

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
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Структура та властивості спрямовано закристалізованого
сплаву системи $V_4C-(Ti,Zr,Mo,Nb,Ta)B_2$ »

Виконавля:

студентка IV курсу, групи ФН-91

Кривенко Кіра Василівна _____

Керівник:

Завідувач кафедрою, д. т. н., професор

Богомол Юрій Іванович _____

Консультант з економічно-організаційного розділу:

Доцент, к. е. н., доцент

Нараєвський Сергій Вікторович _____

Консультант з охорони праці:

Завідувач кафедри ОППЦБ, д. т. н., професор

Левченко Олег Григорович _____

Нормоконтроль:

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.

Студентка Кривенко К. В.

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
Кривенко Кірі Василівні

1. Тема роботи «Структура та властивості спрямовано закристалізованого сплаву системи $B_4C-(Ti,Zr,Mo,Nb,Ta)B_2$ », керівник роботи Богомол Юрій Іванович, професор, доктор техн. наук, затверджені наказом по університету від «01» червня 2023 р. № 2122-с.

2. Термін подання студентом роботи 12.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Аналіз сучасного стану виробництва високотемпературних матеріалів на основі карбіду бору з спрямовано-армованими включеннями диборидів перехідних металів. Впровадження нових методів дозволить визначити перспективні шляхи отримання виробів з кращими механічними властивостями для використання в авіакосмічній

техніці. Обраний технологічний процес має забезпечувати готовий матеріал відповідними необхідними властивостями.

Організаційно-економічний розділ має забезпечити ефективність виконання роботи та оцінити потенційність перспективи даної роботи.

Розділ охорони праці має забезпечити безпеку працівників та виявити потенційні загрози, які можуть виникнути під час проведення досліджень.

4. Зміст роботи:

- провести аналіз сучасного стану виробництва високотемпературних матеріалів на основі карбіду бору з спрямовано-армованими включеннями диборидів перехідних металів;
- отримати матеріал методом безтигельної зонної плавки;
- дослідити структуру та механічні властивості матеріалу $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$;
- визначити та обґрунтувати необхідну кількість робітників, планової калькуляції кошторисної вартості та показники продуктивності та актуальності роботи;
- виявити потенційні загрози під час проведення дослідження та розробити заходи для їх урегулювання.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: технологічна схема одержання сплаву системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$, мікроструктура матеріалу системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$, дифрактограма матеріалу системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$, залежність механічних властивостей матеріалу від швидкості вирощування кристалів.

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 25.10.2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Підготовка експериментального матеріалу для дослідження	07.02	
2	Підготовка ілюстративного матеріалу досліджень	17.04	
3	Написання тексту роботи	24.04	
4	Підготовка презентації	05.06	
5	Оформлення роботи	10.06	
6	Захист дипломної роботи	19.06	

Студент

Кіра КРИВЕНКО

Керівник

Юрій БОГОМОЛ

РЕФЕРАТ

Робота вміщує: 81 сторінку; 17 рисунків; 20 таблиць; 57 літературних джерел.

БЕЗТИГЕЛЬНА ЗОННА ПЛАВКА, ВИСОКОЕНТРОПІЙНІ БОРИДИ, ДИБОРИДИ ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ, КАРБІД БОРУ, СПРЯМОВАНО-АРМОВАНІ КОМПОЗИТИ.

У цій роботі наведено огляд сучасного стану теорії та технології отримання матеріалу на основі карбіду бору (B_4C) спрямовано армовані диборидами перехідних металів.

Об'єктом дослідження є спрямовано-армований композит системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$.

Метою роботи є дослідження структури та механічних властивостей спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$.

Методи дослідження:

- металографічний аналіз;
- електронна мікроскопія;
- рентгеноструктурний аналіз;
- дослідження мікротвердості та тріщиностійкості.

Було отримано зразок спрямовано-армованого матеріалу системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$ методом безтигельної зонної плавки за різних швидкостей вирощування кристалів: 1 мм/хв, 2 мм/хв, 3 мм/хв та 4 мм/хв. Аналіз мікроструктури, хімічного та фазового складу показав наявність двох фаз, а саме, карбіду бору та високоентропійного бориду $(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$. Встановлено, що за умови збільшенні швидкості вирощування кристалів стрижневі включення зменшуються в розмірах, а їх кількість зростає.

Дослідження механічних властивостей показало збільшення мікротвердості та тріщиностійкості з ростом швидкості вирощування кристалів. Отриманий діапазон значень відповідає теоретичним даним.

ABSTRACT

The work contains: 81 pages; 17 drawings; 20 tables; 57 literary sources.

BORON CARBIDE, CRUCIBLELESS ZONE MELTING, DIBORIDES OF
TRANSITION METALS, HIGH-ENTROPY BORIDES.

This work provides an overview of the current state of the theory and technology of material production based on boron carbide (B_4C) directionally reinforced with transition metal diborides.

The object of the research is the directional-reinforced composite of the B_4C -(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta) B_2 system.

The aim of the work is to study the structure and mechanical properties of the directionally crystallized eutectic alloy B_4C -(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta) B_2 .

Research methods:

- metallographic analysis;
- electron microscopy;
- X-ray phase analysis;
- research of microhardness and crack resistance.

A sample of the directional-reinforced material of the B_4C -(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta) B_2 system was obtained by the needleless zone melting method at crystal growth rates of: 1 mm/min, 2 mm/min, 3 mm/min and 4 mm/min. Analysis of the microstructure, chemical and phase composition showed the presence of two phases, namely, boron carbide and high-entropy boride (Ti, Zr, Mo, Nb, Ta) B_2 . It was established that with an increase in the rate of crystal growth, rod inclusions decrease in size, and their number increases.

The study of mechanical properties showed an increase in microhardness and crack resistance with increasing crystal growth rate. The obtained range of values corresponds to theoretical data.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Компоненти системи $B_4C-(Ti,Zr,Mo,Nb,Ta)B_2$	10
1.1.1 Карбід бору (B_4C).....	10
1.1.2 Дибориди перехідних металів	12
1.1.2.1 Диборид титану (TiB_2).....	15
1.1.2.2 Диборид цирконію (ZrB_2)	15
1.1.2.3 Диборид молібдену (MoB_2)	16
1.1.2.4 Диборид ніобію (NbB_2)	17
1.1.1.5 Диборид танталу (TaB_2)	17
1.2 Високоентропійні сплави	18
1.2.1 Високоентропійні бориди	19
1.3 Сплавоутворення в системі $B_4C-(Me_x)B_2$	20
1.4 Методи отримання сплавів $B_4C-(Me_x)B_2$	21
1.4.1 Гаряче пресування	22
1.4.2 Іскро-плазмове спікання.....	23
1.4.3 Зонна плавка	25
1.5 Властивості сплаву $B_4C-(Me_x)B_2$	26
1.6 Області застосування матеріалу $B_4C-(Me_x)B_2$	30
1.7 Висновки та постановка задач дослідження	30
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	32
2.1 Методики проведення експерименту.....	32
2.1.1 Вихідні матеріали	33
2.1.2 Отримання заготовок.....	33
2.1.3 Безтигельна зонна плавка.....	35
2.2 Дослідження мікроструктури	36
2.3 Рентгеноструктурний аналіз	36
2.4 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості	37
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	39
3.1 Дослідження структури матеріалу	39

3.2 Хімічний аналіз структури матеріалу	40
3.3 Фазовий аналіз структури матеріалу	43
3.4 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості матеріалу	44
4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	47
4.1 Науково-технічна актуальність	47
4.2 Розрахунок планових витрат.....	47
4.2.1 Витрати на оплату праці науково-дослідницького персоналу.....	48
4.2.2 Єдиний соціальний внесок.....	49
4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень	50
4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання	51
4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій	51
4.2.6 Витрати на службові відрядження	51
4.2.7 Інші прямі невраховані витрати по темі	52
4.2.8 Накладні витрати	52
4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	53
4.3 Науково-технічна ефективність НДР.....	54
4.4 Висновки до розділу	58
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	59
5.1 Характеристика об'єкту (комплексу) та аналіз небезпечних факторів ..	59
5.2 Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення (нормалізації) умов праці.....	62
5.2.1 Фізичні небезпеки	63
5.2.2 Хімічні небезпеки	64
5.2.3 Електробезпека.....	65
5.2.4 Пожежна безпека	67
5.2.5 Ергономічна безпека.....	70
5.3 Застосування засобів індивідуального захисту.....	72
ВИСНОВКИ.....	73
CONCLUTIONS.....	74
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	75

ВСТУП

Порошкова металургія є відносно новою галуззю науки і техніки, яка прямо відноситься до отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук. Ця галузь дозволяє отримувати матеріали з високою жароміцністю, зносостійкістю та твердістю. Порошкові матеріали і вироби, отримані за допомогою порошкової металургії, зараз широко застосовуються в багатьох галузях науки і техніки [1].

У промисловості все частіше виникає потреба замінити металеві матеріали на керамічні з більш широким спектром властивостей та підвищеною продуктивністю. Кераміка стала основною альтернативою у цьому контексті, оскільки вона відкриває широкі можливості в багатьох галузях промисловості. Вони проявляють високу стійкість у вимогливих умовах середовища та за високих навантажень [2].

Але за рахунок постійного розвитку промисловості і технологій, до всіх матеріалів також підвищуються умови. Тому на сьогоднішній день активно ведуться дослідження і розробки композитів на основі боридів, які відрізняються відмінним складом, структурою та властивостями.

Боридна кераміка є одним з видів керамічних матеріалів, які отримують шляхом спікання боридів металів або боридних сумішей. Бориди металів мають виняткові властивості, які роблять їх привабливими для використання у високотехнологічних застосуваннях. Ці матеріали мають високу твердість, низьку вагу та високу температурну стійкість, що робить їх ідеальними для використання в областях, де вимагаються механічна міцність, зносостійкість та стійкість до високих температур [3].

Одним з найбільш використовуваних матеріалів для керамічних композитів є B_4C [4]. Ця сполука має високу температуру плавлення та твердість, але має низьку тріщиностійкість. Додавання армування у вигляді спрямованих волокон MeB_2 до матриці з B_4C може бути ефективним способом вирішення цієї проблеми.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Компоненти системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$

В даній дипломній роботі розглядається матеріал системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$ який складається з карбіду бору та високоентропійних диборидів перехідних металів. Так як властивості композиційних матеріалів залежать від властивостей вхідних компонентів необхідно спочатку розглянути властивості і структуру карбіду бору, високоентропійні сплави та високоентропійні борода.

1.1.1 Карбід бору (B_4C)

Карбід бору (B_4C) – це сполука бору з вуглецем. Вперше отримана французьким хіміком Фердинандом Фредеріком Анрі Муассаном у 1893 році шляхом відновлення оксиду бору B_2O_3 вуглецем за температури $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5]. Спочатку карбіду бору приписували різні склади: BC , B_2C_2 , B_3C , B_4C , B_6C . У 1939 році було встановлено, що існує тільки карбід бору з формулою B_4C , який плавиться з розкладанням і утворюється за температури $2250\text{ }^{\circ}\text{C}$, за перитектичною реакцією між бором та рідкою фазою, багатою карбоном [6].

Карбід бору є одним з найбільш стійких речовин, яка не піддається окисленню за температурою до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ на повітрі. Також він не розчиняється у воді та концентрованих кислотах, але розчиняється у киплячих розчинах лугів. За температури до $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ карбід бору не взаємодіє з сіркою, азотом та фосфором. А за $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ він реагує з хлором, у наслідок чого утворюється трихлористий бор та вуглець. Карбід бору – напівпровідник із забороненою зоною від 2,5 еВ до 1 еВ. Його електроопір вищий за електроопір карбіду та нітриду кремнію [6].

Карбід бору має густину $2,52\text{ г/см}^3$, мікротвердість $>30\text{ ГПа}$ та модуль пружності 450 ГПа . За твердістю поступається алмазу та нітриду бору. Завдяки поєднанню низької густини, високих значень твердості та модулю пружності

з карбіду бору створюють найлегшу броню для захисту людей і техніки від уражень вогнепальної зброї [5]. Нижче наведена кристалічна структура карбіду бору де чорними кульками й вершинами ікосаедра позначено атоми бору, зеленими кульками — атоми вуглецю (рис. 1.1).

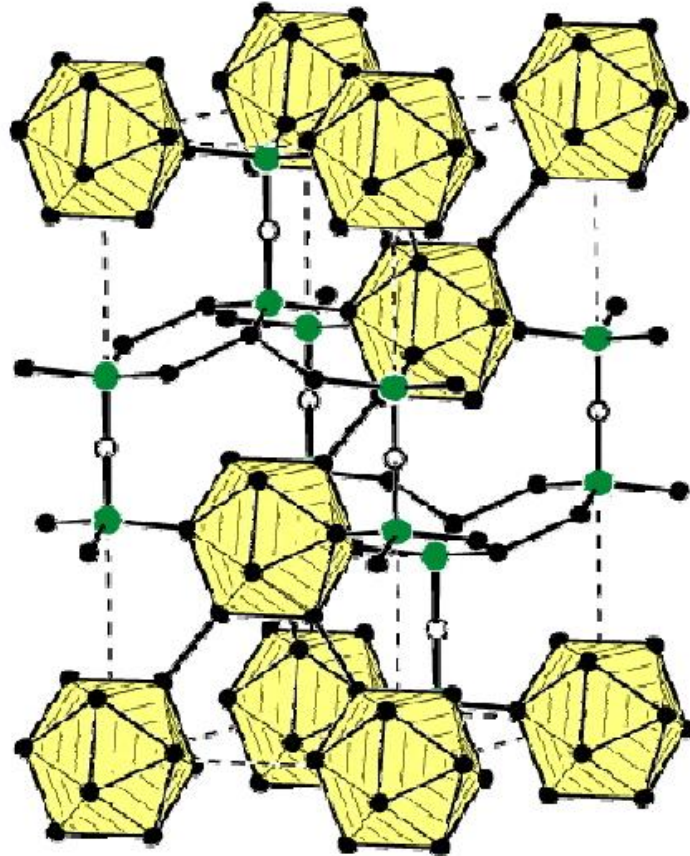


Рисунок 1.1 – Кристалічна ґратка карбіду бору [6]

Елементарна ґратка містить 16 атомів, шість з яких 6 розташовані на ребрах ромбоедра, інші шість — у пустотах поблизу нетригональних вершин, 3 атоми (атоми вуглецю) займають місця на тригональній осі ромбоедра. Відповідно атоми бору в пустотах поблизу нетригональних вершин оточені п'ятьма атомами бору, що розташовані на ребрах ромбоедра й одним атомом вуглецю, тоді як атоми бору на ребрах оточені шістьма атомами бору. Звідси випливає, що усі атоми бору у ґратці мають координацію 6. Центральний атом вуглецю зв'язаний із двома іншими атомами вуглецю, а кінцеві атоми вуглецю

ланцюжка С-С-С зв'язані з центральним атомом вуглецю і з трьома атомами бору, що розташовані на ребрах ромбоєдра [7].

1.1.2 Дибориди перехідних металів

Дибориди – це сполуки, що складаються, зазвичай, з перехідних металів та бору. Дибориди, як і бориди, також мають високу твердість та стійкість до зношування та ще й мають відмінну провідність електричного струму та тепла.

Перехідні метали – хімічні елементи побічних підгруп I–VIII груп періодичної системи елементів [8]. Із 70 досліджених подвійних систем простих речовин з бором сполуки утворюються тільки у 55 системах. Це сполуки між елементами I(a)–VIII(a) 59 підгруп та цинком з бором. Елементи I(b)–IV(b) підгруп періодичної системи елементів сполук з бором не утворюють [6]. Термін «перехідні» пов'язаний з тим, що в періодах ці елементи розташовуються між s- і p-елементами. Перехідні метали, у свою чергу поділяються на d-елементи, у яких відбувається заповнення 3d-, 4d-, 5d- і 6d- підоболонки, і f-елементи, у яких заповнюється 4f- (лантаноїди) або 5f- підоболонка (актиноїди) [8].

Дибориди перехідних металів кристалізуються у гексагональну структуру з просторовою групою $P 6/mmm$, де шари перехідного металу та бору чергуються уздовж осі c, як показано на рисунках 1.2 і 1.3. У кожному з цих шарів атоми утворюють плоску безперервну мережу шестичленних кілець, тоді як атоми перехідного металу розташовані точно над і під відкритими центрами шестикутників бору [9].

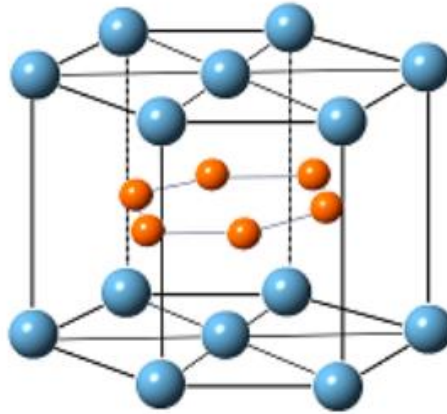


Рисунок 1.2 – Кристалічна гратка диборидів перехідних металів [10]

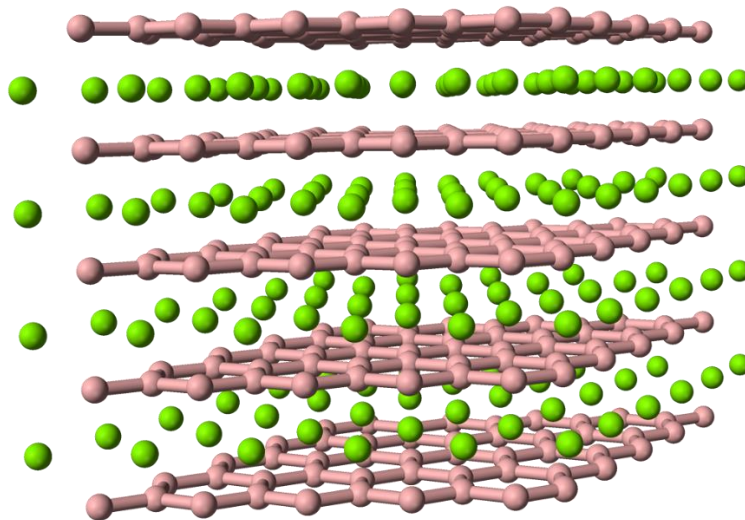


Рисунок 1.3 – Кулеподібна модель частини кристалічної структури диборидів перехідних металів [11]

Подвійні системи з бором відрізняються інтервалом та складами, у яких утворюються сполуки. Для більшості систем сполуки містять 25–66,7 % бору, що відповідає формульному складу M_4B-MB_2 [6].

Фазові діаграми перехідних металів IV групи (Ti, Zr, Hf) відрізняються одна від одної і зовнішнім виглядом, і кількістю виявлених сполук (рис. 2.4). Так у діаграмі Ti – B виявлено такі фази, як Ti_2B , TiB , Ti_3B_4 , TiB_2 . Але існування фази Ti_2B під питанням. Не є певним також існування фаз Ti_2B_5 і

TiB₁₂. У фазовій діаграмі системи Zr – В виявлено тільки дві фази ZrB₂ і ZrB₁₂ [6].

Фазові діаграми металів V групи (V, Nb, Ta). У фазовій діаграмі системи Nb – В визначено наявність чотирьох фаз Nb₃B₂, NbB, Nb₃B₄, NbB₂. У фазовій діаграмі системи Ta – В наявні п'ять фаз, серед них Ta₂B, Ta₃B₂, TaB, Ta₃B₂, TaB₂. Майже всі фази мають вузькі області гомогенності [6].

Фазові діаграми перехідних металів VI групи (Cr, Mo, W). Найбільш визначеною серед цієї групи перехідних металів є діаграма стану системи Мо – В, хоча і в ній є деякі неточності. Так остаточно не визначено існування фази Мо₃B₂, і точно не встановлено склад вищого бориду. Імовірно існування в цій системі таких фаз, як Мо₂B, α-МоВ, β-МоВ, МоВ₂, МоВ_{2.3-2.5}, Мо_{1-x}B₃ [6].

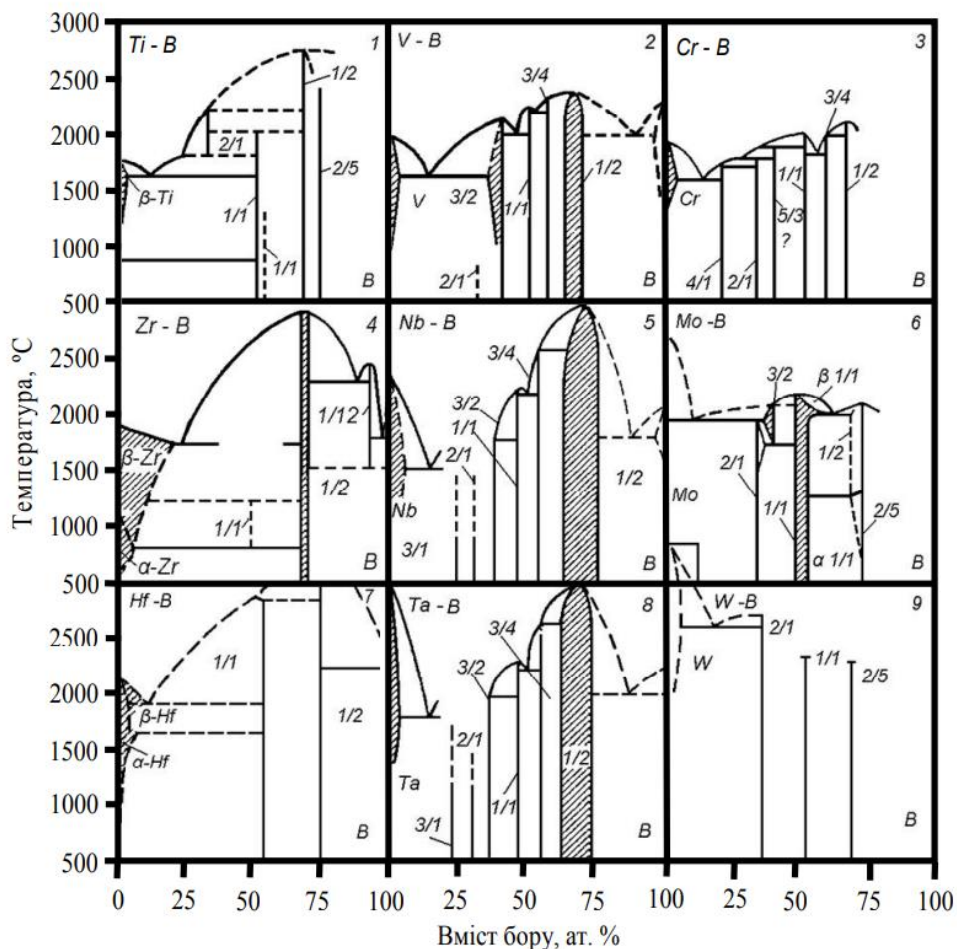


Рисунок 1.4 – Діаграми стану подвійних системи метал – бор [6]

1.1.2.1 Диборид титану (TiB_2)

Диборид титану (TiB_2) – хімічна сполука металу титану та бору. TiB_2 є надзвичайно твердою керамікою, яка має чудову теплопровідність, стійкість до окислення та зносостійкість. Він має деякі схожі властивості з карбідом бору та карбідом титану, але багато з його властивостей перевершують властивості B_4C і TiC [11].

В таблиці 1.1 наведені типові фізико-механічні властивості дибориду титану. TiB_2 стійкий до окислення на повітрі до $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Він також стійкий до HCl і HF , але реагує з H_2SO_4 і HNO_3 . Він легко атакується лугами [12].

Таблиця 1.1 – Типові фізико-механічні властивості дибориду титану (TiB_2) [12]

Властивості	Значення
Густина (г/см^3)	4,52
Точка плавлення ($^\circ\text{C}$)	2970
Міцність (МПа)	410 – 448
Твердість за Кнупом (НК)	1800
Модуль пружності (ГПа)	510 – 575
Коефіцієнт Пуассона	0,1 – 0,15
Питомий об'ємний опір ($\text{Ом}\cdot\text{см}$) за $20\text{ }^\circ\text{C}$	$15\cdot 10^{-6}$
Теплопровідність ($\text{Вт/м}\cdot\text{K}$)	25

1.1.2.2 Диборид цирконію (ZrB_2)

Диборид цирконію (ZrB_2) – це сполука металу цирконію та бору. Він є гексагональним, сірим кристалом або порошком. Матеріал дибориду цирконію має високу твердість, високу температуру плавлення, стійкість до

термічного удару, стійкість до окислення, хорошу електропровідність і хорошу теплопровідність і може протистояти корозії розплавленого металу для компонентів ріжучого інструменту з електричних та електронних матеріалів. Крім того, диборид цирконію має хорошу здатність контролювати нейтрони [13].

В таблиці 1.2 наведені фізико-механічні властивості дибориду цирконію.

Таблиця 1.2 – Фізико-механічні властивості дибориду цирконію (ZrB_2)

Властивості	Значення
Густина ($г/см^3$)	6,085 [14]
Точка плавлення ($^{\circ}C$)	3246 [14]
Молярна маса ($г/моль$)	112,85 [14]
Модуль пружності (ГПа)	495 [15]
Молярна теплоємність ($Дж/(моль \cdot K)$)	48,24 [14]

1.1.2.3 Диборид молібдену (MoB_2)

Диборид молібдену – це сполука металу молібдену та бору. Він має властивості високої електро- та теплопровідності.

Диборид молібдену є унікальним серед диборидів перехідних металів, оскільки він існує як у гексагональній, так і в ромбоєдричній структурі. Він приймає більш складну ромбоєдричну структуру в залежності від стехіометрії бору. Ромбоєдрична структура має просторову групу $R3m$ і може бути отримана від структури типу AlB_2 (гексагональна) шляхом зморщування половини плоских шарів бору, що робить сітку бору більш щільною та розсуває атоми металу вздовж осі c [9].

В таблиці 1.3 наведені фізико-механічні властивості дибориду молібдену.

Таблиця 1.3 – Фізико-механічні властивості дибориду молібдену (MoB_2)

Властивості	Значення
Густина (г/см^3)	7,12; 7,78 [16]
Точка плавлення ($^{\circ}\text{C}$)	2100 [16]
Молярна маса (г/моль)	117,56 [16]

1.1.2.4 Диборид ніобію (NbB_2)

Диборид ніобію – висококовалентний вогнетривкий керамічний матеріал із гексагональною кристалічною структурою [17]. Він є важливим керамічним матеріалом і використовується в багатьох галузях завдяки своїм чудовим механічним властивостям, таким як висока температура плавлення, висока хімічна стабільність, хороша електро- та теплопровідність і висока твердість. Крім того, $\text{Nb}_{1-x}\text{B}_2$ ($x = 0\text{--}0,48$) був надпровідником із максимальною температурою надпровідного переходу за 9,2 К [18].

В таблиці 1.4 наведені фізико-механічні властивості дибориду ніобію.

Таблиця 1.4 – Фізико-механічні властивості дибориду ніобію (NbB_2)

Властивості	Значення
Густина (г/см^3)	6,97 [17]
Точка плавлення ($^{\circ}\text{C}$)	3050 [17]
Молярна маса (г/моль)	114,526 [17]
Питомий електричний опір ($\text{мкОм}\cdot\text{см}$)	25,7 [17]

1.1.1.5 Диборид танталу (TaB_2)

Бориди танталу – це сполуки танталу та бору, що відрізняються надзвичайною твердістю. Цей матеріал стійкий до окислення за температури

нижче 700 °C і кислотної корозії. TaB₂ має таку саму гексагональну структуру, як і більшість диборидів (AlB₂, MgB₂ та ін.) [18].

В таблиці 1.5 наведені фізико-механічні властивості дибориду танталу.

Таблиця 1.5 – Фізико-механічні властивості дибориду танталу (TaB₂)

Властивості	Значення
Густина (г/см ³)	11,70; 12,38 [19]
Точка плавлення (°C)	3000; 3200 [19]
Молярна маса (г/моль)	202,57 [19]
Твердість за Віккерсом (ГПа)	30 [18]

1.2 Високоентропійні сплави

Карбід бору за рахунок високої твердості та стійкості до зношування має низьку пластичність. Тому для покращення властивостей змішуються різні метали для створення нових видів матеріалів з збалансованими властивостями. У традиційній схемі для покращення властивостей додають невелику кількість різних елементів. Але наявність багатьох різноманітних елементів призводять до створення крихких сполук з обмеженістю для розвитку в багатоелементному напрямку. Тому чим менше елементів сплаву, тим краще [20].

Так прийшли до висновку створити високоентропійні сплави. Це сплави, які мають загалом не менше 5 елементів змішаних у приблизно рівних пропорціях. За можливістю зміни концентрації вихідних елементів можна регулювати показники фізико-механічних властивостей сплаву. Наприклад, якщо додати до B₄C титану, алюмінію чи хрому, то можна за рахунок зміни його мікроструктури та механізму деформації досягти певної пластичності [20].

Багатокомпонентний сплав можна відносити до високоентропійних, якщо його ентропійний фактор $T \times S$ з формули [20]:

$$G = H - T \times S, \quad (1.1)$$

де G – енергія Гіббса, Дж;

H – ентальпія, Дж;

T – температура, К;

S – ентропія Дж/К;

Тобто в високоентропійних сплавах не можуть утворюватися прості бінарні і потрійні інтерметалічні та впорядковані фази (наприклад FeCr, AlNi, FeTi) [20].

1.2.1 Високоентропійні бори́ди

Високоентропійні бори́ди (ВЕБ) – це новий клас матеріалів які зберігають свої фізичні та механічні властивості за умов екстремально високих тисках та температурах без погіршення фізичних і/або механічних властивостей. Прості бори́ди перехідних металів були ретельно вивчені, і було виявлено, що вони мають бажані механічні властивості, включаючи високий об’ємний модуль і високу твердість. Високоентропійні бори́ди загалом містять п’ять різних металів у майже однаковому молярному співвідношенні та є стабільними в одній гексагональній фазі типу AlB_2 (рис. 1.5) [21].

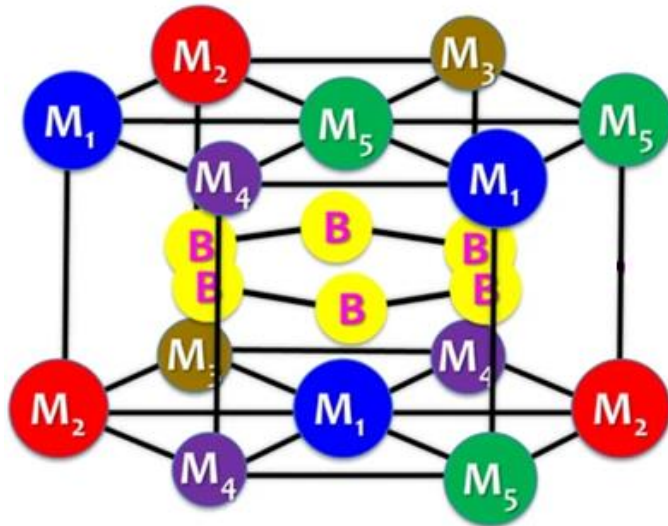


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення атомної структури високоентропійних боридів металів [21]

Включення п'яти або більше різних металевих елементів призводить до високої ентропії (S), включаючи ентропію змішування, і, отже, мінімізованої вільної енергії Гіббса. Ентропію змішування можна виразити як $\Delta S_{\text{mix}} = R \ln(N)$, де R є газовою постійною, а N – кількістю присутніх елементів. Цей ентропійний член у вільній енергії також гарантує, що кристалічні фази з температурою навколишнього середовища у високоентропійних матеріалах також є стабільними за високих температурах, що призводить до їх застосування в умовах екстремальних температур і тиску. Дослідження тиску навколишнього середовища для сплавів з високою ентропією продемонстрували, що відмінні механічні, магнітні та хімічні властивості можна налаштувати порівняно з їх складовими елементами та сполуками [21].

1.3 Сплавоутворення в системі $\text{V}_4\text{C}-(\text{Me}_x)\text{B}_2$

Сплавоутворення в системі $\text{V}_4\text{C}-(\text{Me}_x)\text{B}_2$ розглянемо на прикладі композиту $\text{V}_4\text{C}-\text{TiB}_2$. Система $\text{V}_4\text{C}-\text{TiB}_2$ є псевдобінарною евтектикою, як показано на рисунку 1.6. У цьому дослідженні типова евтектична текстура спостерігалася зі складом $\text{V}_4\text{C}-25$ мол.% TiB_2 . Направлено закристалізовані

композити B_4C - TiB_2 були виготовлені методом плаваючої зони з використанням спечених стрижнів в атмосфері аргону [22].

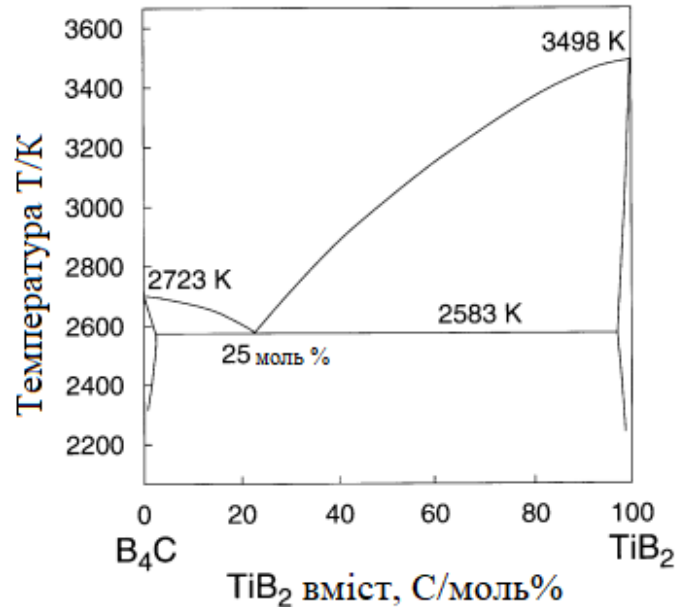


Рисунок 1.6 – Псевдобінарна фазова діаграма композиту B_4C - TiB_2 [22]

Псевдобінарна фазова діаграма — це діаграма рівноваги, розрахована для потрійної системи або системи вищого порядку, у якій розраховуються межі фаз, що виникають в результаті варіації вмісту двох елементів, тоді як кількості всіх інших елементів зберігаються постійними [23].

1.4 Методи отримання сплавів B_4C -(Me_x) B_2

Як було вже зазначено в роботі B_4C має чудові фізико-механічні властивості, такі як висока температура плавлення та твердість, гарна ударна та зносостійкість, чудова стійкість до хімічних агентів, а також висока здатність до поглинання нейтронів. Однак широке застосування даної кераміки було обмежено через низьку в'язкість руйнування ($< 2,2 \text{ МПа м}^{1/2}$) і погану здатність до спікання через низький коефіцієнт самодифузії. Було виявлено, що додавання вторинних фаз до B_4C матриці може покращити її

механічні властивості. Оскільки V_4C і TiB_2 мають високу температуру плавлення та високу твердість, а також хімічну стабільність за високих температур, очікується, що дані композити будуть використовуватися для передових конструкційних матеріалів [24].

1.4.1 Гаряче пресування

Гаряче пресування — це процес порошкової металургії під високим тиском і низькою швидкістю деформації для формування порошкової заготовки за температури, достатньо високій, щоб викликати процеси спікання та повзучості (рис. 1.7) [25].

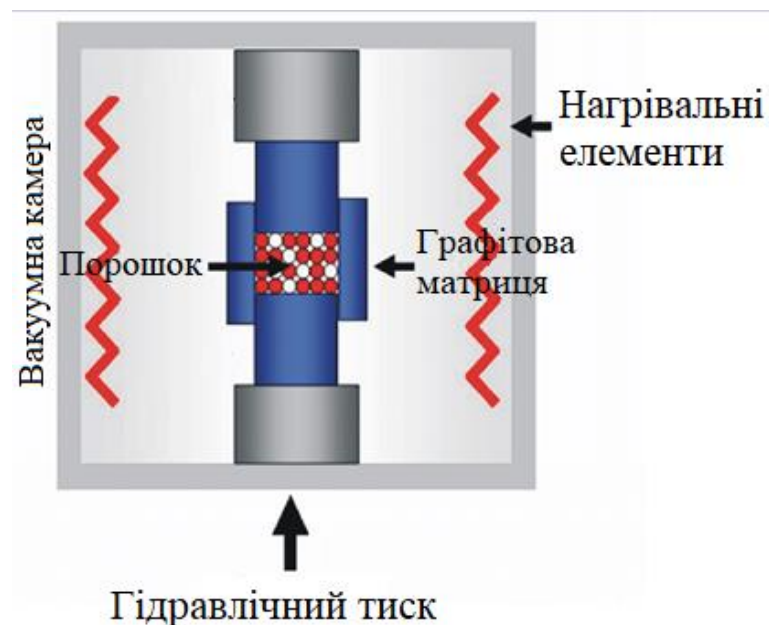


Рисунок 1.7 – Принципова схема, що ілюструє технологію гарячого пресування [26]

Під час гарячого пресування температура і тиск одночасно застосовуються до пресованого порошку, що міститься в матриці. Нагрівання зазвичай досягається за допомогою індукційних котушок і графітової матриці, тоді як тиск часто застосовується гідравлічно. Під дією тиску точки контакту між частинками створюють дуже високу напругу, збільшуючи локальну

швидкість дифузії. Як і для всіх форм ущільнення, розмір часток, температура, тиск, швидкість нагрівання та час витримки впливають на щільність і мікроструктуру пресованих гарячим пресом пресів, тоді як для неоксидів потрібна контрольована атмосфера. Карбіди, бориди та силіциди часто піддають гарячому пресуванню під вакуумом або інертним газом, таким як аргон [27].

Для запобігання взаємодії пресованого матеріалу з матеріалом прес-форми внутрішню поверхню останньої покривають будь-якими інертними складами (рідким склом, емаллю, нітридом бору і ін.) Або захищають металевою фольгою. Деякі з захисних складів можуть одночасно грати роль мастил, які зменшують зовнішнє тертя [28]. Загалом для пресування використовують механічні, гідравлічні або пневматичні преси.

1.4.2 Іскро-плазмове спікання

Термін «іскро-плазмове спікання» зазвичай використовується для позначення техніки спікання, що передбачає одночасне використання одновісного тиску та імпульсного струму високої інтенсивності низької напруги (рис. 1.8) [29].

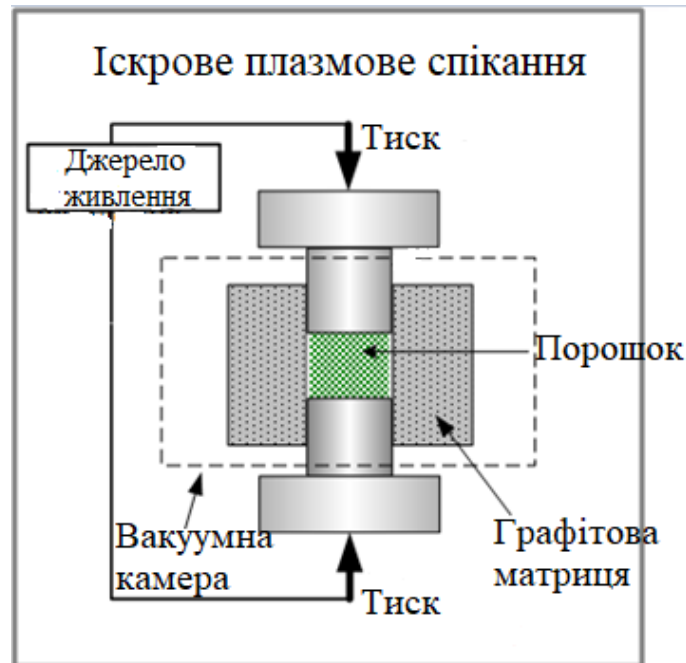


Рисунок 1.8 – Принципова схема спікання імпульсним електричним струмом [30]

Основною характеристикою даного методу є те, що імпульсний або неімпульсний постійний, або змінний струм безпосередньо проходить через графітову матрицю, а також порошкову прес-форму у випадку електропровідних зразків. Встановлено, що джоулеве нагрівання відіграє домінуючу роль у ущільненні пресованих порошків, що призводить до досягнення майже теоретичної щільності за нижчих температур спікання порівняно зі звичайними методами спікання. Вироблення тепла є внутрішнім, на відміну від звичайного гарячого пресування, де тепло забезпечується зовнішніми нагрівальними елементами. Це сприяє дуже високій швидкості нагрівання або охолодження (до 1000 К/хв), отже, процес спікання зазвичай відбувається дуже швидко (протягом кількох хвилин). Як вже було зазначено, спікання відбувається у вакуумі для запобігання окислення матеріалу [31].

1.4.3 Зонна плавка

Метод зонної плавки (плаваючої зони) (ПЗ) — це метод вирощування кристалів без тигля. Під час зонної плавки розплавлена зона утримується між двома вертикальними твердими стрижнями завдяки власному поверхневому натягу (рис. 1.9) [32].

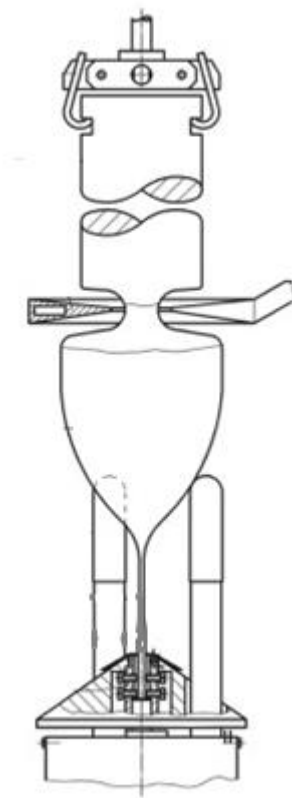


Рисунок 1.9 – Зонно-плаваюча установка [32]

Початковий полікристалічний матеріал має форму окремо стоячого стрижня, закріпленого своїм верхнім кінцем на вертикально рухомому тримачі, інший край живильного стрижня звужується та нагрівається радіочастотною котушкою (індуктор) до розплавлення його кінчика. Потім крапля, що утворюється на кінчику, контактує з орієнтованою затравкою, з'єднаною з нижнім тяговим валом [32].

Основною перевагою даного методу є відсутність контейнера, що виключає забруднення матеріалом тигля та утворення кристалічних дефектів, викликаних взаємодією між зростаючим кристалом і контейнером. Однак промислове застосування методу ПЗ досить обмежене, оскільки максимальний діаметр зразка є відносно малим через труднощі у підтримці стабільної розплавленої зони. Зазвичай максимальна висота розплавленої зони становить кілька міліметрів, що визначається співвідношенням між поверхневим натягом і щільністю розплаву [32].

Ці труднощі були подолані завдяки промислового вирощуванню кремнію технікою голкового вушка. У техніці голчастого вушка форма розплавленої зони стабілізується електромагнітним полем тиску, створюваним спеціальною формою радіочастотної індукційної котушки. Кристали кремнію, отримані цією технікою, мають діаметри до 200 мм і надзвичайно низьке забруднення киснем ($<10^{16} \text{ см}^{-3}$) [32].

1.5 Властивості сплаву $\text{B}_4\text{C}-(\text{Me}_x)\text{B}_2$

Виготовлений гарячим пресуванням з використанням B_4C , C і TiCl_4 як вихідних матеріалів був синтезований композит $\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2$. Порошки прекурсорів $\text{Ti}(\text{OH})_4$ і B_4C отримано методом співосадження [33].

У таблиці 2.6 наведено механічні властивості даного композиту з різним вмістом вмістом TiB_2 .

Іскрове плазмове спікання використовувалося для консолідації порошкових зразків, що склалися з B_4C і різних композицій $\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2$. Цей метод дозволяє консолідувати чисті композити B_4C , B_4C -13 об.% TiB_2 і B_4C -23 об.% TiB_2 із досягненням ≥ 99 % теоретичної щільності без добавок для спікання, залишкових фаз (наприклад, графіту) , а також надмірний ріст зерна через тривалий час спікання [34].

У таблиці 1.6 наведено щільність, механічні властивості та властивості руйнування композитів B_4C -13 TiB_2 і B_4C -23 TiB_2 [34].

Таблиця 1.6 – Властивості композиту B_4C-TiB_2

Метод отримання	Вміст TiB_2 (%)	Діаметр × товщина (мм)	Відносна щільність (%)	Твердість (ГПа)	Міцність на згин (МПа)	Тріщиностійкість (МПа $m^{1/2}$)
Гаряче пресування [33]	19	-	97,5	$24,5 \pm 2,6$	351 ± 52	$7,9 \pm 0,5$
	43	-	99,8	$23,6 \pm 2,3$	506 ± 55	$9,4 \pm 0,6$
Іскрове плазмове спікання [34]	13	20×4	99,4	$35 \pm 0,4$	442 ± 13	$3,7 \pm 0,4$
	23	20×4	99,5	$33 \pm 0,9$	520 ± 24	$6,9 \pm 0,3$
						$7,2 \pm 0,4$
		51×7	99,5	$32 \pm 0,7$	462 ± 9	$6,2 \pm 0,8$

З таблиці 1.6 видно, що за умов гарячого пресування у композита зі збільшенням вмісту TiB_2 зросла відносна щільність, міцність на згин і тріщиностійкість композиту, а твердість композиту зменшилась. Це відбулось через меншу твердість фази TiB_2 , ніж матриці B_4C . Як дрібне зерно, так і різниця в коефіцієнтах теплового розширення між матрицею B_4C і частинками TiB_2 можуть ефективно покращити в'язкість руйнування композиту [33].

Оптимізований B_4C –23об.% TiB_2 композит із цільовою низькою щільністю $\sim 3,0 \text{ г/см}^3$ показав на 30–35 % підвищену твердість, в'язкість до руйнування та міцність на вигин порівняно з кількома комерційними бронекераміками, причому міцність на згин була нечутливою до швидкості деформації в квазістатичних і динамічних умовах завантаження. Механічні дослідження показали, що поліпшення є результатом а) відсутності залишкового графітового вуглецю в композитах, б) зміцнення міжфазних мікротріщин через різницю в коефіцієнтах теплового розширення, що призводить до стиснення матриці B_4C , а фази TiB_2 до розтягування, і в) TiB_2 фази сприяють відхиленню тріщини, тим самим збільшуючи кількість міжкристалічного руйнування [34].

Оскільки на властивості композиту сильно впливає текстура, важливо виготовляти композити з добре контрольованою текстурою. Спрямована кристалізація є зручним методом для контролю текстури, особливо для евтектичних композитів [22].

Порошки B_4C і TiB_2 змішували у складі 25 мол % TiB_2 і ізостатично пресували з навантаженням 9,8 МПа в латексній трубці діаметром 10 мм. Пресовані стрижні спікали за температури 1773 К протягом 3,6 кс в атмосфері аргону. Для нагрівання використовувалася лампа Хе. Для порівняння були підготовлені монолітні матеріали B_4C і TiB_2 . Зразок B_4C був виготовлений методом плаваючої зони, а зразок TiB_2 був виготовлений методом іскроплазмового спікання, оскільки його температура плавлення (3500 К) є занадто високою для методу плаваючої зони [22].

На рисунку 1.10 порівнюється залежність мікротвердості від навантаження на індентор для кількох твердих матеріалів. Мікротвердість фаз B_4C і TiB_2 в композиті отримано шляхом індентування лише фаз B_4C і TiB_2 відповідно. Під мікротвердістю композиту B_4C-TiB_2 розуміють середнє значення з 30 уколів у композиті, нанесених випадковим відступом. Твердість зазвичай зростає зі зменшенням навантаження на індентор. Цю тенденцію можна загалом спостерігати в результаті вимірюванні твердих матеріалів [22].

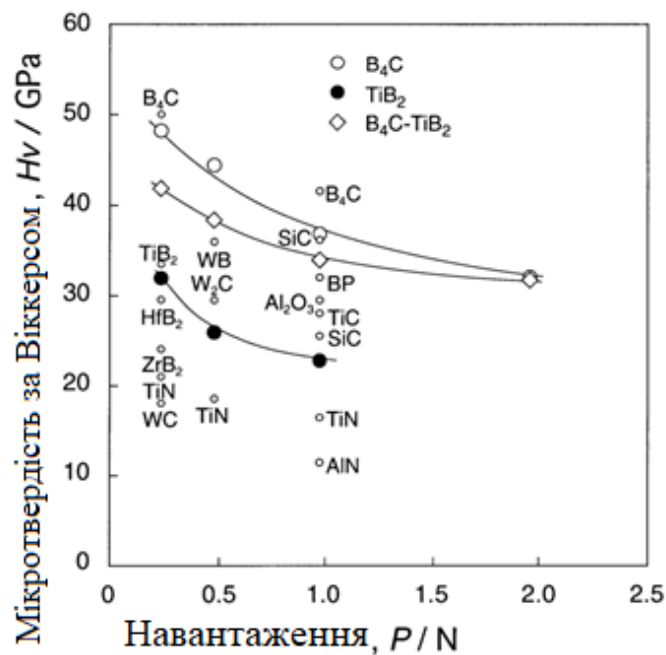


Рисунок 1.10 – Зв'язок між мікротвердістю за Віккерсом (H_v) і навантаження на індентор [22]

Отримані результати показані зі значеннями різних видів кераміки. Композит B_4C-TiB_2 був чи не найтвердішим матеріалом, особливо за умов високої навантаження на індентор. Мікротвердість композиту B_4C-TiB_2 не залежала від швидкості росту. Зі зменшенням навантаження на індентор розмір відбитку ставав меншим, майже таким же, як і текстура евтектики. Це викликало відносно великий розкид значень мікротвердості. Мікротвердість

композиту, виміряна за високих навантажень на індентор, показала майже таке ж значення, як і V_4C [22].

1.6 Области застосування матеріалу $\text{V}_4\text{C}-(\text{Me}_x)\text{B}_2$

Основаючись на отриманих даних композит $\text{V}_4\text{C}-\text{TiB}_2$ можна використовувати для передових конструкційних матеріалів [31] для побудови міцних, легких, стійких до корозії та інших небажаних впливів конструкцій. Матеріали, виготовлені з монолітних V_4C і TiB_2 , визнані кандидатами на вдосконалену конструкційну кераміку завдяки їх винятковій твердості та високотемпературній стабільності [35].

З таблиці 1.6 спостерігаємо, що даний композит має високу твердість, а за рахунок вмісту дибориду перехідних металів має ще і високу стійкість до зношування, завдяки цьому композит $\text{V}_4\text{C}-\text{TiB}_2$ може використовуватися для виготовлення бронежилетів та інших захисних елементів. Так як розробка легких матеріалів з високою твердістю та високою в'язкістю представляє великий інтерес для таких застосувань, як бронезахисне покриття для людей і транспортних засобів, покриття, стійке до подряпин і зносу, гіперзвукові транспортні засоби, ріжучі інструменти тощо [34].

Також даний композит можна застосовувати для абразивів, ядерних контрольних стрижнів і термоелектриків [22].

1.7 Висновки та постановка задач дослідження

В даному розділі розглядався досліджений матеріал на тему «Структура та властивості спрямовано закристалізованого сплаву системи $\text{V}_4\text{C}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ ». Спочатку було розглянуто властивості та структуру всіх компонентів системи сплаву. Було наведене визначення високоентропійних сплавів та боридів. Також було розглянуто

сплавоутверення в системі B_4C-TiB_2 , способи його отримання та можливі області застосування.

З наукової і практичної точки зору, було б цікаво створити композиційний матеріал на основі карбіду бору, як високотемпературного та високотвердого матеріалу, армованого високоентропійним боридом на основі диборидів перехідних металів, які повинні мати виняткові високотемпературні властивості.

Тому метою роботи є дослідження структури та механічних властивостей спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$.

Для досягнення мети потрібно вирішити такі задачі:

- а) отримати зразки на основі карбіду бору, спрямовано армовані диборидами перехідних металів $(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$ методом безтигельної зонної плавки;
- б) дослідити мікроструктуру отриманого зразка;
- в) дослідити фазовий та хімічний склад;
- г) дослідити мікротвердість та тріщиностійкість.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методики проведення експерименту

Технологічна схема виготовлення матеріалу системи $\text{V}_4\text{C}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ наведена на рисунку 2.1.

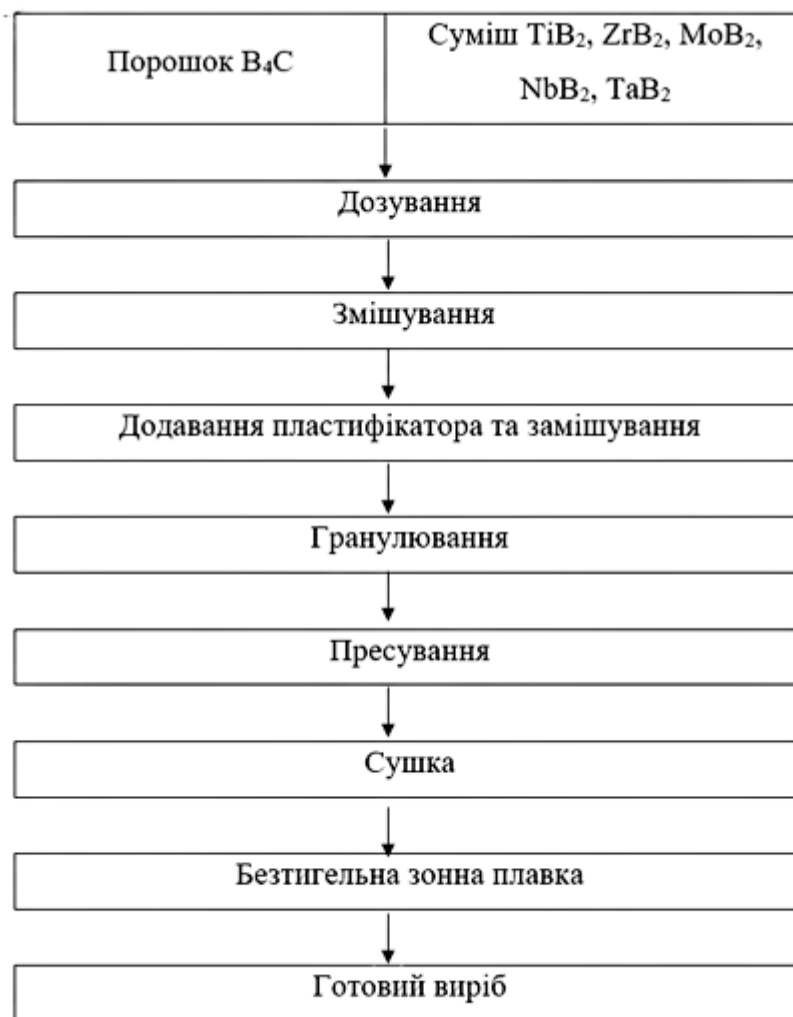


Рисунок 2.1 – Технологічна схема одержання сплаву системи $\text{V}_4\text{C}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$

Виготовлення проходить поетапно: дозування порошків, приготування суміші з додаванням пластифікатора, її гранулювання, пресування стержня, його сушка та безтигельна зонна плавка.

2.1.1 Вихідні матеріали

Для виготовлення спрямовано закристалізованого сплаву використовували порошки карбіду бору та диборидів перехідних металів (Ti, Zr, Mo, Nb, Ta). Їх чистота близько 98 мас.% з розміром частинок 1-5 мкм. В таблиці 2.1 наведено їх відсотковий вміст в сплаві та щільність.

Таблиця 2.1 – Вміст компонентів сплаву та щільність

Компонент	Об'ємна доля, %	Щільність, г/см ³
B₄C	77	2,52
TiB₂	4,6	4,52
ZrB₂	4,6	6,085
MoB₂	4,6	7,12
NbB₂	4,6	6,97
TaB₂	4,6	11,7

2.1.2 Отримання заготовок

Для того, щоб отримати заготовку необхідно провести дозування вихідних порошків. Це потрібно для визначення точного додавання кількостей потрібних компонентів, щоб досягти певного хімічного складу і властивостей виробу.

Визначення необхідної кількості наважок порошку відбувається за допомогою електронних вагів. Далі цю суміш змішують та протирають через сито з розміром комірки 50 мкм. Потім додається пластифікатор 2,5%-го водного розчину полівінілового спирту по 4 мл на один стержень. Після чого проводять гранулювання. Це відбувається з метою кращого розподілу пластифікатор по всій суміші матеріалу.

Перед тим, як перейти до етапу пресування, необхідно розрахувати необхідну наважку порошку:

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

де G – маса порошку, г;

V – об'єм пресформи, см^3 ;

γ – щільність (густина) матеріалу, г/см^3 ;

f – пористість пресовки, яка дорівнює 50%;

k – коефіцієнт, який дорівнює 1,01.

Об'єм пресовки розраховуємо за формулою:

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

де r – радіус пресовки, см;

h – довжина пресовки, см.

Щільність даної системи знаходимо за формулою адитивності:

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

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.

Пресування відбуватиметься в пресформі довжиною в 144 мм та діаметром 10 мм. Використовуючи отримані дані розрахуємо необхідну наважку порошку для одного зразка (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Розрахунок наважки порошку

Суміш	Об'єм пресовки, см ³	Густина матеріалу, г/см ³	Вага, г
B ₄ C-(Ti,Zr,Mo,Nb,Ta)B ₂	22,61	2,94	33,55

Далі іде етап пресування. Визначену кількість порошку розміщували в розбірну форму, після чого здійснювалося пресування за допомогою гідравлічного пресу з тиском 100 МПа. Пресувалось на всякий випадок два стрижня.

Останнім етапом підготовки є сушка стрижнів. Вона потрібна для виведення вологи і зміцнення отриманих заготовок через полімеризацію пластифікатора. Сушка проводиться у вакуумній сушильній камері за температури 80–100 °С протягом 10 годин.

2.1.3 Безтигельна зонна плавка

Після сушки стрижні поміщаються в установку безтигельної зонної плавки Кристал – 206 (рис. 2.12). Отримана заготовка поміщається в нижній затискач камери для безтигельної зонної плавки, а верхній затиск закріплює затравку з відстанню не більше 1 мм між краями заготовки і затравкою. Затискачі мають цангову конструкцію і виготовлені з нержавіючої сталі.

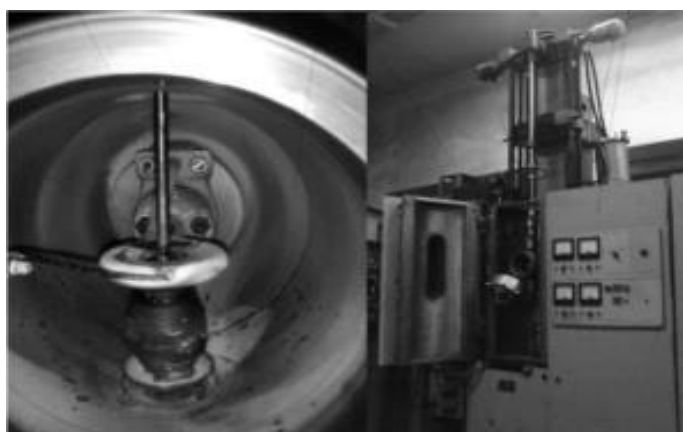


Рисунок 2.12 – Установка "Кристал-206"

Робочий об'єм камери вакуумується до залишкового тиску $1,3 \times 10^{-4}$ Па, а потім заповнюється гелієм, що запобігає інтенсивному випаровуванню сплаву за температури плавлення. Нижня частина затравки нагрівається за допомогою індукційного обігрівача після включення нагрівання. За умови досягнення температури в діапазоні 2000–2150 °С, вихідна порошкова заготовка починає прогріватися від затравки за рахунок теплопровідності та випромінювання. Коли температура заготовки дорівнює температурі затравки, потужність нагрівання поступово збільшується до моменту появи зони розплаву між затравкою та заготовкою. Зона розплаву залишається нерухомою протягом 2-4 хвилин, а потім переміщується вздовж вихідної заготовки. Швидкість переміщення залежить від здатності порошку до ущільнення під дією градієнту температури. Для пресовок із карбіду бору швидкість переміщення зони розплаву вздовж вихідної заготовки повинна бути меншою за 0,5 мм/хв, що дозволяє отримати безпористий фронт плавлення та стабільну зону розплаву [36].

2.2 Дослідження мікроструктури

Отримані зразки були розрізані на електроерозійному станку в поперечному та поздовжньому напрямках, і запресовані у порошок бакеліту. Після чого вони шліфувались на спеціальному верстаті. Шліфівка відбувалась спочатку на крупнозернистому папері P180, а далі – дрібнозернистому P2500. Мікроструктура спрямовано закристалізованого сплаву системи $B_4C-(Ti,Zr,Mo,Nb,Ta)B_2$ досліджувалась на скануючому електронному мікроскопі Axia ChemiSEM HiVac.

2.3 Рентгеноструктурний аналіз

Рентгеноструктурний аналіз проводиться за допомогою установки Rigaku Ultima IV з випромінюванням $CuK\alpha$ (рис. 2.13).



Рисунок 2.13 – Установка Rigaku Ultima IV

Для ідентифікації фаз у досліджуваних зразках необхідно провести якісний фазовий аналіз. Даний аналіз базується на тому, що будь яка кристалічна речовина має свій особистий дифракційний спектр, а у випадку суміші речовин ці спектри накладаються. Для визначення характеристики речовини необхідно виміряти інтенсивність реперних (найбільш інтенсивних) ліній і визначити міжплощинні відстані [37].

Перед проведенням рентгено-фазового аналізу необхідно знати хімічний склад досліджуваних зразків. Його можна провести на тому самому мікроскопі для дослідження мікроструктури. Хімічний склад потрібен для того, щоб скласти список кристалічних фаз. Якщо зразок має одну фазу, то фазовий аналіз є простим завданням, але зі збільшенням кількості компонентів у зразку цей процес стає складнішим.

2.4 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості

Для визначення механічних властивостей спрямовано закристалізованого сплаву системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$ спочатку за допомогою мікротвердоміра MHV-1000 та алмозної пірамідки робилися відбитки за навантаженням 9,8Н (1 кг) і часом витримки 10 с. Далі за допомогою оптичного мікроскопу Neophot 21 виконуються знімки зроблених

відбитків та використовуючи “Imagelab 1.0” вимірюються необхідні значення для визначення мікротвердості та тріщиностійкості.

Для розрахунку мікротвердості використовується формула:

$$H\mu = \frac{1,854 \cdot P}{d^2}, \quad (2.4)$$

де P – навантаження ідентора на зразок;

d – середнє значення довжин діагоналей пірамідки.

Для виміру тріщиностійкості використовували метод мікроіндентування за формулою:

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

де P – навантаження ідентора на зразок;

c – середнє значення довжин тріщин пірамідки.

Для розрахунку теоретичної мікротвердості для зразку $B_4C-(Ti,Zr,Mo,Nb,Ta)B_2$ використовувалась формула адитивності:

$$HV = HV_1 \cdot V_1 + HV_2 \cdot V_2 \quad (2.6)$$

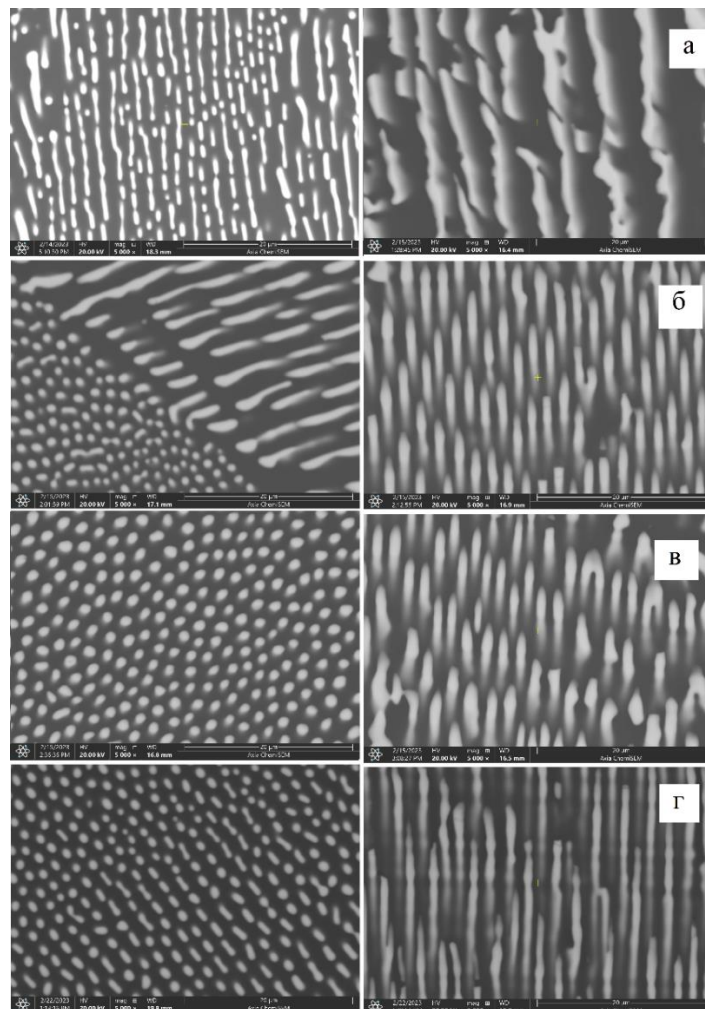
де HV_1 та HV_2 – значення твердості по Віккерсу основного матеріалу та ВЕБа;

V_1 та V_2 – відсотковий вміст матеріалів у зразку.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Дослідження структури матеріалу

Було отримано та досліджено мікроструктури спрямовано-армованого композиту системи $\text{B}_4\text{C}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$, який був виготовлений за допомогою безтигельної зонної плавки в площині поперечного та продольного перерізу відносно напрямку вирощування кристалів з різною швидкістю (рис. 3.1). Було отримано по два зразки (поперечний і продольний) за різних швидкостях вирощування кристалу: 1 мм/хв, 2 мм/хв, 3 мм/хв та 4 мм/хв.



а – 1 мм/хв; б – 2 мм/хв; в – 3 мм/хв; г – 4 мм/хв.

Рисунок 3.1 – Мікроструктура спрямовано-армованого композиту системи $\text{B}_4\text{C}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$ зі збільшенням $\times 5000$ та різних швидкостях вирощування кристалу

Аналізуючи мікроструктури на рисунку 3.1 бачимо, що зі збільшенням швидкості вирощування кристалів включення стають дрібнішого розміру і, відповідно, їх кількість зростає при одному і тому ж об'ємному вмісті.

З таблиці 2.1 відомо, що найбільшу об'ємну долю в системі має карбід бору (B_4C), отже він є основою даного матеріалу. Аналізуючи рисунок 3.1 спостерігаємо, що структури мають матрицю з карбиду бору темно-сірого кольору та включення ВЕБів світлого кольору. Також бачимо, що при двох перерізах, а саме поперочному та продольному, структура має взаємне розташуванням довгих, вузьких стрижнів в матриці матеріалу. Це дає нам підставу вважати, що сплав має стрижневу структуру. На основі цього приходимо до висновку, що даний сплав є евтектичним так як його фази не розчиняються одна в одній, а існують поруч із збереженням своєї структури.

Однак, ми можемо спорігати лише дві фази і для більш детального аналізу необхідно провести хімічний та фазовий аналіз.

3.2 Хімічний аналіз структури матеріалу

Хімічний аналіз структури проводиться для визначення хімічного складу матеріалів і компонентів, що складають структуру (рис. 3.2).

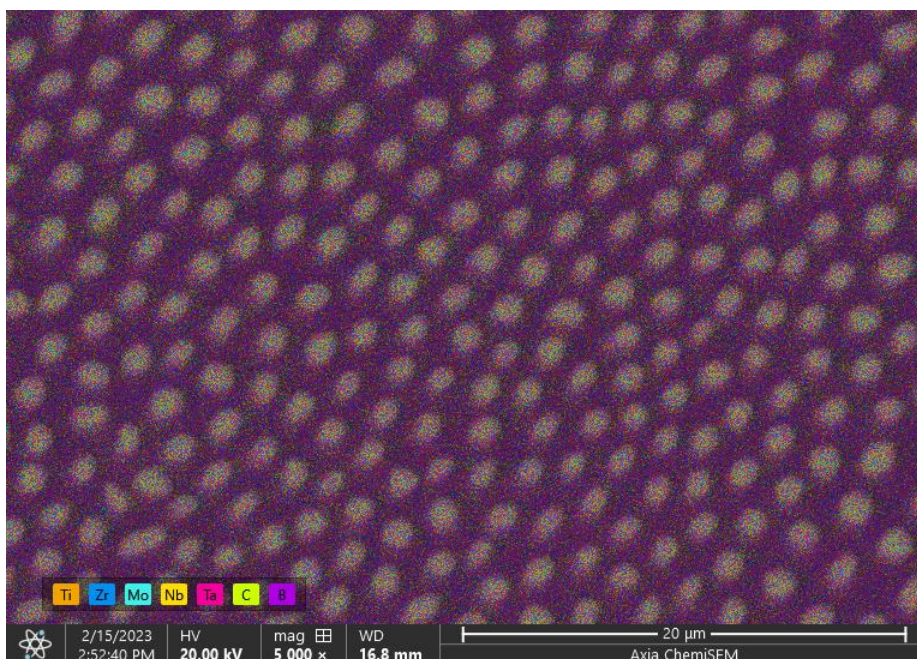


Рисунок 3.2 – Мікроструктура спрямовано-армованого матеріалу системи $B_4C-(Ti,Zr,Mo,Nb,Ta)B_2$ при збільшенні $\times 5000$ після хімічного аналізу

Аналізуючи отриману структуру після хімічного аналізу на рисунку 3.2 бачимо, що основну частину матеріалу займає бор. На світлих включеннях ВЕБів спостерігаємо наявність різних включень елементів. Однак, на даній структурі погано видно включення вуглецю та точний розподіл всіх елементів, тому необхідно розглянути кожний елемент сплаву окремо (рис. 3.3).

Аналізуючи рисунок 3.3 підтверджуємо, що матрицею даного матеріалу є карбід бору (B_4C), а на місті світлих включень бачимо наявність відповідних металів, а саме Ti, Zr, Mo, Nb та Ta. Аналіз також підтверджує, що даний сплав є евтектичним, так як з хімічної точки зору не спостерігається повне розчинення компонентів один у одному.

Для того, щоб переконатися остаточно в аналізованих даних необхідно провести фазовий аналіз спрямовано-армованого матеріалу системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$.

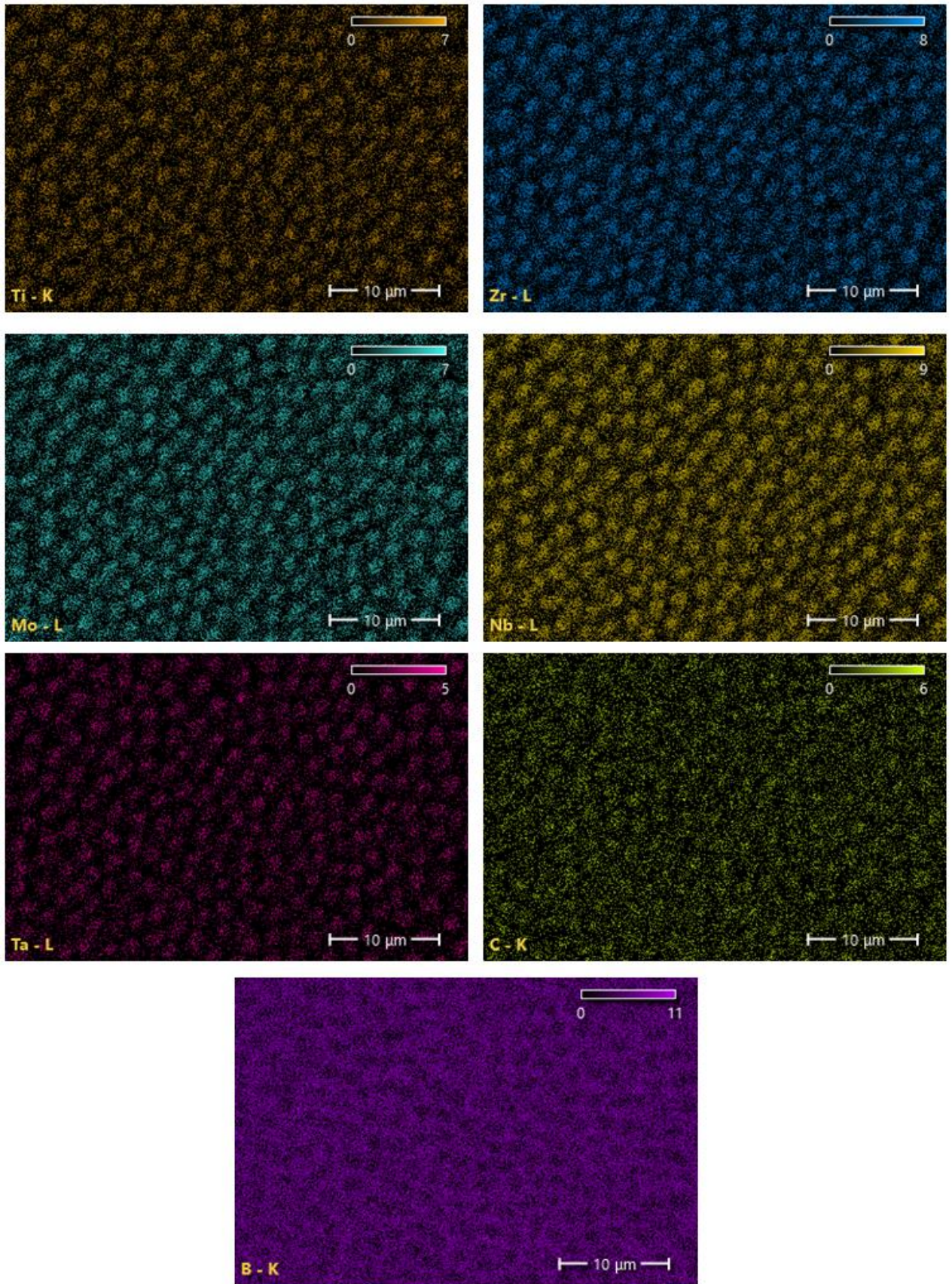


Рисунок 3.3 – Хімічний розподіл кожного елементу спрямовано-армованого композиту системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$

3.3 Фазовий аналіз структури матеріалу

Цей метод дослідження ґрунтується на тому, що кожна кристалічна речовина має свій унікальний дифракційний спектр, який може бути використаний для її ідентифікації. У випадку, коли у зразку присутня суміш різних речовин, їх дифракційні спектри накладаються один на одного. Це ми якраз спостерігаємо при хімічному аналізі спрямовано-армованого композиту системи $\text{B}_4\text{C}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$. Хімічний склад потрібен для того, щоб скласти список кристалічних фаз перед проведенням фазового аналізу. Результати фазового аналізу наведені на рисунку 3.4.

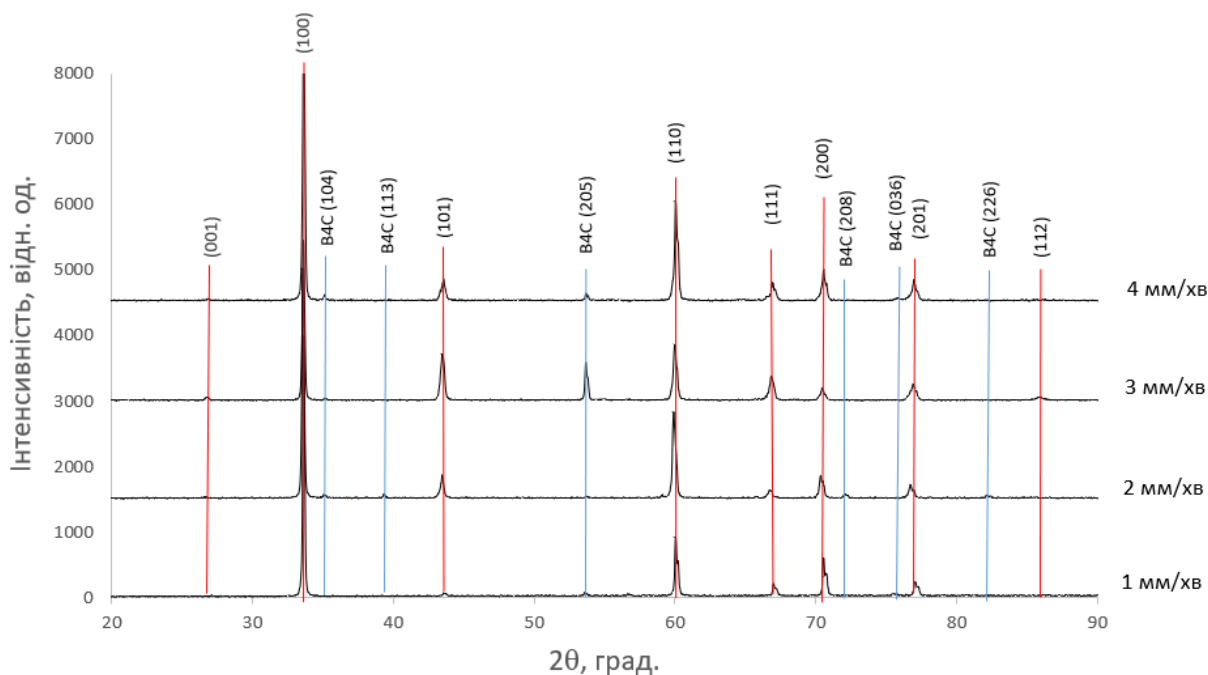


Рисунок 3.4 – Дифрактограма спрямовано-армованого матеріалу системи $\text{B}_4\text{C}-(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Mo}, \text{Nb}, \text{Ta})\text{B}_2$

Аналізуючи дифрактограму на рисунку 3.4 бачимо, що матеріал складається з двох фаз, B_4C (позначений синьою лінією на рисунку) та ВЕБа (позначений червоною лінією на рисунку). Отримані дані для високоентропійного дибориду задовільно співпадають з даними отриманими у статті Гільда зі співавторами [38].

Оскільки на дифрактограмі найбільшу інтенсивність має пік ВЕБа з індексом (100), то можна стверджувати, що саме ця орієнтація є переважною під час кристалізації. Пік на куті 2θ зі значенням 53° з індексом (205) має найбільшу інтенсивність та вказує на переважну орієнтацію для B_4C .

3.4 Дослідження мікротвердості та тріщиностійкості матеріалу

За допомогою мікротвердоміра MHV-1000, оптичного мікроскопу Neophot 21 та програми «Imagelab 1.0» були досліджені механічні властивості спрямовано-армованого матеріалу системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$. За допомогою формули 2.6 було розраховано теоретичну мікротвердість, яка складає 36,09 ГПа. Для розрахунку, згідно навчального посібника, мікротвердість за Віккерсом для B_4C складає 40 ГПа [39], а для $(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$ – 23 ГПа згідно статті [39]. Експериментальні значення мікротвердості по Віккерсу та тріщиностійкості для даного матеріалу при різних швидкостях вирощування кристалу наведені на рисунках 3.5 та 3.6.

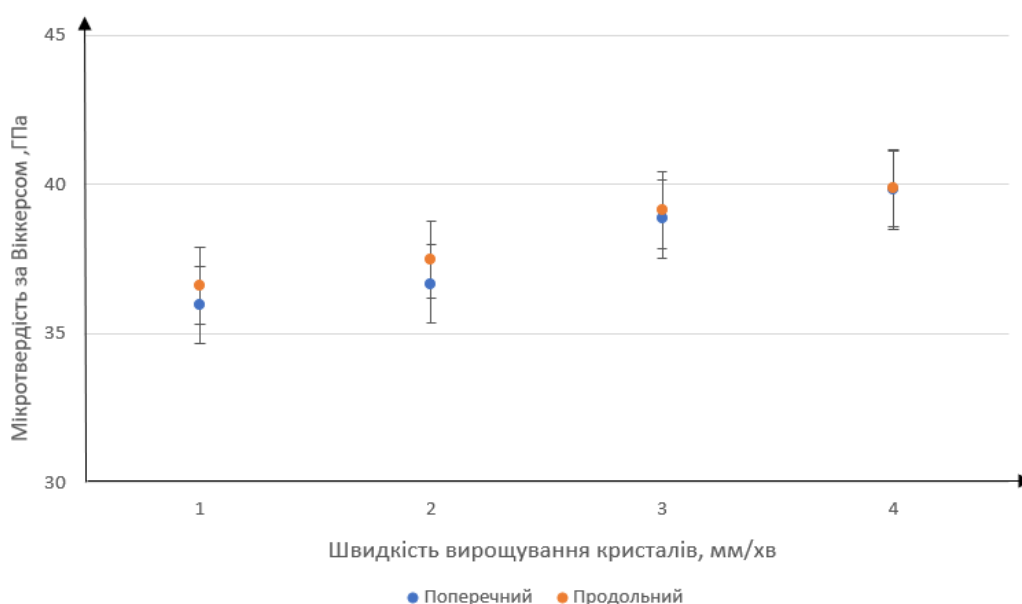


Рисунок 3.5 – Графік залежності значення мікротвердості по Віккерсу від швидкості вирощування кристалів у спрямовано-армованому композиті системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$

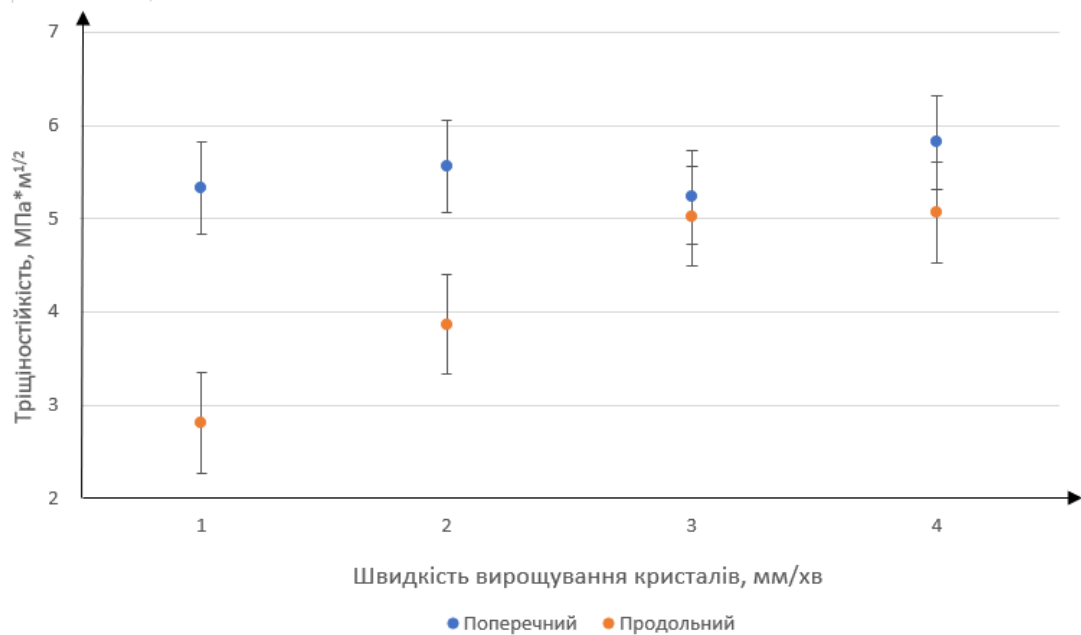


Рисунок 3.6 – Графік залежності значення тріщиностійкості від швидкості вирощування кристалів у спрямовано-армованому композиті системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$

Аналізуючи графіки на рисунках 3.5 та 3.6 спостерігаємо, що при збільшенні швидкості вирощування кристалів збільшується мікротвердість та тріщиностійкість матеріалу. Це пов'язано з тим, що за рахунок більшої швидкості росту кристалів розмір фазових складових зменшується і, відповідно, збільшується їх кількість при одному і тому ж процентному співвідношенні. Тобто, чим більше включень, тим більше бар'єрів на шляху руху тріщин. Також за рахунок їх утворень, подібно до правила Холла-Петча, зменшення розмірів структурних складових та відстані між ними приводить до збільшення кількості міжфазних поверхонь розділу в матеріалі. За рахунок цього збільшується значення мікротвердості.

На рисунку 3.7. приведений типовий відбиток піраміди Вікерса після вимірювання твердості.

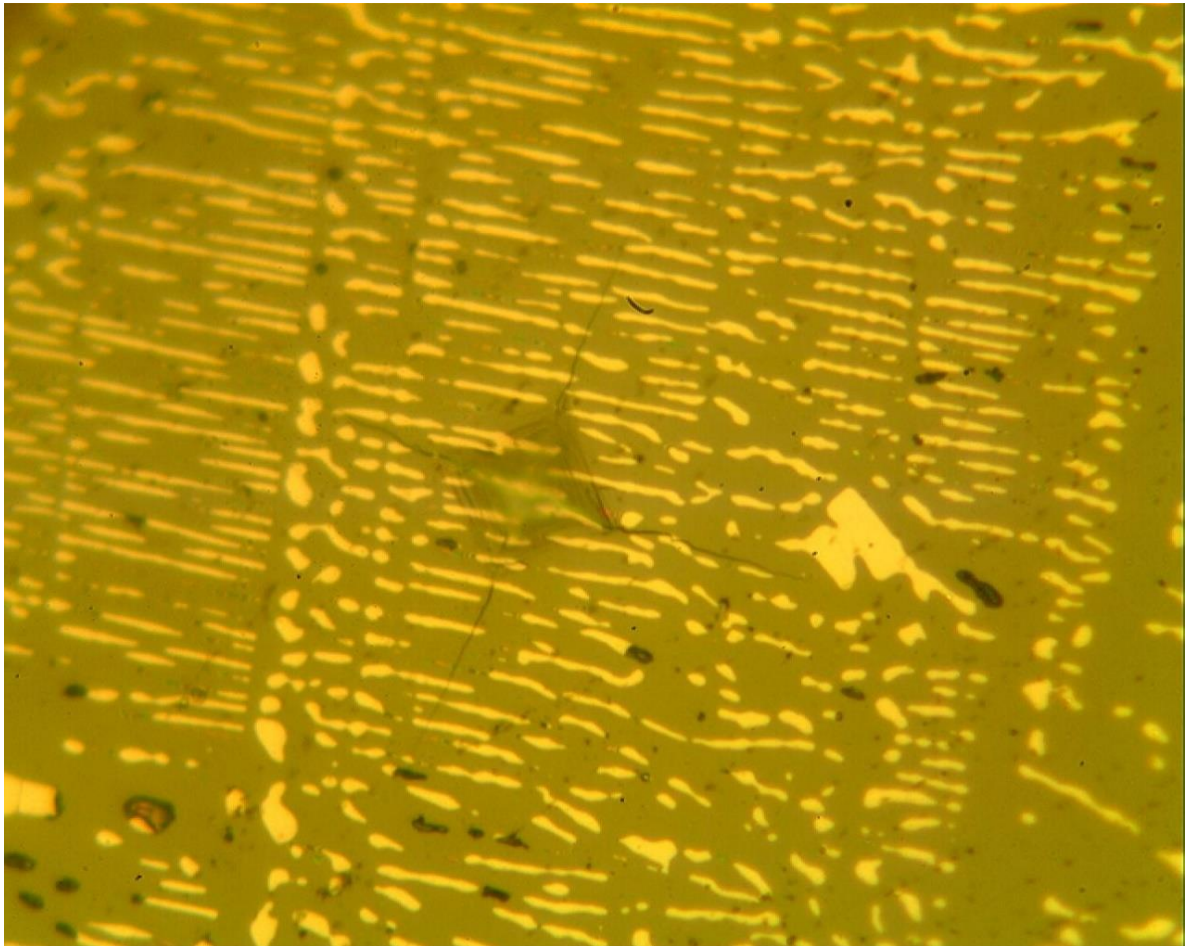


Рисунок 3.7 – Поширення тріщин від кутів відбитка індентора Вікерса у спрямовано-армованому композиті системи $B_4C-(Ti,Zr,Mo,Nb,Ta)B_2$

Проаналізувавши рисунок 3.7 спостерігаємо, що тріщини, які розповсюджуються від кутів відбитка змінюють напрямок руху, проходять крізь матрицю карбіду бору, не руйнуючи армуючу фазу, чи взагалі зупиняються. Тобто у даному композиційному матеріалі працюють добре відомі і типові для спрямовано армованих керамічних матеріалів механізми зміцнення, такі як: мостикування, відхилення і зупинки тріщин на армуючих включеннях. За рахунок цих механізмів підвищується тріщиностійкість матеріалу.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Науково-технічна актуальність

У даній роботі розроблявся спрямовано закристалізований сплав системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$. Даний матеріал буде застосовуватися для створення високотемпературних конструкційних матеріалів для авіакосмічної техніки. Кераміка на основі боридів має високу температуру плавлення ($>3000\text{ }^{\circ}C$), велику твердість, відмінну стійкість до окислення та низьку щільність (густину). Наприклад, для даного матеріалу щільність становить $2,94\text{ г/см}^3$. Також вони мають відносну щільність понад 90%. Ця кераміка також характеризується низьким коефіцієнтом теплового розширення, що забезпечує їхню стабільність за різних температурних змінах.

В авіакосмічній техніці широко застосовуються високотемпературні конструкційні матеріали з боридної кераміки. Ці матеріали використовуються для створення термозахисних покриттів, які призначені для захисту поверхонь від надмірного нагріву під час входження в атмосферу. Вони також знаходять застосування у виготовленні термостійких деталей, наприклад, лопаток турбін, сопел ракетних двигунів, горілок та інших елементів, які піддаються значному тепловому навантаженню [40].

Завдяки своїм унікальним властивостям, високотемпературні матеріали з боридної кераміки забезпечують підвищену надійність, тривалу експлуатаційну термостійкість і здатність працювати в екстремальних умовах, що робить їх незамінними в авіакосмічній промисловості.

4.2 Розрахунок планових витрат

Аналіз всіх витрат, пов'язаних з реалізацією проекту, дозволяє встановити його собівартість або кошторисну вартість. Планування спрямоване на зниження трудових і матеріальних витрат з метою досягнення оптимальних результатів при мінімальних витратах.

Планова собівартість визначається за наступними статтями витрат: витрати на оплату праці науково-дослідницького персоналу; єдиний соціальний внесок; вартість матеріалів; вартість спеціального обладнання; витрати на службові відрядження; інші прямі витрати по темі; накладні витрати [41].

4.2.1 Витрати на оплату праці науково-дослідницького персоналу

Витрати, включені у цю категорію, охоплюють заробітну плату працівників усіх рівнів, зайнятих у виконанні завдань, пов'язаних із даною темою. Крім того, варто враховувати, що для тем, які фінансуються з державного бюджету, прибуток не враховується, тому в цю категорію витрат включається лише основна заробітна плата (без премій та інших виплат, що здійснюються з прибутку) [39].

Витрати на оплату праці розраховують на основі даних про трудомісткість окремих робіт по темі. Розрахунок ведеться в людино-днях (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Трудомісткість етапів

Найменування робіт по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів		
	Завідувач кафедри	Інженер-дослідник	Лаборант
Підготовчий етап	3	5	5
Проведення експерименту	8	25	10
Написання записки	6	20	—
Оформлення, перевірка та захист	6	8	—
Разом за виконавцями теми	23	58	15

Середньоденна заробітна плата за категоріями виконавців розраховується шляхом ділення їх посадового місячного окладу на 21,2 (де 21,2 – усереднене число робочих днів за місяць). Витрати на посадових окладів безпосередніх їх виконавців наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада	Планова трудомісткість, людино-днів	Заробітна плата, грн		
		Місячний оклад	Денна заробітна плата	Усього за виконавцями
Завідувач кафедри	23	45 072,79	2 126,08	48 899,84
Інженер- дослідник	58	8 475,28	399,78	23 142
Лаборант	15	6 766	319,15	4 787,25
Разом	—			76 829,09

4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) є обов'язковим внеском, який здійснюється для загальнодержавного соціального 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.4.2).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22, \quad (4.1)$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 76829,09 \cdot 0,22 = 16902,4 \text{ грн.}$$

4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Витрати на матеріали, необхідні для проведення даної науково-дослідної роботи (НДР), можуть бути визначені шляхом множення ціни одиниці матеріалу на загальну кількість використаного матеріалу [41]. Результати розрахунків зведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Вартість матеріалів, необхідних для виконання НДР

Найменування матеріалів	Стандарт	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Порошок B_4C	98%	кг	0,1	675	67,5
Порошок TiB_2	99,5%	кг	0,05	1 300	65
Порошок ZrB_2	99,5%	кг	0,05	5 805,43	290,27
Порошок MoB_2	99,5%	кг	0,05	11 022,97	551,15
Порошок NbB_2	99,5%	кг	0,05	11 022,97	551,15
Порошок TaB_2	99,5%	кг	0,05	11 022,97	551,15
Разом	—	—	—	—	2 076,22

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

$$T_v = 2076,22 \cdot 0,1 = 207,62 \text{ грн.}$$

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

$$B_m = 2076,22 + 207,62 = 2283,84 \text{ грн.}$$

4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання

У даній роботі використовуються наявні засоби обладнання, включаючи установку для безтигельної зонної плавки Кристал-206, металографічний мікроскоп NEOPHOT-21, установку Rigaku Ultima IV з випромінюванням $\text{CuK}\alpha$, RIGAKU ULTIMA IV та мікротвердомір MHV-1000. Додаткове спеціальне обладнання не було придбано.

4.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій

У виконанні даної роботи сторонні організації участі не приймали.

4.2.6 Витрати на службові відрядження

Дослідження були проведені з використанням наявного обладнання, яке знаходиться в лабораторіях КПП 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.

4.2.7 Інші прямі невраховані витрати по темі

Ця стаття включає всі додаткові витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідних робіт, які не були враховані в попередніх статтях. Серед таких витрат враховується 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 [41].

$$I_{\text{в}} = (ЗП + \text{€CB} + B_{\text{м}}) \cdot 0,1, \quad (4.2)$$

Наразі $I_{\text{в}}$ буде становити:

$$I_{\text{в}} = (76829,09 + 16902,4 + 2283,84) \cdot 0,1 = 9601,53 \text{ грн.}$$

4.2.8 Накладні витрати

Ця стаття включає різноманітні витрати, пов'язані з управлінням організацією-виконавцем теми. Серед цих витрат враховуються витрати на винахідництво і раціоналізацію, амортизацію основних засобів, науково-технічну інформацію, забезпечення нормальних умов праці та техніки безпеки, оплату послуг банків, а також податки, збори та інші обов'язкові платежі та витрати, пов'язані з цим [41].

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

$$H_{\text{в}} = (ЗП + \text{€CB} + B_{\text{м}} + I_{\text{в}}) \cdot 0,2, \quad (4.3)$$

Наразі H_B буде становити:

$$H_B = (76829,09 + 16902,4 + 2283,84 + 9601,53) \cdot 0,2 = 21123,27 \text{ грн.}$$

4.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Для складання планової калькуляції вартості досліджень з даної теми використовуються обчислені значення та нормативні дані (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Назва статей	Умовне позначення	Сума, грн.	Обґрунтування
Витрати на оплату праці	ЗП	76 829,09	За розрахунками
Єдиний соціальний внесок	ЄСВ	16 902,4	22 % від ЗП
Матеріали для проведення досліджень	V_M	2 283,84	За розрахунками
Витрати на спеціальне обладнання	$V_{об}$	—	Не планується
Витрати на послуги сторонніх організацій	V_{co}	—	Не планується
Інші прямі витрати	I_B	9 601,53	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
Накладні витрати	H_B	21 123,27	20 % від усіх прямих витрат
Всього		126 740,13	Сума попередніх статей

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Дослідження, що виконуються в цій роботі, мають характер пошукових та теоретичних досліджень. Для визначення доцільності проведення цієї роботи необхідно розрахувати очікуваний економічний ефект науково-дослідних робіт. Проте такі розрахунки можна здійснити лише для досліджень, які прямо спрямовані на створення нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції та розробку нових конструкцій [41]. Тому слід використовувати бальну систему оцінки економічної ефективності за наступними показниками:

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

Умовні коефіцієнти (K_1 , K_2 , K_3 , K_4) використовуються для визначення частки сумарного річного економічного ефекту, яка буде утворюватися за кожною з перерахованих шкал. Далі буде надано більш детальний опис системи оцінки для кожної шкали, починаючи з оцінки важливості розробки.

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення [41]:

- 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 K_2 може приймати такі значення [41]:

- 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 К3 може приймати такі значення [41]:

- 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 К4 може приймати такі значення [41]:

- 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 [39].

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (4.4)$$

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

$$Б = 1 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 7 = 336$$

Таблиця 4.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показники оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристика даної розробки	Кількість балів
Важливість розробки	K_1	Робота ініціативна, не є завданням будь-яких директивних органів або частиною комплексної програми	1
Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися споживачі однієї галузі	8
Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне	6
Складність проведення дослідження	K_4	Робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень.	7

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot V_{\text{НДР}}, \quad (4.5)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

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

$B_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 4.4);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 336 - 0,25 \cdot 126740,13 = 136314,97 \text{ грн.}$$

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:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}. \quad (4.6)$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = \frac{136314,97}{126740,13} = 1,076.$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,076 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

4.4 Висновки до розділу

Під час виконання даного розділу розраховали сумарні витрати на виконання НДР, який складає 126 740,13 грн. Також визначили, що проведений економічний аналіз підтвердив доцільність даного науково-дослідницької роботи з економічної перспективи.

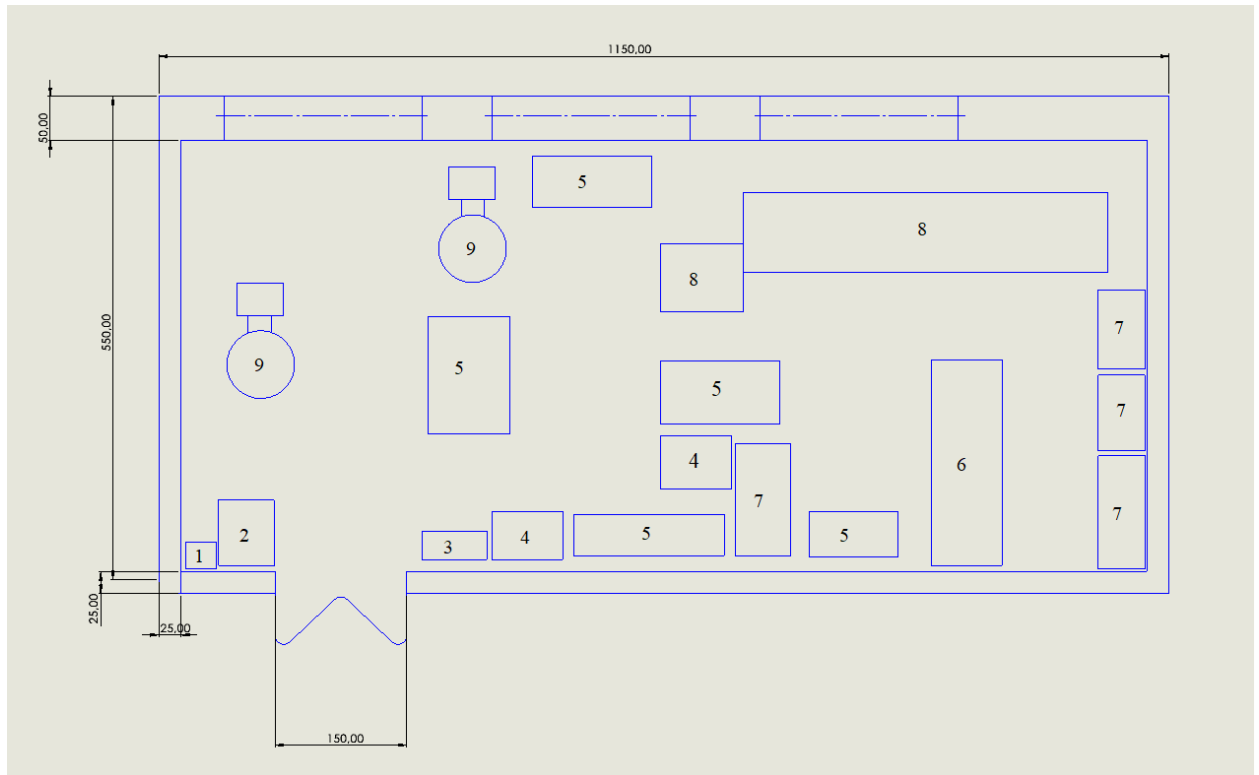
5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Дипломна робота виконується в «Лабораторії технологій тугоплавких сполук» №028 навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона.

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності [42]. Ця сфера має велике значення для гарантування безпеки та здоров'я на робочому місці, запобігання нещасним випадкам та професійним захворюванням, а також підвищення продуктивності та задоволеності працівників. Для досягнення цих цілей необхідно ретельно проводити дослідження та оцінку ризиків на робочому місці, розробляти та впроваджувати ефективні системи управління охороною праці, надавати навчання та інструктажі працівникам, а також забезпечувати належне технічне обладнання та захисні засоби.

5.1 Характеристика об'єкту (комплексу) та аналіз небезпечних факторів

Як зазначалось вище, робота проводиться в лабораторії № 028 навчального корпусу №9 (рис. 5.1). Розміри лабораторії вказані в сантиметрах. Згідно з ДБН В.2.2-28:2010 товщина зовнішніх стін має бути 500 мм, а товщина внутрішніх стін – 250 мм, ширина головних проходів усередині приміщень проектується розміром 1,5 м [42].



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

Рисунок 5.1 – План науково-дослідної лабораторії №028

Як видно зі схеми лабораторії на рисунку 5.1 її ширина складає 550 см (5,5 м), довжина – 1150 см (11,5 м) та ширину проходу – 150 см (1,5 м). Товщина зовнішніх складає 50 см, а товщина внутрішніх стін – 25 см. Тож можемо прийти до висновку, що поки дане приміщення відповідає умовам праці.

Специфікація основного технологічного обладнання, яке використовувалось для виконання науково-дослідної роботи наведена в таблиці 5.1. Під час роботи використовувалися: сушильна шафа, верстат електроерозійного різання та установка безтигельної зонної плавки.

Таблиця 5.1 – Специфікація технологічного обладнання

№	Найменування	Розміри Д×Ш×В, мм	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 електроерозійн ого різання СХ8	1300×1100× 1700	Максимальна продуктивність 5 0-100 мм ² /хв.	2	4
3	Установка «Кристал-206»	-	-	1	8

Також згідно з ДБН В.2.2-28:2010, висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа – 15 м³ та 4,5 м² відповідно на кожного працівника [43]. Характеристики приміщення в якому знаходиться робоче місце наведені в таблиці 5.2. Над роботою працювало троє осіб, тому розрахунок розміру площі та об'єму на людину відбувався з цим урахуванням.

Таблиця 5.2 – Параметри науково-дослідної лабораторії

Довжина, м	Ширина, м	Висота, м	Площа, м ²	Об'єм, м ³	Площа на людину, м ² /люд.	Об'єм на людину, м ³ /люд.
11,5	5,5	4,5	63,25	284,63	21,08	94,88

Щоб впевнитися, що приміщення відповідає основним геометричним вимогам, в таблиці 5.3 наведено порівняння розрахованих значень площі та об'єму на людину з нормативними.

Таблиця 5.3 – Реальні та нормативні характеристики приміщення і розміщення технологічного обладнання

№	Параметр приміщення	Реальне значення	Нормативні значення
1	Площа на 1 працюючого	21,08 м ²	4,5 м ²
2	Об'єм на 1 працюючого	94,88 м ³	15 м ³
3	Мінімальна ширина проходу	1,5 м	1,5 м

З отриманих результатів приходимо до висновку, що дане приміщення відповідає основним геометричним вимогам, які ставляться до будівель промислового призначення.

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

Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів відіграє важливу роль у процесі забезпечення безпеки та охорони праці. Головна мета цієї оцінки полягає у визначенні рівня ризику, пов'язаного з конкретними факторами, що можуть негативно впливати на безпеку та здоров'я працівників [44].

В цьому пункті будуть розглянуті наступні небезпечні фактори, які виникають під час проведення науково-дослідної роботи: фізичні небезпеки; хімічні небезпеки; електробезпека; пожежна небезпека та ергономічна небезпека.

5.2.1 Фізичні небезпеки

Із існуючих фізичних небезпечних джерел, дане обладнання виділяє тільки шум (табл. 5.4) [45]. Шум по різному впливає на роботу та працівників. Це призводить до зниження продуктивності, спричинення втоми та стресу, загрози для слуху, ускладнення комунікації та негативного впливу на загальне здоров'я та благополуччя працівників.

Таблиця 5.4 – Основні фізичні небезпеки під час проведення технологічного процесу

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

Шум який виникає у лабораторії можна класифікувати як постійний. Це означає, що рівень звуку під час роботи з обладнанням протягом усього робочого дня не змінюється більше ніж на 5 дБА. Однак, згідно ДСН 3.3.6.037-99 під час одночасної та тривалої роботи обладнання, рівень шуму може перевищувати допустимі норми. Але це може призвести до виникнення профзахворювань [46]. Працюючи в умовах високого рівня шуму, продуктивність ручної праці може знизитись до 60%, а при розрахунках цей показник може становити навіть 50%. Для зменшення шкідливого впливу виробничого шуму на працівників шумних виробництв, послаблення

передавання його в сусідні приміщення застосовують звуко- і віброізоляцію, звуко- і вібропоглинання та глушники шуму [47].

Допустимий рівень шуму для лабораторних приміщень, де проводяться експериментальні роботи, становить 75 дБА [46]. В даній лабораторії рівень шуму вимірюють принаймні один раз кожні пів року за допомогою шумоміра. Результати виміру наведений в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Реальні та нормативні фактори небезпеки під час проведення технологічного процесу

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

Отже, згідно отриманих результатів маємо, що реальне значення шуму в лабораторії – 65 дБА і навіть якщо працювати на даному обладнанні довго, то значення шуму підвищиться принаймні на 5 дБА, що вписується в нормативне значення для лабораторних приміщень. Але, не зважаючи на це, для кращого ментального здоров'я необхідно робити перериви в роботі чи використовувати спеціальні шумозахисні навушники.

5.2.2 Хімічні небезпеки

Єдиним хімічним небезпечним джерелом в даній науково-дослідній роботі є порошок. Хоча під час роботи не було застосовано ніяких шкідливих речовин, під час змішування, дозування та пресування порошків карбіду бору та диборидів перехідних металів (Ti, Zr, Mo, Nb, Ta,) може відбуватися утворення дрібнодисперсного пилу.

Лабораторні умови експерименту забезпечують дотримання гранично допустимих меж концентрацій шкідливих речовин, які мають вплив на людський організм. Усі речовини, що утворюють пил, зберігаються в посуді, що розміщені у витяжній шафі (рис 5.2).



Рисунок 5.2 – Зображення вентиляції

Як вже було зазначено вище та з рисунку 5.2 спостерігаємо, що в місці збереження використовуваного порошку та над робочим місцем для проведення необхідних операцій знаходиться вентиляція.

Вдихання дрібнодисперсного пилу може спричиняти подразнення дихальних шляхів, запалення легенів та дихальних шляхів, що може призводити до таких симптомів, як кашель, запалення слизової оболонки носа, проблеми з диханням та подихом. Велика кількість дрібнодисперсного пилу в організмі може негативно позначатися на загальному стані здоров'я. Це може спричиняти загальну отруєність організму, порушення роботи органів і систем, а також збільшувати ризик розвитку серйозних захворювань, включаючи серцево-судинні захворювання та рак [48]. Тому для того, щоб точно мінімізувати контакт з утвореним пилом, не зважаючи на наявність вентиляції, слід одягти захисний одяг (рукавички, халат), респіратор та захисні окуляри.

5.2.3 Електробезпека

Електробезпека – система організаційних і технічних заходів і засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу

електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики (ДСТУ 2843-94)[45].

В даній лабораторії небезпеку ураження струму несуть всі прилади, які задіяні в роботі. Для живлення установки «Кристал 206» використовується струм напругою 380 В, а для сушильної шафи та верстата електроерозійного різання – 220 В.

Електричний струм не виявляється органами чуття людини. Ураження людини електричним струмом небезпечне тому, що електричний струм може виникнути зненацька на металевих неструмопровідних частинах електроустановок, апаратів, механізмів, а також на поверхні землі, коли людина не застосовує засобів захисту [44].

Ураження електричним струмом відносяться до небезпечних факторів, що відображаються на всьому організмі. Проте всі електротравми умовно поділяють на два основних види: місцеві електротравми, коли виникає місцеве ураження організму, електричний опік, електричні знаки, металізація шкіри; загальні електротравми, коли уражається весь організм людини через порушення нервової системи, нормальної діяльності життєво важливих органів і систем – електричний удар [44].

Для запобігання ураження струмом від електроприладів необхідно проводити періодичну перевірку приладів та навчати персонал безпечному виконанню робіт на них (ДНАОП 0.00-1.21-98) [49].

Нижче наведено основні небезпеки, які створюються в технологічному процесі під час роботи з електричними приборами (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Основні небезпеки під час роботи з електричними приборами

№	Найменування обладнання	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1	«Кристал – 206»	Кожух та корпус	Пошкодження ізоляції; помилкове вимикання; замкнення дроту на землю	Робітник; технологічний процес
2	Сушильна шафа	Кожух та корпус	Пошкодження ізоляції; помилкове вимикання; замкнення дроту на землю	Робітник; технологічний процес
3	Верстат електроерозійного різання	Кожух, корпус та дріт	Пошкодження ізоляції; помилкове вимикання; замкнення дроту на землю	Робітник; технологічний процес

Категорія приміщення визначається наявністю в приміщенні чинників підвищеної або особливої небезпеки електротравм [50]. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 дана лабораторія відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою [51]. Вона має бетонну підлогу та в ній використовується провідний порошок. Як вже зазначалось, у нас використовується обладнання яке живиться напругою 220 В і 380 В, тому його необхідно забезпечити захисним заземленням. Для уникнення випадкового контакту зі струмоведучими частинами, що перебувають під напругою, встановлюються огорожі у вигляді сіток ППЕУ-89. Також краще під час роботи використовувати гумові рукавички, якщо це не буде перешкоджати роботі, гумові чоботи та бути обачними і дотримуватися правил безпеки.

5.2.4 Пожежна безпека

У даній лабораторії знаходяться тверді горючі речовини та матеріали. Це дає нам підставу вважати, що дане приміщення має категорію Г та шанс

виникнення пожежі класу А. Приміщення категорії Г мають негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, спалимі рідини і тверді горючі речовини, які спалюються або утилізуються як паливо [52]. Будівля відноситься до I ступеня вогнестійкості (ДБН В.1.1-7-2002) [53].

За рахунок використовуваного обладнання та вище написаного приходимо до висновку, що пожежонебезпечна зона відноситься до класу II-Па, а вибухонебезпечна зона – до класу 2 [54].

Нижче наведена таблиця де наведені основні пожежні небезпеки, які створюються під час технологічного процесу (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Основні пожежні небезпеки в технологічному процесі

№	Найменування обладнання	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1	«Кристал – 206»	Індуктор	Коротке замикання; порушення правил пожежної безпеки; необережне користування відкритим вогнем	Робітник; технологічний процес
2	Сушильна шафа	Блок електроніки; нагрівальні елементи	Коротке замикання; порушення правил пожежної безпеки; необережне користування відкритим вогнем	Робітник; технологічний процес
3	Верстат електроерозійного різання	Генератор	Коротке замикання; порушення правил пожежної безпеки; необережне користування відкритим вогнем	Робітник; технологічний процес

Враховуючи всі перелічені небезпеки та фактори, корпус вживає різноманітні заходи для забезпечення пожежної безпеки. У даній лабораторії встановлено чотири пожежні сигналізатори ИП-105, які передають сигнал до центральної панелі пожежної сигналізації. Вони спрацьовують за підвищенням температури до значення $t = 72\text{ }^{\circ}\text{C}$. А в коридорі розташований пожежний кран з приєднаним пожежним рукавом.

Також для запобігання пожежі необхідно мати в приміщенні вогнегасники та плани з евакуацією (рис. 5.3), так як важливим аспектом пожежної безпеки є належна організація евакуаційних шляхів, які повинні бути вільними від перешкод. Необхідно проводити регулярні перевірки та

технічне обслуговування обладнання для пожежної безпеки. Ці заходи сприяють зменшенню ризику пожежі, ранньому виявленню вогню, забезпеченню безпечної евакуації та захисту працівників і майна. Також головне під час роботи бути уважними та дотримуватися правил безпеки. Так як, не зважаючи на всі прилади безпеки, через нашу неуважність та легковажність може статися неминуче.

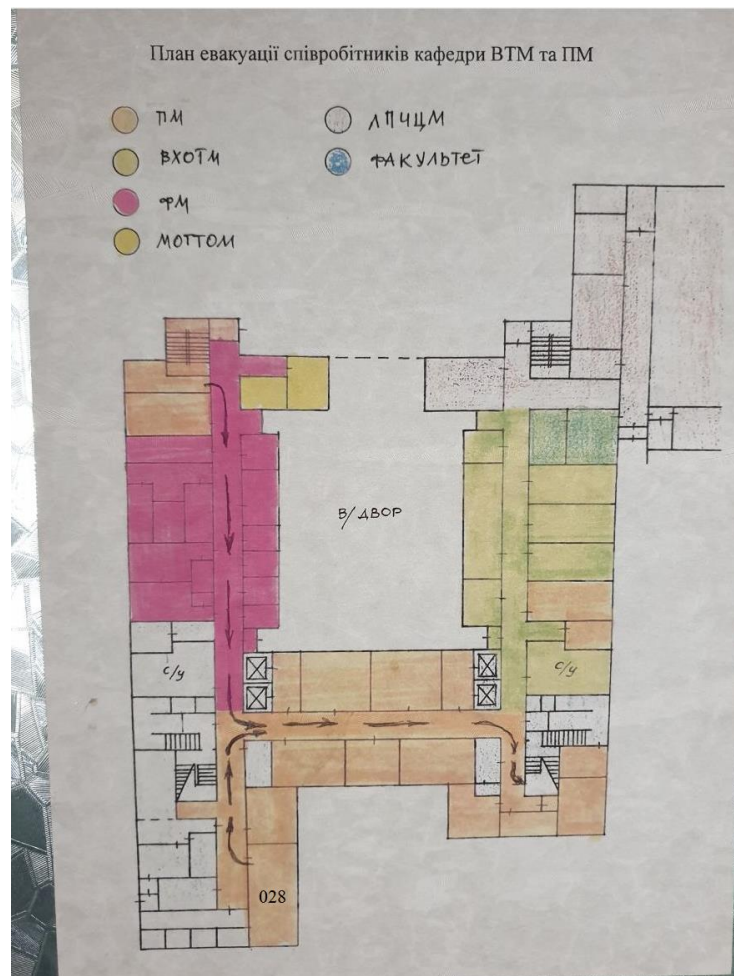


Рисунок 5.3 – План евакуації

5.2.5 Ергономічна безпека

Крім вищеперелічених небезпек, також необхідно врахувати небезпеку яка виникає через людський фактор або умов праці.

Ергономіка – наукова дисципліна, що комплексно вивчає людину (групу людей) у конкретних умовах її (їх) діяльності, пов'язаної з використанням машин (технічних засобів), якщо коротко – система «людина – машина» (СЛМ) (рис. 5.4). Виникнення даної галузі обумовлено бурхливими темпами науково – технічного прогресу й зростанням ролі людського фактора. Про це свідчать техногенні аварії на атомних електростанціях, заводах хімічних концернів, залізничні катастрофи й падіння літаків. Аналіз цих подій показує, що в багатьох випадках були допущені помилки людей. Вони відбувалися як через недисциплінованість, так і через те, що людина була поставлена в такі умови, за яких її надійність суттєво знижується [56].

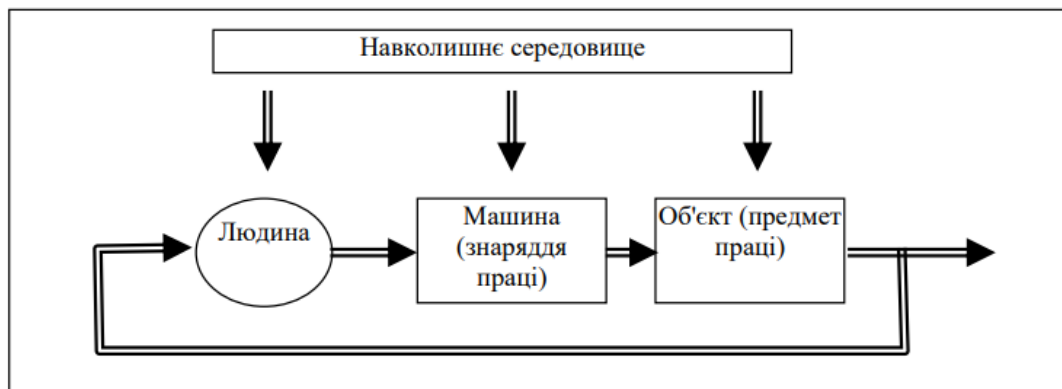


Рисунок 5.4 – Структурна схема системи СЛМ [52]

Недостатня організація робочого місця або неправильні рухи тіла можуть призвести до розвитку захворювань м'язів та скелетної системи або спричинити травми. У науково-дослідній роботі можуть існувати вимоги до тривалого сидячого положення, повторних рухів або піднімання важких предметів. Важливо створити комфортні умови праці, використовувати ергономічне обладнання та регулярно проводити паузи для розтяжки та відпочинку.

5.3 Застосування засобів індивідуального захисту

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) є важливою складовою безпеки праці і використовуються для захисту працівників від потенційних небезпек під час роботи в лабораторії.

В першу чергу ЗІЗ необхідні для ухилення або зниження впливу шкідливих та небезпечних факторів на організм, а також для захисту від забруднення. Їх використання допомагає уникнути контакту з шкідливими речовинами, пилом, шумом, випромінюванням та іншими факторами, які можуть спричинити професійні захворювання. Вони дозволяють знизити ризик виникнення хронічних захворювань, алергічних реакцій та інших небажаних наслідків. Також вони допомагають дотримуватися встановлених нормативів та вимог безпеки на робочому місці. Це включає в себе дотримання правил щодо захисту від шкідливих речовин, уникання травм та забезпечення безпечних умов праці [56].

В підрозділах вище вже зазначалися ЗІЗ які необхідні для роботи над обладнанням під час виникнення різних небезпек, тому нижче наведені підсумки необхідних ЗІЗ для виконання даної науково-дослідної роботи:

- протишумові навушники;
- захисні окуляри;
- респіратор;
- спецодяг: халати, фартухи;
- гумові рукавички;
- електроізолювальні чоботи чи черевики.

Однак використовувати тільки ЗІЗ недоцільно. Проаналізувавши всі написані пункти можна прийти до висновку, що краще для захисту від перерахованих небезпек є комбіноване поєднання всіх захистів. Так як зміна технології, автоматизація, герметизація устаткування, ефективна вентиляція тощо, не можуть забезпечити достатню безпеку під час роботи [57].

ВИСНОВКИ

Під час виконання даної дипломної роботи було проаналізовано літературу по темі роботи. При аналізі було розглянуто інформацію про властивості і структуру кожного компоненту спрямовано закристалізованого сплаву системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$, сплавоутверення в системі B_4C-MeB_2 , способи його отримання та можливі області застосування.

Методом безтигельної зонної плавки отримано спрямовано закристалізований евтектичний сплав системи $B_4C-(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$.

Проаналізовано мікроструктуру, хімічний та фазовий склад і встановлено, що композит складається з двох фаз, а саме, карбіду бору та високоентропійного бориду $(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta)B_2$. Отримані дані підтверджуються літературними даними отриманими для індивідуальних компонентів.

Показано, що зі збільшенням швидкості вирощування кристалів стрижневі включення зменшуються в розмірах, а їх кількість зростає.

Дослідження механічних властивостей показало збільшення мікротвердості та тріщиностійкості з ростом швидкості вирощування кристалів.

Було визначено та обґрунтовано необхідну кількість робітників, планову калькуляцію кошторисної вартості та показники актуальності під час проведення даної науково-дослідної роботи. Також було виявлено та обґрунтовано заходи для запобігання виникнення загроз під час проведення дослідження.

CONCLUTIONS

During the completion of this diploma work, the literature on the topic of the work was analyzed. During the analysis, information on the properties and structure of each component of the directionally crystallized alloy of the B_4C -(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta) B_2 system, alloy formation in the B_4C -Me B_2 system, methods of its production and possible areas of application were considered.

A directionally crystallized eutectic alloy of the B_4C -(Ti, Zr, Mo, Nb, Ta) B_2 system was obtained by the method of crucibleless zone melting.

The microstructure, chemical and phase composition were analyzed and it was established that the composite consists of two phases, namely, boron carbide and high-entropy boride (Ti, Zr, Mo, Nb, Ta) B_2 . The obtained data are confirmed by literature data obtained for individual components.

It is shown that with an increase in the rate of crystal growth, rod inclusions decrease in size, and their number increases.

The study of mechanical properties showed an increase in microhardness and crack resistance with increasing crystal growth rate.

The necessary number of workers, the planned calculation of the estimated cost and indicators of relevance during the implementation of this research work were determined and substantiated. Measures to prevent the emergence of threats during the study were also identified and substantiated.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук [Текст] / А. М. Степанчук. – Київ : Видавництво “Політехніка”. – 2006. – 353 с.
2. Суббота І. С. Інноваційні технології кераміки : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» [Текст] / І. С. Суббота, Л. М. Спасьонова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 65 с.
3. Boride Ceramics: Densification, Microstructure Tailoring and Properties Improvement [Text] / Pei Zhang, Ji Zou, De Wei Ni [and others] // Journal of Inorganic Materials. – 2012. – Vol. 27, №3. – p. 225-233.
4. Morrell R. Ceramic Matrix Materials [Text] / R. Morrell // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2016. – p. 1-24.
5. Матеріали на основі бору, карбіду бору та бориду [Електронний ресурс] // Енциклопедія Сучасної України. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-66966>. – Назва з екрана. – Дата звернення : 05.05.2023.
6. Бірюкович Л. О. Кристалохімія тугоплавких сполук : навч. посіб. [Текст] / Л. О. Бірюкович. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 112 с.
7. Карбид бора [Текст] / П. С. Кислый, М. А. Кузенкова, Н. И. Боднарчук [и др.]. – Київ : Наук. думка, 1988. – 216 с.
8. Перехідні метали [Електронний ресурс] // Вікіпедія : вільна енциклопедія [офіц. веб-сайт]. – Електрон. дані. – Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%85%D1%96%D0%B4%D0%BD%D1%96_%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B8. – Назва з екрана. – Дата перегляду : 05.05.2023.
9. Mechanisms of TiB₂ and graphite nucleation during TiC–B₄C high temperature interaction / O. Popov, V. Vishnyakov, S. Chornobuk [and others] // Ceramics International. – 2019. – Vol. 45, no. 14. – P. 16740–16747.
10. Stabilization and superconductivity of AlB₂-type nonstoichiometric molybdenum diboride by Sc doping [Text] / Wuzhang Yang, Guorui Xiao, Qinqing

Zhu [and others] // *Ceramics International*. – 2022. – Vol. 48, no. 14. – P. 19971-19977.

11. Preparation of titanium diboride TiB_2 by spark plasma sintering at slow heating rate [Text] / Jürgen Schmidt, Marian Boehling, Ulrich Burkhardt [and others] // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2007. – Vol. 8, no. 5. – P. 376–382.

12. Titanium Diboride (TiB_2) - Properties and Applications [Electronic resource] // AZoM.com. – Mode of access :

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=492>. – Title from screen. – date of access : 05.05.2023.

13. Zirconium diboride [Electronic resource] // Chemical Database Online. – Mode of access :

<https://www.chembk.com/en/chem/Zirconium%20diboride>. – Title from screen. – date of access : 06.05.2023.

14. Zirconium diboride [Electronic resource] // Wikipedia: the free encyclopedia [offic. website]. – Mode of access :

https://en.wikipedia.org/wiki/Zirconium_diboride. – Title from screen. – date of access : 07.05.2023.

15. Структурообразование и механические свойства диборида циркония в присутствии активирующих спекание добавок [Электронный ресурс] / О. Н. Григорьев, Б. А. Галанов, А. В. Коротеев [и др.]. – Киев. – Режим доступа : <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/114438/15-Grigoriev.pdf?sequence=1>.

– Название с экрана. – Дата просмотра : 05.05.2023.

16. Niobium diboride [Electronic resource] // Wikipedia: the free encyclopedia [offic. website]. – Mode of access :

https://en.wikipedia.org/wiki/Niobium_diboride. – Title from screen. – Date of access : 06.05.2023.

17. Chemical synthesis of niobium diboride nanosheets by a solid-state reaction route [Electronic resource] / Liangbiao Wang, Qianli Shen, Hengfei Qin [and others]. – 2018. – 36-40 p. – Mode of access :

[http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/167271/04-](http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/167271/04-Wang.pdf?sequence=1)

[Wang.pdf?sequence=1](http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/167271/04-Wang.pdf?sequence=1). – Title from screen. – Date of access : 06.05.2023.

18. Tantalum boride [Electronic resource] // Wikipedia: the free encyclopedia [offic. website]. - Electron. data. – Mode of access :

https://en.wikipedia.org/wiki/Tantalum_boride. – Title from screen. – Date of access : 07.05.2023.

19. Low-temperature deposition of TaB and TaB₂ by chemical vapor deposition [Text] / Motojima, Seiji; Kito [and others]. // Journal of Nuclear Materials. – Amsterdam : Elsevier, 1982. – Vol. 105, no. 2-3. – 262–268 p.

20. Мисливченко О. М. Особливості структуроутворення та властивості високоентропійних сплавів системи Cr-Al-Fe-Co-Ni-Cu-Mn-V : дис. ... канд. техн. наук. : 05.16.01 – металознавство та термічна обробка металів [Текст] / Олександр Миколайович Мисливченко. – Київ, 2016. – 163 с.

21. Seth Iwan. Synthesis and Ultrahigh Pressure Compression of High-Entropy Boride (Hf_{0.2}, Mo_{0.2}, Nb_{0.2}, Ta_{0.2}, Zr_{0.2})B₂ to 220 GPa [Text] / Seth Iwan, Christopher Perreault, Yogesh K. Vohra. / Materials 2023, 2022. – Vol. 16, no. 1. – P. 158.

22. Itaru Gunjishima. Characterization of Directionally Solidified B₄C–TiB₂ Composites Prepared by a Floating Zone Method [Text] / Itaru Gunjishima, Takaya Akashi, Takashi Goto // Materials Transactions. – 2002. – Vol. 43, no. 4. – P. 712–720.

23. T9: Calculating pseudobinary phase diagrams [MatCalc Documentation] [Electronic resource] // Matcalc - Solid State and Kinetics Precipitation. – Mode of access : <https://www.matcalc.at/wiki/doku.php?id=tutorials:t9>. – Title from screen. – Date of access : 07.05.2023.

24. Synthesis and properties of hot pressed B₄C–TiB₂ ceramic composite [Text] / XinYan Yue, ShuMao Zhao, Peng Lü [and others] // Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Vol. 527, no. 27-28. – P. 7215–7219.

25. Hot pressing [Electronic resource] // Wikipedia: the free encyclopedia [offic. website]. – Mode of access :

https://en.wikipedia.org/wiki/Hot_pressing. – Title from screen. – Date of access : 07.05.2023.

26. Hot Forging and Hot Pressing of AlSi Powder Compared to Conventional Powder Metallurgy Route [Text] / Sayed Moustafa, Walid Daoush, Ahmed Ibrahim [and others] // Materials Sciences and Applications. – 2011. – Vol. 02, no. 08. – P. 1127–1133.

27. Structural and Thermostructural Ceramics [Text] / Jon Binner, Tammana S.R.C Murthy // Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses. – 2021. – Vol. 2. – P. 3–24.

28. Гаряче пресування [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ni.biz.ua/2/2_9/2_9495_goryachee-pressovanie.html. – Назва з екрану. – Дата перегляду : 08.05.2023.

29. Spark Plasma Sintering [Text] / Umberto Anselmi-Tamburini // Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses. – 2021. – Vol. 1. – P. 294–310.

30. Spark plasma sintering [SubsTech] [Electronic resource] // main_page [SubsTech]. – Mode of access : https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=spark_plasma_sintering. – Title from screen. – Date of access : 08.05.2023.

31. Influence of spark plasma sintering parameters on densification and mechanical properties of boron carbide [Text] / Sairam K., Sonber J. K., Murthy T. S. R. [and others] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – Vol. 42. – P. 185-192.

32. Bulk Crystal Growth of Semiconductors: An Overview / R. Fornari // Comprehensive Semiconductor Science and Technology. – 2011. – Vol. 3. – P. 1-35.

33. Synthesis and properties of hot pressed B₄C–TiB₂ ceramic composite [Text] / XinYan Yue, ShuMao Zhao, Peng Lü [and others] // Materials Science and Engineering A. – 2010. – P. 7215–7219.

34. Spark plasma sintering of B₄C and B₄C–TiB₂ composites: Deformation and failure mechanisms under quasistatic and dynamic loading [Text] / W. S. Rubink,

V. Ageh, H. Lide [and others] // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41, no. 6. – P. 3321–3332.

35. Microstructure and mechanical properties of pulsed electric current sintered B₄C–TiB₂ composites [Text] / S. G. Huang, K. Vanmeensel, O.J.A. Malek [and others] // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 528, no. 3. – P. 1302– 309.

36. Пат. 30026А Україна, 6 С30В 13/02, 7/00. Спосіб очистки від домішок та вирощування монокристалів тугоплавких матеріалів [Електронний ресурс] / П. І. Лобода ; патентовласник Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”. - №97 125905 ; заявл. 09.12.1997 ; опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6. – 6 с. – Режим доступу : <https://uapatents.com/6-30026-sposib-ochistki-vid-domishok-ta-viroshhuvannya-monokristaliv-tugoplavkikh-materialiv.html>. – Назва з екрану. – Дата перегляду : 18.05.2023.

37. Горелик С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст] / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – Москва : Изд-во Металлургия, 1970. – 366 с.

38. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics [Text] / Joshua Gild, YuanyaoZhang, Tyler Harrington [and others] // Scientific reports. – 2016. – Vol. 6, no. 1. – P. 37946 – 37946.

39. Матеріалознавство тугоплавких металів та сполук [Текст] : навчальний посібник / Кисла Г. П., Лобода П. І., Федорчук В. Є. [та ін.]. – Київ : Центр учбової літератури, 2017. – 320 с.

40. Богомол, Ю. І. Фізико-хімічні основи керування структурою та властивостями армованих керамічних матеріалів для роботи в екстремальних умовах експлуатації : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали / Богомол Юрій Іванович. – Київ, 2019. – 45 с.

41. Магістерська дисертація за освітньо-професійною програмою [Електронний документ] : рекомендації до проектування : навч. посіб. для

студ. спеціальності 132 “Матеріалознавство” освітньої програми “Нанотехнології та комп’ютерний дизайн матеріалів” : 2 частини / 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. – Назва з екрана. – Дата перегляду : 01.06.2023.

42. Про охорону праці [Електронний ресурс] // Офіційний вебпортал парламенту України. – Режим доступу :

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>. – Назва з екрана. – Дата перегляду : 01.06.2023.

43. Будинки адміністративного та побутового призначення [Текст] / ДБН В.2.2-28:2010. – [Чинний від 2011-10-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 52 с.

44. Основи охорони праці : підручник / О. І Запорожець, О. С. Протоєрейський, Г. М. Франчук [та ін.]. – Київ : Центр учбової літератури, 2009. – 264 с.

45. Розділ з охорони праці в дипломних роботах: Рекомендації до виконання [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О.Г. Левченко, Г.В. Демчук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 16 с. – Режим доступу :

<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30051>. – Назва з екрана. – Дата перегляду : 01.06.2023.

46. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [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.

47. Охорона праці та цивільний захист [Текст] / О.Г. Левченко, О.І. Полукаров, В.В. Зацарний [та ін.] // за ред. О.Г. Левченка. – Київ : Основа, 2019. – 472 с.

48. Fine Particles (PM 2.5) Questions and Answers [Electronic resource] // New York State Department of Health. – Mode of access :

https://www.health.ny.gov/environmental/indoors/air/pmq_a.htm. – Title from screen. – Date of access : 01.06.2023.

49. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : ДНАОП 0.00-1.21-98. – [Введений з 09.01.1998]. – Київ : 1998. – 394 с.

50. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : НПАОП 40.1-1.21-98. – [Чинний від 1998-09-01] – Київ : Міністерство юстиції України, 1998. – 89 с.

51. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Текст] : НПАОП 40.1-1.32-01. – [Чинний від 2001-06-21] – Київ : Міністерство праці та соціальної політики України, 2001. – 75 с.

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. Основи ергономіки : навч. посібник / В. Г. Брусенцов, О. В. Брусенцов, І. І. Бугайченко [та ін.]. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – 141 с.

56. Personal Protective Equipment - Overview [Electronic resource] // Occupational Safety and Health Administration. – Mode of access : <https://www.osha.gov/personal-protective-equipment>. – Title from screen. – Date of access : 01.06.2023.

57. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація [Текст] : ДСТУ EN 133:2005. – [Чинний від 2005-06-14] – Київ : Національний стандарт України, 2006. – 14 с.