих зразків Випалювання зразків при глазуруванні поливою

Обладнання	Характеристики	Призначення
Аналітичні ваги GR200 (210 г/0,1 мг) 	1-го класу точності Мережевий адаптер Програмне забезпечення WinST Габаритні розміри (В×Ш×Г) – 327×249×330 мм	•Зважування вихідних компонентів •Гідростатичне зважування зразків на етапах контролю

Джерело: складено автором за аналізом роботи [33]

3.2. Модернізація обладнання

В роботі пропонується нова конструкція насосу для закачування шлікеру у форму (рис. 3.1).

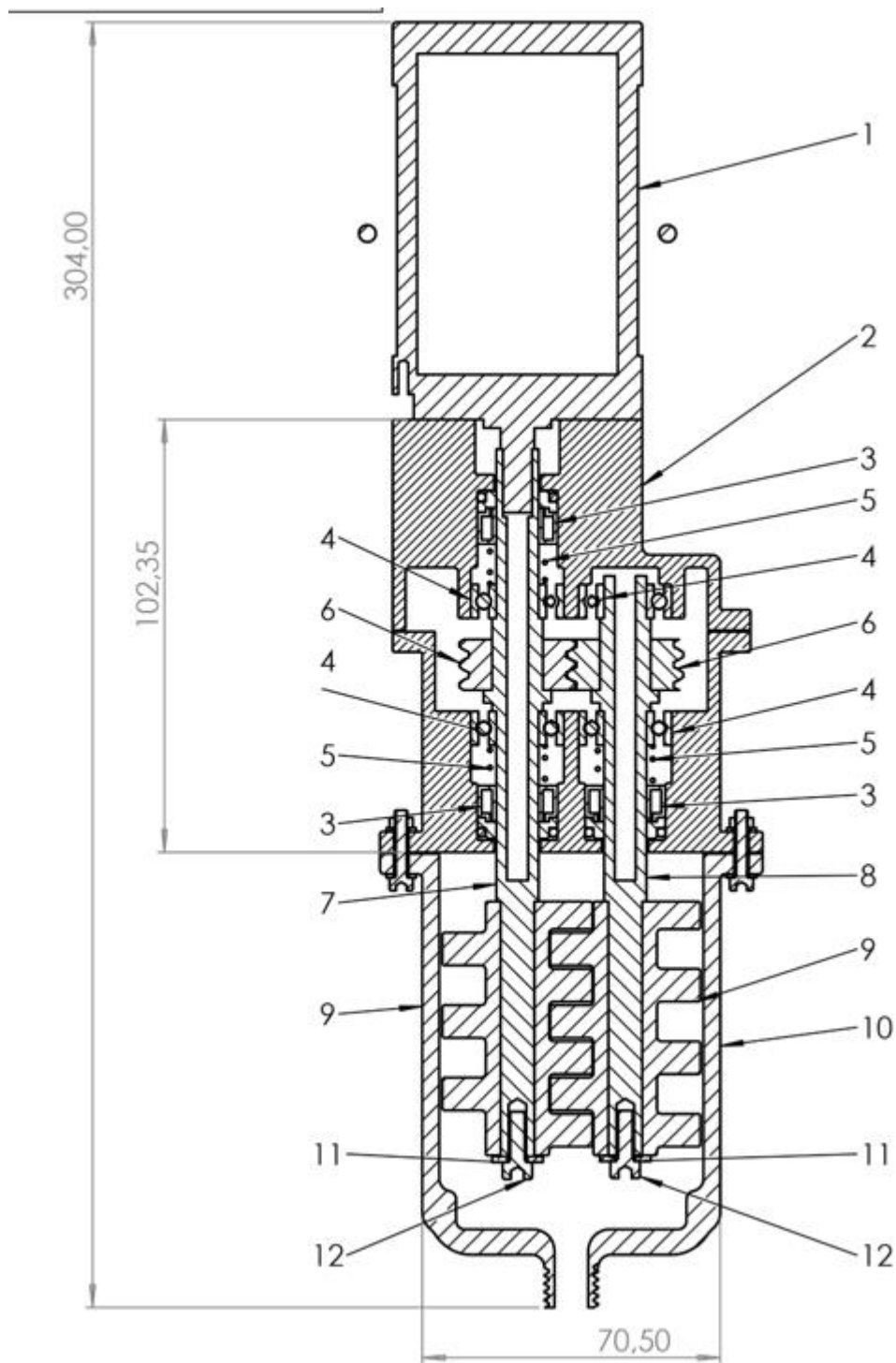


Рис. 3.1. Конструкція насосу [розроблено автором]:

1 – електродвигун; 2 – корпус редуктора; 3 – манжета армована; 4 – підшипник; 5 – пружина; 6 – шестерня; 7, 8 – вал; 9 – шнековий гвинт; 10 – корпус насосу; 11 – втулка ковзання; 12 – пряма шнеків

Конструкцію насосу наведено на складальному кресленнику 132.6131М.04.01.СК. Специфікацію до кресленнику наведено у Додатках.

На рис. 3.2 наведено розроблену автором конструкцію шнеку.

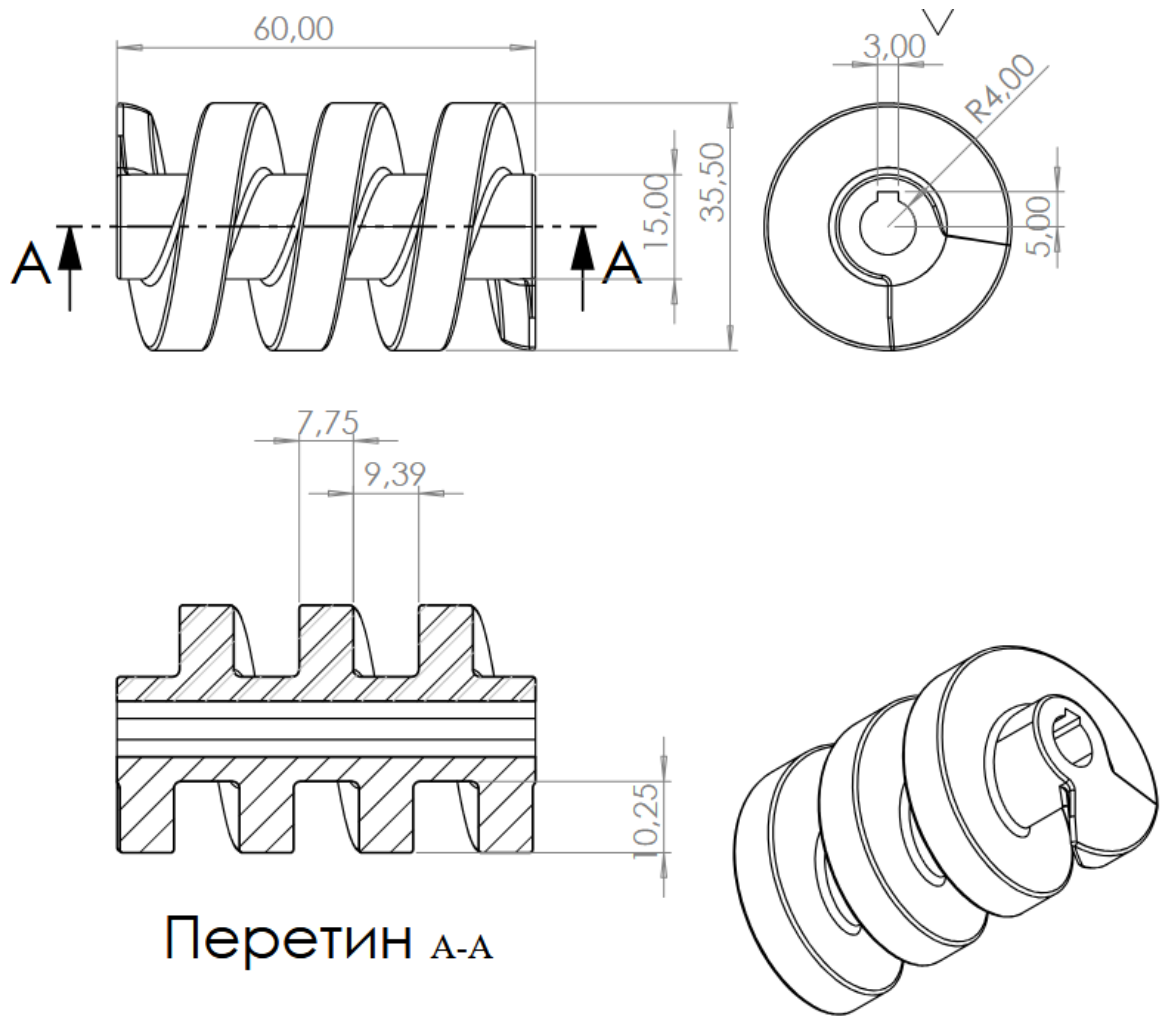


Рис. 3.2 Конструкція шнеку [розроблено автором]

3.3. Організація виробництва на ділянці для виготовлення карбідокремнієвих виробів

На ділянці (рис. 3.3) в одну зміну працюють 4 працівника:

- інженер-технолог;
- оператор;
- підсобний робочий;
- контролер.

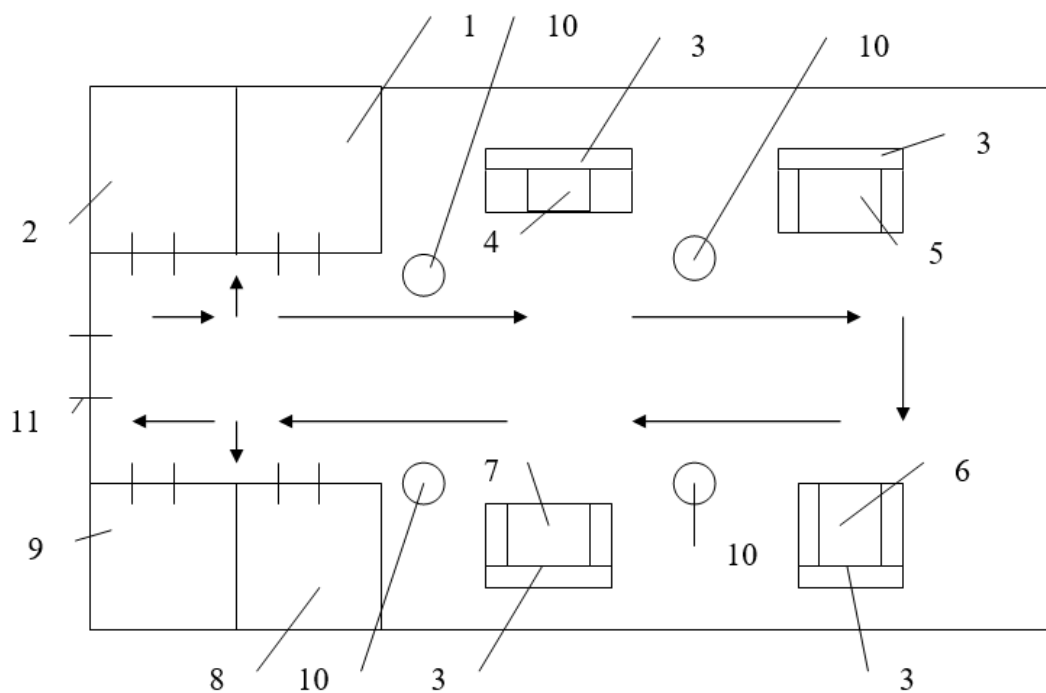


Рис. 3.3. План ділянки для виготовлення карбідокремнієвих виробів
 1 – матеріальна схованка для вихідної сировини; 2 – матеріальна схованка для устаткування; 3 – стіл для обладнання; 4 – змішувач; 5 – розпилювальна сушарка; 6 – гідропрес; 7 – піч для спікання; 8 – склад готової продукції; 9 – відділ контролю якості; 10 – робоче місце; 11 – двері

3.4. Висновки за розділом 3.

1. Надано характеристики, можливості і призначення основного обладнання, яке планується застосовувати на виробничій ділянці з виготовлення малогабаритних карбідокремнієвих виробів простої конфігурації.

2. Конструкторська розробка полягатиме у розробці конструкції насоса для закачування шлікеру у форму і удосконалення шнеку.

3. Розглянуто структуру та організацію робіт на виробничій ділянці з виготовлення карбідокремнієвих малогабаритних виробів циліндричної форми. Розроблено план ділянки.

РОЗДІЛ 4. ФІНАНСОВИЙ ПЛАН ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБКИ

Перспективи впровадження результатів розробки. Впровадження результатів розробки пов'язано з використанням деталей, виготовлених з карбідокремнієвої кераміки у сучасному авіабудуванні. Авіаційні паливні насоси високого тиску є критичними компонентами сучасних авіаційних двигунів. Вони відповідають за забезпечення стабільної та надійної подачі палива під високим тиском, що є необхідним для ефективної роботи двигуна. Надійність та довговічність цих насосів безпосередньо впливають на безпеку польотів, експлуатаційні витрати та загальну ефективність флоту. Традиційно компоненти паливних насосів виготовляються з нержавіючої сталі та інших металевих сплавів, які мають достатні механічні властивості та стійкість до корозії. Однак використання карбідокремнієвих деталей може значно покращити їх характеристики через підвищення твердості, термостійкості та зносостійкості.

Економічний аналіз доцільності заміни традиційних матеріалів на карбід кремнію в авіаційних паливних насосах високого тиску.

Розглянуто:

- технологічну собівартість;
- експлуатаційні витрати;
- економію палива;
- вплив на обслуговування та інші фактори, які можуть вплинути на загальну ефективність та вартість володіння.

1. Вихідні дані для розрахунків:

- Кількість літаків у флоті: 50 одиниць
- Кількість паливних насосів на літак: 2 насоси
- Кількість критичних компонентів у насосі: 5 одиниць
- Термін служби компонентів з нержавіючої сталі: 5 000 годин
- Термін служби компонентів з карбіду кремнію: 15 000 годин

- Вартість виготовлення одного компонента з нержавіючої сталі:
1 000 USD

- Вартість виготовлення одного компонента з карбіду кремнію:
1 800 USD

- Вартість простою літака при заміні компонентів: 25 000 USD за літак

- Середня витрата палива на літак: 2 500 літрів на 10 годин польоту

- Середній наліт годин на один літак на рік: 2 000 годин

- Вартість палива: 0,6 USD за літр

- Витрати на обслуговування (без врахування заміни компонентів):

- Нержавіюча сталь: 100 000 USD на рік для всього флоту

- Карбід кремнію: 80 000 USD на рік для всього флоту

- Курс валют: 1 USD = 41 UAH

2. Розрахунок загальних витрат за 5 років

2.1. Компоненти з нержавіючої сталі

2.1.1. Розрахунок сумарного наліту годин

- Сумарний наліт годин на один літак за 5 років:

- $2\,000 \text{ годин/рік} \times 5 \text{ років} = 10\,000 \text{ годин}$

2.1.2. Кількість замін компонентів

- Кількість замін компонентів за 5 років:

- $10\,000 \text{ годин} \div 5\,000 \text{ годин} = 2 \text{ заміни}$

2.1.3. Вартість виготовлення компонентів

- Загальна кількість компонентів:

- $50 \text{ літаків} \times 2 \text{ насоси} \times 5 \text{ компонентів} \times 2 \text{ заміни} = 1\,000$

компонентів

- Загальна вартість виготовлення компонентів:

- $1\,000 \text{ компонентів} \times 1\,000 \text{ USD} = 1\,000\,000 \text{ USD}$

2.1.4. Вартість простою при заміні компонентів

- Загальна кількість простоїв:

- $50 \text{ літаків} \times 2 \text{ заміни} = 100 \text{ простоїв}$

- Загальна вартість простою:
- $100 \text{ простоїв} \times 25\,000 \text{ USD} = 2\,500\,000 \text{ USD}$

2.1.5. Витрати на паливо

- Сумарна витрата палива на один літак за 5 років:
- $(2\,500 \text{ літрів} \div 10 \text{ годин}) \times 10\,000 \text{ годин} = 2\,500\,000 \text{ літрів}$
- Вартість палива на один літак за 5 років:
- $2\,500\,000 \text{ літрів} \times 0,6 \text{ USD} = 1\,500\,000 \text{ USD}$
- Загальна вартість палива для всього флоту:
- $1\,500\,000 \text{ USD} \times 50 \text{ літаків} = 75\,000\,000 \text{ USD}$

2.1.6. Витрати на обслуговування

- Загальні витрати на обслуговування за 5 років:
- $100\,000 \text{ USD/рік} \times 5 \text{ років} = 500\,000 \text{ USD}$

2.1.7. Загальні витрати

- Разом:
- Виготовлення компонентів: 1 000 000 USD
- Простої при заміні: 2 500 000 USD
- Витрати на паливо: 75 000 000 USD
- Витрати на обслуговування: 500 000 USD
- Загальні витрати за 5 років: 79 000 000 USD

2.2. Компоненти з карбїду кремнію

2.2.1. Кількість замін компонентів

- Кількість замін компонентів за 5 років:
- $10\,000 \text{ годин} \div 15\,000 \text{ годин} = 0,67 \text{ заміни}$
- Оскільки компоненти служать довше 5 років, заміна не потрібна

протягом цього періоду.

- Загальна кількість компонентів:
- $50 \text{ літаків} \times 2 \text{ насоси} \times 5 \text{ компонентів} = 500 \text{ компонентів}$

2.2.2. Вартість виготовлення компонентів

- Загальна вартість виготовлення компонентів:
- $500 \text{ компонентів} \times 1\,800 \text{ USD} = 900\,000 \text{ USD}$

2.2.3. Вартість простою при заміні компонентів

- Оскільки заміна не потрібна протягом 5 років, простої відсутні.
- Загальна вартість простою: 0 USD

2.2.4. Економія палива

- Покращена ефективність насосів: зменшення витрати палива на 3%.

- Знижена витрата палива на один літак за 5 років:

- $2\,500\,000 \text{ літрів} \times 0,97 = 2\,425\,000 \text{ літрів}$

- Вартість палива на один літак за 5 років:

- $2\,425\,000 \text{ літрів} \times 0,6 \text{ USD} = 1\,455\,000 \text{ USD}$

- Загальна вартість палива для всього флоту:

- $1\,455\,000 \text{ USD} \times 50 \text{ літаків} = 72\,750\,000 \text{ USD}$

2.2.5. Витрати на обслуговування

- Загальні витрати на обслуговування за 5 років:

- $80\,000 \text{ USD/рік} \times 5 \text{ років} = 400\,000 \text{ USD}$

2.2.6. Загальні витрати

- Разом:

- Виготовлення компонентів: 900 000 USD

- Простої при заміні: 0 USD

- Витрати на паливо: 72 750 000 USD

- Витрати на обслуговування: 400 000 USD

- Загальні витрати за 5 років: 74 050 000 USD

3. Порівняльний аналіз витрат

3.1. Загальна економія при використанні карбіду кремнію

- Економія на виготовленні компонентів:

- $1\,000\,000 \text{ USD (нержавіюча сталь)} - 900\,000 \text{ USD (SiC)} = 100\,000 \text{ USD економії}$

- Економія на простої при заміні:

- $2\,500\,000 \text{ USD (нержавіюча сталь)} - 0 \text{ USD (SiC)} = 2\,500\,000 \text{ USD економії}$

- Економія на паливі:
 - $75\,000\,000\text{ USD (нержавіюча сталь)} - 72\,750\,000\text{ USD (SiC)} = 2\,250\,000\text{ USD}$ економії

- Економія на обслуговуванні:
 - $500\,000\text{ USD (нержавіюча сталь)} - 400\,000\text{ USD (SiC)} = 100\,000\text{ USD}$ економії

3.2. Загальна економія за 5 років

- Сумарна економія:
 - $100\,000\text{ USD (компоненти)} + 2\,500\,000\text{ USD (простої)} + 2\,250\,000\text{ USD (паливо)} + 100\,000\text{ USD (обслуговування)} = 4\,950\,000\text{ USD}$

3.3. Загальні витрати

- Нержавіюча сталь: $79\,000\,000\text{ USD}$
- Карбід кремнію: $74\,050\,000\text{ USD}$
- Різниця: $79\,000\,000\text{ USD} - 74\,050\,000\text{ USD} = 4\,950\,000\text{ USD}$

4. Детальний аналіз окупності інвестицій

4.1. Додаткові витрати на компоненти. Хоча вартість виготовлення одного компонента з SiC вища, загальна кількість компонентів менша через довший термін служби.

4.2. Економія на простої при заміні. Відсутність простоїв при заміні компонентів з SiC призводить до значної економії.

4.3. Економія на паливі. Покращена ефективність насосів з компонентами з SiC знижує витрати на паливо на 3%.

4.4. Економія на обслуговуванні. Компоненти з SiC менш схильні до зносу, що знижує витрати на регулярне обслуговування на $20\,000\text{ USD}$ на рік.

4.5. Чистий прибуток

- Загальна економія за 5 років: $4\,950\,000\text{ USD}$: ця сума представляє чистий прибуток від інвестицій у компоненти з карбіду кремнію.

5. Додаткові фактори, що впливають на економічну доцільність

5.1. Підвищення надійності та безпеки. Компоненти з SiC мають вищу стійкість до зношування та корозії, що знижує ризик відмов обладнання.

5.2. Вплив на екологію. Зниження витрати палива зменшує викиди CO₂, що позитивно впливає на екологічні показники авіакомпанії.

5.3. Репутаційні переваги. Впровадження передових технологій покращує імідж компанії як інноваційної та екологічно відповідальної.

5.4. Можливість отримання податкових пільг. За використання енергоефективних та екологічно чистих технологій можуть надаватися податкові пільги або державні гранти.

6. Аналіз ризиків

6.1. Технологічні ризики. Необхідність адаптації виробничих процесів під новий матеріал. Можливість виникнення непередбачуваних технічних проблем під час експлуатації.

6.2. Економічні ризики. Коливання цін на матеріали та паливо можуть вплинути на розраховану економію.

6.3. Ринкові ризики. Конкуренти можуть швидко впровадити аналогічні технології, знижуючи конкурентну перевагу.

Узагальнення отриманих результатів наведено у табличній формі (табл.4.1).

Таблиця 4.1

Техніко-економічне обґрунтування впровадження карбідокремнієвих деталей у сучасне авіабудування

Витрати	Карбідокремнієві деталі	Нержавіюча сталь	Ефект
Загальні витрати	74050 000	79000 000	4950 000
Витрати на обслуговування	400 000	500 000	100 000
Матеріальні витрати (на компоненти)	900 000	1000 000	100 000
Економія на простой і заміні	0	2500 000	250 000

Впровадження компонентів з карбіду кремнію в авіаційні паливні насоси високого тиску є економічно доцільним та приносить значну вигоду протягом 5-річного періоду. Основні переваги включають:

- Загальна економія: 4 950 000 USD за 5 років.
- Підвищення ефективності: Зниження витрати палива на 3%.
- Зниження витрат на обслуговування: Економія 100 000 USD за 5 років.
- Відсутність простоїв при заміні компонентів, що підвищує ефективність використання флоту.
- Покращення екологічних показників та можливість отримання додаткових переваг від держави.

. Висновки до розділу

1. Складено фінансовий план і визначено чистий прибуток від заміни деталей паливної системи, виготовлених з нержавіючої сталі на деталі з карбідокремнієвої кераміки.
2. Проаналізовано вплив на екологію, ремонтні роботи, визначено ризики впровадження проекту.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ І ДОВКІЛЛЯ НА ВИРОБНИЧІЙ ДІЛЬНИЦІ З ВИГОТОВЛЕННЯ КАРБІДОКРЕМНІЄВИХ МАТЕРІАЛІВ

5.1. Заходи щодо охорони праці на виробничій ділянці

5.1.1. Нормативні документи

Охорона праці на підприємстві організована як система законодавчих актів, соціально – економічних, організаційних, технічних і лікувально – профілактичних заходів і засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. Людина в процесі праці є головним об'єктом охорони праці [35].

Законодавчо правовими актами по охороні праці й охороні навколишнього середовища є:

- Конституція України (стаття 43)
- Кодекс законів про працю України (прийнято Верховною Радою України 14 жовтня 1992 року, був переглянутий і затверджений Президентом України у новій редакції 21 листопада 2002 року)

- Кримінальний кодекс України

Система стандартів безпеки праці (ССБП) – поділяються на міждержавні (ISO), державні (ДСТУ), міжгалузеві (ГСТУ), галузеві (ОСТ), стандарти підприємства (СТПССБП).

Стандарти використовуються на підприємствах, в установлених організаціях згідно з комплексним заходами щодо досягнення встановлених нормативів безпеки, гігієни праці та виробничої санітарії, розроблених на основі обстеження устаткування, технологічних процесів, фактичного санітарно-технічного та протипожежного стану робочих місць.

5.1.2. Аналіз комплексних небезпек

На виробничій ділянці (рис. 3.3) передбачені наступні ділянки:

- підготовки порошку SiC;

- підготовки піску;
- підготовки та заливки шлікера;
- підготовки прес-порошку;
- пресування порошкової суміші
- термічних операцій (спікання порошкових заготовок і випалу глазурованої поливи);
- підготовки товарних карбідокремнієвих виробів.

На ділянці підготовки піску повинен бути підведений трубопровід холодної води.

На ділянці термічних операцій необхідно передбачити встановлення систем охолодження.

У схованці сировинних матеріалів необхідно розташувати приямки для зберігання сировинних матеріалів та визначити місця зберігання піску та порошку SiC.

Стічні води формуються на ділянці відмивання піску і виготовлення шлікера. Відпрацьована вода зливається у заводську систему каналізації. На ділянці з приготування і заливці шлікера необхідно забезпечити очищення стічних вод.

На всій виробничій ділянці необхідно забезпечити загальну і локальну вентиляційні системи і встановити пожежні гідранти.

Для роботи сушильного обладнання повинен бути підведений трубопровід природного газу.

Необхідно встановити:

- датчики контролю концентрації інертних газів із системою звукової і світлової сигналізації на випадок перевищення гранично-допустимих значень концентрації;
- заземлення гідропресу, сушарки, печі;
- захисних огорож струмопідводів електрообладнання;
- датчиків температури у бункерах шихти і печах, сушильних шафах;
- захисних огорож площадок обслуговування печі з атмосферою аргону.

5.2. Заходи щодо охорони навколишнього середовища при виробництві керамічних матеріалів

Виробництво керамічних матеріалів являє собою комплекс складних технологічних процесів, пов'язаних з тепловими витратами, шкідливими викидами, виділенням летких і полідисперсних речовин. Поводження із сипучими матеріалами вимагає їх сортування, розвантаження, пакування, змішування, формування тощо.

Дослідження, проведені в роботі [36] показали, що при виробництві кераміки пилевиділення перевищують гранично-допустимі значення (ГПЗ). У сумішепідготувальному цеху вони становлять 12-15 разів, на ділянці навантаження/розвантаження – у 2-3 рази. У цехах з випалювання керамічних виробів виділяється оксид вуглецю (1,5-2 ГПЗ), сірчаний ангідрид (3-3 ГПЗ). Концентрації фенолу, аміаку, формальдегіду перевищують санітарні норми у 1,5-2 рази.

Серед виробничих отрут найбільш поширеними залишаються метали, зокрема у рідкому стані, у вигляді аерозолей. Важкі метали після потрапляння до організму нерівномірно розподіляються між клітинами і тканинами.

Внаслідок високотемпературних процесів, зокрема термічної обробки, спікання, випалювання органічних сполук та продуктів неповного згоряння утворюється ароматичний вуглеводень бензапірен.

Найбільш ефективним шляхом боротьби є розробка і застосування таких технологій і вихідних матеріалів, що виключають, чи зменшують виділення шкідливих речовин, або дозволяють їх цілком утилізувати. Повинна бути приточно-витяжна вентиляція, яку рекомендується включати не менш, ніж за 30 minut до початку роботи, створення приладів та пристроїв для контролю забруднення атмосферного повітря та переведення нагрівальних печей та пристроїв на паливо з меншою кількістю шкідливих речовин тощо. Рішення поставлених задач у сполученні з реалізацією і

впровадження установок утилізації тепла, витяжного повітря дозволить підвищити ефективність і економічність систем вентиляції й опалення цехів.

Вимоги до санітарної охорони навколишнього середовища [36]:

1. При контролі за дотриманням гранично допустимих викидів (ГДВ) основними повинні бути прямі методи, які дозволяють вимірювати концентрації шкідливих речовин і обсягів газоповітряної суміші після газоочисних установок або в місцях безпосереднього виділення речовин в атмосферу.

2. У проектах підприємств (цехів, ділень) з отримання та застосування епоксидних смол і матеріалів на їх основі повинні бути представлені відомості за якісним і кількісним складом виробничих викидів і стоків, обсягом можливих відходів з урахуванням перспектив розвитку виробничого об'єкта, за характеристикою можливих наслідків впливу забруднень на навколишнє середовище.

3. Вміст шкідливих речовин в атмосферному повітрі не повинен перевищувати значень ГДК.

5.3. Висновки до розділу

1. Виконано аналіз комплексних небезпек на виробничій ділянці з виготовлення карбідокремнієвих матеріалів; розглянуто профілактичні заходи.

2. Проаналізовано шкідливі заходи виробництва керамічних композиційних матеріалів.

ВИСНОВКИ

1. Виконано ґрунтовний аналіз технологій отримання рекристалізованих, гарячепресованих, наноструктурованих карбідокремнієвих матеріалів, матеріалів на зв'язках, біо-SiC матеріалів; визначено переваги і недоліки технологій, особливості структуроутворення, наведено приклади виробів.

2. Розроблено технологічну схему виготовлення карбідокремнієвого матеріалу на кремнеземистій зв'язці і досліджено особливості формування його структури. Відмінною особливістю технології є використання в якості пластифікатора поліетиленгліколю і глазурування поливою спеченої заготовки для виключення залишкової пористості.

3. Розроблено організаційні заходи на виробничій дільниці з виготовлення карбідокремнієвих малогабаритних виробів циліндричної форми; обрано основне обладнання. Конструкторська розробка полягатиме у розробці конструкції насосу для закачування шлікеру у форму і удосконалення шнеку.

4. Запропоновано фінансовий план впровадження карбідокремнієвої деталі у сучасне двигунобудування.

5. Розглянуто заходи щодо охорони праці та довкілля на виробничій дільниці з виготовлення карбідокремнієвих матеріалів з порошку SiC.

Результати досліджень були представлені на III Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій» (24-26 вересня 2024 р.) у Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків та опубліковані у вигляді тез:

Казимиренко Ю. О., Мельник М. О. Розвиток технологій та застосування склокомпозитів і керамічних матеріалів у суднобудуванні та енергетичному машинобудуванні. Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій в умовах кризових ситуацій : Матеріали III Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції. 2024. Харків: Харківський національний

університет міського господарства імені О.М. Бекетова (24-26 вересні 2024 р.). С. 4-5

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. Ковбашин В. І., Бочар І. Й. Технологічні особливості силіцидного покриття на карбіді кремнію та силіциді молібдену. *Вісник Теннопільського національного технічного університету*. Тернопіль. 2014. № 3 (75). С. 127-131.
2. Кириленко К. В. Резистативні композиційні матеріали з багатокомпонентним перколяційним кластером для нагрівачів з інтенсивною тепловіддачею: дис. канд. техн. наук. 05.02.01. Київ, 2017 НАНУ ІПМ ім. І. М. Францевича. 252 с.
3. Тимошенко Я. Г., Гадзира М. П., Гнесин Г. Г., Галямін В. Б. Особливості структуроутворення вторинного карбіду кремнію, синтезованого в умовах взаємодії нанорозмірного нестехіометричного карбіду кремнію з оксидом заліза. *Dopov Nac. acad. nauk. Ukr.* 2017. № 2. С. 42-48.
4. Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Захаров А. В., Майстат М. С., Волощук В. В., Сарай В. В. Технологія виготовлення радіопоглинаючої кераміки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2021. № 2 (1362) С. 9-12.
5. Чурсанова М. В. Дослідження структури біоморфного карбіду кремнію за допомогою спектроскопії комбінаційного розсіювання світла. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики*. 2010. № 4. С. 151-155.
6. Саввова О. В. Нові керамічні та скломатеріали спеціального призначення : конспект лекцій для студентів 1 курсу денної форми навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія . Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 106 с.
7. Композиційні матеріали на основі карбіду кремнію : монографія / за ред. О. П. Уманського : Ін-тут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича : Київ : Наукова думка, 2022. 128 с.

8. Полоз О. Ю., Ебич Ю. Р. Взаємодія компонентів високонаповнених композицій холодного твердіння з карбідом силіцію при формуванні їх дисперсної структури. *Питання хімії та хімічної технології*. 2017. Т. 3 (112). С. 53-57.

9. Андрєєв О. В., Грабовський Ю. Є., Заболотний М. А., Асланова Л. І., Білявіна Н. М., Майстренко А. Л., Кулич В. Г. Дифрактометричні дослідження виробів з реакційно зв'язаного карбіду кремнію. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2021. Т.19. № 1. С. 121-123.

10. Мініцький А. В. Створення фізико-технологічних основ виготовлення високощільних матеріалів : дис. д-ра техн. наук 05.16.06. Київ 2020. Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського. 369 с.

11. Олейник Г. С. Вплив структурних і технологічних факторів на розвиток збиральної рекристалізації при спіканні керамічних матеріалів. Науково-технічний журнал «Вісник Українського матеріалознавчого товариства». ІПМ ім. І. М. Францевича. 2013. Вип. 6. С. 9-30.

12. Корнілович В. Ю., Пилипенко І. В., Ковальчук І. А. Фізико-хімія сучасних неорганічних матеріалів [Електронний ресурс] : підручник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 134 с.

13. Олексюк І. Д., Парасюк О. В., Іващенко І. А. Хімія твердого тіла : навч. посібник. Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 316 с.

14. Біла А. О., Сорока П. І., Тertiшний О. А. Фізико-хімічні основи отримання карбіду кремнію з рисового лущиння. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2010. № 10. С. 78-85.

15. Уманський О. П., Стороженко М. С., Панасюк А. Д., Коновал В. П. Дослідження контактної взаємодії TiB_2-SiC зі сплавами $Ni-Cr$. *Адгезія розплавів і пайка металів*. 2008. Вип. 41. С. 36-43.

16. Суббота І. С., Спасьонова Л. М., Тобілко В. Ю. Хімічна технологія кераміки : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 178 с.

17. Суббота І. С., Спасьонова Л. М. Теоретичні основи кераміки і скла : навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 206 с.
18. Туркевич В. З., Стратійчук Д. А., Туркевич Д. В. Термодинамічний розрахунок стану системи Si–C при тисках до 8 ГПа. *Надтверді матеріали*. 2016. № 2. С. 95-98.
19. Івженко В. В., Кайдаш О. М., Майстренко А. Л., Кулич В. Г., Ткач В. М., Косенчук Т. О. Дослідження впливу силіціювання на структуру і властивості гарячепресованого матеріалу карбід кремнію–вуглець. *Інструментальне матеріалознавство*. 2020. Вип. 23. С. 324-335.
20. Клим Г. І. Механізми наноструктурування внутрішнього вільного простору в скло-керамічних матеріалах електронної техніки : дис. д-ра техн. наук 01.04.07 НУ «Львівська політехніка» Львів, 2015. 384 с.
21. Говорун Т. П., Будник А. Ф., Юскаєв В. Б. Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів: навчальний посібник. Суми: СумДУ, 2014. 255 с.
22. Казимиренко Ю. О., Карпеченко А. А. Методичні вказівки до виконання курсової і лабораторних робіт з дисципліни «Дисперсні матеріали та композити». Миколаїв: НУК, 2019. 100 с.
23. Доманцевич Н. І., Шестопад Г. С., Яцишин Б. М. Зміна механічних властивостей модифікованих поліетиленових плівкових матеріалів за низьких температур та термоциклювання. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2022. № 31 С. 86-91.
24. Корнілович Б. Ю., Андрієвська О. Р., Племенніков М. М., Спасьонова Л. М. Фізична хімія кремнезему і дисперсних силікатів : навч. посібник. К. : Освіта України, 2013. 178 с.
25. Племенніков М. М., Тобілко В. Ю. Силікатне матеріалознавство : навч. посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 103 с.
26. Цибенко О. С., Крищук М. Г. Системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу у машинобудуванні : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2018. 100 с.

27. Магопець О. А., Шалімова Н. С., Черновол О. М. Фінансовий аналіз : навч. посібник : Центральноукраїнський нац. Техн. ун-тет: Кропівницький : ЦНТУ, 2022. 230 с.

28. Мельник Л. І. Хімія і фізика полімерів : навч. посібник. Київ. НТУУ «КПІ». 2016. 161 с.

29. Мазілін Б. О. Структура та механічні властивості комбінованих нанокompозитних покриттів на основі керамічних матеріалів : дис PhD 105 «Прикладна фізика і наноматеріали». Харківський нац. Ун-тет ім. В.Н. Каразіна. Харків. 2021. 202 с.

30. Положай С. Г., Зайчук О. В., Сухий К. М., Положай А. Г. Щільноспечена карбідокремнієва кераміка на склокристалічній зв'язці кордієритового складу. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023. № 5. Рр. 98-105.

31. Сизоненко О. М., Івлієв А. І., Баглюк Г. А. Перспективні процеси виготовлення порошкових матеріалів: підручник : Миколаїв. НУК. 2014. – 374 с.

32. Ковбашин В., Бочар І. Спосіб обробки реакційно-спечених виробів на основі карбиду кремнію та дисиліциду молібдену. *Матеріали наук. коні. Тернопільського національного технічного ун-ту імені Івана Пулюя*, Тернопіль 2019. С. 108-109.

33. Якіменко О. В. Проектування підприємств з виробництва будівельної кераміки : консп. Лекцій. Харків: ННУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 122 с.

34. Рижова О. П. Наукові основи технології кольорових екологічно безпечних емалей : дис. д-ра техн. наук : 05.17.11. НТУ «Харківський політехнічний інститут» : Харків : 2020. 412 с.

35. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. Львів, Афіша, 2015. 319 с.

36. Клименко Л. П., Залеський І. І. Технолекологія : підручник. Херсон : ЛОДІ ПЛЮС, 2017. 348 с.