

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені  
Є. О. Патона**

**Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

Юрій БОГОМОЛ

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Дипломна робота**

**«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»  
спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

**на тему: «Структура та властивості спрямовано закристалізованого  
сплаву системи SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ФН-91

Палагеча Дмитро Леонідович \_\_\_\_\_

Керівник:

Завідувач кафедрою, к. т. н., ст. дослідник

Солодкий Євген Васильович \_\_\_\_\_

Консультант з економічного розділу:

Доцент, к. е. н., доцент

Нараєвський Сергій Вікторович \_\_\_\_\_

Консультант з розділу охорони праці:

Завідувач кафедри, д. т. н., професор

Левченко Олег Григорович \_\_\_\_\_

Нормоконтроль: 19.06.2023

Доцент, к. т. н., доцент

Бірюкович Ліна Олегівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

Доцент, к. т. н., доцент,

Іващенко Євген Вадимович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент Палагеча Д. Л. \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Навчально-науковий інститут**  
**матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона**  
**Кафедра високотемпературних матеріалів та**  
**порошкової металургії**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ **Юрій БОГОМОЛ**

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Палагечи Дмитру Леонідовичу**

1. Тема роботи «Структура та властивості спрямовано закристалізованого сплаву системи  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ », керівник роботи Богомол Юрій Іванович, д. т. н., професор, затверджені наказом по університету від «01» червня 2023р. № 2122-с

2. Термін подання студентом роботи 12.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Вхідні дані для дослідження включають аналіз поточного стану виробництва високотемпературних матеріалів, що містять карбід кремнію та спрямовано-армовані включення диборидів перехідних металів. Вибраний технологічний процес має забезпечувати отримання готового матеріалу з необхідними властивостями. Впровадження нових методів дослідження дозволить визначити перспективні шляхи отримання матеріалів з покращеними механічними властивостями для застосування у

сфері аерокосмічної техніки та інших сферах де необхідні високі механічні властивості за високих температур.

Організаційно-економічні засади повинні забезпечувати ефективність виконання науково-дослідної роботи, а також її користь для подальшого розвитку даної сфери.

Охорона праці та безпека в надзвичайній ситуації повинні створювати безпечні умови для працівників, методом передбачення та підготовки до можливих загроз.

#### 4. Зміст роботи:

- проаналізувати сучасний стан виробництва високотемпературних матеріалів на основі карбіду кремнію з диборидами перехідних металів;
- отримати матеріал методом безтигельної зонної плавки;
- дослідити структуру та механічні властивості матеріалу  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ ;
- дослідити, яка кількість робітників необхідна для виконання даної роботи, а також визначити їх заробітну плату;
- визначати можливі шкідливі виробничі фактори;
- розробити план дій для запобігання впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: технологічна схема одержання сплаву системи  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ , мікроструктура матеріалу системи  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ , хімічний склад системи  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ , дифрактограма системи  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ , діаграми мікромеханічних властивостей системи  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ .

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічний	старший викладач к.е.н. Нараєвський С.В.	08.05.2023	
Охорона праці	професор, д.т.н. Левченко О. Г.	25.05.2023	

7. Дата видачі завдання 15.04.2023

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготовка експериментального матеріалу	29.04	
2.	Підготовка ілюстративного матеріалу	02.05	
3.	Написання тексту роботи	19.05	
4.	Підготовка презентації	05.06	
5.	Оформлення роботи	12.06	
6.	Захист дипломної роботи	20.06	

Студент

Дмитро ПАЛАГЕЧА

Керівник

Євген СОЛОДКИЙ

## РЕФЕРАТ

Робота вміщує 75 стор., 16 рис., 22 табл., 42 літ. дж.

БЕЗТИГЕЛЬНА ЗОННА ПЛАВКА, ДИБОРИДИ ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ, КАРБІД КРЕМНІЮ, СПРЯМОВАНО-АРМОВАНІ МАТЕРІАЛИ, ВИСОКОЕНТРОПІЙНІ ДИБОРИДИ, ВИСОКОЕНТРОПІЙНІ СПЛАВИ.

У даній роботі викладено огляд сучасного стану теорії і технології отримання високоентропійного матеріалу на основі карбіду кремнію (SiC), який був спрямовано армований диборидами перехідних металів.

Об'єкт дослідження: спрямовано закристалізований сплав системи SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)<sub>2</sub>B<sub>2</sub>.

Мета дослідження: дослідження структури та властивостей композиційного матеріалу на основі карбіду кремнію спрямовано армованого високоентропійним сплавом на основі диборидів титану, цирконію, гафнію, ніобію та танталу, що був виготовлений методом безтигельної зонної плавки.

Методи дослідження:

1. Металографічний аналіз;
2. Растрова електронна мікроскопія;
3. Рентгено-фазовий аналіз;
4. Дослідження мікромеханічних властивостей.

Методом безтигельної зонної плавки було виготовлено сплав системи SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)<sub>2</sub>B<sub>2</sub>. Аналіз мікроструктури, фазового та хімічного складу показав наявність двох фаз: карбіду кремнію (SiC) та високоентропійного дибориду (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)<sub>2</sub>B<sub>2</sub>.

Дослідження мікромеханічних властивостей показали, що інтегральна мікротвердість складає 24 ГПа у поперечному та 21,7 ГПа у поздовжньому напрямках при навантаженні в 9,8 Н. Тріщиностійкість складає 6,14 МПа для поперечного та 5,5 МПа для поздовжнього перетину. Отримані дані задовільно співпадають з теоретичними та розрахованими по правилу сумішей.

## ABSTRACT

The work contains: 75 p., 16 fig., 22 tabl., 42 refer.

DIBORIDES OF TRANSITION METALS, DIRECTIONALLY REINFORCED COMPOSITE MATERIALS, HIGH ENTROPY DIBORIDES, HIGH ENTROPY MATERIALS, SILICON CARBIDE.

This work presents an overview of the current state of theory and technologies of obtaining high entropy materials based on Silicon carbide (SiC), which was directionally reinforced with diborides of transition metals.

Object of research: high entropy material  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ .

The aim of the work:

1. Metallographic analysis;
2. Scanning electron microscopy;
3. X-ray phase analysis;
4. Research of micromechanical properties.

The sample of  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  was created by the crucibleless zone melting. The analyses of microstructure, chemical composition and X-ray phase data showed existence of two phases: Silicon carbide (SiC) and high entropy diboride  $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ .

The study of the micromechanical properties showed that integral microhardness is 24 GPa in transverse cut and 21,7 GPa in longitudinal cut under the load 9,8 N. The crack resistance is 6,14 MPa in transverse cut and 5,5 MPa in longitudinal cut. The data is theoretically and mathematically proved.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	10
1.1 Карбід кремнію (SiC).....	10
1.2 Властивості TiB <sub>2</sub> .....	12
1.3 Властивості ZrB <sub>2</sub> .....	13
1.4 Властивості HfB <sub>2</sub> .....	14
1.5 Властивості NbB <sub>2</sub> .....	16
1.6 Властивості TaB <sub>2</sub> .....	16
1.7 Високоентропійні сплави .....	17
1.8 Термодинаміка фазової стійкості .....	18
1.9 Високоентропійні бориди .....	20
1.9.1 Бориди тугоплавких металів.....	20
1.9.2 Приклади високоентропійних боридів .....	20
1.10 Методи отримання високоентропійних сплавів .....	21
1.10.1 Механічне сплавлення.....	22
1.10.2 Дугове плавлення.....	23
1.10.3 Індуктивне наплавлення.....	24
1.10.4 Іскро-плазмове спікання.....	25
1.11 Сплавоутворення в системі MeB <sub>2</sub> -SiC .....	25
1.12 Области застосування сплавів системи MeB <sub>2</sub> -SiC.....	26
1.13 Висновки та постановка завдання дослідження .....	27
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	28
2.1 Отримання композиту .....	28
2.2 Вихідні матеріали.....	29
2.3 Отримання заготовок зразків.....	29
2.4 Одержання композитів методом безтигельної зонної плавки.....	31
2.5 Дослідження мікроструктури композитів .....	32
2.6 Рентгенофазовий аналіз.....	32
2.7 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості спрямовано армованих композитів системи SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B <sub>2</sub> .....	33

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ .....	35
3.1 Дослідження структури композитів .....	35
3.2 Дослідження хімічного складу .....	36
3.3 Дослідження фазового складу .....	38
3.4 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості .....	39
4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	42
4.1 Аналіз умов праці, небезпечних та шкідливих факторів .....	42
4.2 Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення (нормалізації) умов праці .....	46
4.2.1 Фізичні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів ...	46
4.2.2 Мікроклімат .....	48
4.2.3 Запиленість повітря .....	49
4.2.4 Небезпека ураження людини електричним струмом .....	51
4.2.5 Пожежна безпека .....	52
4.3 Застосування засобів індивідуального захисту .....	53
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	55
5.1 Науково-технічна актуальність .....	55
5.2 Розрахунок планових витрат .....	55
5.2.1 Витрати на оплату праці науково-дослідницькому персоналу .....	56
5.2.2 Єдиний соціальний внесок .....	58
5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень .....	58
5.2.4 Витрати на спеціальне обладнання .....	59
5.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій .....	59
5.2.6 Витрати на службові відрядження .....	60
5.2.7 Інші прямі невраховані витрати по темі .....	60
5.2.8 Накладні витрати .....	60
5.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми .....	61
5.3 Науково-технічна ефективність НДР .....	62
5.4 Висновки до розділу .....	66
ВИСНОВКИ .....	67
CONCLUSION .....	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....	69

## ВСТУП

В теперішньому світі все розвивається дуже швидко, і, відповідно, з'являється дуже багато нових задач, виконати які людство поки не в змозі через відсутність необхідних для цього матеріалів. В зв'язку з цим, з'явилася ідея, за допомогою якої можна шукати нові матеріали з кращими властивостями, а саме високоентропійні сплави (ВЕС).

Доведено, що сплави з високою ентропією є новою ініціативою в сучасну епоху в галузі матеріалознавства та техніки. Матеріали з високою ентропією розроблені завдяки вимогам виключно хороших механічних властивостей. Механічні властивості цих сплавів ґрунтуються або визначаються їхньою кристалічною структурою, а також хімічним складом, що є найважливішим для їх мікроструктури. Попит на високоентропійні сплави дуже високий через їх високу міцність за високої температури, що має високу пластичність, яка дуже потрібна в конструкційних застосуваннях у сфері транспорту та енергетики [1].

Крім того, звичайні сплави не можуть зберігати свою твердість за високих температурах через обмежений механізм зміцнення, доступний для них, тоді як ВЕС мають кращу твердість за високої температури через різноманітні механізми зміцнення, такі як дислокаційні реакції, зміцнення вторинної фази, твердорозчинне зміцнення [2].

Також досить вагомим фактом є те, що при утворенні у ВЕСах складної атомної структури можуть виникати нові фізичні та хімічні властивості. Тому дослідження даних матеріалів можуть допомогти знайти нові явища та властивості для подальшого їх використання.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Оскільки тема роботи полягає у дослідженні структури та властивостей спрямовано закристалізованого сплаву системи  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ , то для початку потрібно розглянути властивості компонентів даного сплаву.

### 1.1 Карбід кремнію (SiC)

**Історія SiC.** Вчений Йонс Якоб Берцеліус, який народився в 1779 році в місті Лінчепінг (Швеція) у 1824 році написав та опублікував статтю, в якій зробив припущення, що між вуглецем та кремнієм існує хімічний зв'язок. На разі Лінчепінгський університет є центром національної програми у Швеції, який славиться вивченням властивостей SiC як напівпровідника [1].

Однак, якщо говорити про SiC, який можна зустріти в природі, то відомо, що він має форму дрібних кристалів, які походять від метеоритів, які були знайдені на поверхні або у верхніх частинах мантії Землі. Відомо, що перший, хто знайшов природний SiC в метеориті – це Анрі Муассан. Метеорит знаходився в каньйоні Діабло. Цікавим є той факт, що деякі з цих, так званих, муассанітів з'явилися раніше за Сонце. Це було встановлено за допомогою аналізу ізотопного складу, який був аномальним і, вірогідно, став таким через оточення метеориту червоними гігантами [2]-[6].

**Використання кераміки з карбіду кремнію.** Часто кераміка з карбіду кремнію, а також споріднених матеріалів широко застосовується в різноманітних галузях, зокрема у військовій та інженерній техніці. SiC необхідний для використання в аерокосмічній промисловості, оборонній промисловості, атомній промисловості, хімічній промисловості і, звичайно, для створення напівпровідників, як було сказано вище. Також, деякі вчені пропонують використовувати SiC для виявлення так званої темної матерії Sub-GeV [7].

**Методи виготовлення SiC кераміки.** Створення SiC кераміки включає в себе чотири етапи: сировина, формування ще необробленого тіла, спікання та механічна обробка. Наразі тривимірні керамічні компоненти складної форми SiC виготовляють за двома підходами [2].

Перший підхід – це спікання та механічна обробка. Кераміка виготовляється за допомогою різноманітних технологій спікання, таких як спікання без тиску, гаряче пресування, реакційне спікання. Після цього компоненти кераміки складної форми отримують використовуючи різні методи механічної обробки, що може складатися з шліфування, точіння, тощо [2].

Другий підхід – це майже повне формування, а потім спікання. Спочатку відбувається підготовка необробленого тіла SiC складної форми, використовуючи різноманітні технології формування, наприклад, шлікерне литво або литво під тиском. Після цього керамічний компонент складної форми піддають спіканню без тиску [2].

**Політопи SiC.** Карбід кремнію існує в багатьох різних кристалічних структурах, що мають назву політопи. Не зважаючи на те, що всі політопи SiC хімічно складаються з 50% атомів карбону, що ковалентно зв'язані з 50% атомами кремнію, кожний політоп має свої відмінні властивості електричного напівпровідника [3].

Відомо більш ніж 100 різних політопів, але тільки деякі з них можна виростити для подальшого використання як напівпровідника. Найпоширенішими політопами, що використовуються для електроніки є: 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC ( $\beta$ -SiC).  $\beta$ -SiC – єдиний політоп, що має кубічну кристалічну ґратку. Політопи, що мають не кубічну ґратку мають назву  $\alpha$ -SiC. 4H-SiC та 6H-SiC є єдиними політопами SiC, що мають гексагональну кристалічну структуру. Також є представник ромбоїдричної кристалічної структури - 15R-SiC [3].

## 1.2 Властивості TiB<sub>2</sub>

Матеріали на основі дибориду титану (TiB<sub>2</sub>) отримали широке визнання завдяки своїм високим показникам твердості і модулю пружності, відмінній стійкості до зношування, а також винятковій теплопровідності та електропровідності. Потенційні застосування включають конструкційні матеріали для високих температур, різальні інструменти, броня, електроди в металургії та деталі, що піддаються зношуванню [8]-[13].

В таблиці 1.1 зазначені властивості TiB<sub>2</sub> в залежності від температури.

Таблиця 1.1 – властивості TiB<sub>2</sub> від температури [14]

Властивість	Температура					
	20	500	1000	1200	1500	2000
Об'ємний модуль пружності, ГПа	240	234	228			
Міцність на стиснення, ГПа	1,8					
Швидкість текучості, 10 <sup>-9</sup> s <sup>-1</sup>					0,005	3,1
Густина, г/см <sup>3</sup>	4,5	4,449	4,389	4,363	4,322	4,248
Модуль пружності, ГПа	565	550	534			
Міцність на згин, МПа	400	429	459	471	489	
Тріщиностійкість, МПа*м <sup>1/2</sup>	6,2					
Коефіцієнт тертя	0,9	0,9	0,6			
Твердість, ГПа	25	11	4,6			
Коефіцієнт Пуассона	0,108	0,108	0,108			
Модуль зсуву, ГПа	255	248	241			

Температура плавлення TiB<sub>2</sub> дорівнює близько 3225 °С. Властивості, якими володіє TiB<sub>2</sub> роблять його кандидатом для використання в складних умовах з підвищеним зношенням та за підвищених температур [13].

Диборид титану може бути отриманий шляхом використання різних високотемпературних методів, таких як прямі реакції титану або його оксидів/гідридів з елементарним бором за температури понад 1000°С, карботермічне відновлення оксиду титану та оксиду бору, або гідрогенне відновлення галогенідів бору в присутності металу або його галогенідів. Серед

різних шляхів синтезу були розроблені електрохімічний синтез та твердотільні реакції для отримання дрібніших частинок дибориду титану у великій кількості. Прикладом твердотільної реакції є боротермічне відновлення, яке може бути проілюстроване наступною реакцією [13]:



### 1.3 Властивості $\text{ZrB}_2$

$\text{ZrB}_2$  є одним із боридів перехідних металів, які можуть бути потенційно застосовані в екстремальних термічних та хімічних середовищах. Це обумовлено його високою стійкістю. Прикладом застосування може бути повернення в атмосферу, польоти на гіперзвуковій швидкості. З цієї родини матеріалів  $\text{ZrB}_2$  має найнижчу теоретичну щільність, яка поєднується з високою електричною та теплопровідністю. Ця унікальна комбінація властивостей робить кераміку на основі  $\text{ZrB}_2$  привабливою для аерокосмічних та інших застосувань, таких як високотемпературні електроди, тиглі для контакту з розплавленими металами, компоненти для корозійних середовищ та застосувань, що вимагають стійкості до зношування [15].

Температура плавлення  $\text{ZrB}_2$  дорівнює  $3000\text{ }^\circ\text{C}$ . Для виготовлення  $\text{ZrB}_2$  можуть використовувати саморосповсюджуваний високотемпературний синтез (СВС). Цей метод є передовим для створення карбідів, боридів, нітридів тощо. Відомо, що спікання  $\text{ZrB}_2$  є досить складним через його високу температуру плавлення та ковалентній природі. Досить великою проблемою при спіканні боридів є зростання зрена, яке створює високі внутрішні напруження, що пов'язано з анізотропією. Це призводить до утворення мікротріщин у зразках під час охолодження.  $\text{ZrB}_2$  спікають за температури  $2000\text{-}2200\text{ }^\circ\text{C}$  шляхом гарячого пресування [16].

Властивості  $\text{ZrB}_2$  наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Властивості  $ZrB_2$  [17].

Властивість	Значення
Об'ємний модуль пружності, ГПа	400
Густина, г/см <sup>3</sup>	6,1
Модуль пружності, ГПа	350
Міцність на згин, МПа	300
Тріщиностійкість, МПа*м <sup>1/2</sup>	5
Твердість, ГПа	22-26
Коефіцієнт Пуассона	0,08-0,14
Модуль зсуву, ГПа	120

#### 1.4 Властивості $HfB_2$

$HfB_2$  є боридом металу IV групи, тому він є ультра-вогнетривким матеріалом з температурою плавлення понад 3000 °С. Він має високу твердість, високу термічну та електричну провідність, а також високу механічну міцність і жорсткість до 2000 °С і більше. Крім того, він хімічно стійкий в кислих середовищах. Завдяки цим винятковим властивостям, бориди перехідних металів вважаються перспективними матеріалами для аерокосмічних застосувань, таких як компоненти двигунів та передні кромки гіперзвукових літальних апаратів. Інші потенційні використання включають концентровані сонячні теплові поглиначі, оболонки ядерного палива та поглиначі нейтронів. Зокрема, у поєднанні з карбідом кремнію або вуглецевим волокном у вигляді керамічних композитів матриці (СМС), вони забезпечують комбінацію покращеної стійкості до відмов і опору до абляції [18].

Більше характеристик приведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – властивості HfB<sub>2</sub> [19], [20]

Властивість	Значення
Об'ємний модуль пружності, ГПа	200
Міцність на стиснення, ГПа	2
Густина, г/см <sup>3</sup>	10.5
Модуль пружності, ГПа	440
Міцність на згин, МПа	300
Твердість, ГПа	20
Коефіцієнт Пуассона	0.1

Через сильний ковалентний зв'язок та низьку самодифузію, для ущільнення диборидів необхідні високі температури та зовнішні тиски. Зазвичай використовуються два підходи для покращення ущільнення. Перший підхід полягає у використанні альтернативних методів обробки, таких як реактивне гаряче пресування, іскро-плазмове спікання та полімерні прекурсори. Ці техніки спрямовані на покращення чистоти та процесу ущільнення диборидів. Другий підхід полягає у вивченні різних домішок для зниження температури спікання. Наприклад, додавання металів або кераміки як допоміжних речовин під час спікання виявилось ефективним для покращення спікаємості та ущільнення кераміки на основі ZrB<sub>2</sub>-SiC. Однак, фази на границі зерен, утворені за допомогою допоміжних речовин під час спікання, часто негативно впливають на міцність за підвищених температурах та інші механічні властивості. Тому велике значення має дослідження отримання кераміки на основі HfB<sub>2</sub> з використанням дрібних початкових порошків з високою спікаємістю та чистотою без додавання допоміжних речовин для спікання. Також, HfB<sub>2</sub> можна синтезувати за допомогою боротермічного відновлення HfO<sub>2</sub>, використовуючи аморфний бор [19].

## 1.5 Властивості NbV<sub>2</sub>

Дибориди перехідних металів мають різноманітні основні електронні стани, такі як надпровідність у дибориду металу Nb і унікальну кристалізацію магнітного порядку, зокрема у ніобію (Nb), який має найбільшу глибину магнітного проникнення серед усіх елементів. Nb також має найнижчу щільність серед усіх високотемпературних металів разом із технецієм (Tc). Цікавим аспектом є його хороше теплове розширення, яке розглядається у зв'язку з його типом (II) надпровідності, що знайшло застосування в обладнанні для магнітно-резонансної томографії в медичній промисловості [21].

Деякі характеристики наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – властивості NbV<sub>2</sub> [21]-[22]

Властивість	Значення
Об'ємний модуль пружності, ГПа	270
Густина, г/см <sup>3</sup>	6.97
Модуль пружності, ГПа	400
Твердість, ГПа	16
Коефіцієнт Пуассона	0.18

## 1.6 Властивості TaV<sub>2</sub>

Диборид танталу (TaV<sub>2</sub>) – це керамічний матеріал з групи боридів перехідних металів. Цей матеріал характеризується високою температурною стійкістю, високою твердістю, досить непоганою теплопровідністю, а також електропровідністю. Також відомо про досить високу хімічну стійкість.

Деякі властивості наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – властивості TaB<sub>2</sub> [23]-[24]

Властивість	Значення
Густина, г/см <sup>3</sup>	11.70
Модуль пружності, ГПа	550
Твердість, ГПа	25.5
Коефіцієнт Пуассона	0.2

Порошок TaB<sub>2</sub> можна отримати за допомогою реакції Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> з елементарним бором у вакуумі за температури 1650 °C [24].

### 1.7 Високоентропійні сплави

Найголовнішою рисою високоентропійних сплавів є їх різноманітність, яка досягається за допомогою ентропії змішування, яку застосовують для їх створення. Використовуючи даний метод можна отримати багато випадкових конфігурацій, які матимуть унікальні властивості. Збільшення ентропії для твердих речовин призводить до більш стабільної конфігурації сполук. Для того, щоб створити високоентропійний матеріал, так званий «безлад», тобто неупорядкованість отримують за допомогою використання декількох елементів з подібною валентністю або подібним зарядом, але різним розміром, які знаходяться випадковим чином на вироджених ділянках кристалічної структури. Якщо все зроблено вірно, то отриманим результатом будуть спотворені, але непорушені структури. Вчені вважають, що викривлена решітка може призводити до цікавих властивостей, які можуть бути корисними. Ці матеріали також відомі під іншими назвами: багатокомпонентні матеріали, багатоосновні матеріали, композиційно складні матеріали [4].

ВЕ матеріали, а також ефект стабілізації ентропії вперше були досліджені в металевих сплавах, що склалися з п'яти або більше металів в еквімолярних пропорціях. Високоентропійні матеріали є надзвичайно перспективними для дослідження, оскільки ми маємо більш ніж 40 металів, які можна використовувати для створення нових матеріалів з унікальними

властивостями. На мою думку, нам потрібно більше досліджень, тому що, теоретично, дані матеріали зможуть мати набагато кращі властивості ніж ті, що ми маємо зараз [4].

У 2015 році було відзначено зростання інтересу до ВЕ кераміки, коли була зафіксована стабілізація ентропії еквімолярної фази типу кам'яної солі (Mg, Ti, Cu, Zn, Ni) O з п'ятьма елементами. З того часу інші класи ВЕС, такі як бориди, карбідів та нітриди, також отримали увагу. У 2016 році була створена нова група матеріалів - ультрависокотемпературна кераміка (УВТК), яка включає ВЕ дибориди, що потенційно можуть бути використані в різних високотехнологічних застосуваннях, включаючи теплові та екологічні бар'єрні покриття, каталізатори, розщеплення води, а також виготовлення твердих та зносостійких покриттів або матеріалів ядерного екранування наступного покоління [4].

Ультрависокотемпературна кераміка – це матеріали, що мають температуру плавлення вище 3300 К. Вони складаються з малої кількості боридів, карбідів і нітридів раних перехідних металів, таких як  $\text{HfB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{HfN}$  і  $\text{TaC}$ . Наразі відомо, що УВТК є надзвичайно корисними, оскільки вони мають властивості вищі за існуючі конструкційні матеріали, що робить їх основними для використання в екстремальних середовищах [4].

## 1.8 Термодинаміка фазової стійкості

У термодинамічній рівновазі фази, присутні в сплаві, залежать від вільної енергії Гіббса змішування та вільної енергії утворення інтерметалічних сполук. Інтерметаліди можуть випадати в осад у твердому розчині, багатому на А або В, і твердий розчин не обов'язково має бути випадковим, оскільки різні атомні види можуть групуватися або впорядковуватися на решітці. Суміш також може розкладатися на два твердих розчини з різними складами та структурами. Ситуація стає дедалі складнішою, оскільки додається більше

легуючих елементів, оскільки збільшується кількість можливих фаз, які можуть співіснувати [9].

У випадках, коли сполуки демонструють композиційний діапазон стабільності, необхідно враховувати енергії дефектів. Показано кілька можливих реакцій змішування (рис.1.1). Загалом, склад сплаву, термодинаміка процесу змішування та наявність інтерметалічних сполук відіграють важливу роль у визначенні фаз, присутніх у кінцевому продукті [9].

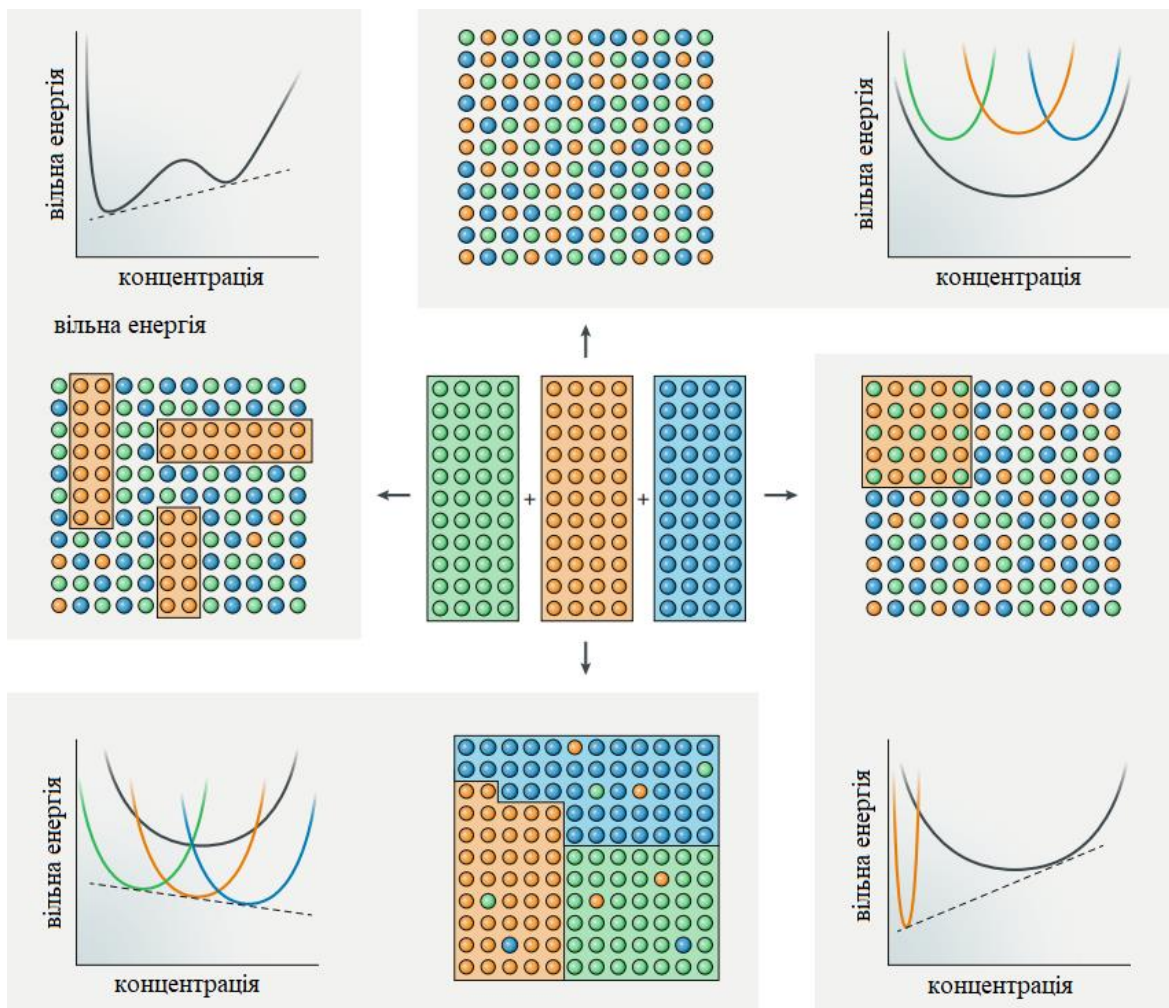


Рисунок 1.1 – Можливі реакції змішування для трьох легуючих елементів [9]

У сплавах типу а–в повна змішуваність у всьому діапазоні складу зустрічається рідко, і тверді розчини зазвичай знаходяться біля кінців чистих елементів, тоді як різні інтерметалічні сполуки, багато з яких крихкі, існують між ними. Ця проблема ще більш виражена в багатоелементних сплавах, де є

численні пари елементів, які можуть притягувати один одного, що призводить до більшої кількості потенційно крихких інтерметалідів [9].

## **1.9 Високоентропійні бориди**

### **1.9.1 Бориди тугоплавких металів**

На відміну від решти тугоплавких сполук, атоми бору мають досить великий розмір, що дозволяє їм утворювати зв'язки типу B – B в решітці. Основним чинником, що встановлює структуру боридів – це розмір атомів, а не число валентних електронів. Бор може утворювати з металами такі сполуки як монобориди, дибориди, тетрабориди, гексабориди, а також додекабориди. Цікавим є факт, що природа металу у боридях не має значної ролі, тому існує можливість заміни одних металів іншими без зміни типу структури [5].

### **1.9.2 Приклади високоентропійних боридів**

Було проведено дослідження високоентропійних еквімолярних диборидів металів (табл.1.6). Були проаналізовані коефіцієнти різниці розмірів Юма-Ротері використовуючи для раціоналізації утворення високоентропійних твердих розчинів у цих диборидях металів. Було отримана понад 92% теоретичної щільності, при цьому композиції були однорідними як для нанорозміру до мікророзміру. Для того, щоб підтвердити утворення двовимірного високоентропійного металу, було проведена скануюча просвічуюча електронна мікроскопія з корекцією аберації із зображенням кільцевого темного поля та кільцевого світлого поля. Також, було виявлено, що нанорозмірна композиція розділена жорсткою 2-D сіткою бору, без будь-якої шарової сегрегації вздовж осі c.

Таблиця 1.6 – Результати досліджень [8]

	Композити	$\delta_a$	$\delta_c$	$a$ (Å)		$c$ (Å)		Середня густина
				середнє	XRD	середнє	XRD	
ВЕС #1	(Hf <sub>0,2</sub> Zr <sub>0,2</sub> Ta <sub>0,2</sub> Nb <sub>0,2</sub> Ti <sub>0,2</sub> )B <sub>2</sub>	1,4%	3,9%	3,110	3,101	3,346	3,361	92,4%
ВЕС #2	(Hf <sub>0,2</sub> Zr <sub>0,2</sub> Ta <sub>0,2</sub> Mo <sub>0,2</sub> Ti <sub>0,2</sub> )B <sub>2</sub>	1,7%	5,2%	3,093	3,080	3,307	3,316	92,4%
ВЕС #3	(Hf <sub>0,2</sub> Zr <sub>0,2</sub> Mo <sub>0,2</sub> Nb <sub>0,2</sub> Ti <sub>0,2</sub> )B <sub>2</sub>	1,7%	5,2%	3,101	3,092	3,311	3,345	92,3%
ВЕС #4	(Hf <sub>0,2</sub> Mo <sub>0,2</sub> Ta <sub>0,2</sub> Nb <sub>0,2</sub> Ti <sub>0,2</sub> )B <sub>2</sub>	1,3%	4,0%	3,084	3,082	3,253	3,279	92,2%
ВЕС #5	(Mo <sub>0,2</sub> Zr <sub>0,2</sub> Ta <sub>0,2</sub> Nb <sub>0,2</sub> Ti <sub>0,2</sub> )B <sub>2</sub>	1,6%	4,6%	3,090	3,075	3,265	3,253	92,1%
ВЕС #6	(Hf <sub>0,2</sub> Zr <sub>0,2</sub> W <sub>0,2</sub> Mo <sub>0,2</sub> Ti <sub>0,2</sub> )B <sub>2</sub>	2,0%	6,2%	3,082	--	3,268	--	--
ВЕС #7	(Hf <sub>0,2</sub> Zr <sub>0,2</sub> Ta <sub>0,2</sub> Cr <sub>0,2</sub> Ti <sub>0,2</sub> )B <sub>2</sub>	2,3%	5,2%	3,081	3,079	3,307	3,336	92,2%

Ці матеріали є новим типом ультрависокотемпературної кераміки, а також новим класом високоентропійних матеріалів. Ці матеріали є першою створеною високоентропійною неоксидною керамікою, що мають унікальну не кубічну (гексагональну) і шарувату (квазі-2Д) високоентропійну кристалічну структуру. Дана будова суттєво відрізняється від матеріалів, які були створені раніше. Проаналізувавши властивості, можна помітити, що твердість та стійкість до окислення проаналізованих матеріалів в середньому переважають середні показники п'яти окремих диборидів металів [8].

### 1.10 Методи отримання високоентропійних сплавів

Методи виготовлення високоентропійних сплавів можна поділити на три основні шляхи (рис.1.2). Основним шляхом є змішування в рідкому стані, включаючи дугове плавлення, плавлення електроопором, індукційне плавлення, лазерне плавлення, лазерне плакування та лазерно-інженерне формування сітки (LENS). Другий шлях – це тверде змішування, яке в основному включає механічне легування та подальший процес консолідації. Іншим шляхом є змішування газів, включаючи осадження методом розпилення, імпульсно-лазерне осадження (PLD), атомно-шарове осадження (ALD), молекулярно-променева епітаксія (MBE) і осадження з парової фази [10].



Рисунок 1.2 – Методи виготовлення високоентропійних сплавів [10]

### 1.10.1 Механічне сплавлення

Механічне легування (МЛ) з подальшим спіканням є одним з найбільш популярних методів отримання нанокристалічних високоентропійних сплавів (ВЕС). Механічне легування має переваги у покращенні розчинності твердих речовин, можливості обробки при кімнатній температурі та утворенні однорідного сплаву. Іскрове плазмове спікання застосовується для отримання гранул ВЕС високої щільності з мелених порошків. Однак, виробництво ВЕС з використанням МЛ супроводжується проблемами, такими як забруднення та висока схильність до окислення [11].

Механічне легування (МЛ) - це часто використовуваний "зверху вниз" метод отримання нанокристалічних матеріалів з використанням твердотілих процесів, які знаходяться в стані дисбалансу. Це включає розмелювання елементарних порошків для досягнення легування на атомному рівні. Процес МЛ характеризується повторним зварюванням та розривом порошкових частинок, що знаходяться між засобами для розмелювання, а ступінь цього процесу залежить від механічних властивостей порошкових складових [11].

Механічне легування (МЛ) має перевагу розширеної твердої розчинності навіть в незмішуваних системах, крім обробки на наномасштабі. Це можна пояснити покращеним швидкістю дифузії за рахунок нанорозміру компонентів порошку перед легуванням. Тому, крім збільшеної конфігураційної ентропії, МЛ додає покращену стабільність до фаз твердих розчинів у високоентропійних сплавах (ВЕС). На відміну від хімічних шляхів і методів осадження для синтезу наноматеріалів, великомасштабне виробництво порошку можливе через МЛ з використанням таких пристроїв, як планетарний кульовий млин, млини з атриторами та інші [11].

### **1.10.2 Дугове плавлення**

Технологія дугового плавлення є досить ефективною для отримання високоякісних металевих сплавів з точним складом і властивостями. У процесі дугового плавлення два електроди наближаються до поверхні металевого матеріалу, який має бути розплавлений. Потім струм проходить через електроди, утворюючи електричну дугу між ними. Тепло, яке виникає відданого процесу дає можливість підплавити поверхню металу, що знаходиться у місці контакту з електродами. Як результат ми отримуємо рідку краплину металу, що може бути використана для отримання сплавів або розпилення для подальшого використання в методах напилення.

Для успішного проведення процесу дугового плавлення важливо дотримуватися оптимальних параметрів електричної дуги, які залежать від властивостей матеріалу, розташування електродів, а також від інших факторів. Від цих параметрів залежить якість отриманого продукту і, відповідно, його властивості [12].

### 1.10.3 Індуктивне наплавлення

Індуктивне наплавлення – це багатообіцяючий метод, який є досить простим і може використовуватися для середньомасштабного та великомасштабного виробництва. Цей метод дозволяє досить однорідне перемішування розплаву з підтримкою високої температури, що в свою чергу робить цю технологію досить дешевою. Однак, дана технологія все ж має деякі виклики, які потрібно вирішити перед тим як використовувати цей метод для великомасштабного виробництва [25].

Індуктивне наплавлення - це процес, при якому матеріал нагрівається для плавлення або наплавлення за допомогою індукційного нагрівання. Цей процес заснований на створенні змінного магнітного поля за допомогою високочастотного електричного струму, який протікає через котушку, що оточує об'єкт, що потребує нагрівання. Під час проходження струму через котушку утворюється змінне магнітне поле. Це змінне магнітне поле індукуює електромагнітні індукційні струми в матеріалі, який нагрівається. Ці індукційні струми генерують тепло за допомогою ефекту Джоуля, що призводить до нагрівання матеріалу.

Індукційні струми, які генеруються, створюють тепло, яке використовується для плавлення або нагрівання матеріалу, який піддається наплавленню. Це може призводити до плавлення поверхні об'єкта, наплавлення додаткового матеріалу або зміни структури матеріалу, в залежності від конкретного застосування. Індуктивне наплавлення використовується для розширення або відновлення поверхневого шару об'єктів, а також для створення з'єднань між матеріалами шляхом наплавлення. Цей метод часто застосовується в різних промислових процесах, таких як металообробка, автомобільна промисловість, аерокосмічна техніка та інші галузі, де необхідне точне і контрольоване нагрівання та наплавлення матеріалів [26].

### 1.10.4 Іскро-плазмове спікання

Іскро-плазмове спікання – це метод спікання, який застосовують для порошкових матеріалів. В ньому застосовуються швидкий нагрів та високий тиск. Під час проходження процесу порошок розташовується між двома електродами з високочастотним електричним струмом, що власне і є причиною появи іскор та створення плазмового розряду в порошок. Завдяки іскрінню та плазмі, частини порошку дуже швидко нагріваються до високої температури, що призводить до прискорення процесів дифузії та спікання. Високий тиск, який створюється у системі, сприяє зближенню та об'єднанню порошкових частинок. Завдяки описаному вище комбінованому ефекту, відбувається досить ефективно спікання матеріалу з подальшою його високою щільністю і добре зв'язною структурою [27].

До переваг іскро-плазмового спікання можна віднести низьку температуру спікання, досить високу швидкість проходження процесу, швидке нагрівання та досить висока щільність отриманих заготовок [28].

### 1.11 Сплавотворення в системі $\text{MeB}_2\text{-SiC}$

Сплавотворення в системі  $\text{MeB}_2\text{-SiC}$  можна продемонструвати на прикладі діаграми стану  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$  (рис. 1.3). Як можна помітити, при вмісті  $\text{ZrB}_2$  50% у композиті  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$  формується евтектична фаза за температури нижчій, ніж тем температура розкладання  $\text{SiC}$ . З цього можна зробити висновок, що між  $\text{SiC}$  та  $\text{ZrB}_2$  мають евтектичний тип взаємодії. Матеріал був виготовлений за допомогою процесу високотискового плазмового напилення (HPPS) [27]. Можна припустити, що і у системах  $\text{HfB}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{NbB}_2\text{-SiC}$  і  $\text{TaB}_2\text{-SiC}$  також евтектичний тип взаємодії.

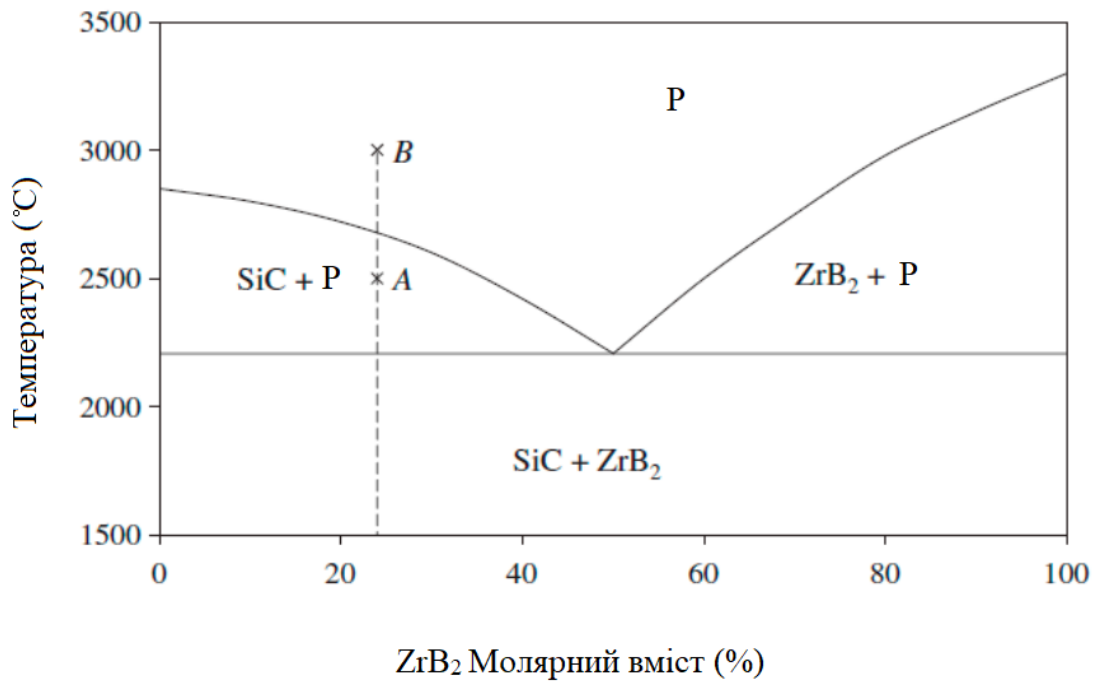


Рисунок 1.3 – Діаграма стану ZrB<sub>2</sub>-SiC [27]

### 1.12 Области застосування сплавів системи MeB<sub>2</sub>-SiC

Високоентропійні матеріали в комбінації з карбідом кремнію можуть бути застосовані в різних галузях і областях. Аерокосмічна техніка: високоентропійні сплави можуть використовуватися для виготовлення компонентів, які вимагають високої міцності, низької ваги та відмінних термічних властивостей.

Автомобільна промисловість: високоентропійні матеріали можуть знайти застосування в автомобільній промисловості для виготовлення легких та міцних деталей, які сприяють зниженню ваги автомобілів і покращенню паливної ефективності.

Електроніка: високоентропійні матеріали можуть бути використані в електронних пристроях для виготовлення провідників, контактів, термоелектричних матеріалів та інших компонентів з високою провідністю, стійкістю до окисування та стабільністю в екстремальних умовах [29].

### 1.13 Висновки та постановка завдання дослідження

Був зроблений аналіз літературних даних по карбїду кремнію і високоентропійних сплавах на основі дїборидів перехідних металів. Були розглянуті приклади різних ВЕСів з дїборидами та їх властивості. Встановлено, що такі матеріали мають високі фізико-механічні характеристики, такі як твердість, міцність та окисно стійкість за підвищених температур. Також було розглянуто сучасні методи, якими виготовляють високоентропійні сплави.

Проте з літературних даних відомо, що тріщиностійкість у порівнянні з металами є досить низькою, тому було б цікаво створити композиційний матеріал, який би містив у собі і карбїд кремнію, як високотемпературний матеріал з високою термічною і окисною стійкістю, так і високоентропійні бориди, які повинні мати виняткові високотемпературні властивості.

Тому метою даної роботи було дослідження структури та властивостей композиційного матеріалу на основі карбїду кремнію спрямовано армованого високоентропійним сплавом на основі дїборидів титану, цирконію, гафнію, ніобію та танталу, що був виготовлений методом безтигельної зонної плавки.

Для досягнення мети необхідно було виконати наступні завдання:

1. Отримати методом безтигельної зонної плавки композиту системи  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ .
2. Дослідити мікроструктуру отриманого композиту.
3. Дослідити фазовий і хімічний склад отриманого композиту.
4. Дослідити мікромеханічні властивості отриманого композиту.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Отримання композиту

Для того, щоб виготовити композит системи  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  треба пройти наступні етапи: дозування порошків, приготування суміші, пресування стрижня, сушка, безтигельна зонна плавка. На рисунку 2.1 показана технологічна схема одержання даного композиту.

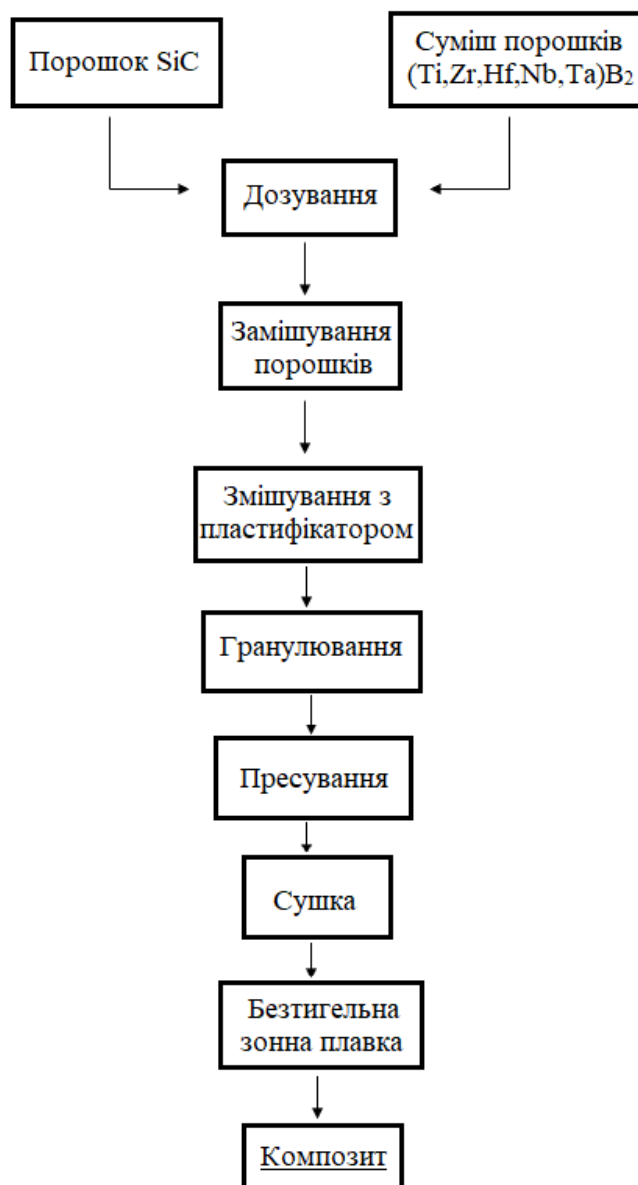


Рисунок 2.1 – Технологічна схема отримання композиційного матеріалу  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$

## 2.2 Вихідні матеріали

Для того, щоб виготовити зразки даного композиту, були використані порошки карбіду кремнію, та суміш порошків дибориду титану, дибориду цирконію, дибориду гафнію, дибориду ніобію та дибориду танталу з чистотою близько 98 мас.% з розміром частинок 1–5 мкм. Диборидні включення складали 50 об.% в кожному зі зразків. В таблиці 2.1 наведені відсоткові вмісти компонентів в сумішах, а також їх густина.

Таблиця 2.1 – Вміст вихідних компонентів у суміші

№	Компоненти	Об'ємна доля, %	Густина, г/см <sup>3</sup>
1	SiC	50	3,1
	TiB <sub>2</sub>	10	4,52
	ZrB <sub>2</sub>	10	6,08
	HfB <sub>2</sub>	10	10,5
	NbB <sub>2</sub>	10	6,97
	TaB <sub>2</sub>	10	11,7

## 2.3 Отримання заготовок зразків

Для того, щоб зробити заготовку, необхідно спочатку провести дозування вихідних порошків, використовуючи електронні ваги. Далі необхідно їх перемішати за допомогою десятикратного протирання через сито з розміром комірки 50 мкм. Потім додаємо пластифікатор, яким є водний розчин полівінілового спирту (2,5%) в кількості 1/5 від маси порошку.

Перед початком пресування потрібно розрахувати наважку порошку для визначення необхідної кількості порошку для засипання в прес-форму. Для проведення розрахунку використовуємо формулу:

$$G = V \cdot \gamma \cdot (1-f) \cdot k, \quad (2.1)$$

де G – маса порошку, г;

$V$  – об’єм пресовки,  $\text{см}^3$ ;

$\gamma$  – густина компактного матеріалу,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$f$  – пористість пресовки, що дорівнює 60 %;

$k$  – коефіцієнт, що дорівнює 1,01.

Об’єм пресовки визначається за формулою:

$$V = \pi r^2 h, \quad (2.2)$$

де  $r$  – радіус пресовки,  $\text{см}$ ;

$h$  – довжина пресовки,  $\text{см}$ .

Густина трикомпонентної системи можна знайти за формулою:

$$\gamma = \frac{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4 \gamma_5 \gamma_6}{\gamma_2 \gamma_3 \gamma_4 \gamma_5 \gamma_6 \alpha_1 + \gamma_1 \gamma_3 \gamma_4 \gamma_5 \gamma_6 \alpha_2 + \gamma_1 \gamma_2 \gamma_4 \gamma_5 \gamma_6 \alpha_3 + \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_5 \gamma_6 \alpha_4 + \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4 \gamma_6 \alpha_5 + \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4 \gamma_5 \alpha_6}, \quad (2.3)$$

де  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$  – щільність відповідних компонентів;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$  – масова доля відповідних компонентів.

Після проведення розрахунків відбувається операція пресування. Необхідну кількість порошку розміщують у розбірну прес-форму, після чого проводять пресування за допомогою гідравлічного пресу. Тиск при цьому 100 МПа. В результаті був отриманий зразок у вигляді стрижня довжиною 145 мм і діаметром 10 мм (табл. 2.2). Після цього, для видалення вологи та зміцнення отриманих заготовок шляхом полімеризації пластифікатора, проводилась вакуумна сушка. Цей процес тривав протягом 10 годин за температури 80 – 100°C.

Таблиця 2.2 – Розрахунок наважки порошку

Суміш	Об'єм пресовки, см <sup>3</sup>	Щільність матеріалу, г/см <sup>3</sup>	Вага, г
SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B <sub>2</sub>	22,76	4,77	33,78

#### 2.4 Одержання композитів методом безтигельної зонної плавки

Для того, щоб виготовити спрямовано-армований композит на основі карбіду кремнію системи SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub> була використана установка безтигельної зонної плавки Кристал – 206 (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Установка «Кристал – 206»

Просушена заготовка поміщається в нижній затискач камери даної установки. За допомогою верхнього затискача фіксуємо затравку з наперед заданою орієнтацією таким чином, щоб відстань між краями зразка та затравки була не більше за 1 мм. Для нормальної роботи, робочий об'єм вакуумується до залишкового тиску  $1,3 \times 10^{-4}$  Па, а потім заповнюється гелієм до надлишкового тиску 2 атм., що дозволяє сплаву не випаровуватися занадто інтенсивно при температурі плавлення.

## 2.5 Дослідження мікроструктури композитів

Зразки, які були отримані в результаті зонної плавки далі були розрізані на електроерозійному станку в поперечному напрямку та шліфувались і полірувались. Далі частини зразка були запресовані в бакеліт для дослідження мікроструктури. Структуру досліджували металографічно за допомогою оптичного мікроскопу НЕОРНОТ-21 (рис.2.3).



Рисунок 2.3 – Оптичний мікроскоп НЕОРНОТ-21

## 2.6 Рентгенофазовий аналіз

Для того, щоб зробити рентгенофазовий аналіз зразків, використовували установку Rigaku Ultima IV (рис.2.4).



Рисунок 2.4 – Установка Rigaku Ultima IV

Для визначення фаз в досліджуваних зразках проводиться якісний фазовий аналіз. Цей аналіз базується на тому, що кожна кристалічна речовина має свій унікальний дифракційний спектр, а при наявності суміші речовин ці спектри перекриваються. Для визначення складу речовини необхідно виміряти інтенсивність характерних дифракційних ліній та обчислити відповідні міжплощинні відстані.

## 2.7 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості спрямовано армованих композитів системи $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$

Для того, щоб визначити механічні властивості, запресований в бакеліт зразок був досліджений за допомогою мікротрведрометра MHV-1000. Під час дослідів було використане навантаження в 9,8Н; час витримання дорівнював 10 секундам. Для розрахунку мікротвердості необхідно використати формулу:

$$H_{\mu} = \frac{P}{F} = \frac{P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1.854 \cdot P}{d^2}, \quad (2.4)$$

де  $\alpha$  – кут при вершині алмазної піраміди;

P – навантаження;

F – бокова поверхня відбитка піраміди.

Для того, щоб виміряти тріщиностійкість спрямовано армованого композиту був використаний метод мікроіндентування. Значення мікротвердості можна розрахувати за формулою:

$$K_{1c} = \frac{0.075 * P}{c^{1.5}}, \quad (2.5)$$

де P – навантаження на індентор;

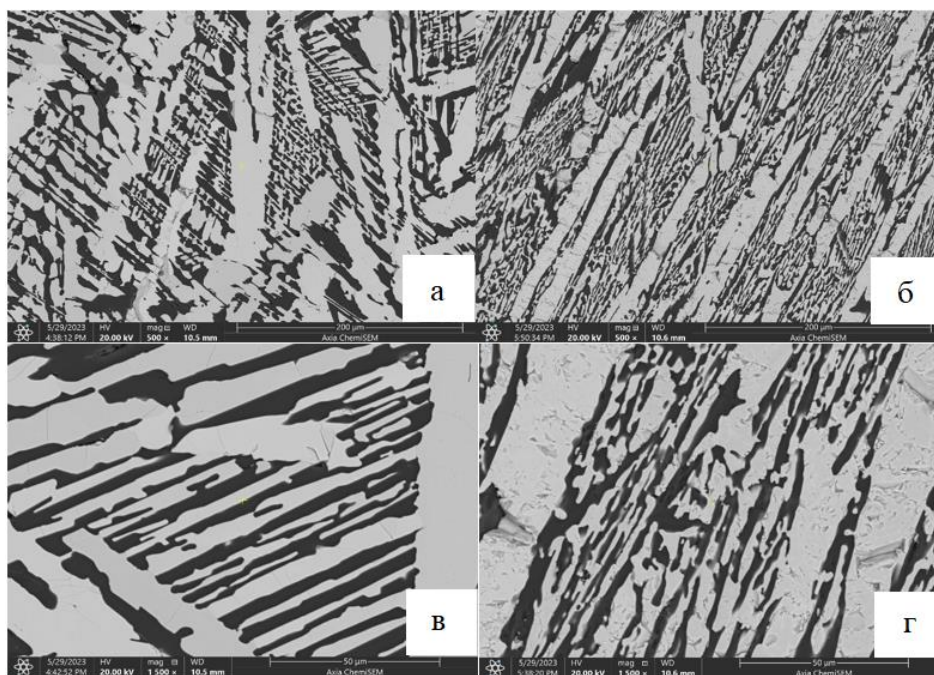
c – половина довжини тріщини, що проходить через відбиток піраміди.

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

### 3.1 Дослідження структури композитів

Було проведено дослідження мікроструктури спрямовано-армованого композиту системи  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ , який був виготовлений за допомогою безтигельної зонної плавки в площині поперечного та повздовжнього перерізу відносно напрямку вирощування (рис. 3.1). Було визначено фазовий склад даного матеріалу, розподіл та напрямки включень.

З мікроструктури видно, що композиційний матеріал має спрямовану структуру та складається з двох фаз: темної  $\text{SiC}$  та світлої  $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ . Відомо, що система  $\text{SiC}-(\text{Me})\text{B}_2$  є евтектичною, а оскільки на мікроструктурі ми спостерігаємо наявність крупних включень дибориду, встановлено, що наш матеріал має заевтектичний склад.



а –  $\times 500$ , поперечний; б –  $\times 500$ , поздовжній;

в –  $\times 1500$ , поперечний, г –  $\times 1500$ , поздовжній

Рисунок 3.1 – Мікроструктури системи  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  в поперечному та повздовжньому перерізах за різного збільшення

На основі аналізу мікроструктури поперечного та повздовжнього перерізів можна стверджувати, що включення диборидної фази є пластинчастими.

### 3.2 Дослідження хімічного складу

Для аналізу хімічного складу обрали мікроструктуру повздовжнього перерізу системи  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  за збільшенням  $\times 2500$  (рис. 3.2).

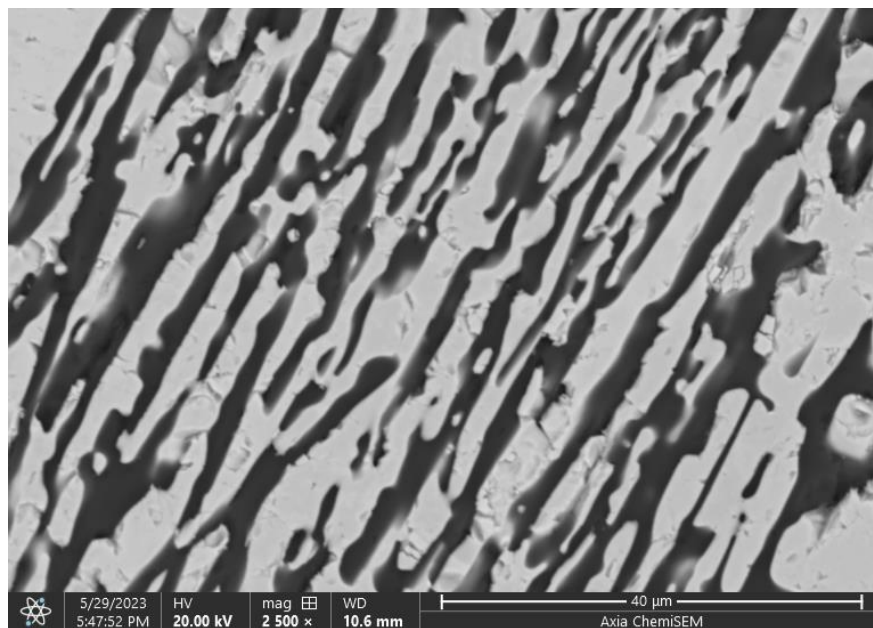


Рисунок 3.2 – Мікроструктура повздовжнього перерізу системи  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  при збільшенні  $\times 2500$

Після аналізу можна зробити висновки, що оскільки ми спостерігаємо Ti, Zr, Hf, Nb та Ta у світлій фазі, можна стверджувати, що ця фаза є високоентропійним боридом  $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ . Темна фаза в свою чергу має в своєму складі кремній (Si) та вуглець (C), тому можна стверджувати, що ця фаза – карбід кремнію (SiC) (рис.3.3).

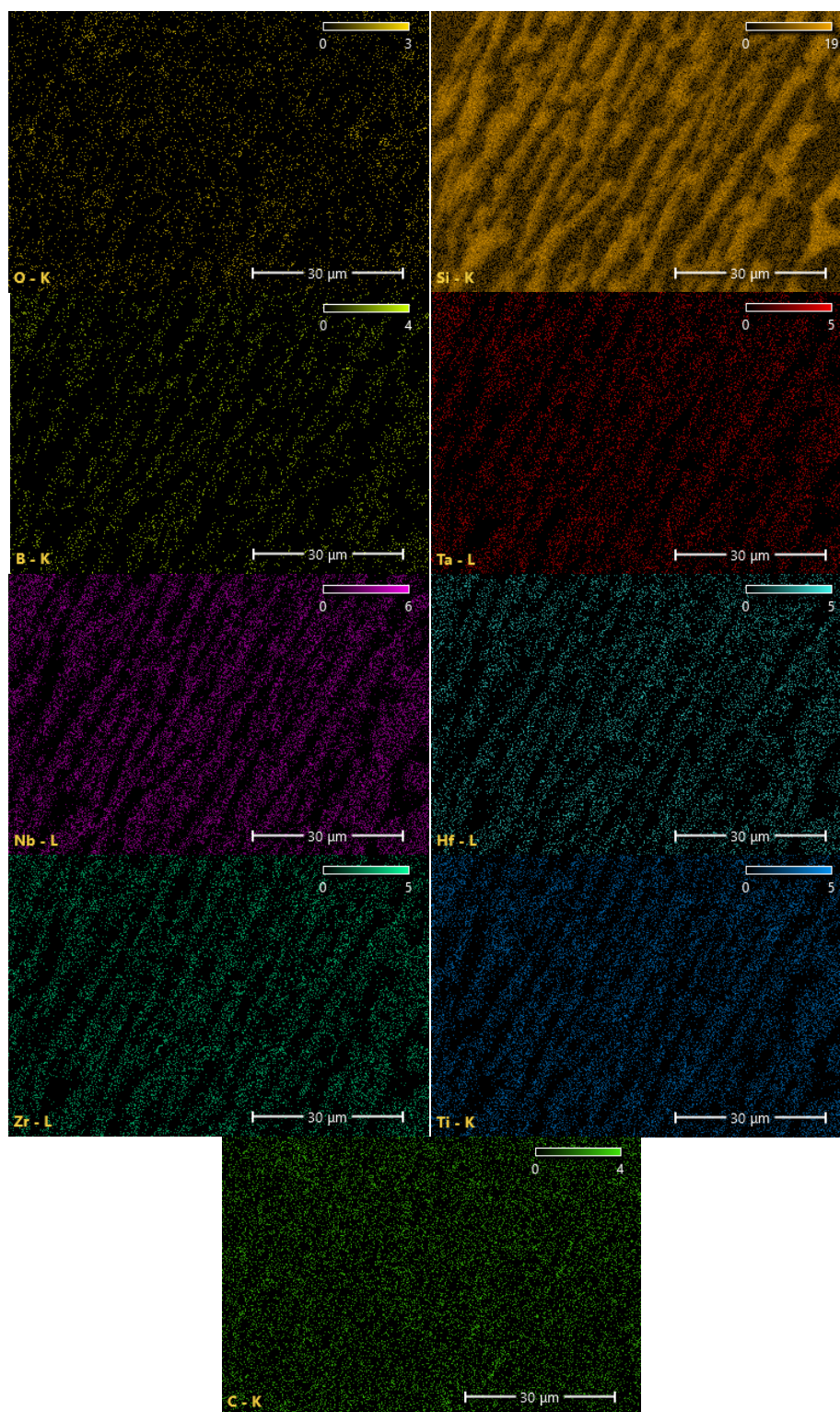


Рисунок 3.3 – Результати дослідження хімічного складу композиту SiC-  
(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>

### 3.3 Дослідження фазового складу

Дослідження фазового складу були проведені методом рентгенівської дифрактографії. Проаналізувавши дифрактограму спрямовано кристалізованого композиту  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ , встановлено, що композит складається з таких фаз як:  $\text{SiC}$  та  $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  (рис. 3.4).

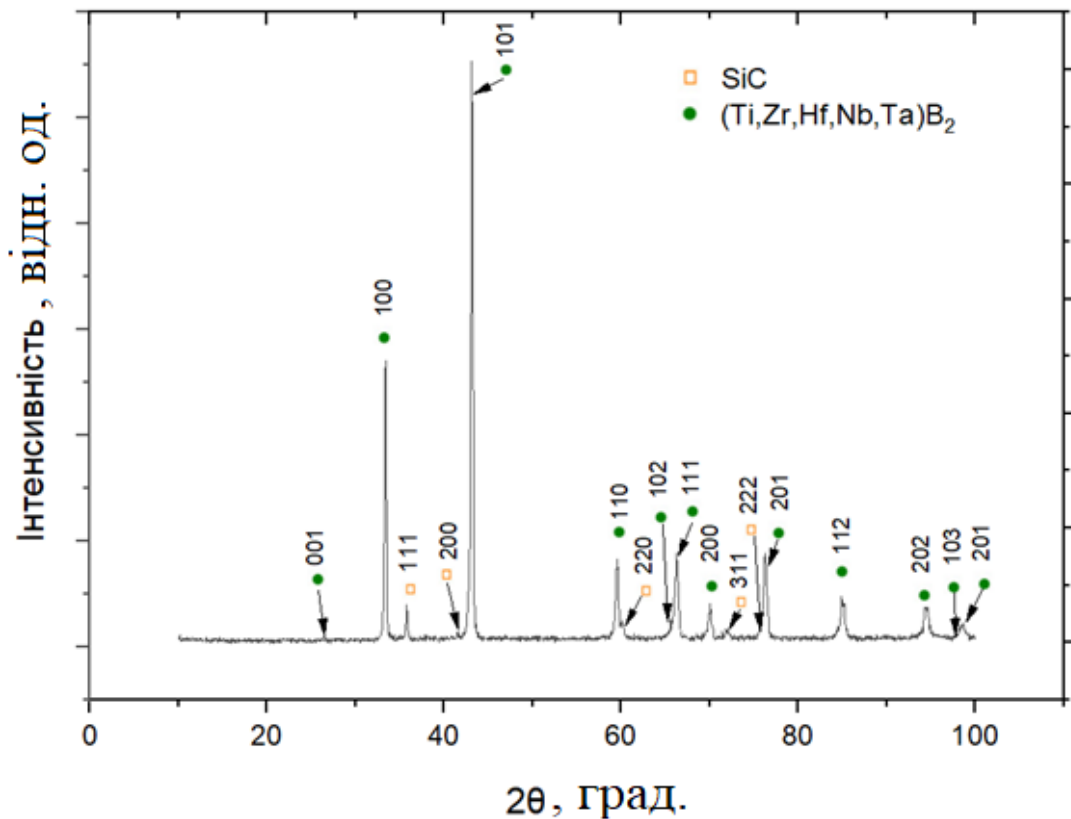


Рисунок 3.4 – Дифрактограма системи  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  виготовленої методом безтигельної зонної плавки

Отримана інформація повністю узгоджується з результатами отриманими для індивідуальної фази  $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ , що була описана Джошуа Гільдом у статті [8].

Оскільки метод безтигельної зонної плавки полягає у створенні спрямовано-закристалізованого композиту, можна спостерігати переважну орієнтацію фаз. У нашому випадку видно переважну орієнтацію (101) фази

(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>. Також спостерігається збільшена інтенсивність фази (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub> з орієнтацією (100), що може свідчити про орієнтацію даної фази і у цьому напрямку (рис. 3.4). Включення карбиду кремнію (SiC) мають переважну орієнтацію (111).

Дані рентгенофазового аналізу задовільно узгоджуються з даними металографічного та хімічного аналізу.

### 3.4 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості

Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості були проведені для зразків вирізаних із отриманого композиту у поздовжньому і поперечному напрямках. Відбитки були отримані за допомогою мікротвердоміра MHV-1000 (рис. 3.5, 3.6).

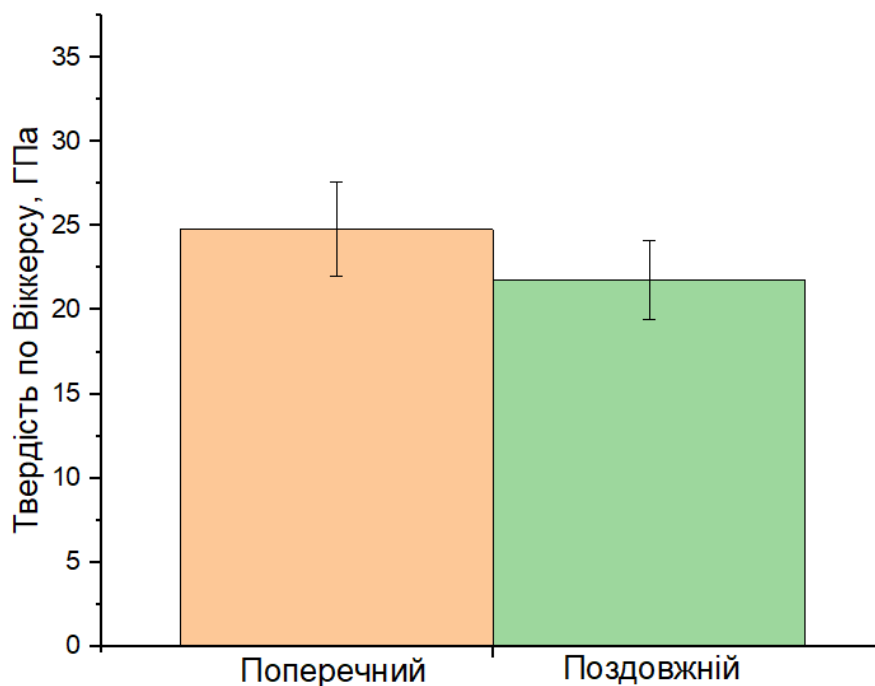


Рисунок 3.5 – Діграма інтегральної мікротвердості поперечної та поздовжньої мікроструктури композиту SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>

Дослідження мікромеханічних властивостей показали, що інтегральна мікротвердість композиту SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>, виміряна при навантаженні

9,8 Н, складає 24 ГПа у поперечному та 21,7 ГПа у поздовжньому напрямку. Меншу твердість у поздовжнього зразка можна пояснити особливостями структури даного матеріалу, а саме, анізотропією мікроструктури. Отримані значення за формулою адитивності задовільно підтверджують експериментальні.

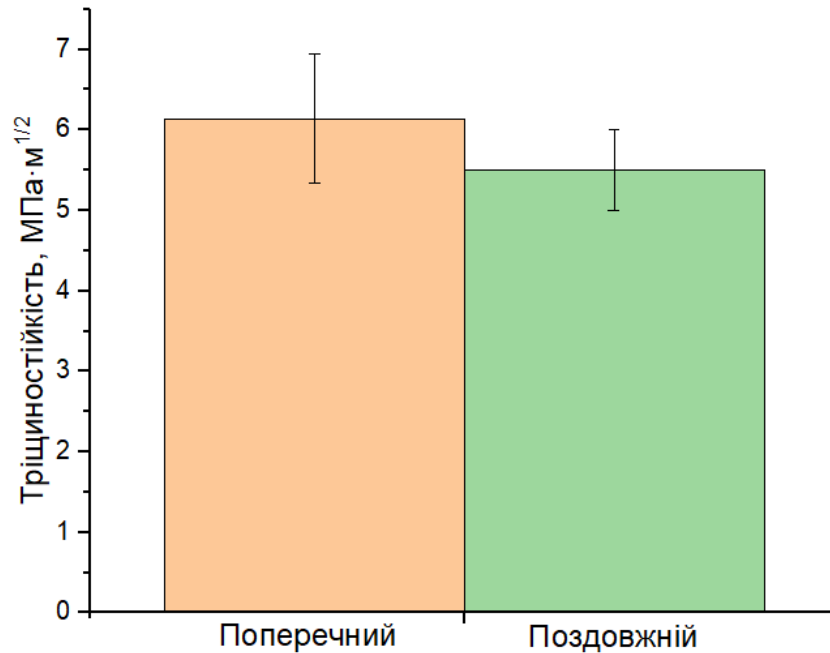


Рисунок 3.6 – Діаграма тріщиностійкості поперечної та поздовжньої мікроструктури композиту  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$

Тріщиностійкість композиту  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ , виміряна методом індентування, склала 6,14 МПа м<sup>1/2</sup> для поперечного та 5,5 МПа м<sup>1/2</sup> для поздовжнього зразка.

На рисунку 3.7. показаний відбиток після індентування пірамідою Вікерса. Видно, що тріщини, що розповсюджуються від кутів відбитка при досягненні армуючої фази або відхиляються від початкового напрямку розповсюдження і огинають перешкоду, або зупиняються. Таким чином, це приводить до збільшення енергії руйнування і, як наслідок, підвищення тріщиностійкості композиту.

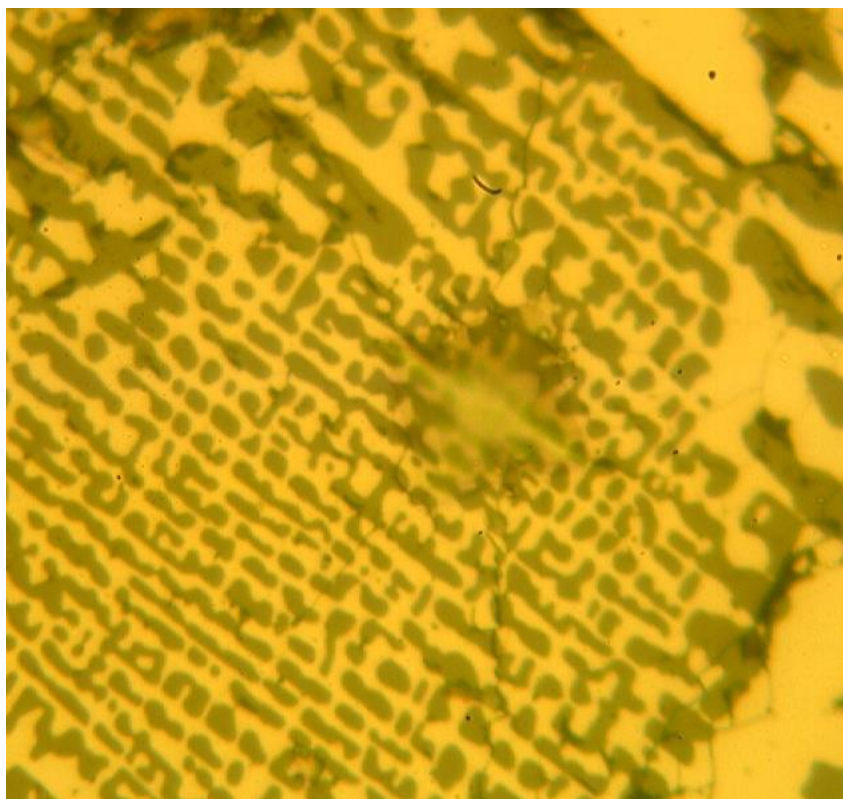


Рисунок 3.7 – Відбиток в мікроструктурі композиту  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ**

Охорона праці вважається однією з найважливіших передумов для забезпечення стабільної та безпечної праці. Вона включає в себе комплекс заходів і політик, які охоплюють правові, соціально-економічні, організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні та медико-профілактичні аспекти, і мають на меті збереження життя, здоров'я та працездатності людей під час виконання трудової діяльності. Умови, в яких проводяться науково-дослідні роботи, повинні гарантувати безпеку праці для інженерів-дослідників. Сучасні методи дослідження обладнання у наукових лабораторіях повинні забезпечувати відсутність травматичних ситуацій для працівників, створювати оптимальні робочі умови та ефективно усувати негативний вплив шкідливих факторів, що можуть призвести до професійних захворювань [30].

Головною метою розділу є розгляд небезпечних факторів, які пов'язані з охороною праці, що можуть виникати під час дослідження структури та властивостей високоентропійних матеріалів. В процесі будуть розглянуті практичні рекомендації для покращення безпеки та здоров'я працівників.

### **4.1 Аналіз умов праці, небезпечних та шкідливих факторів**

Дипломна робота виконується на базі ЦККНО ІМЗ ім. Є. О. Патона в лабораторії під номером 028, яка знаходиться в навчальному корпусі №9. У таблицях 4.1 та 4.2 наведено специфікацію технологічного обладнання та характеристики приміщення, де розташоване робоче місце.

Таблиця 4.1 – Параметри науково-дослідної лабораторії

Довжина, м	11,5
Ширина, м	5,5
Висота, м	4,5
Площа, м <sup>2</sup>	63,25
Об'єм, м <sup>3</sup>	284,625

Таблиця 4.2 Специфікація технологічного обладнання

№	Найменування	Розміри Д/Ш/В	Основні характеристики	Кількість	Позиція на рисунок
1	Сушильна шафа СП- 1130	1200/1894/1312	Номінальна потужність - 10,2 кВт, матеріал – нержавіюча сталь	1	3
2	Верстат електро- ерозійного різання СХ8	1300/1100/1700	Максимальна продуктивність 50- 100 мм <sup>2</sup> /хв.	2	4
3	Установка «Кристал- 206»	-	-	1	8

Відповідно до основних вимог до будівель виробничого призначення, які викладені в ДБН В.2.2-28:2010, висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа – 15 м<sup>3</sup> та 4,5 м<sup>2</sup> відповідно на кожного працівника [31].

У даному випадку площа приміщення складає:

$$S = 11,5 \cdot 5,5 = 63,25 \text{ м}^2, \quad (4.1)$$

а об'єм приміщення:

$$V = 11,5 \cdot 5,5 \cdot 4,5 = 284,625 \text{ м}^3. \quad (4.2)$$

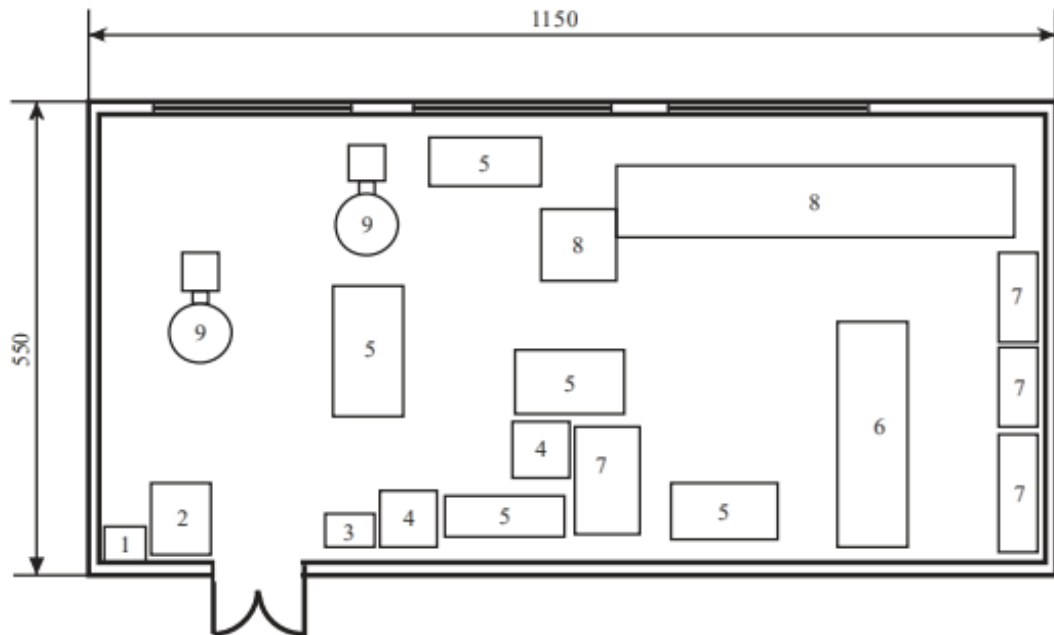
Під час досліджень в лабораторії працює 3 чоловіки, звідки ми отримуємо, що площа на одну людину складає:

$$S_{\text{ч}} = 63,25/3 = 21,0833 \text{ м}^2 / \text{чол.}, \quad (4.3)$$

а об'єм:

$$V_{\text{ч}} = 284,625/3 = 94,875 \text{ м}^3 / \text{чол.} \quad (4.4)$$

Відповідно, приміщення, де відбувається створення та дослідження високоентропійного матеріалу задовольняє основні вимоги для приміщень виробничого призначення за геометричними параметрами. План приміщення можна переглянути на рисунку 4.1.



1 – умивальник; 2 – сейф; 3 – сушильна шафа; 4 – верстат електро-ерозійного різання; 5 – робочий стіл; 6 – установка «Кристал-106»; 7 – шафа; 8 – установка «Кристал-206»; 9 – вакуумна установка

Рисунок 4.1 – План науково-дослідної лабораторії

Виконуючи дану роботу, було виявлено наступні шкідливі фактори: можливе використання шкідливих хімічних речовин, робота за високих температур, робота за підвищеного шуму або вібрації, робота в умовах запилення, а також можливі ергономічні проблеми.

Дана робота, за категорією важкості відповідає значенню «легка, 16(ДСН 3.3.6.042-99 [38]). Обрана категорія має легкі фізичні навантаження, які можуть супроводжуватися деякою фізичною напругою та можуть виконуватися сидячи або стоячи. Також можлива робота пов'язана з ходьбою.

Таблиця 4.3 – Реальні та нормативні характеристики приміщення і розміщення технологічного обладнання

№	Параметр приміщення	Реальне значення	Нормативні значення
1	Площа на 1 працюючого	21,0833	4,5 м <sup>2</sup>
2	Об'єм на 1 працюючого	94,875 м <sup>3</sup>	15 м <sup>3</sup>
3	Мінімальна ширина проходу	1,5	1,5 м

## 4.2 Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення (нормалізації) умов праці

### 4.2.1 Фізичні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів

В лабораторії 028 присутні наступні потенційні причини безпеки:

- Верстат для проведення електроерозійного різання;
- Установка "Кристал - 206" для вирощування кристалів методом безтигельної зонної плавки.

Таблиця 4.6 – Основні фізичні небезпеки, які створюються в технологічному процесі

№ п.п.	Найменування обладнання	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1	Верстат електроерозійного різання	Генератор	Механічний шум від роботи генератора	Робітник
2	«Кристал – 206»	Механічний вакуумний насос вакуумної установки	Механічний шум від роботи вакуумної установки	Робітник

За своїми характеристиками шум, що виникає в лабораторії, можна віднести до сталого типу, оскільки рівень звуку протягом робочого дня залишається майже незмінним і не перевищує 5 децибелів. Залежно від джерел походження, шум поділяється на механічний, що виникає внаслідок роботи вакуумного насоса, та електромагнітний, спричинений діяльністю установки "Кристал – 206". У разі одночасної роботи всього устаткування, рівень шуму може перевищувати встановлені Державними санітарними нормами норми, що може призвести до професійних захворювань. Вимоги до рівня шуму для лабораторій, де проводяться експериментальні роботи, допускаються до 75 децибелів. Під час виконання даної дипломної роботи ці вимоги дотримуються, оскільки рівень шуму в лабораторії 028 складає 65 децибелів (див. таблицю 4.7). Цей показник регулярно вимірюється за допомогою шумовимірника не рідше одного разу протягом кожних шести місяців [32].

Таблиця 4.7 – Реальні та нормативні фактори безпеки, що створюються в технологічному процесі

№	Фактор безпеки	Реальне значення	Нормативні значення
1	Шум	65 дБА	75 дБА

Шум може спричинити різноманітні фізіологічні реакції, патологічні зміни, порушення функціонування організму та механічні ушкодження. Працюючи в умовах високого рівня шуму, продуктивність ручної праці може знизитись до 60%, а за розрахунками цей показник може становити навіть 50%. Слід зазначити, що тривала робота в умовах високого рівня шуму особливо негативно впливає на нервову систему, серцево-судинну систему та органи дихання. Постійна необхідність підвищувати голос за спілкування в умовах виробництва негативно впливає на психічний стан працівників. Для зменшення шкідливого впливу виробничого шуму на працівників шумних приміщень використовуються заходи зі звукоізоляції, звукопоглинання та віброізоляції, а також застосовуються шумопоглинаючі матеріали та шумові

глушники. Крім того, для зменшення впливу шуму на працівників застосовуються індивідуальні засоби захисту від шуму, а також обмежується час перебування в зоні підвищеного шуму [30].

#### 4.2.2 Мікроклімат

Маючи підходящий мікроклімат працюючи в лабораторії – це досить важливий аспект з міркувань охорони праці. Це допоможе забезпечити комфортні умови праці робітникам, що в свою чергу позитивно відобразиться на продуктивності.

Нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні промислових приміщень наведені в таблиця 4.4.

Таблиця 4.4 – Оптимальні величини температури, відносної вологості та швидкості руху повітря робочої зони виробничих приміщень [38]

Період року	Категорія робіт	Температура повітря	Відносна вологість	Швидкість руху повітря, м/сек
Холодний період року	Легка 1б	21 - 23	60 - 40	0,1
Теплий період року		22 - 24	60 - 40	0,2
Виміряні значення	Холодний	19	55	0,1
	Теплий	20	65	0,1

З таблиці 4.4 можна зробити наступні висновки:

- в холодний та теплий періоди температура не потрапляє в оптимальне значення, але знаходиться в межах допустимих значень (табл. 4.5);

- в холодний період року відносна вологість знаходиться в оптимальних межах;
- в теплий період року відносна вологість не потрапляє в оптимальне значення, але знаходиться в межах допустимих значень (табл. 4.5);
- в холодний та теплий періоди швидкість руху повітря знаходиться в оптимальних межах.

Основні причини, чому важливо мати підходящий мікроклімат, включають збереження здоров'я та благополуччя працівників, покращення продуктивності та ефективності роботи, зниження ризику виникнення виробничих нещасних випадків та збереження експериментальних умов.

Таблиця 4.5 – Допустимі умови мікроклімату [38]

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість (%) на робочих місцях – постійних і непостійних
		На постійних робочих місцях	На непостійних робочих місцях	
Холодний період року	Легка 1б	20-24	17-25	75
Теплий період року		21-28	19-30	65 – при 27 °С

#### 4.2.3 Запиленість повітря

Чистоту повітря можна визначити за запиленістю повітря в приміщенні. Оскільки під час роботи по отриманню порошків, могли утворитися дрібнодисперсні частинки, які можуть становити значну небезпеку з точки зору охорони праці. Вдихання цих частинок може призвести до подразнення,

запалення та утворення рубців у дихальних шляхах, а також спричинити розвиток різних респіраторних захворювань.

Окрім того, деякі частинки пилу можуть містити токсичні речовини, такі як хімічні сполуки або важкі метали. Ці речовини можуть проникати в організм через дихальні шляхи та викликати отруєння, ураження органів або навіть ракові захворювання. Крім того, дрібнодисперсні частинки пилу можуть легко розноситись повітрям, спричиняючи контамінацію навколишнього середовища. Особлива небезпека пов'язана з дрібнодисперсним пилом полягає в його здатності до вибуху та пожежі. Деякі види пилу можуть бути вибухонебезпечними, і при наявності джерел запалювання може виникнути вибух або пожежа.

Для зменшення ризику, пов'язаного з дрібнодисперсним пилом, необхідно вживати заходи безпеки. Це включає використання протипилових респіраторів, засобів колективного захисту, систем вентиляції та знежирювання поверхонь, що можуть бути забруднені пилом [39]. Крім того, важливо регулярно контролювати рівень пилу та дотримуватись правил виробничої гігієни та охорони праці для запобігання негативному впливу дрібнодисперсного пилу на здоров'я працівників та навколишнє середовище.



Рисунок 4.2 – Зображення вентиляції

#### 4.2.4 Небезпека ураження людини електричним струмом

Оскільки згідно з вимогами до електробезпеки в навчально-наукових приміщеннях, для протидії ураження струмом від електроприладів, вони мають перевірятися на регулярній основі, а персонал має знати як безпечно виконувати роботи на приборах (ДНАОП 0.00-1.21-98) [40].

Для живлення сушильної шафи та верстата електроерозійного різання в лабораторії 028 використовується струм з напругою 220 В. У той же час, для живлення установки «Кристал 206» використовується струм з напругою 380 В.

Таблиця 4.6 – Основні небезпеки, які створюються в технологічному процесі при роботі з електричними приборами

п.п.	Найменування обладнання	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
	Сушильна шафа	Кожух та корпус	Пошкодження ізоляції, помилкове вимикання, замкнення дроту на землю	Робітник, технологічний процес
	Верстат електроерозійного різання	Кожух та корпус, дріт	Пошкодження ізоляції, помилкове вимикання, замкнення дроту на землю	Робітник, технологічний процес
	«Кристал – 206»	Кожух та корпус	Пошкодження ізоляції, помилкове вимикання, замкнення дроту на землю	Робітник, технологічний процес

#### 4.2.5 Пожежна безпека

Працівники, які знаходяться та проводять дослідити на базі лабораторії 028, мають обов'язково пройти інструктаж по пожежній безпеці. Лабораторія, для уникнення неочікуваних ситуацій, спричинений зношенням деталей, має проходити пожежно-технічні перевірки.

У лабораторії 028 можливі пожежі внаслідок горіння твердих речовин з або без тління. Приміщення відноситься до категорії Г щодо вибухонебезпеки та пожежної небезпеки [33]. Зона, яка може спричинити пожежу, належить до класу II-Па. Вибухонебезпечна зона відноситься до другого класу [34].

Пожежі в лабораторії можуть виникнути внаслідок таких факторів: електричні несправності, що призводять до короткого замикання; недотримання правил пожежної безпеки при використанні електричних побутових пристроїв; неналежне поводження з відкритим вогнем; виробничі роботи, пов'язані з використанням вогню.

Таблиця 4.7 – Основні пожежні небезпеки, які створюються в технологічному процесі

№ п.п.	Найменування обладнання	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1	2	3	4	5
1	Сушильна шафа	Блок електроніки, нагрівальні елементи	коротке замикання; порушення правил пожежної безпеки; необережне користування відкритим вогнем	Робітник, технологічний процес

Продовження таблиці 4.7

1	2	3	4	5
2	Верстат електроерозійного різання	Генератор	коротке замикання; порушення правил пожежної безпеки; необережне користування відкритим вогнем	Робітник, технологічний процес
3	«Кристал – 206»	Індуктор	коротке замикання; порушення правил пожежної безпеки; необережне користування відкритим вогнем	Робітник, технологічний процес

В будівлі вжито різноманітні заходи для пожежної безпеки, включаючи технічні, організаційні та режимні заходи. У лабораторії встановлено 4 пожежні сигналізатори ИП-105, які підключені до основної панелі пожежної сигналізації. У коридорі є пожежний кран з пожежним рукавом. Згідно з вимогами ДБН В.1.1-7-2002, будівля відповідає I ступеню вогнестійкості, що передбачає використання негорючих матеріалів у конструкціях. Основні заходи по пожежній безпеці включають перевірку засобів пожежогасіння та систем пожежної сигналізації, стану електричної проводки, щорічне тестування ізоляції з використанням високої напруги та обережне поводження з легкозаймистими матеріалами [35].

### 4.3 Застосування засобів індивідуального захисту

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) застосовуються для відвертання або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів на робочому місці,

а також для захисту від забруднення. Вони використовуються в ситуаціях, коли безпеку роботи неможливо забезпечити за допомогою конструкції обладнання, організації виробничих процесів, архітектурно-планувальних рішень та колективних засобів захисту.

Для безпечного виконання даної науково-дослідної роботи необхідно застосовувати такі засоби індивідуального захисту:

1. Засоби захисту органів слуху: протишумові навушники.
2. Засоби захисту органів дихання: фільтрувальні пристрої (протипилові, протигазові, протиаерозольні).
3. Одяг спеціальний захисний (спецодяг): халати, фартухи, плащі; захисний одяг від механічних ушкоджень (проколювання, різання); захисний одяг від електричних ушкоджень (електричного струму та електричної дуги); бризок металу та інфрачервоного випромінювання; захисний одяг під час зварювання; теплозахисний одяг.
4. Засоби захисту ніг та стегон: електроізолювальні чоботи, черевики, боти, калоші.
5. Засоби захисту шкіри (засоби дерматологічні): захисні креми, мазі, гелі; очисники шкіри; репаративні засоби [36].

Застосування індивідуального захисту обумовлене необхідністю забезпечення ефективного захисту працівників у виробничих умовах, коли інші методи захисту, такі як зміна технології, автоматизація, герметизація устаткування, ефективна вентиляція тощо, не можуть забезпечити достатню безпеку робіт. На підставі досвіду фахівців з промислової гігієни і профзахворювань стверджується, що використання індивідуального захисту є ненадійним методом в системі захисту від шкідливих виробничих факторів і повинно застосовуватися тільки тоді, коли інші більш ефективні методи неможливі або не можуть знизити шкідливу дію до безпечного рівня [37].

## 5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 5.1 Науково-технічна актуальність

В даній роботі був досліджений спрямовано закристалізований високоентропійний диборидний сплав  $\text{SiC}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ . У сплавів даного типу досить широкий спектр застосувань.

Він може бути використаний в аерокосмічній техніці. Найпопулярнішими матеріалами для даної категорії є: алюміній з густиною  $2.7 \text{ г/см}^3$ , титан з густиною  $4.5 \text{ г/см}^3$  та інші матеріали. Завдяки тому, що сплав, який досліджується в даній роботі є високоентропійним на основі кераміки, ми маємо змогу отримати кращі механічні властивості, а також отримати кращу термостійкість, маючи при цьому досить низьку густину ( $3,21 \text{ г/см}$ ), що є однією з основних вимог для застосування в аерокосмічній галузі.

Їх можуть використовувати в автомобільній промисловості, оскільки завдяки своїм механічним властивостям та стійкості до високих температур, з них можуть виготовляти деталі двигунів, систем вихлопу, гальм, а також інших компонентів, які працюють в умовах високих навантажень та температур.

Існує також можливість використання даних сплавів в медицині для виготовлення протезів, імплантатів та медичних інструментів. Такі їх властивості як механічні міцність та стійкість до корозії є важливими факторами для їх успішного застосування в даній галузі.

### 5.2 Розрахунок планових витрат

Розрахунок всіх витрат, пов'язаних з виконанням теми, дозволяє встановити її собівартість або кошторисну вартість. Планування спрямоване на зниження трудових і матеріальних витрат з метою досягнення найкращих результатів при найменших витратах.

Планова собівартість визначається наступними складовими витратами: оплата праці науково-дослідницького персоналу, єдиний соціальний внесок, вартість матеріалів, вартість спеціального обладнання, витрати на службові відрядження, інші прямі витрати по темі та накладні витрати.

Розрахунок собівартості є важливим етапом в процесі планування і оцінки витрат на виконання дослідницької теми. Він дозволяє оцінити необхідні ресурси, які знадобляться для реалізації проекту, і забезпечити ефективне використання цих ресурсів. Планування витрат допомагає досягти економічної ефективності проекту, забезпечити оптимальне використання ресурсів та знизити ризики невиконання бюджету.

### **5.2.1 Витрати на оплату праці науково-дослідницькому персоналу**

У цій категорії витрат враховуються витрати на заробітну плату прямих виконавців теми, а заробітна плата адміністративно-управлінського персоналу та працівників дослідних виробництв включається в кошторисну вартість теми через розділ "Накладні витрати". Важливо враховувати, що для тем, які фінансуються з державного бюджету, прибуток не враховується, тому в цій статті витрат включається тільки основна заробітна плата без урахування премій та інших виплат, що здійснюються з прибутку.

Витрати на оплату праці розраховують на основі даних про трудомісткість окремих робіт по темі (табл. 5.1) та посадових окладів безпосередніх їх виконавців (табл. 5.2).

Загальна трудомісткість робіт, що виконуються безпосередньо студентом (інженером-дослідником), визначається навчальним планом відповідного напрямку підготовки.

Таблиця 5.1 – Трудомісткість етапів

Найменування робіт по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів		
	Провідний науковий співробітник	Інженер-дослідник	Лаборант
Підготовчий етап	3	6	6
Проведення експерименту	5	21	9
Написання записки	9	25	–
Оформлення, перевірка та захист	6	6	–
Разом за виконавцями теми	23	58	15

Підраховуючи денну середню заробітну плату для кожної категорії виконавців та множачи її на плановий обсяг робіт, визначається плановий фонд заробітної плати всіх виконавців. Отримані результати розрахунку фонду заробітної плати для даної теми наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада	Планова трудомісткість, людино-днів	Заробітна плата, грн		
		Місячний оклад	Денна заробітна плата	Усього за виконавцями
Провідний науковий співробітник	23	22276	1050.75	24167.35
Інженер-дослідник	58	8910	420.28	24376.41
Лаборант	15	6688	315.47	4732.07
Разом				53275.84

### 5.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (підсумок по табл.5.2).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22, \quad (5.1)$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 53275,84 \cdot 0,22 = 11\,720,68 \text{ грн.}$$

### 5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Вартість матеріалів, необхідних для здійснення даної науково-дослідної роботи (НДР), можна визначити шляхом множення ціни одиниці матеріалу на загальний обсяг використаного матеріалу. Результати розрахунків вартості матеріалів наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вартість матеріалів, необхідних для виконання НДР

Найменування матеріалів	Стандарт	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1	2	3	4	5	6
Порошок В <sub>4</sub> С	98%	кг	0.1	750	75
Порошок ТiВ <sub>2</sub>	99,5%	кг	0.05	1 450	72.5

## Продовження таблиці 5.3

1	2	3	4	5	6
Порошок ZrB <sub>2</sub>	99,5%	кг	0.05	6100	305
Порошок MoB <sub>2</sub>	99,5%	кг	0.05	29 540	1477
Порошок NbB <sub>2</sub>	99,5%	кг	0.05	11077	553.85
Порошок TaB <sub>2</sub>	99,5%	кг	0.05	11077	553.85
Разом	–	–	–	–	3037.2

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо на рівні 10 % від планової вартості загальних витрат на матеріали:

$$T_B = 3037,2 \cdot 0,1 = 303,73 \text{ грн.}$$

У такому разі загальна сума витрат на закупівлю матеріалів та їх транспортування буде становити:

$$B_M = 3037,2 + 303,73 = 3\,340,93 \text{ грн.}$$

#### 5.4.2 Витрати на спеціальне обладнання

Для проведення досліджень використовуються наявні засоби обладнання, такі як установка для безтигельної зонної плавки Кристал-206, металографічний мікроскоп NEOPHOT-21, растровий електронний мікроскоп Selmi РЭМ-106И, RIGAKU ULTIMA IV та мікротвердомір MHV-1000. Додаткового спеціального обладнання не придбавалося.

#### 5.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій

У виконанні даної роботи сторонні організації участі не приймали.

### 5.2.6 Витрати на службові відрядження

Дослідження були проведені з використанням наявного обладнання, яке знаходиться в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема в Інституті матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона. Витрати на виробничо-наукові відрядження не передбачені, оскільки всі роботи були здійснені на місці, у лабораторіях.

### 5.2.7 Інші прямі невраховані витрати по темі

Ця стаття охоплює всі додаткові витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідних робіт, які не були враховані в попередніх статтях. Серед цих витрат включаються оплата фахівців з інших організацій, консультаційні послуги, використання обладнання інших організацій та інші витрати, пов'язані з цим. При проведенні роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10 % від суми врахованих витрати на виконання НДР.

$$I_{\text{в}} = (ЗП + \text{ЄСВ} + V_{\text{м}}) \cdot 0,1. \quad (5.2)$$

Наразі  $I_{\text{в}}$  буде становити:

$$I_{\text{в}} = (53275,84 + 11\,720,68 + 3\,340,93) \cdot 0,1 = 6\,833,74 \text{ грн.}$$

### 5.2.8 Накладні витрати

Ця стаття включає витрати, пов'язані з керівництвом організацією, що виконує дану роботу, а також витрати на винахідництво і раціоналізацію. Вона також охоплює витрати на амортизацію основних засобів, на науково-технічну інформацію, на створення нормальних умов праці і забезпечення техніки

безпеки. Крім того, вона включає витрати на оплату банківських послуг, податки, збори та інші обов'язкові платежі.

Накладні витрати ( $H_B$ ) по НДР визначаються у відсотках до прямих витрат. У Інституті проблем матеріалознавства відсоток накладних витрат складає 20 % від суми всіх прямих витрат по ДР:

$$H_B = (ЗП + ЄСВ + V_M + I_B) \cdot 0,2. \quad (5.3)$$

Наразі  $H_B$  буде становити:

$$H_B = (53275,84 + 11\,720,68 + 3\,340,93 + 6\,833,74) \cdot 0,2 = 15\,034,23 \text{ грн.}$$

### 5.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова калькуляція вартості проведення досліджень по темі складається на підставі виконаних розрахунків та нормативних даних (табл.5.4).

Таблиця 5.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Назва статей	Умовне позначення	Сума, грн.	Обґрунтування
1	2	3	4
Витрати на оплату праці	ЗП	53275.84	За розрахунками
Єдиний соціальний внесок	ЄСВ	11720.68	22 % від ЗП
Матеріали для проведення досліджень	$V_M$	3340.93	За розрахунками
Витрати на спеціальне обладнання	$V_{об}$	–	Не планується
Витрати на послуги сторонніх організацій	$V_{со}$	–	Не планується

Продовження таблиці 5.4

1	2	3	4
Інші прямі витрати	$I_B$	6833.74	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
Накладні витрати	$H_B$	15034.23	20 % від усіх прямих витрат
Всього		90205.42	Сума попередніх статей

### 5.3 Науково-технічна ефективність НДР

Дослідження, що проводяться в цій роботі, мають пошуковий і теоретичний характер. Розрахунок очікуваного економічного ефекту науково-дослідної роботи є необхідним для визначення його доцільності. Проте такий розрахунок можна здійснити лише для досліджень, що прямо спрямовані на створення нових матеріалів, покращення якості продукції та розробку нових конструкцій. У зв'язку з цим, рекомендується використовувати систему оцінки економічної ефективності за такими показниками:

- важливість розробки;
- можливість використання результатів;
- теоретичне значення та рівень новизни дослідження;
- складність виконання теми.

Частку сумарного річного економічного ефекту, що утвориться за кожною з перелічених шкал, позначають умовно відповідним номеру шкали коефіцієнтом ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ). Наведемо докладніше систему оцінки за кожною шкалою. Першою розглянемо шкалу важливості розробки [43].

Коефіцієнт  $K_1$  може приймати наступні значення:

– ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;

– робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;

– робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;

– робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;

– робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K2 може приймати такі значення:

– результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;

– результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією 3 бали;

– результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями 5 балів.

– результатами розробки можуть користуватися споживачі в межах однієї галузі – 8 балів;

– результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K3 може приймати такі значення:

– робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

– під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

– внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

– внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або щонебудь подібне – 6 балів;

– отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт  $K_4$  може приймати такі значення:

– роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

– роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

– роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

– робота виконується багатьма підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;

– робота виконується багатьма організаціями, витрати більше 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4. \quad (5.4)$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 1.5 становить:

$$B = 1 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 5 = 240.$$

Таблиця 5.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показники оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристика даної розробки	Кількість балів
Важливість розробки	К <sub>1</sub>	Робота ініціативна, не є завданням будь-яких директивних органів або частиною комплексної програми	1
Можливість використання результатів розробки	К <sub>2</sub>	Результатами розробки можуть користуватися споживачі однієї галузі	8
Теоретична значимість та рівень новизни розробки	К <sub>3</sub>	Внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне	6
Складність проведення дослідження	К <sub>4</sub>	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 грн.	5

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot V_{\text{НДР}}, \quad (5.5)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3, для розрахунку обираємо  $E_n = 0,25$ );

$V_{\text{НДР}}$  – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 5.4);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 336 - 0,25 \cdot 90205,42 = 145448,64 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності  $E_e$ . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}. \quad (5.6)$$

У нашому прикладі  $E_e$  буде становити:

$$E_e = \frac{145448,64}{90205,42} = 1,612.$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,612 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

#### **5.4 Висновки до розділу**

Під час виконання цього розділу було здійснено розрахунок загальних витрат на науково-дослідну роботу, який склав суму в гривнях. Крім того, проведений економічний аналіз підтвердив доцільність цього проекту з економічної точки зору.

## ВИСНОВКИ

Спрямовано закристалізований сплав системи  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  було отримано методом безтигельної зонної плавки.

Досліджено мікроструктуру композиту в площині поперечного та поздовжнього перерізу відносно напрямку вирощування. Встановлено, що він складається з матриці з карбіду кремнію спрямовано армованої високоентропійним диборидом  $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ . Показано, що матеріал є заевтектичним, оскільки спостерігаються крупні включення дибориду, а також що фази мають пластинчасту форму.

Аналіз хімічного складу підтвердив наявність кремнію (Si) та вуглецю (C) в темній карбіду кремнію фазі та наявність Ti, Zr, Hf, Nb та Ta у світлій армуючій фазі дибориду.

Дослідження фазового складу показали, що спрямовано закристалізований композит  $\text{SiC}-(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$  складається з таких фаз як: SiC та  $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ . Було виявлено переважні орієнтації фази високоентропійного бориду: (101) та (100). Також було визначено, що (111) – це переважна орієнтація SiC.

Дослідження мікромеханічних властивостей показали, що інтегральна мікротвердість складає 24 ГПа у поперечному та 21,7 ГПа у поздовжньому напрямках при навантаженні в 9,8 Н. Тріщиностійкість складає 6,14 МПа для поперечного та 5,5 МПа для поздовжнього перетину. Отримані дані задовільно співпадають з теоретичними та розрахованими по правилу сумішей.

Були проведені дослідження актуальності виконання даної роботи, а також були проаналізовані собівартість та економічна ефективність науково-дослідної роботи з урахуванням ресурсних витрат. Також були сформовані основні вимоги до охорони праці під час виконання даної наукової роботи.

## CONCLUSION

The directionally crystallized alloy SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub> was obtained by the method of crucibleless zone melting.

The samples transversely and longitudinally cuts were studied. The analysis of microstructure shows that the composite has two phases: the dark SiC and the light (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>. It was established that the material is super eutectic, as we can see big diboride phases and also, their shape is lamellar.

The chemical composition confirmed the existence of silicon (Si) and carbide (C) in the dark phase and the existence of Ti, Zr, Hf, Nb and Ta in the light phase.

The study of phases composition also showed, that the composite SiC-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub> consist of such phases as: SiC and (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B<sub>2</sub>. The preferred orientations for high entropy alloy were found as (101) and (100). Also, the preferred orientation for SiC was found to be (111).

Analyses of micromechanical properties showed that the crack resistance is 6,14 MPa for transverse cut and 5,5 MPa for longitudinal cut, and integral microhardness is 24 GPa for transverse cut and 21,7 GPa for longitudinal cut. The load was 9,8 H. The received data is proved by the theoretical information.

The relevance of this work was studied and also the estimated cost and economic efficiency were studied considering the resources usage. The production conditions are analyzed and the basic requirements to labor protection during performance of research work on the set subjects are formulated.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Choyke W. J. Physical Properties of SiC [Electronic resource] / W. J. Choyke, G. Pensl // MRS Bulletin. – 1997. – Vol. 22, no. 3. – P. 25–29. – Mode of access : <https://doi.org/10.1557/s0883769400032723>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
2. Recent advances in joining of SiC-based materials (monolithic SiC and SiCf/SiC composites): Joining processes, joint strength, and interfacial behavior [Electronic resource] / Guiwu Liu, Xiangzhao Zhang, Jian Yang [et al.] // Journal of Advanced Ceramics. – 2019. – Vol. 8, no. 1. – P. 19–38. – Mode of access : <https://doi.org/10.1007/s40145-018-0297-x> . – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
3. Ruff M. SiC devices: physics and numerical simulation [Electronic resource] / M. Ruff, H. Mitlehner, R. Helbig // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1994. – Vol. 41, no. 6. – P. 1040–1054. – Mode of access : <https://doi.org/10.1109 /16.293319>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
4. Quantitative inspection of grain-scale chemical inhomogeneities in high-entropy AlB<sub>2</sub>-type transition metal diborides [Electronic resource] / F. Monteverde, Federico Saraga, Mattia Gaboardi [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. – 2022. – Mode of access : <https://doi.org/10.1111/jace.18619>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
5. Матеріалознавство тугоплавких металів та сполук : навч. посіб. / Г. П. Кисла [та ін.]. – Київ : Центр учб. літ., 2017. – 320 с.
6. Katoh Y. Silicon carbide and its composites for nuclear applications – Historical overview [Electronic resource] / Yutai Katoh, Lance L. Snead // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 526. – P. 151849. – Mode of access : <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151849>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

7. Silicon carbide detectors for sub-GeV dark matter [Electronic resource] / Sinéad M. Griffin [et al.] // *Physical Review D*. – 2021. – Vol. 103, no. 7. – Mode of access : <https://doi.org/10.1103/physrevd.103.075002>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

8. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics [Electronic resource] / Joshua Gild, Yuanyao Zhang, Tyler Harrington [et al.] // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6, no. 1. – Mode of access : <https://doi.org/10.1038/srep37946>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

9. George E. P. High-entropy alloys [Electronic resource] / Easo P. George, Dierk Raabe, Robert O. Ritchie // *Nature Reviews Materials*. – 2019. – Vol. 4, no. 8. – P. 515–534. – Mode of access : <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

10. Zhang W. Science and technology in high-entropy alloys [Electronic resource] / Weiran Zhang, Peter K. Liaw, Yong Zhang // *Science China Materials*. – 2018. – Vol. 61, no. 1. – P. 2–22. – Mode of access : <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

11. Vaidya M. High-entropy alloys by mechanical alloying: A review [Electronic resource] / Mayur Vaidya, Garlapati Mohan Muralikrishna, Budaraju Srinivasa Murty // *Journal of Materials Research*. – 2019. – Vol. 34, no. 5. – P. 664–686. – Mode of access : <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.37>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

12. Metallic Glasses - Properties and Processing [Electronic resource] / ed. by H. Huang. – [S. l.] : InTech, 2018. – Mode of access : <https://doi.org/10.5772/intechopen.72335>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

13. Basu B. Processing and properties of monolithic TiB<sub>2</sub>-based materials [Electronic resource] / B. Basu, G. B. Raju, A. K. Suri // *International Materials Reviews*. – 2006. – Vol. 51, no. 6. – P. 352–374. – Mode of access :

<https://doi.org/10.1179/174328006x102529>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

14. Munro R. G. Material properties of titanium diboride [Electronic resource] / R. G. Munro // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – 2000. – Vol. 105, no. 5. – P. 709. – Mode of access : <https://doi.org/10.6028/jres.105.057>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

15. Zhang S. C. Pressureless Densification of Zirconium Diboride with Boron Carbide Additions [Electronic resource] / S. C. Zhang, G. E. Hilmas, W. G. Fahrenholtz // Journal of the American Ceramic Society. – 2006. – Vol. 89, no. 5. – P. 1544–1550. – Mode of access : <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.00949.x>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

16. Gupta N. Microstructure Development, Nanomechanical, and Dynamic Compression Properties of Spark Plasma Sintered  $TiB_2$ -Ti-Based Homogeneous and Bi-layered Composites [Electronic resource] / Neha Gupta, Venkitanarayanan Parameswaran, Bikramjit Basu // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2014. – Vol. 45, no. 10. – P. 4646–4664. – Mode of access : <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2383-1>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

17. Effect of Fe and Cr Addition on the Sintering Behavior of  $ZrB_2$  Produced by Self-Propagating High-Temperature Synthesis [Electronic resource] / Suman Kumari Mishra, Swapan Kumar Das, Ajoy Kumar Ray [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. – 2004. – Vol. 85, no. 11. – P. 2846–2848. – Mode of access : <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00540.x>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

18. Synthesis of group IV and V metal diboride nanocrystals via borothermal reduction with sodium borohydride [Electronic resource] / Luca Zoli, Pietro Galizia, Laura Silvestroni [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. – 2018. – Vol. 101, no. 6. – P. 2627–2637. – Mode of access :

<https://doi.org/10.1111/jace.15401>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

19. Ultrahigh temperature ceramics (UHTCs) based on  $ZrB_2$  and  $HfB_2$  systems: Powder synthesis, densification and mechanical properties [Electronic resource] / Guo-Jun Zhang, Wei-Ming Guo, De-Wei Ni [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2009. – Vol. 176. – P. 012041. – Mode of access : <https://doi.org/10.1088/1742-6596/176/1/012041>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

20. Electrical and thermophysical properties of  $ZrB_2$  and  $HfB_2$  based composites [Electronic resource] / Manab Mallik, Ansu J. Kailath, K.K. Ray [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2012. – Vol. 32, no. 10. – P. 2545–2555. – Mode of access : <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.02.013>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

21. Physical properties of  $NbB_2$  under pressure using quantum ESPRESSO codes [Electronic resource] / Tara Prasad, Mahesh Chandra Shah, Pankaja Singh [et al.] // INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHOTONICS, METAMATERIALS & PLASMONICS: PMP-2019, Noida, India. – [S. l.], 2019. – Mode of access : <https://doi.org/10.1063/1.5120915>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

22. DEMIRSKYI D. Fabrication, microstructure and properties of in situ synthesized  $B_4C$ ;  $NbB_2$  eutectic composites by spark plasma sintering [Electronic resource] / Dmytro DEMIRSKYI, Yoshio SAKKA // Journal of the Ceramic Society of Japan. – 2015. – Vol. 123, no. 1433. – P. 33–37. – Mode of access : <https://doi.org/10.2109/jcersj2.123.33>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

23. Zhao W. J. Structural, mechanical, and electronic properties of,  $TaB$ , and  $IrB$ : First-principle calculations [Electronic resource] / Wen Jie Zhao, Yuan Xu Wang // Journal of Solid State Chemistry. – 2009. – Vol. 182, no. 10. – P. 2880–2886. – Mode of access : <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2009.07.054>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

24. Zhang X. Synthesis, densification, and mechanical properties of TaB<sub>2</sub> [Electronic resource] / Xiaohong Zhang, Gregory E. Hilmas, William G. Fahrenholtz // *Materials Letters*. – 2008. – Vol. 62, no. 27. – P. 4251–4253. – Mode of access : <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.06.052>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
25. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys [Electronic resource] / Simbarashe Fashu, Mykhaylo Lototsky, Moegamat Wafeeq Davids [et al.] // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 186. – P. 108295. – Mode of access : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108295>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
26. Mühlbauer A. History of induction heating and melting / A. Mühlbauer. – Essen : Vulkan, 2008. – 202 p.
27. Alosime E. M. The Oxidation Behavior of ZrB<sub>2</sub>-SiC Ceramic Composites Fabricated by Plasma Spray Process [Electronic resource] / Eid M. Alosime, Mohammed S. Alsuhybani, Mohammed S. Almeataq // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, no. 2. – P. 392. – Mode of access : <https://doi.org/10.3390/ma14020392>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
28. Tokita M. Progress of Spark Plasma Sintering (SPS) Method, Systems, Ceramics Applications and Industrialization [Electronic resource] / Masao Tokita // *Ceramics*. – 2021. – Vol. 4, no. 2. – P. 160–198. – Mode of access : <https://doi.org/10.3390/ceramics4020014>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
29. Pressureless densification of ZrB<sub>2</sub>-SiC composites with vanadium carbide [Electronic resource] / J. Zou, Guo-Jun Zhang, Yan-Mei Kan [et al.] // *Scripta Materialia*. – 2008. – Vol. 59, no. 3. – P. 309–312. – Mode of access : <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.03.029>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
30. Охорона праці та цивільний захист [Текст] : навч. посіб. / О. Г. Левченко, О.І. Полукаров, В.В. Зацарний [та ін.] ; [за ред. О. Г. Левченка]. – Київ : Основа, 2019. – 472 с.

31. Будинки адміністративного та побутового призначення [Текст] : ДБН В.2.2- 28:2010. – [Чинний від 2011-10-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 52 с.
32. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвучу та інфразвучу [Текст] : ДСН 3.3.6.037-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я України. Головне санітарно-епідеміологічне управління, 1999. – 34 с.
33. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Текст] : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. – [Чинний від 2017-01-01]. – Київ : Національний стандарт України, 2016. – 34 с.
34. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників [Текст] : НАПБ Б.01.008-2018. – [Чинний від 2018-03-30]. – Київ : Міністерство внутрішніх справ України, 2018. – 24 с.
35. Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд [Текст] : ДБН В2.5-13-98. – [Чинний від 1999-04-01]. – Київ : Держбуд України, 1999. – 247 с.
36. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація [Текст] : ДСТУ 7239:2011. – [Чинний від 2011-08-01]. – Київ : Національний стандарт України, 2011. – 11 с.
37. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація [Текст] : ДСТУ EN 133:2005. – [Чинний від 2005-06-14]. – Київ : Національний стандарт України, 2006. – 14 с.
38. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Текст] : ДСН 3.3.6.042 – 99. – [Чинний від 01.12.99]. – Київ : 1999. – 10 с
39. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Текст] : ДБН В.2.5 67:2013. – [Чинний від 01.01.2014]. – Київ : Держстандарт України, 2014. – 240 с.

40. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : ДНАОП 0.00-1.21-98. – [Чинний від 09.01.1998]. – Київ : 1998. – 394 с.
41. Meyers M. Mechanical Behavior Of Materials / Marc Meyers, Krishan Chawla. – [S. l.] : Meyers, 2007. – 680 p.
42. Ritchie R. O. The conflicts between strength and toughness [Electronic resource] / Robert O. Ritchie // Nature Materials. – 2011. – Vol. 10, no. 11. – P. 817 822. – Mode of access: <https://doi.org/10.1038/nmat3115>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.
43. Магістерська дисертація за освітньо-професійною програмою : рекомендації до проєктування : навч. посіб. для студ. спеціальності 132 “Матеріалознавство” освітньої програми “Нанотехнології та комп’ютерний дизайн матеріалів” : 2 частини [Електронний ресурс] / НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” ; уклад.: А. М. Степанчук, А. В. Мініцький, С. В. Нараєвський. – Частина 2. – Київ : НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2021. – 87 с. – Режим доступу: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45852/1/Magistr\\_dys\\_rekom.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45852/1/Magistr_dys_rekom.pdf). – Назва з екрана. – Дата звернення: 19.05.2023.