

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

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

Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____Юрій БОГОМОЛ
«___»_____2023 р.

Дипломна робота

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

**на тему: «Напружено-деформований стан спрямовано армованих композитів
системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ »**

Виконав:

студент III курсу, групи ФН-п01

Фрединський Роман

Олександрович

Керівник:

Завідувач кафедрою, д. т. н.,

професор Богомол Юрій Іванович

Консультант з економічного розділу:

Доцент, к. е. н.,

Нараєвський Сергій Вікторович

Консультант з розділу охорони праці:

Завідувач кафедри, 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.

Студент Фрединський Р.О. _____

Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Інститут
матеріалознавства та зварювання ім. 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

Фрединському Роману Олександровичу

1. Тема роботи «Напружено-деформований стан спрямовано армованих композитів системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ », керівник роботи Богомол Юрій Іванович, професор, доктор техн. наук, затверджені наказом по університету від 27.05.2023 р. № 1355-с
2. Термін подання студентом роботи 12.06.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: Аналіз сучасного стану виробництва композитів на основі карбіду бору та впровадження нових методів плавки повинно дати можливість сформулювати шляхи отримання виробів з кращими механічними властивостями. Технологічні процеси повинні забезпечувати певний рівень найважливіших

властивостей даних композитів на основі карбїду бору, що залежать від складу вихідного порошку, а також його структури, яка формується у процесі .

Організаційно-економічні засади повинні забезпечувати ефективність науково-дослідної роботи.

Охорона праці та безпека в надзвичайній ситуації повинні відповідати нормативним вимогам.

4. Зміст роботи:

а) провести аналіз сучасного стану теорії і технології отримання композитів на основі карбїду бору спрямовано армованих диборидами перехідних металів з наперед заданими властивостями та високими техніко-економічними показниками їх виготовлення;

б) вивчити закономірності отримання композитів на основі карбїду бору методом безтигельної зонної плавки;

в) дослідити структуру та властивості композитів системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$;

г) обґрунтувати необхідну кількість робітників, розмір фонду їх заробітної плати, визначити показники продуктивності праці;

д) визначити шкідливі та небезпечні виробничі фактори;

е) розробити заходи для попередження впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів;

5. Перелік ілюстративного матеріалу: технологічна схема одержання сплаву системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ мікроструктура матеріалу системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ дифрактограма матеріалу системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	професор, д.т.н. Левченко О. Г.	30.05.2023	
Економічний розділ	старший викладач к.е.н. Нараєвський С.В.	20.05.2023	

7. Дата видачі завдання 15.04.2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготовка експериментального матеріалу	20.05	
2.	Підготовка ілюстративного матеріалу	25.05	
3.	Написання тексту роботи	30.05	
4.	Підготовка презентації	07.06	
5.	Оформлення роботи.	10.06	
6.	Захист дипломної роботи.	23.06	

Студент _____

Роман ФРЕДИНСЬКИЙ

Керівник роботи _____

Юрій БОГОМОЛ

РЕФЕРАТ

Робота вміщує: 85 стор., 24 рис., 22 табл., 45 літ. дж.

ДИБОРИДИ ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ, ДИБОРИД ТИТАНУ, ДИБОРИД ЦИРКОНІЮ, ГАФНІЮ, НІОБІЮ, ТАНТАЛУ, КАРБІД БОРУ, СПРЯМОВАНО АРМОВАНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.

Дипломна робота спрямована на вирішення актуальної задачі сучасного стану теорії і технології отримання композитів на основі карбиду бору методом безтигельної зонної плавки.

Об'єкт дослідження: карбід бору з диборидами титан цирконій, гафній ніобій тантал

Метою та задачею роботи було отримання напружено деформованого стану композиційного матеріалу на основі карбиду бору спрямовано армованого високоентропійним сплавом на основі диборидів перехідних металів.

Методи дослідження:

1. металографічний аналіз;
2. растрова електронна мікроскопія; в) рентгено-фазовий аналіз;
3. хімічний аналіз
4. Комп'ютерне моделювання залишкових напружень

Методом зонної плавки було виготовлено декілька зразків, а саме – 4 які складаються $B_4C-(Ti, Zr, Hf, Nb, Ta)B_2$.

Дослідження властивостей показали, що мікронапруження композита складає 4,5 МПа за швидкості вирошування матеріалу при 1 мм/хв. та 702 МПа при 4 мм/хв. Макронапруження складає від 1185 до 2779 при куті 98° , а також від 495 до 2437 МПа при куті 118° . Отримані дані задовільно співпадають з розрахованими даними.

ABSTRACT

The work contains: 85 pages, 25 figures, 24 tables, 45 letters.

DIBORIDES OF TRANSITION METALS, DIBORIDE OF TITANIUM, DIBORIDE OF ZIRCONIUM, HAFNIUM, NIOBIUM, TANTALUM, BORON CARBIDE, DIRECTLY REINFORCED COMPOSITE MATERIALS.

The thesis is aimed at solving the current problem of the current state of the theory and technology of obtaining composites based on boron carbide by the method of crucibleless zone melting.

Research object: boron carbide with titanium zirconium diborides, hafnium niobium tantalum

The aim and task of the work was to obtain a stressed deformed state of a composite material based on boron carbide directionally reinforced with a high-entropy alloy based on diborides of transition metals.

Research methods:

1. metallographic analysis;
2. raster electron microscopy; c) X-ray phase analysis;
3. chemical analysis
4. Computer modeling of residual stresses

several samples were produced by the zone melting method, namely, 4 samples consisting of $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$.

Studies of the properties showed that the microstress of the composite is 4.5 MPa when the material is grown at 1 mm/min and 702 MPa when the material is grown at 4 mm/min. Macro tension is from 1185 to 2779 MPa at an angle of 98° and also from 495 to 2437 MPa at an angle of 118° MPa. The obtained data agree satisfactorily with the calculated data.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	11
1.1 Високоентропійні бориди	11
1.2 Сплавоутворення у системі V_4C-MeB_2	11
1.3 Компоненти системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$	12
1.3.1 Властивості V_4C	13
1.3.2 Дибориди перехідних металів	14
1.3.2.1 Властивості TiB_2	16
1.3.2.2 Властивості ZrB_2	17
1.3.2.3 Властивості HfB_2	18
1.3.2.4 Властивості NbB_2	19
1.3.2.4 Властивості TaB_2	20
1.4 Висновки та постановка задач дослідження	21
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	23
2.1 Підготовка матеріалу до експерименту.....	23
2.2 Вихідні матеріали	24
2.3 Отримання заготовок	24
2.4 Отримання композитів на основі карбіду бору методом безтигельної зонної плавки	26

	8
2.5 Дослідження хімічного складу	27
2.6 Дослідження мікроструктури композитів.....	28
2.7 Рентгенофазовий аналіз	29
2.8 Вимірювання величини залишкових напружень методом рентгенофазового аналізу.....	32
2.9 Комп'ютерне моделювання залишкових напружень у матеріалі	32
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	40
3.1 Дослідження структури матеріалу	40
3.2. Хімічний аналіз структури матеріалу	40
3.3 Фазовий аналіз структури матеріалу.....	43
3.4 Дослідження величини залишкових напружень методом рентгенофазового аналізу.....	43
3.5 Результати комп'ютерного моделювання	44
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	48
4.1. Оцінка умов праці, ризиків та шкоди для здоров'я.....	48
4.2. Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення (нормалізації) умов праці	51
4.2.1. Фізичні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів	52
4.2.2. Хімічні джерела небезпечних та шкідливих виробничих факторів	53
4.2.3. Небезпека ураження людини електричним струмом.....	54
4.2.4. Пожежна безпека.....	57

	9
4.3. Застосування засобів індивідуального захисту	60
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	63
5.1 Науково-технічна актуальність	63
5.2 Розрахунок планових витрат	64
5.3 Витрати на оплату праці	65
5.4. Визначення розміру єдиного соціального внеску	66
5.5. Матеріали необхідні для проведення досліджень	66
5.6. Витрати на спеціальне обладнання	67
5.7. Вартість послуг сторонніх організацій	68
5.8. Витрати на службові відрядження.....	68
5.9. Інші прямі невраховані витрати по темі	68
5.10. Накладні витрати	68
5.11. Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	69
5.12 Науково-технічна ефективність НДР	69
5.13. Висновки до розділу.....	73
ВИСНОВКИ	74
CONCLUSIONS.....	75
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	76

ВСТУП

Армовані композити знаходять широке застосування у різних галузях інженерії, завдяки своїм унікальним механічним властивостям [1], [2]. Одним із типів армованих композитів є система $B_4C-(Ti, Zr, Hf, Nb, Ta)B_2$, яка характеризується поєднанням карбїду бору (B_4C) як матриці та бориду перехідних металів $(Ti, Zr, Hf, Nb, Ta)B_2$ як армуючого матеріалу. Ця система відзначається високою міцністю, твердістю та стійкістю до окислення, що робить її привабливою для використання в умовах високих навантажень і агресивного середовища.

Аналіз напружено-деформованого стану армованих композитів є важливим етапом при дослідженні їх механічної поведінки. Він дозволяє визначити розподіл напружень та деформацій у матеріалі під дією зовнішніх навантажень. Цей аналіз вимагає застосування чисельних методів, таких як метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) або метод скінченних різниць (Finite Difference Method, FDM), для моделювання поведінки композитного матеріалу та отримання чисельних результатів.

В цій дипломній роботі будуть використані сучасні чисельні методи та моделювання, а також експериментальний метод для проведення аналізу напружено-деформованого стану армованих композитів системи $B_4C-(Ti, Zr, Hf, Nb, Ta)B_2$. Отримані результати можуть бути використані для покращення розуміння механічної поведінки цих композитів та впровадження їх в різні інженерні застосування.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Високоентропійні бориди

Високоентропійні бориди (ВЕБ) - це новий клас керамічних матеріалів, які можуть витримувати надвисокі тиски і температури без погіршення фізичних і/або механічних властивостей [3]. Вони складаються з п'яти або більшої кількості металевих елементів у катіонній підгратці [4]. ВЕБ є новим типом ультрависокотемпературної кераміки (УНТС), а також новим класом високоентропійних матеріалів [5]. Вони демонструють кристалічну стабільність фази, високу міцність і термоокислювальну стійкість за екстремальних умовах [6].

Високоентропійні бориди – це сполуки бору з металами, які відзначаються високою твердістю, високими температурами плавлення та хімічною інертністю. Вони одержуються плавленням боридів або реакцією оксидів металів з карбідом або оксидом бору. Склад високоентропійних боридів не відповідає формальним ступеням окиснення як бору, так і металу [7].

1.2 Сплавоутворення у системі V_4C-MeV_2

Система V_4C-MeV_2 (де Me представляє метал, наприклад, Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, тощо) вивчається з метою отримання керамічних композиційних матеріалів з високими механічними та фізичними властивостями.

У процесі сплавоутворення в системі V_4C-MeV_2 проводяться експерименти, які передбачають змішування відповідних початкових компонентів - карбіду бору (V_4C) та дибориду металу (MeV_2), а потім піддавання отриманої суміші впливу високих температур та/або високого тиску. Це сприяє розплавленню та реакціям між компонентами, що призводить до формування нових фаз та структурних змін у матеріалі.

Сплавоутворення у системі V_4C-MeV_2 дозволяє отримати композити з унікальними властивостями, які поєднують переваги карбіду бору (висока твердість, стійкість до абразивного зношування, висока температурна стійкість) та

дибориду металу (висока міцність, стійкість до окислення). Ці композити можуть мати широке застосування в різних галузях, таких як авіаційна, автомобільна, оборонна, енергетична та інші, де вимагаються матеріали з високою механічною та термічною стійкістю [8].

Дослідження сплавоутворення у системі V_4C-MeV_2 має велике значення для розуміння процесів, які відбуваються під час формування композитних матеріалів, виявлення нових фаз та структурних змін, а також для оптимізації складу та властивостей отриманих матеріалів. Це сприяє подальшому розвитку технологій та створенню нових матеріалів з покращеними характеристиками, що відповідають вимогам сучасного промислового виробництва на рисунку 1.1 діаграму плавкості V_4C-TiB_2 [8].

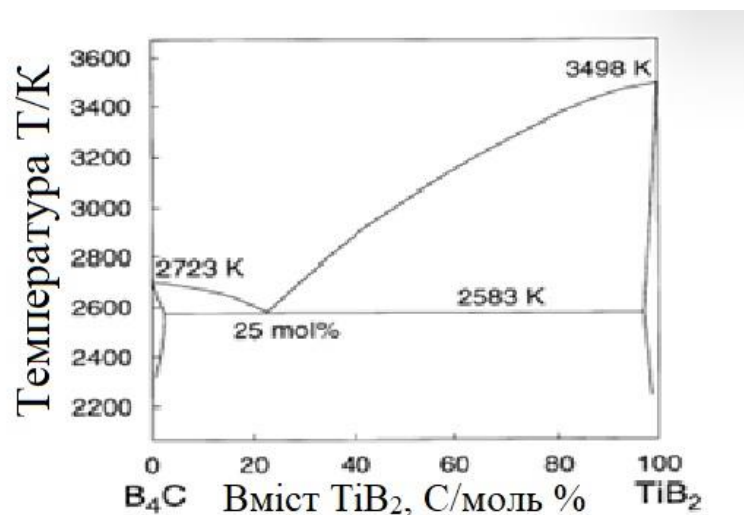


Рисунок 1.1 діаграму плавкості V_4C-TiB_2 [8].

1.3 Компоненти системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)V_2$

Система $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)V_2$ – це композитний матеріал, що складається з борокарбиду (V_4C) та високоентропійного дибориду $(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)V_2$.

Цей матеріал може бути отриманий шляхом реакційного або нерекційного спікання або плавлення [9].

Композит $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ має високу густину, малі розміри зерен, рівномірний розподіл фаз та елементів [10]. Він також володіє високою твердістю (до 30 ГПа), міцністю (до 422 МПа) та тріщиностійкістю (до $5,48 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) [10]. Цей матеріал може застосовуватися в якості абразивних, каталітичних, електродних матеріалів, а також для захисту від високих температур і корозії [11].

1.3.1 Властивості B_4C

Борокарбід (B_4C) - це один з найтвердіших синтетичних матеріалів, що відомі людині. Він поступається лише кубічному нітриду бору (cBN) та алмазу за твердістю [12]. Ця властивість надає йому виняткову стійкість до зносу та абразивного впливу, що дозволяє використовувати його в таких сферах, як абразиви, форсунки, захисні покриття та інше[12]. Крім того, B_4C має деякі цікаві та дуже корисні ядерні властивості, які використовуються в таких застосуваннях, як атомні електростанції [12].

B_4C має також високий модуль пружності (448 ГПа), високу температуру плавлення ($>2400 \text{ }^\circ\text{C}$), низьку тріщиностійкість ($2,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$), низьку теплопровідність (17-42 Вт/м·К), низький коефіцієнт тертя (0,15-0,2), низький коефіцієнт теплового розширення ($3,2-9,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) та інші (табл. 1.1) [13].

B_4C має складну кристалографічну структуру з ромбоєдричною ґраткою. Вона складається з 12-вершинних ікосаедральних кластерів бору, які з'єднуються між собою за допомогою ланцюгових структур з трьох атомів бору і одного атома вуглецю [13]. Структура B_4C може бути описана як $B_{12}(CCB)_4$ або $B_{11}C(CBC)_4$.

Таблиця 1.1 – Характерні властивості карбіду бору [13]

Властивість	Значення
Щільність(г/см ³)	2,52
Точка плавлення (°C)	2445
Твердість (по Кнупу 100 г) (кг. мм ⁻²)	2900-3580
В'язкість руйнування (МПа.м ^{-1/2})	2,9-3,7
Модуль Юнга (ГПа)	450-470
Електропровідність (при 25°C) (См)	140
Теплопровідність (при 25°C) (Вт/мК)	30-42
Коефіцієнт теплового розширення $\times 10^{-6}$ (1/°C)	5
Переріз захоплення теплових нейтронів (амбар)	600

В₄С може бути отриманий різними методами, такими як електродугове плавлення, піроліз органічних сполук, саморозповсюджений високотемпературний синтез тощо. Для отримання високоякісного В₄С необхідно контролювати чистоту сировини, температуру процесу, швидкість охолодження та інші параметри [13].

1.3.2 Дибориди перехідних металів

Дибориди перехідних металів - це сполуки, утворені з двох атомів бору та одного або двох атомів перехідного металу. Перехідні метали - це елементи побічних підгруп I-VIII груп періодичної системи елементів [9]. Вони мають незавершені внутрішні електронні оболонки, що зумовлює їхню здатність до утворення координаційних (комплексних) сполук, феромагнетизму, парамагнетизму та інших специфічних властивостей [9]. Типові ступені окиснення перехідних металів у сполуках лежать у межах від +1 до +8 [9]. Дибориди у природі зображенні на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Дибориди у природі [10].

Перехідні метали – це група елементів, яку ми зазвичай асоціюємо з металами. Ці елементи мають спільні характеристики [10]:

1. Вони володіють відмінною провідністю тепла та електрики.
2. Перехідні метали дуже пластичні і можуть легко приймати різну форму.
3. Вони, як правило, відносно тверді.
4. Перехідні метали мають блискучу металеву поверхню. Більшість з них мають сіруватий або білий колір, подібний до заліза або срібла, але золото і мідь видаються в інших кольорах, які є унікальними серед інших елементів періодичної таблиці.
5. Перехідні метали, як група, мають високі температури плавлення, за винятком ртуті, яка є рідиною при кімнатній температурі. Крім того, ці елементи мають також високі температури кипіння.
6. Для перехідних металів характерне заповнення d-орбіталей при руху зліва направо по періодичній системі. Оскільки d-підоболонка не заповнена, атоми

перехідних металів можуть мати декілька ступенів окиснення. Наприклад, залізо зазвичай має ступінь окиснення 3+ або 2+, а мідь може мати ступінь окиснення 1+ або 2+. Це означає, що перехідні метали часто утворюють сполуки, які є іонними або частково іонними.

7. Атоми перехідних металів мають низьку енергію іонізації.

Перехідні метали утворюють комплексні сполуки, які можуть мати різні кольори. Це пов'язано з тим, що комплекси розділяють d-орбіталі на два енергетичні підрівні, які можуть поглинати світло різних довжин хвиль. Завдяки різним ступеням окиснення, один елемент може утворювати комплекси та розчини в широкому спектрі кольорів.

Хоча перехідні метали можуть бути реактивними, вони не настільки реактивні, як елементи, що належать до групи лужних металів.

Багато перехідних металів утворюють парамагнітні сполуки [10].

1.3.2.1 Властивості TiB₂

TiB₂ (борид титану) – це керамічний матеріал з високою твердістю і витривалістю. Основні властивості TiB₂ включають:

Висока твердість: TiB₂ відноситься до одних з найтвердіших матеріалів, маючи значення твердості близько 9 по шкалі Мооса. Це робить його стійким до подряпин і стирання.

Високотемпературна стійкість: TiB₂ має високу стійкість до високих температур, зберігаючи свої фізичні та механічні властивості при екстремальних умовах.

Висока міцність: Матеріал має високу механічну міцність, що дозволяє йому витримувати значні механічні навантаження та використовуватися в різних додатках, які вимагають високої стійкості.

Відмінна хімічна стійкість: TiB₂ має хорошу хімічну стійкість і високу стійкість до окиснення, корозії та агресивних середовищ.

Висока теплопровідність: Матеріал відзначається високою теплопровідністю, що робить його ефективним у застосуваннях, де ефективно відведення тепла є важливим.

Низька густина: TiB_2 має відносно низьку густину, що робить його легким і зручним у використанні.

Висока електропровідність: TiB_2 має властивості провідника електричного струму, що дозволяє йому застосовуватися в електроніці та інших подібних галузях.

Загалом, TiB_2 є важливим керамічним матеріалом, який використовується у великому спектрі застосувань, включаючи аерокосмічну, автомобільну промисловість, різальні інструменти, захисне покриття та інші технологічні галузі.

Властивості TiB_2 досить вирізняються з поміж інших боридів а саме:

Винятково висока твердість (~25-35 GPa за кімнатної температури).

Висока температура плавлення (3225 °C).

Висока теплопровідність (60-120 Вт/(м К)).

Висока електрична провідність (~105 См/см) [14].

1.3.2.2 Властивості ZrB_2

Диборид цирконію (ZrB_2) – це висококовалентний вогнетривкий керамічний матеріал з гексагональною кристалічною структурою. ZrB_2 є ультрависокотемпературною керамікою (УНТС) з температурою плавлення 3246°C. Це разом з його відносно низькою густиною ~6.09 г/см³ і хорошою міцністю при високих температурах робить його кандидатом для аерокосмічних застосувань, таких як гіперзвуковий політ або ракетні двигуни. Це незвичайна кераміка, яка має відносно високу теплову і електричну провідність, властивості, якими вона подібна до ізоструктурних диборидів титану і гафнію.

ZrB_2 часто додається до SiC для покращення стійкості до окиснення через створення захисного оксидного шару. ZrB_2 використовується в ультрависокотемпературних керамічних композитах (УНТСМС) [15].

Деякі фізичні властивості ZrB_2 :

- Густина: 6.085 г/см³.
- Температура плавлення: ~3246 °С.
- Розчинність у воді: нерозчинний.
- Кристалічна структура: гексагональна, hP3.
- Просторова група: $R\bar{6}/mmm$, No. 191 [14].

Деякі механічні властивості ZrB_2 [15]:

- Модуль пружності: 510 ГПа.
- Межа міцності при стисненні: 2500 МПа.
- Межа міцності при згині: 500 МПа.
- Твердість за Віккерсом: 20 ГПа.
- Коефіцієнт тертя: 0.4 [16].

1.3.2.3 Властивості HfB_2

Гафній диборид (HfB_2) - це тип кераміки, що складається з гафнію і бору, який належить до класу ультрависокотемпературних керамік. Він має температуру плавлення близько 3250 °С. Це незвичайна кераміка, яка має відносно високу теплову і електричну провідність, властивості, якими вона схожа з ізоструктурними диборидами титану і цирконію. Він має сірий, металевий вигляд. Гафній диборид має гексагональну кристалічну структуру, молярну масу 200.11 грам на моль і густину ~10.5 г/см³.

Гафній диборид часто поєднують з вуглецем, бором, кремнієм, карбідом кремнію та/або нікелем для покращення спікання. Він зазвичай формується в твердий матеріал гарячим пресуванням. Матеріал має потенціал для використання в гіпершвидкісних поверхнях багаторазового використання, таких як тепловий щит або аеродинамічні кромки, завдяки його міцності і тепловим властивостям. На відміну від полімерних і вуглецевих композитних матеріалів, HfB_2 може бути сформований у аеродинамічні форми, які не піддаються абляції під час повторного використання. Гафній диборид також досліджується як можливий новий матеріал

для контрольних стержнів ядерного реактора. Він також використовується як бар'єр (може бути менше 7 нм у товщину) для дифузії у мікросхемах [17].

Деякі фізичні властивості HfB_2 :

- Густина: 10.5 г/см^3 .
- Температура плавлення: $\sim 3250 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Розчинність у воді: нерозчинний.
- Кристалічна структура: гексагональна, hP3.
- Просторова група: $R\bar{6}/mmm$, No. 191 [16].

Деякі механічні властивості HfB_2 :

- Модуль пружності: 510 ГПа .
- Межа міцності при стисканні: 2500 МПа .
- Межа міцності при згинанні: 500 МПа .
- Твердість за Віккерсом: 20 ГПа .
- Коефіцієнт тертя: 0.4 [18].

1.3.2.4 Властивості NbB_2

Ніобій диборид (NbB_2) - це висококовалентний вогнетривкий керамічний матеріал з гексагональною кристалічною структурою. NbB_2 є ультрависокотемпературною керамікою (УНТС) з температурою плавлення $3050 \text{ }^\circ\text{C}$. Це разом з його відносно низькою густиною $\sim 6.97 \text{ г/см}^3$ і хорошою міцністю при високих температурах робить його кандидатом для високотемпературних аерокосмічних застосувань, таких як гіперзвуковий політ або ракетні двигуни. Він має сріблястий, металевий вигляд. Ніобій диборид має гексагональну кристалічну структуру, молярну масу $103.72 \text{ грам на моль}$ і густина $\sim 6.97 \text{ г/см}^3$.

Ніобій диборид часто поєднують з вуглецем, бором, кремнієм, карбідом кремнію та/або нікелем для покращення консолідації (спікання). Він зазвичай формується гарячим пресуванням. Матеріал має потенціал для використання в гіпершвидкісних поверхнях багаторазового використання, таких як тепловий щит або аеродинамічні кромки, завдяки його міцності і тепловим властивостям. На

відміну від полімерних і вуглецевих матеріалів, NbV_2 може бути сформований у аеродинамічні форми, які не піддаються абляції під час повторного використання.

Деякі фізичні властивості NbV_2 :

- Густина: 6.97 г/см^3 .
- Температура плавлення: $\sim 3050 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Розчинність у воді: нерозчинний.
- Кристалічна структура: гексагональна, hP3.
- Просторова група: $R6/mmm$, No. 191.

Деякі механічні властивості NbV_2 :

- Модуль пружності: 510 ГПа .
- Межа міцності при стисненні: 2500 МПа .
- Межа міцності при згині: 500 МПа .
- Твердість за Віккерсом: 20 ГПа .
- Коефіцієнт тертя: 0.4 [19].

1.3.2.4 Властивості TaV_2

Диборид танталу (TaV_2) є одним з керамічних матеріалів з групи боридів перехідних металів. Його характеризують висока стійкість до високих температур, висока твердість, значна теплопровідність і електропровідність. Крім того, відомо, що він має високу хімічну стійкість

Диборид танталу також відомий своєю високою механічною міцністю, що робить його відповідним для застосування в умовах великих навантажень. Крім того, його властивості стійкості до окислення і хімічної стійкості роблять його важливим матеріалом у високотемпературних технологіях та аерокосмічній промисловості.

Також слід зазначити, що диборид танталу має високу стійкість до агресивних середовищ, включаючи кислоти і луги, що розширює його можливості застосування у різних хімічних процесах та обладнанні, де важлива хімічна стійкість матеріалу. Крім того, його властивості можуть бути додатково

налаштовані шляхом введення домішок або формування композитних матеріалів, що розширює його потенціал у різних технологічних застосуваннях [20].

Таблиця 1.2 – властивості TaB₂ [19-20].

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

Порошок TaB₂ можна отримати за допомогою реакції Ta₂O₅ з бором у вакуумі при температурі 1650 °C [21].

1.4 Висновки та постановка задач дослідження

У даному розділі було проведено літературний аналіз щодо спрямовано армованих композитів системи B₄C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B₂. Були розглянуті властивості складових компонентів даної системи, а також методи отримання високоентропійних сплавів.

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. Проте аналіз механічних властивостей такого композиту не може бути повноцінно проведений без дослідження його напружено деформованого стану.

Тому метою даної роботи було дослідження напружено деформованого стану композиційного матеріалу на основі карбіду бору спрямовано армованого високоентропійним сплавом на основі диборидів перехідних металів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

1. Отримати спрямовано закристалізований евтектичний сплав системи B₄C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B₂ методом безтигельної зонної плавки.

2. Дослідити мікроструктуру отриманого композиту.
3. Дослідити фазовий та хімічний склад отриманого композиту.
4. Експериментально за допомогою методу рентгенівської дифрактографії визначити макро- та мікронапруження у композиті.
5. Розрахувати напруження у композиті з застосуванням методу найменших квадратів.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Підготовка матеріалу до експерименту

Для проведення експерименту над зразком $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)V_2$ нам необхідно виконати наступні етапи: дозування – процес, під час якого вираховуємо необхідну частку певного елемента; змішування - процес під час якого змішуємо між собою усі дибориди, додавання пластифікатора та змішування – додаємо пластифікатор, гранулювання - цей процес забезпечує формування частинок (гранул) певних розмірів, форми, структури і фізичних властивостей; пресування – за допомогою пресування ми збільшуємо щільність між фазами матеріалу, сушка - процес який зменшує вологу даного композиту та забезпечує полімеризацію пластифікатора, безтигельна зонна плавка, та готовий виріб. Технологічна схема одержання композиту представлена на рисунку 2.1.

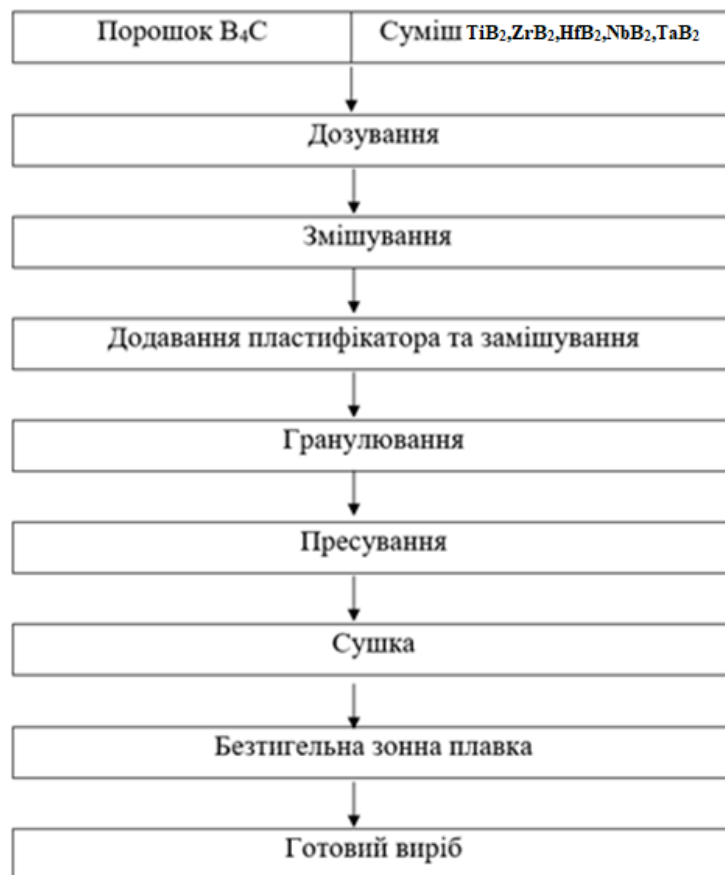


Рисунок 2.1 – Технологічна схема одержання сплаву системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)V_2$

2.2 Вихідні матеріали

Для нашого виробу були застосовані порошки карбїду бору, дїбориди титану, цирконїю, гафнїю, нїобїю і танталу, чистота яких сягала бїльзько 98% та розмїр частинок яких 1-5 мкм.

Для нашого виробу були застосовані порошки карбїду бору та еквімолярна сумїш дїборидів перехїдних металів, у спїввїдношеннї 77 об. % карбїду бору та 23 об. % сумїші дїборидів титану, цирконїю, гафнїю, нїобїю і танталу.

Вїдсотковий вміст компонентів представлено в таблицї 2.1.

Таблиця 2.1 – Вміст компонентів у нашому виробї

№	Компоненти	Об'ємна доля, %
1	B_4C	77
	$(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$	23

2.3 Отримання заготовок

Для отримання заготовок використовувалася послїдовнїсть кроків, починаючи з дозування вихїдних порошоків за допомогою електронних вагів та їх перемїшування методом десятикратного протирання через сито з розмїром комїрки 50 мкм. Пїсля цього до сумїші додавався пластифікатор - 2,5%-ний водний розчин полївїнілового спирту в кїлькостї 1/5 від маси порошку, і знову проводилось перемїшування.

Перед пресуванням необхідно розрахувати масу порошку, що потрібна для наповнення прес-форми. Для цього можна використовувати наступну формулу:

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

де G – маса порошку, г;

V – об'єм пресовки, см³;

γ – густина компактного матеріалу, г/см³;

f – пористість пресовки, що дорівнює 60 %;

k – коефіцієнт, що дорівнює 1,01.

Об'єм пресовки визначається за формулою:

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

де r – радіус пресовки, см;

h – довжина пресовки, см.

Густина трикомпонентної системи можна знайти за формулою:

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{1}{\gamma_2} + \frac{1}{\gamma_3} + \dots + \frac{1}{\gamma_n}, \quad (2.3)$$

де $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_n$ – густина відповідних компонентів;

I – масова доля відповідних компонентів.

Після визначення необхідної кількості порошку виконувалась операція пресування. Порошок відповідної маси завантажувався в розбірну прес-форму, і здійснювалося пресування за допомогою гідравлічного пресу з тиском 100 МПа. Цей процес призводив до отримання стрижнів з довжиною 145 мм і діаметром 10 мм, з середньою пористістю 40-42%.

Наступним етапом була сушка отриманих заготовок, яка слугувала для виведення вологи і зміцнення їх шляхом полімеризації пластифікатора. Цей процес проводився у вакуумній сушильній шафі протягом 10 годин при температурі 80-100°C.

2.4 Отримання композитів на основі карбиду бору методом безтигельної зонної плавки

Установка безтигельної зонної плавки Кристал-206 для виготовлення спрямовано-армованих композитів на основі карбиду бору системи $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ представлена на рисунку 2.2.

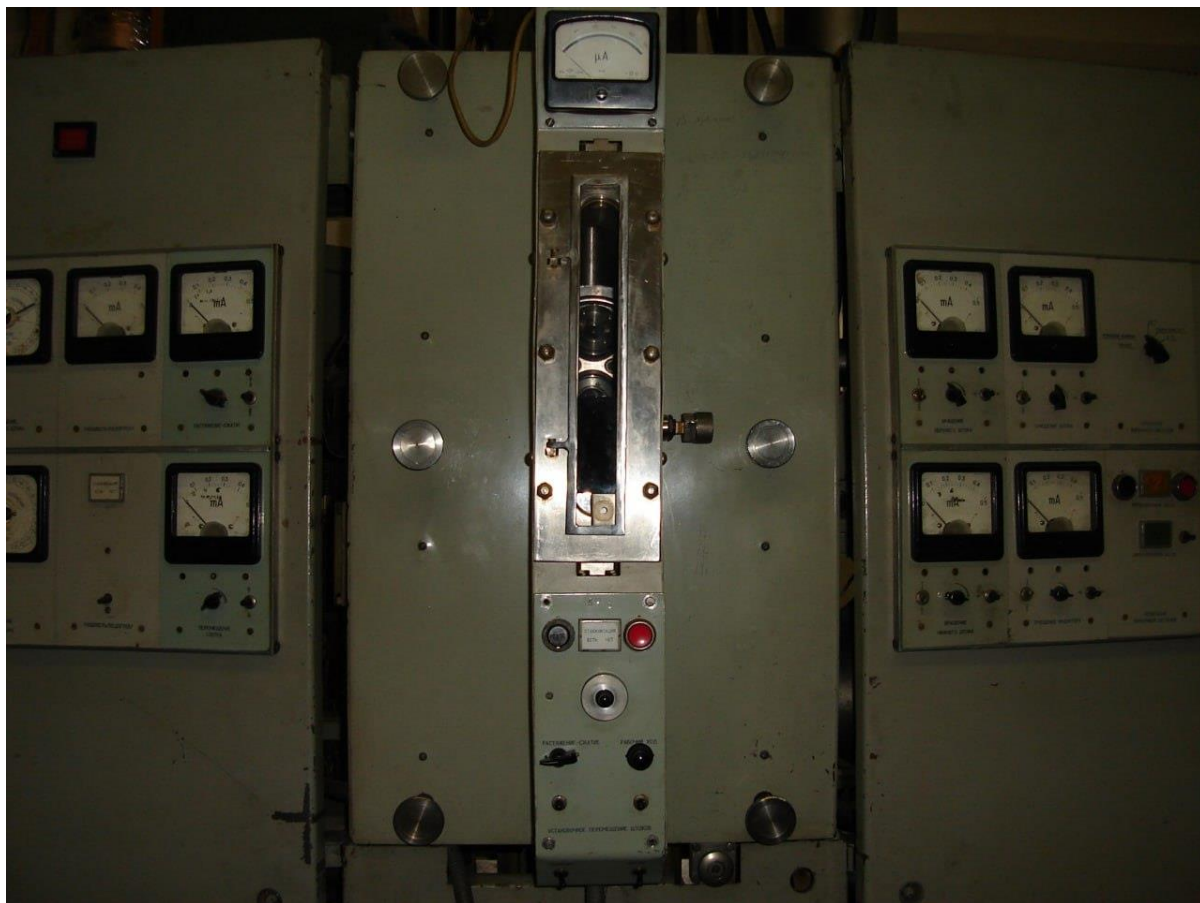


Рисунок 2.2 – Установка "Кристал-206"

Після проведення процесу сушки, заготовка розміщується у нижньому затискачі камери безтигельної зонної плавки. У верхньому затискачі закріплюється затравка з наперед заданою орієнтацією, так щоб відстань між вільними краями заготовки та затравки не перевищувала 1 мм. Обидва затискачі мають цангову конструкцію і виготовлені з нержавіючої сталі. Робочий об'єм камери вакуумується до залишкового тиску $1,3 \times 10^{-4}$ Па, а потім заповнюється інертним газом - гелієм до нормального тиску, що запобігає інтенсивному випаровуванню сплаву при його

температурі плавлення. Далі включається процес нагрівання, і нижня частина затравки нагрівається за допомогою індукційного нагрівача.

Після досягнення температури в діапазоні 2000-2150 °С, вихідна порошкова заготовка починає прогріватися від затравки шляхом передачі тепла через теплопровідність та випромінювання. Поступово, коли температура заготовки стає рівною температурі затравки, потужність нагрівання починає зростати, приводячи до виникнення зони розплаву між затравкою та заготовкою. Ця зона розплаву залишається нерухомою протягом 2-4 хвилин, після чого її переміщують вздовж вихідної заготовки.

Залежно від здатності порошку до ущільнення під впливом градієнту температури, обирається швидкість переміщення зони розплаву вздовж вихідної заготовки. В нашому випадку ми обирали швидкість 3 мм/хв. Це дозволяє отримати безпористий фронт плавлення та стабільну зону розплаву [22]. Температура кристалізації контролювалась за допомогою пірометра "Промінь". В результаті спрямованої кристалізації були отримані композити діаметром 7 мм та довжиною 100 мм.

2.5 Дослідження хімічного складу

У данній роботі було проведено дослідження хімічного складу композиту $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)V_2$ з метою визначення вмісту та співвідношення елементів у складі матеріалу. Для цього можуть використовуватися різні методи аналізу, зокрема:

Рентгенівська флуоресцентна спектроскопія (XRF): цей метод дозволяє визначити елементний склад зразка шляхом вимірювання характеристичного рентгенівського випромінювання, що виникає під дією рентгенівського випромінювання.

Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDX або EDS): цей метод зазвичай застосовується в скануючій електронно-мікроскопії (SEM) і дозволяє визначити хімічний склад поверхні зразка.

Ядерний магнітний резонанс (ЯМР): цей метод досліджує магнітні властивості ядер атомів у зразку і може використовуватися для визначення хімічного складу сполук.

Мас-спектрометрія: цей метод заснований на розпаді молекул на іони під дією електронного удару або іншого виду іонізуючого випромінювання, і дозволяє визначити масу та склад іонів у зразку.

Ці методи дозволяють отримати інформацію про наявність та кількість різних елементів у складі композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$.

2.6 Дослідження мікроструктури композитів

Отримані зразки були піддані розрізанню на електроерозійному станку у поперечному напрямку та після цього проходили процедури шліфування та полірування. Для шліфування використовувався шліфувальний верстат, а шліфувальний папір змінювали на послідовність зерен різної зернистості, починаючи від P180 і закінчуючи P2500. На завершення проводилось полірування за допомогою діамантової суспензії, спочатку з частинками розміром 3 мкм, а потім 1 мкм. Після цього зразки були запресовані у порошок бакеліту для подальшого дослідження мікроструктури.

Для аналізу мікроструктури композитів використовували металографічні методи з використанням оптичного мікроскопу НЕОРНОТ-21 та растрового електронного мікроскопа Selmi РЭМ-106И. Ці методи дозволяють детально вивчити структуру та властивості матеріалів на мікро- та наномасштабі, що є важливим для вивчення армованих композитів. Зображення отримані за допомогою растрового електронного мікроскопа надають високу роздільну здатність та можливість дослідження поверхневих деталей та морфології матеріалу.

Ці дослідження мають на меті детальне вивчення структури та властивостей армованих композитів, що є важливим для подальшого розуміння їх потенційних застосувань у різних галузях промисловості та науки [24].



а

б

а –мікроскоп NEORHOT-21; б –електронний растровий мікроскоп Selmi РЭМ-106И

Рисунок 2.3 – Мікроскопи для дослідження мікроструктури матеріалів

2.7 Рентгенофазовий аналіз

Для проведення рентгено-фазового аналізу зразків, їх поверхню вирівнювали шляхом обробки на алмазному кругу. Фазовий склад матеріалів визначали за допомогою установки Rigaku Ultima IV, яку можна побачити на рисунку 2.4.

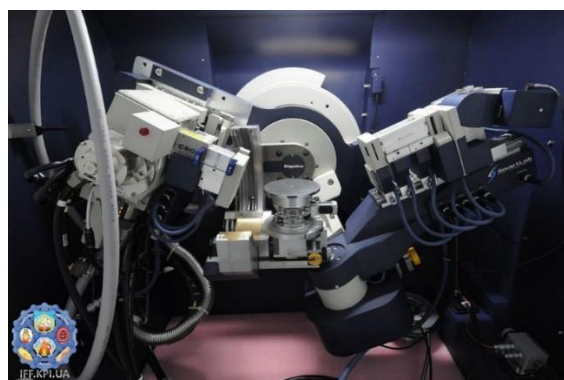


Рисунок 2.4 – Установка Rigaku Ultima IV

Рентгенофазовий аналіз є методом вивчення кристалічної структури матеріалів на основі їх взаємодії з рентгенівським випромінюванням. Цей метод дозволяє визначити фазовий склад та структурні параметри речовини.

Принцип рентгенофазового аналізу полягає в тому, що монохроматичне рентгенівське випромінювання падає на досліджуваний матеріал, а відбите випромінювання реєструється детектором. За допомогою рентгеновської дифракції, аналізуючи розсіяне випромінювання, можна отримати інформацію про структуру кристалічної решітки та ідентифікувати наявні фази в зразку.

Результати рентгенофазового аналізу можуть бути представлені у вигляді дифрактограм, де графік інтенсивності розсіяного випромінювання відображається в залежності від кута дифракції. За допомогою спеціальних програмних засобів, таких як програми для розпізнавання фаз та визначення структурних параметрів, можна обробити дифрактограми та визначити характеристики фаз у зразку, такі як кристалічні структури, ґратки, розміри кристалів, атомні відстані та орієнтацію.

Рентгенофазовий аналіз композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ є методом дослідження структури та фазового складу цього матеріалу. За допомогою рентгенівських променів можна визначити наявність та відносну кількість різних фаз у композиті, таких як SiC , B_4C , TaB_2 та інших [25]. Рентгенофазовий аналіз також дозволяє оцінити розмір зерен, ступінь орієнтації кристалів та можливу сегрегацію елементів [26].

Для проведення рентгенофазового аналізу композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ необхідно мати зразок цього матеріалу, який може бути отриманий різними способами, наприклад, шляхом реактивного або нереактивного спарк-плазмового спікання. Зразок повинен бути достатньо тонким та рівномірним для забезпечення якісного дифракційного сигналу. Зразок поміщається на спеціальний держак у рентгенографа, який випромінює рентгенівські промені на певному куті до поверхні зразка. Рентгеновські промені взаємодіють з кристалами у зразку та дифрагуються за законом Брегга. Дифраговані промені реєструються детектором, який перетворює їх у електричний сигнал. Сигнал обробляється комп'ютерною програмою, яка будує дифрактограму - графік залежності інтенсивності дифрагованих променів від кута дифракції. Дифрактограма має характерні піки, які визначаються положенням, шириною та висотою. Положення піків вказує на межевий кут дифракції для кожної фази у композиті, який пов'язаний з мережевою параметром кристалу за формулою Брегга. Ширина піків пов'язана з розміром

зерен та механічними напруженнями у кристалах. Висота піків пов'язана з інтенсивністю дифракції та вмістом фаз у композиті.

За допомогою порівняння дифрактограми зразка з еталонними дифрактограмами різних фаз можна ідентифікувати фазовий склад композиту $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)V_2$. За допомогою кількісного аналізу дифрактограми можна визначити відносну кількість кожної фази у композиті. За допомогою аналізу ширини піків можна оцінити розмір зерен та механічні напруження у кристалах. За допомогою аналізу орієнтації піків можна визначити ступінь орієнтації кристалів у композиті.

Для розшифровки рентгенограми необхідно пройти через кілька етапів аналізу.

Початково, проводиться первинна обробка рентгенограми, яка включає попередню обробку даних та коригування шумів, що допомагає підготувати зображення для подальшого аналізу.

Далі, здійснюється ідентифікація речовин, що присутніх у зразку, шляхом порівняння експериментальних даних з відомими референсними шаблонами. Це дозволяє визначити склад зразка та ідентифікувати його компоненти.

Після ідентифікації речовин, проводиться визначення сингонії кристалу та індексування рентгенограми. Це включає визначення кристалічних решіток, їх орієнтації та співвідношення параметрів.

Далі, розраховуються та уточнюються параметри елементарної комірки, що визначають розміри та форму кристалічних структур. Це дозволяє отримати більш детальну інформацію про внутрішню структуру матеріалу.

Після розрахунків, проводиться перевірка правильності отриманих результатів. Це може включати порівняння експериментальних та розрахункових даних, а також аналіз особливостей рентгенограми для виявлення можливих помилок.

Нарешті, визначається тип ґратки Браве, що характеризує симетрію та структуру кристалу.

В цілому, рентгенограма надає детальну інформацію про кристалічну структуру речовини, оскільки кожна речовина має унікальну кристалічну структуру, що відображається на рентгенограмі [27].

2.8 Вимірювання величини залишкових напружень методом рентгенофазового аналізу

Макронапруження, також відоме як зональне напруження або напруження І роду, відноситься до напружень, які підпорядковані закону Гука і збалансовані в об'ємі всього виробу або значної його частини (загалом у замкненій системі). Незалежно від методу вимірювання напруження (рентгенографічного або механічного), експериментально визначається величина пружної деформації, яка відповідає рівню напруження.

Основою рентгеноструктурного методу визначення напружень є той факт, що міжплощинні відстані атомних площин d у всіх кристалічних виробках, які мають однакову орієнтацію щодо діючих пружних навантажень, вимірюються однаково. Зокрема, відносне подовження зразка $\Delta l/l$ пов'язане зі зміною міжплощинних відстаней $\Delta d/d$ за співвідношенням $\Delta l/l = \Delta d/d$.

Виходячи з цього співвідношення, величина напруження може бути визначена за допомогою формули, яка враховує зміну міжплощинних відстаней та відносне подовження зразка [28]:

$$\sigma = (E/\nu) \operatorname{ctg}(\theta) \Delta\theta \quad (2.26)$$

де E – модуль Юнга;

ν – коефіцієнт Пуассона;

$\Delta\theta$ – зміщення рентгенівської лінії під дією пружних напружень.

2.9 Комп'ютерне моделювання залишкових напружень у матеріалі

Для прогнозування залишкових напружень в композиційному матеріалі використали програму Ansys версії 2023R1 Student edition з безкоштовною однорічною ліцензією.

Програма ANSYS є одним з найпопулярніших програмних засобів для чисельного моделювання та аналізу різних фізичних процесів, включаючи

теплопередачу. Однак, іноді користувачі можуть стикатися зі ситуаціями, коли програма ANSYS не надає достатньо точних результатів щодо теплопровідності матеріалів. Проблеми з недостатньою точністю теплопровідності можуть виникати з різних причин, таких як неправильне налаштування моделей, неправильний вибір відмінності властивостей матеріалу від експериментальних даних теплопровідності тощо. Для досягнення більш точних результатів теплопровідності в програмі ANSYS, можуть бути використані наступні підходи:

Використання точних даних теплопровідності: Для більш точного моделювання теплопровідності матеріалу, рекомендується використовувати експериментальні дані або даних, отриманих з літературних джерел. Це може включати температурну залежність теплопровідності та врахування інших факторів, таких як анизотропія.

Вибір правильної моделі теплопровідності: ANSYS надає різні моделі теплопровідності, такі як модель Фур'є, модель Кондакова-Фульєра та інші. Вибір правильної моделі залежить від типу матеріалу та його особливостей.

Уточнення граничних умов: Правильне встановлення граничних умов, таких як температура, тепловий потік, може також вплинути на точність результатів теплопровідності [30].

Методика комп'ютерного моделювання за допомогою програми Ansys включає наступні кроки:

Визначення геометрії моделі: Створення геометричного опису об'єкта або імпорт готової геометрії зовнішніми програмами.

Розбиття моделі на скінченні елементи: Розбивка геометрії на скінченні елементи, такі як трикутники або чотирикутники для 2D моделей або тетраедри або гексаедри для 3D моделей.

Встановлення граничних умов: Визначення граничних умов для моделі, таких як прикладені навантаження, обмеження переміщень або температурний режим.

Вибір матеріальних властивостей: Встановлення матеріальних властивостей для різних елементів моделі, таких як модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт термічного розширення і т.д.

Виконання обчислень: Запуск обчислень за допомогою вибраного алгоритму чисельного розв'язку для визначення поведінки моделі відповідно до заданих умов.

Аналіз результатів - оцінка результатів моделювання, включаючи переміщення, напруження, температуру, потоки.

Валідація та оптимізація моделі: Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними, виконання коригувань і оптимізація моделі для досягнення кращої відповідності.

Зауважимо, що комп'ютерні моделі дозволяють пересвідчитись у правильному розумінні механізмів явищ, що відбуваються в матеріалі, а також одержана адекватна модель може замінити ряд експериментів з ще не перевіреними складами матеріалів, режимами технологічних процесів тощо.

Поставлені задачі та їх реалізація [31]:

Задача комп'ютерного моделювання складалась із 2 частин: задачі нестационарної теплопровідності та задачі нестационарної структурної механіки.

Задача нестационарної теплопровідності для оцінки теплового поля у заготовці під час спікання зонною плавкою

Задача характеризується диференціальним рівнянням:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{k}{c_v \rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{k}{c_v \rho} \nabla^2 T \quad (2.1)$$

де T - поле температура,

τ – змінний час,

k теплопровідність матеріалу

ρ щільність матеріалу,

x, y, z відповідають просторовим координатам

∇^2 Оператор Лапласа.

Відповідно, для реалізації задачі необхідні властивості матеріалу:

Вхідні дані для моделі:

ізотропна теплопровідність наведенна у таблиці 2.1 та таблиці 2.2 [32].

Оскільки теплопровідність є об'ємною характеристикою то теплопровідність композиційного матеріалу визначається як середньозважене значення з використанням об'ємного вмісту компонентів:

$$k_{\text{Композиту}} = 0,77k_{\text{В}_4\text{С}} + 0,23k_{\text{(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)В}_2}$$

Густина:

$$\text{В}_4\text{С}: 2,52 \text{ г/см}^3 \text{ [32];}$$

$$\text{(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)В}_2: 8282,089 \text{ г/см}^3.$$

Густина високоентропійного бориду визначається як рентгенівська густина з врахуванням кристалічної структури (рис. 2.1), з відповідними параметрами $a = 3,110 \text{ \AA}$ $c = 3,346 \text{ \AA}$ [31].

Таблиця 2.2 – Ізотропна теплопровідність $\text{В}_4\text{С}$ [31].

Температура, °C	Ізотропна теплопровідність, Вт/м К
20	28,15425
300	19,94759
500	16,52606
700	14,11138
1000	11,57823
1027	11,39429
1400	9,344722
1700	8,164459
1800	7,834715
1900	7,53061
2000	7,249261
2027	7,17687
2200	6,745316
2300	6,518764

Таблиця 2.3 – Ізотропна теплопровідність $(\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2$ [31].

Температура, °C	Ізотропна теплопровідність, Вт/м К
20	24,8
1027	29
2300	41

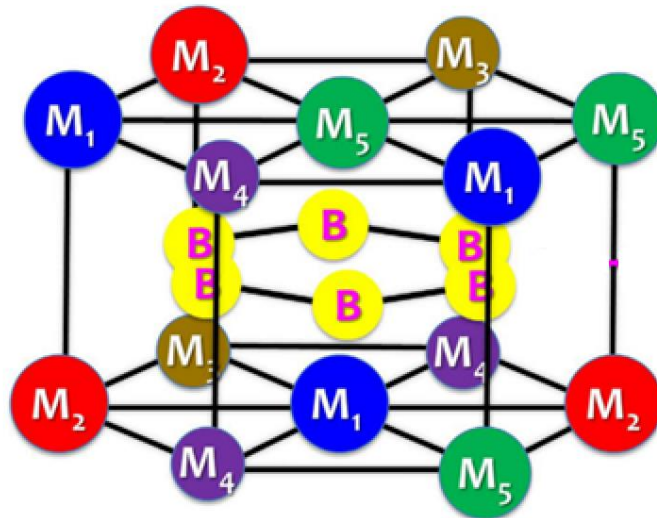


Рисунок 2.5 – Кристалічна гратка високоентропійного бориду [31].

Густина композиту визначаєм як середньозважену використовуючи об'ємний вміст компоненту, вона складає:

$$\text{B}_4\text{C} - (\text{Ti,Zr,Hf,Nb,Ta})\text{B}_2: 3,82 \text{ г/см}^3.$$

Питома ізохорна теплоємність (рис. 2.6) [33].

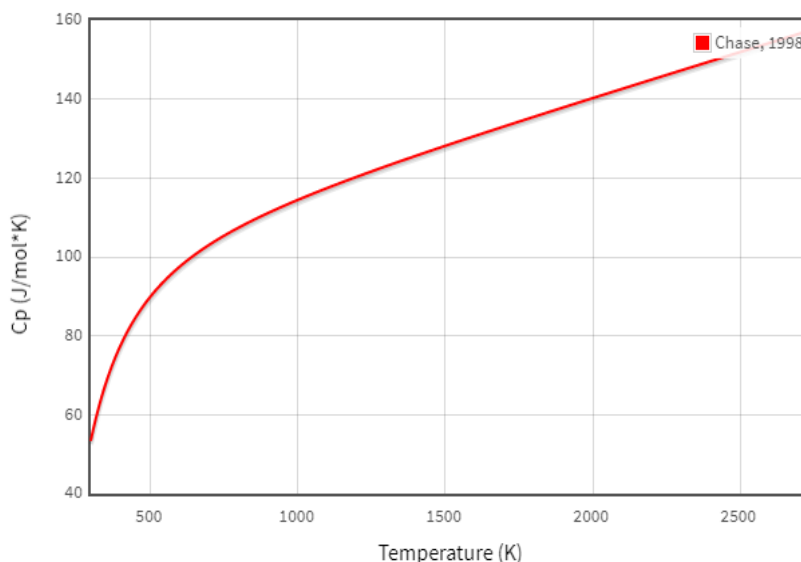


Рисунок 2.6 – Графік питомої теплоємності карбиду бору

Теплоємність високоентропійного бориду та її температурна залежність визначається наближено, враховуючи близькі значення молярних теплоємностей індивідуальних боридів та однаковий характер їх залежностей від температури. Таблиця залежності теплоємності від температури приведена в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Залежності теплоємності від температури[31]

Температура °C	Теплоємність Дж/кг °C
20	423,7288
100	500,4373
300	597,3807
500	653,7288
800	714,3028
1000	746,3837
1200	773,94
1400	797,8562
1600	818,7363
1800	837,0576
2000	853,2344
2200	867,6472
2300	874,0551
2400	880,6572
2500	886,7457
2700	898,3051

Питома теплоємність композиційного матеріалу визначається як середньозважена величина з урахуванням масового вмісту компонентів. Масовий вміст високоентропійного бориду складе 0,493.

Враховуючи інтервал плавлення композиції та наближене значення теплового ефекту плавлення температурна залежність теплоємності композиції може бути описана графіком (рис 2.7).

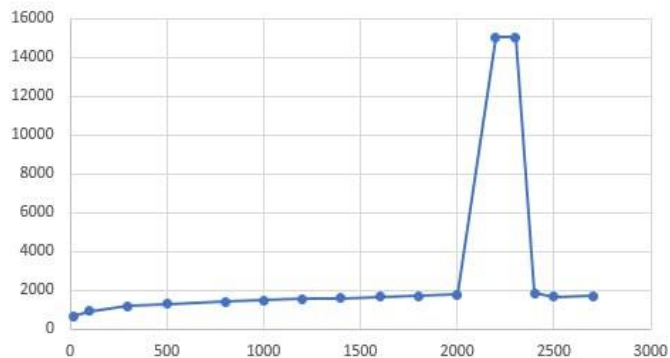


Рисунок 2.7 – Залежність теплоємності від температури плавлення

Для реалізації 2-ї задачі нестационарної структурної механіки механіки необхідні:

Пружні характеристики – модуль пружності

Модуль пружності для карбіду бору (B_4C) становить близько 450 ГПа, а для диборидів він сповтерігається 500 ГПа [33].

Наукові дослідження показують [33], що коефіцієнт Пуассона для композитів системи $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ може варіюватися залежно від конкретної складової сплаву та його мікроструктури. Загальна тенденція полягає в тому, що для карбіду бору (B_4C) коефіцієнт Пуассона знаходиться в діапазоні приблизно від 0,15 до 0,20, тоді як для диборидів титану (TiB_2), цирконію (ZrB_2), гафнію (HfB_2), ніобію (NbB_2) та танталу (TaB_2) цей коефіцієнт може варіюватися в межах від 0,20 до 0,25. Ці значення служать орієнтиром для визначення механічних властивостей та поведінки цих композитних матеріалів під навантаженням.

Наукові дослідження показують, що коефіцієнт теплового розширення для композитів системи $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ може варіюватися в залежності від конкретного складу сплаву та його мікроструктури. Загальна тенденція полягає в тому, що для карбіду бору (B_4C) коефіцієнт теплового розширення зазвичай

становить приблизно $4-6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, тоді як для диборидів цей коефіцієнт може варіюватися в діапазоні від 6 до $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Знання коефіцієнта теплового розширення є важливим для врахування термічних напружень та проектування композитних матеріалів, особливо в умовах змінної температури та теплових навантажень.

Необхідні граничні умови Діріхле та початкові умови, у вигляді температурного поля – результату роботи задачі 1.

Оскільки процес досліджується на широкому температурному інтервалі, для реалізації моделей необхідні температурні залежності усіх вказаних властивостей матеріалів, саме для цього проводим моделювання в ANSYS.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Дослідження структури матеріалу

Дослідження мікроструктури спрямованого закристалізованого евтектичного сплаву системи $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ показало що вона представляє собою матрицю карбіду бору темного кольору спрямовано армовану високоентропійним диборидом світлого кольору (рис.3.1). Інші фази на макроструктурі не виявлено.

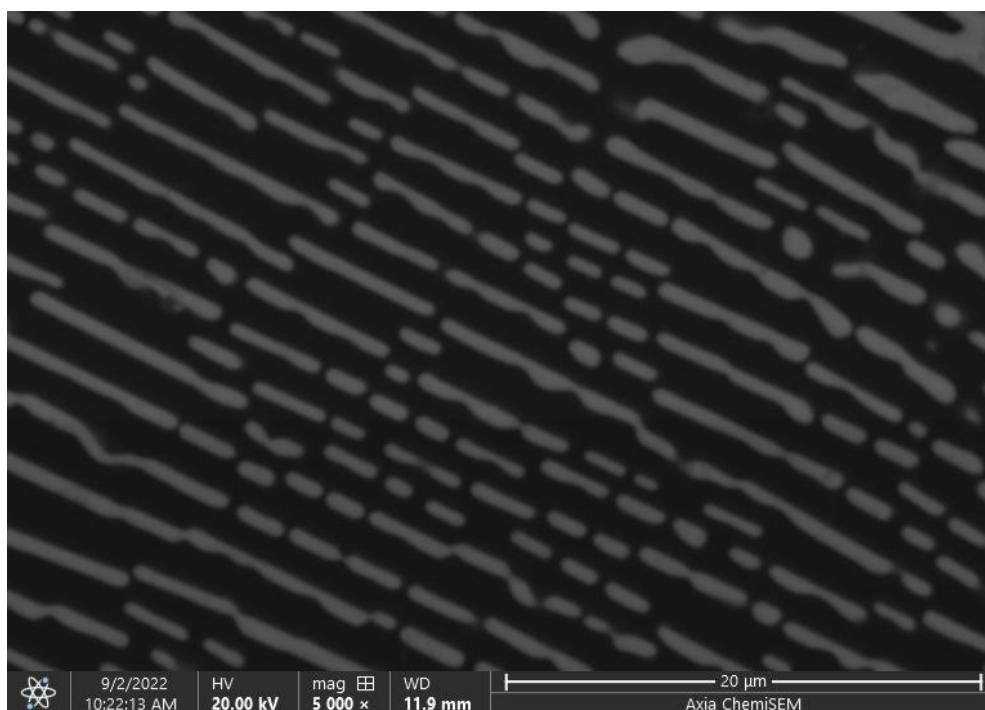


Рисунок 3.1 – Мікроструктура спрямовано-армованого композиту системи $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$

3.2. Хімічний аналіз структури матеріалу

Хімічний аналіз отриманого композиту провадився методом мікрорентгеноспектрального аналізу на електронному мікроскопі Selmi РЭМ-106И (рис 3.2).

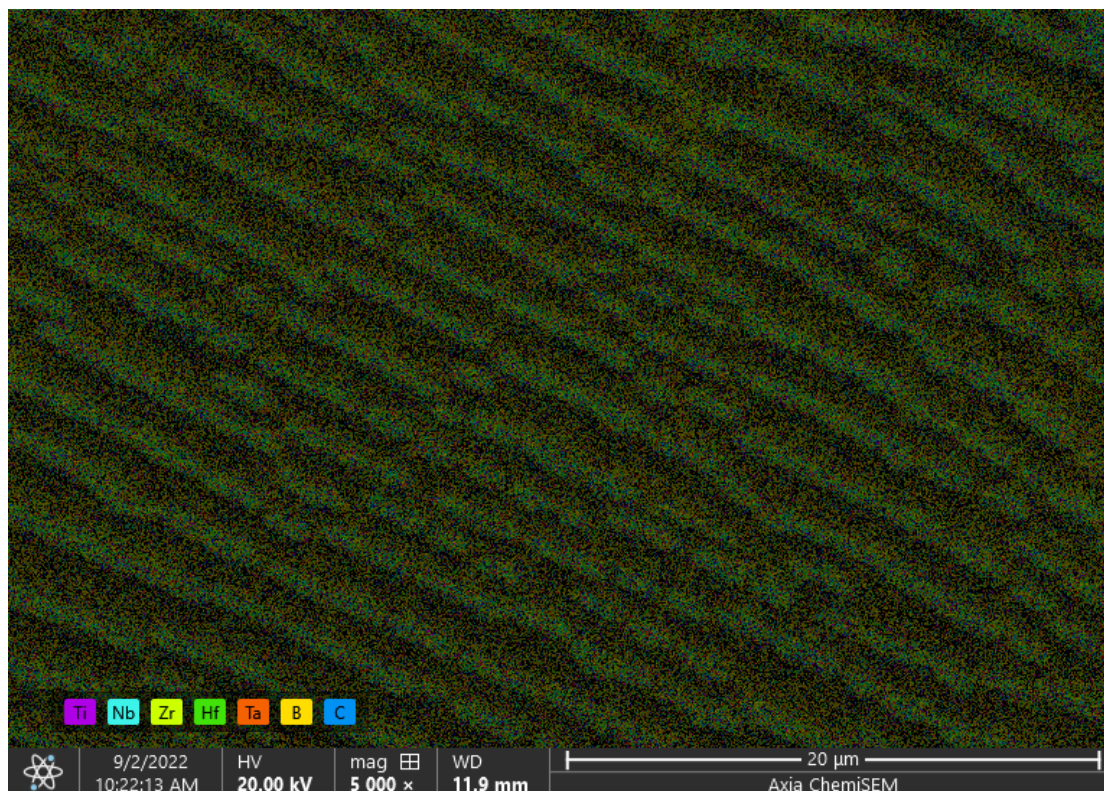


Рисунок 3.2 – Мікроструктура спрямовано-армованого матеріалу системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$

Дослідження показали, що бор та вуглець знаходяться переважно в області матричної фази, що підтверджує, що матриця являє собою карбід бору (рис 3.3). З іншого боку атоми Ti, Zr, Hf, Nb і Ta спостерігаються та рівномірно розподіляються в області армованих включень (рис 3.3).

Це в свою чергу підтверджує що світла фаза на мікроструктурі (рис.3.1) представляє собою високоентропійний борид $(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$.

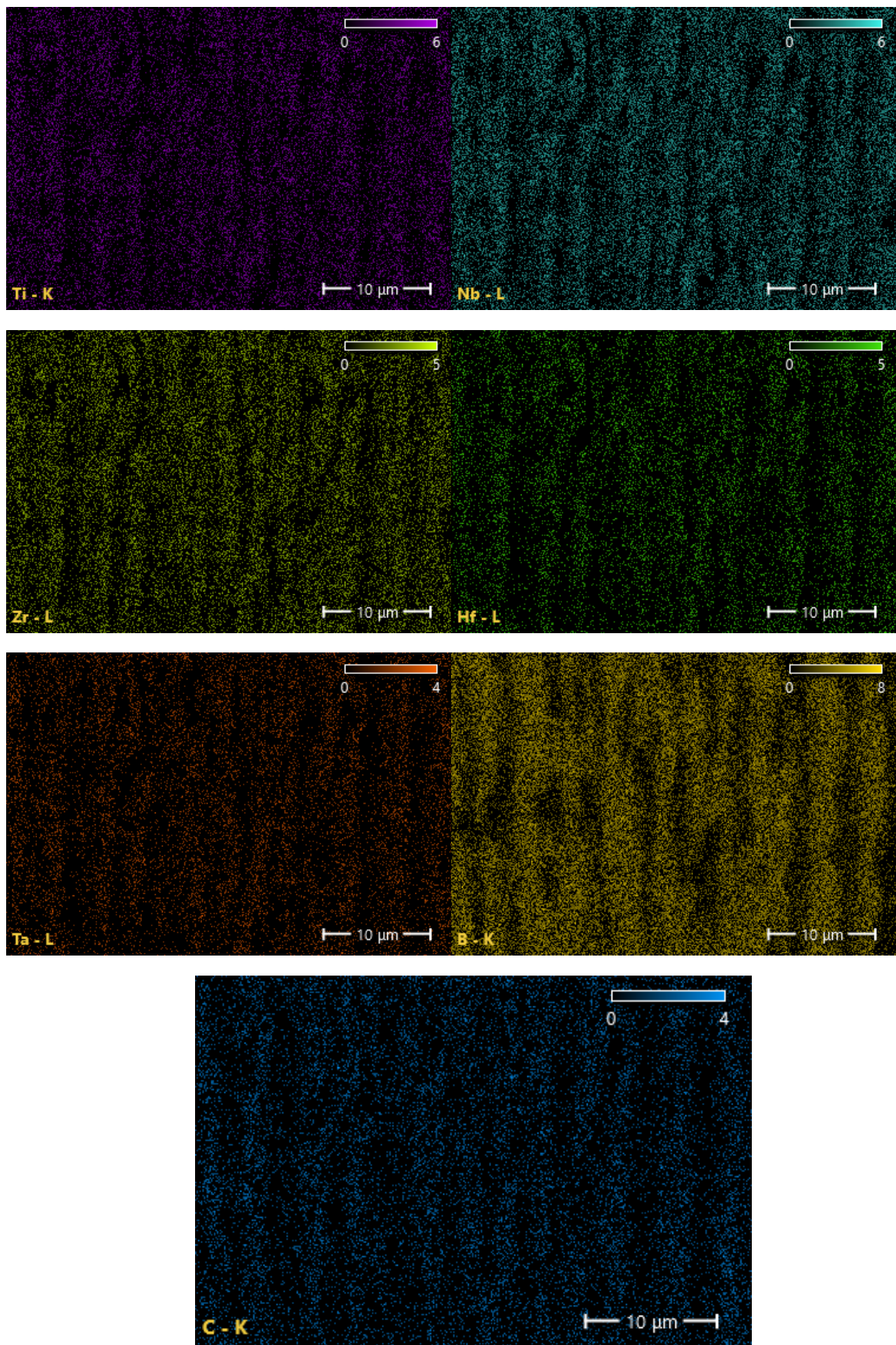


Рисунок 3.3 - Результати дослідження хімічного складу композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$.

3.3 Фазовий аналіз структури матеріалу

Аналіз дифрактограм (рис. 3.4) спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву системи $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$, вирощеного за швидкостей 1-4 мм/хв. Показав, що усі сплави у дослідженому діапазоні складаються з 2 фаз: карбиду бору та високоентропійного дибориду $(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$. Отримані дані задовільно співпадають з результатами авторів роботи [33] для аналогічного індивідуального високоентропійного дибориду. Таким чином, на основі металографічного, хімічного та фазового аналізів можна стверджувати, що отриманий спрямовано армований композит представляє собою матрицю з карбиду бору армовану високоентропійним диборидом $(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$.

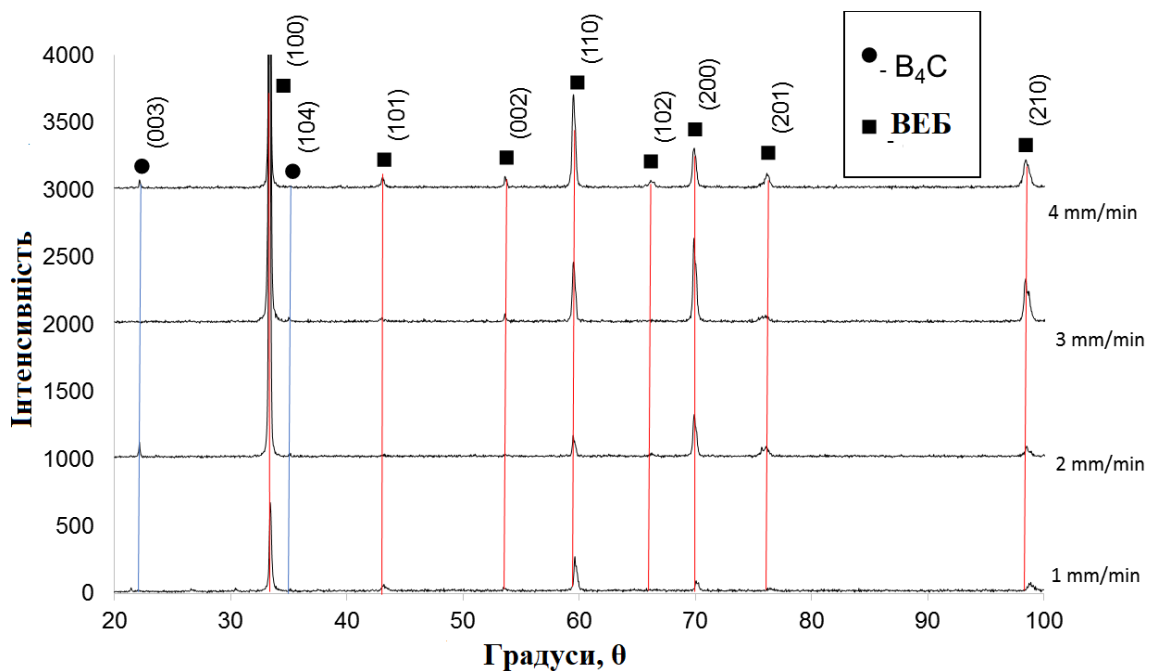


Рисунок 3.4 – Дифрактограми отриманого сплаву

3.4 Дослідження величини залишкових напружень методом рентгенофазового аналізу

Для аналізу величини залишкових макронапружень методом рентгеноструктурного аналізу оберали піки на рентгенограмі, які знаходяться на великих кутах: 98.492° та $118,157^\circ$. Дослідження показали, що рівень напружень у

композиті лежить в діапазоні 495.88 - 2779.58 МПа, причому, помітне деяке збільшення їх величини зі збільшенням швидкості вирощування (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Результати визначення мікро- та макронапружень

		Швидність вирощування мм/хв			
		1	2	3	4
Мікронапруження, МПа	B ₄ C	4,5	126	445	702
	(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B ₂	25	30	45	55
Макронапруження МПа	Кут 98,492°	1419.52	2425.40	1185.40	2779.58
	Кут 118,157°	495.88	1051.36	2437.13	1069.68

Дослідження величини мікронапружень у фазових складових спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B₂ показало, що рівень напружень у матриці з карбиду бору збільшується з підвищенням швидкості вирощування від 4,5 МПа при 1 мм/хв. до 702 МПа при 4 мм/хв.

З іншого боку величина мікронапружень у високоентропійному дибориді (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B₂, також збільшується від 25 МПа при 1 мм/хв до 55 МПа при 4мм/хв.

Таким чином спостерігається тенденція до збільшення рівня як макро- так і мікронапружень з підвищенням швидкості вирощування композиту.

3.5 Результати комп'ютерного моделювання

Оскільки процес досліджується у широкому температурному інтервалі, для реалізації моделей ми застосували температурні залежності усіх вказаних властивостей матеріалів.

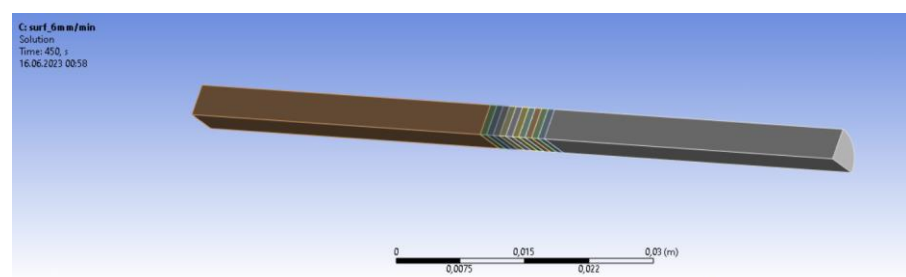


Рисунок 3.5 – Домен у зразку композиту, вибраний для розрахунків (¼ стержня композиту)

Розрахунки виконані на домені який являє собою $\frac{1}{4}$ частину стержня з композиту $V_4C - 23\%$ високоентропійного бориду (рис. 3.5). Цикл нагрівання-охолодження застосовано до ділянки зразка висотою 10 мм, розділену на 10 окремих зрізів. Застосовано швидкості переміщення зони розплаву 1,5 мм/хв. та 6 мм/хв., відповідно. Далі розглядали зріз №5 та зріз №9, які відрізняються умовами нагрівання: зріз №9 нагрівається в статичному стані, до початку руху, зріз № 5 – тільки в динамічному режимі – проходженням через зону розплаву.

Для 1,5 мм/хв. брали зріз №9 нашого стержня (рис. 3.6). На рисунку 3.7 зображено графік залежності температури від часу для зрізу №9 при 1,5 мм/хв.

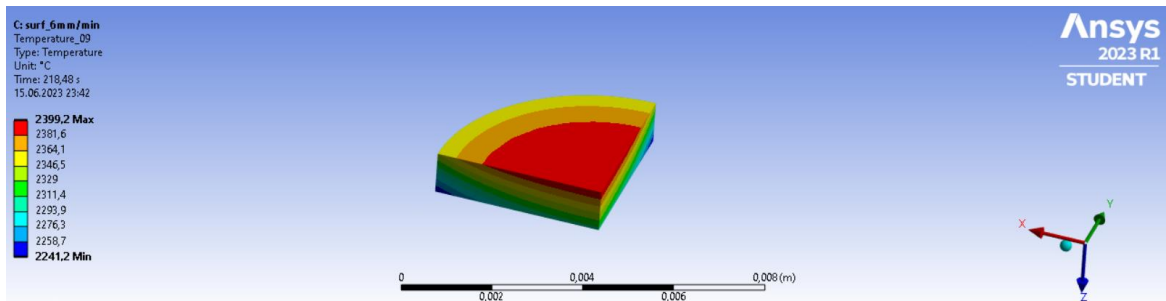


Рисунок 3.6 – Зріз №9 стержня з розподілом температур на 40 секунд і охолодження за швидкості 6 мм/хв.

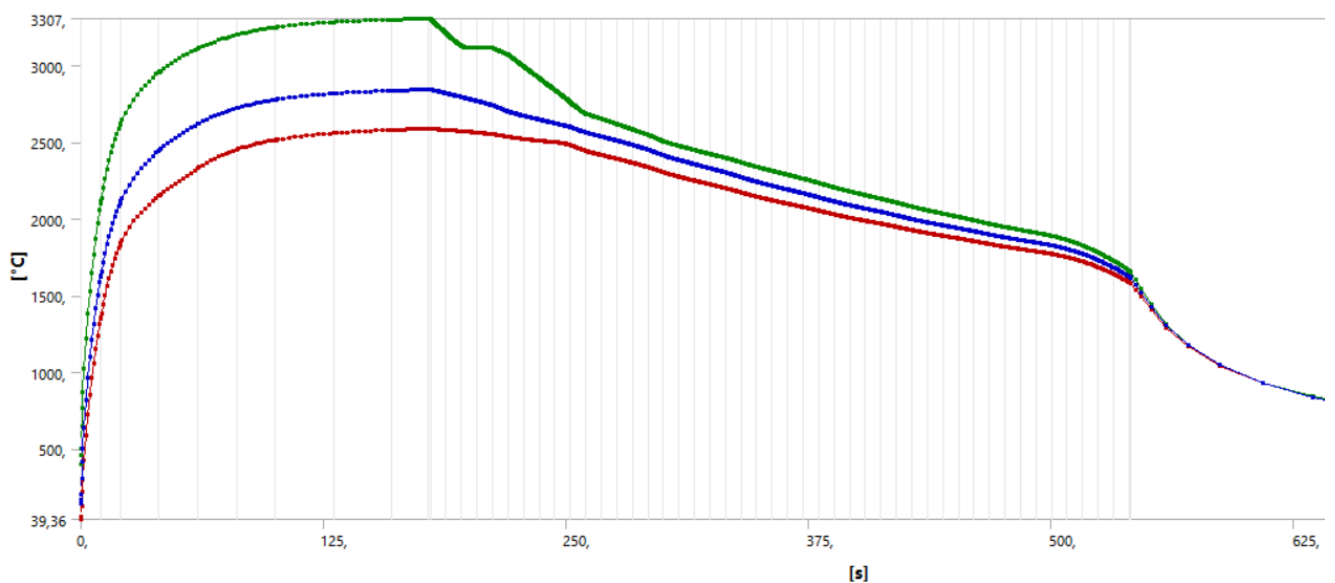


Рисунок 3.7 – Графік залежності температури від часу для зрізу №9 за 1,5 мм/хв.

Аналогічно для зрізу №5 за 6 мм/хв. (рис. 3.8). На рисунку 3.9 зображено графік залежності температури від часу для зрізу №5 за 6 мм/хв.

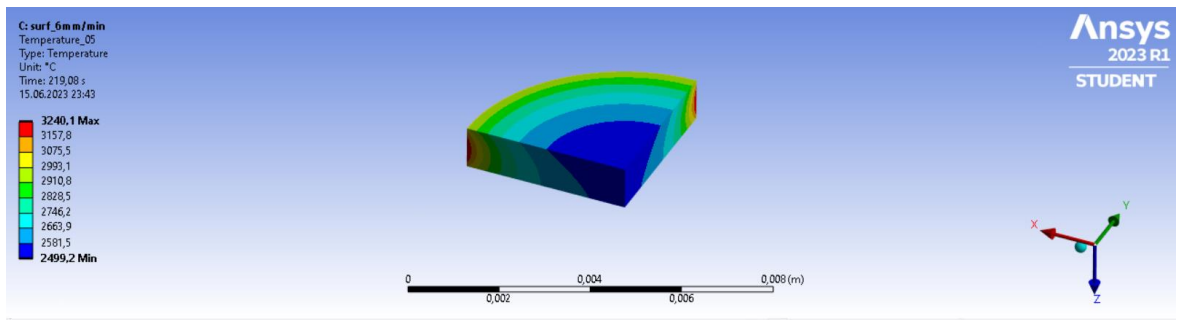


Рисунок 3.8 – Графік залежності температури від часу для зрізу №5 в момент максимального нагріву за 6 мм/хв.

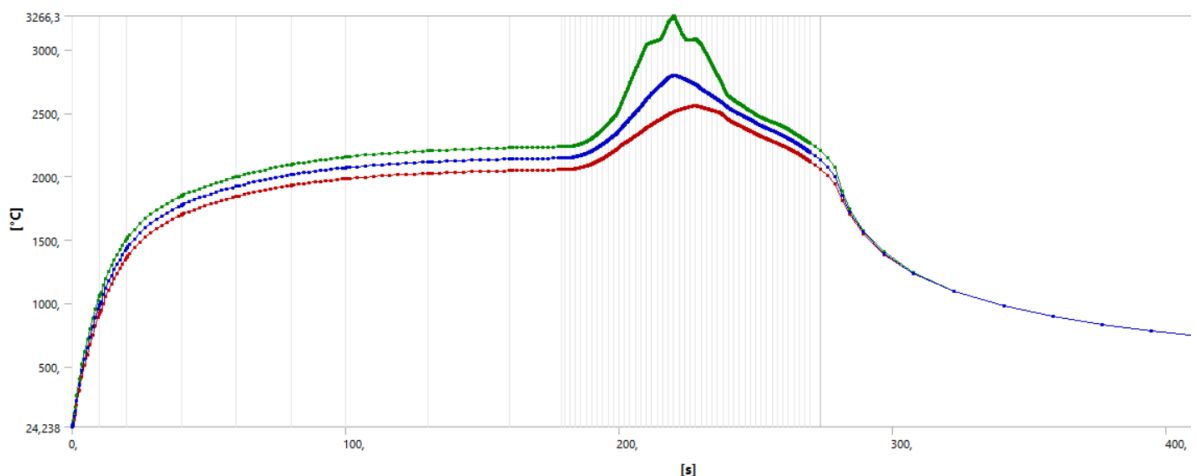


Рисунок 3.9 – Графік залежності температури від часу зрізу №5 для 6мм/хв

Для розрахунку механічних макро напружень використовували задачу 2. Вхідною інформацією для задачі 2 є зміна в часі температурного поля розрахована в задачі 1.

У таблиці 3.2 наведені результати розрахунку механічно-залишкових напружень для двох зрізів №5 та №9 зразка $(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ та для двох швидкостей вирощування 1,5 та 6 мм/хв. Для зрізу №5, який пройшов повільне нагрівання, спостерігається більш широкий розподіл значень напружень, тоді як для зрізу №9, який проник через зони розплаву, спостерігається менший розподіл значень.

Таблиця 3.2 – Рівень залишкових макро напружень

Зразок	Швидкість вирощування (мм/хв)	Зріз 5(МПа)	Зріз 9(МПа)
1	1,5	380-630	545-593
2	6	619-750	690-760

Загалом, порядок величин напружень відносно схожий між розрахунковими та експериментальними значеннями залишкових макронапружень, які були виміряні за допомогою рентгенівського методу. Хоча числові значення можуть відрізнятися, враховуючи різницю в визначенні еквівалентних та інших типів напружень, результати співпадають на достатньому рівні, враховуючи властивості матеріалу та точність вимірювання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Необхідною складовою ефективної організації праці та виробництва є забезпечення безпеки праці. Це означає створення умов праці, які мінімізують вплив небезпечних і шкідливих факторів на працівників. Метою розділу "Охорона праці" є аналіз небезпечних та шкідливих факторів, пов'язаних з одержанням і дослідженням спрямовано закристиалізованих евтектичних композиційних матеріалів, а також розробка заходів для їх усунення. Організація праці також включає заходи, спрямовані на попередження травматизму і захворювань працівників, створення безпечних умов праці, зменшення шуму, вібрацій та запиленості на робочому місці, будівництво та покращення санітарно-побутових умов, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту. Всі ці заходи сприяють підвищенню продуктивності праці та збереженню здоров'я працівників.

4.1. Оцінка умов праці, ризиків та шкоди для здоров'я

В рамках дипломної роботи здійснюється дослідження в Лабораторії технологій тугоплавких сполук під номером 028, яка знаходиться у навчальному корпусі №9. У таблиці 4.1 наведена специфікація технологічного обладнання, що використовується, тоді як таблиця 5.2 містить характеристики приміщення, де розташоване робоче місце.

Відповідно до вимог, викладених у ДБН В.2.2-28:2010 для будівель виробничого призначення, розмірні характеристики приміщень мають відповідати певним параметрам. Вимагається, щоб висота виробничих приміщень була не менше 3,2 м, а об'єм і площа на кожного працівника становили 15 м³ та 4,5 м² відповідно [35].

Таблиця 4.1 - Опис технологічного обладнання з вказанням його характеристик.

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

Таблиця 4.2 – Характеристики науково-дослідної лабораторії.

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

У нашому випадку площа приміщення складає:

$$S = 11,5 \cdot 5,5 = 63,25 \text{ м}^2, \quad (5.1)$$

Об'єм приміщення вираховується за формулою:

$$V = 11,5 \cdot 5,5 \cdot 4,5 = 284,625 \text{ м}^3. \quad (5.2)$$

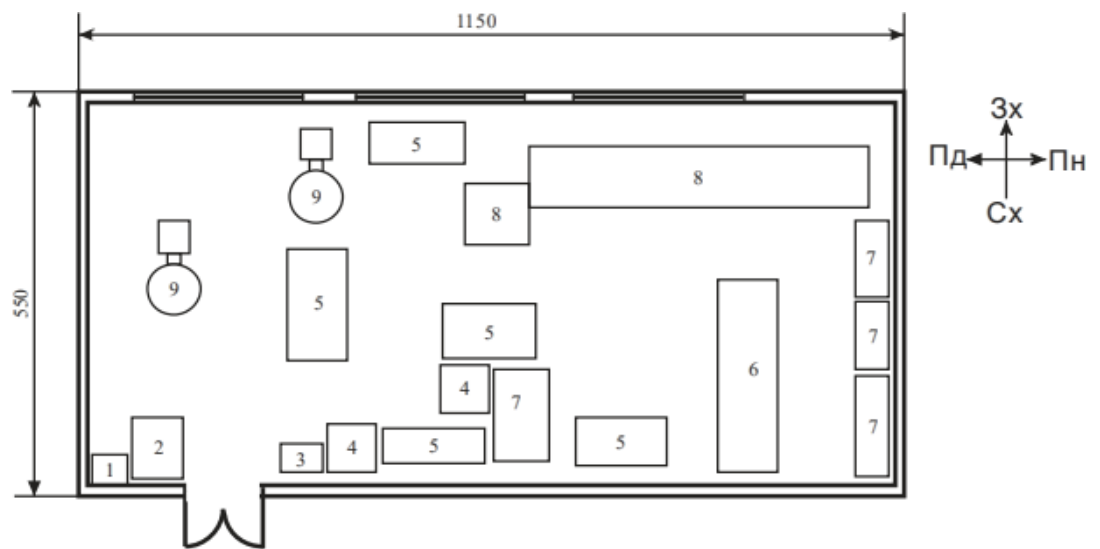
При проведенні експериментів у лабораторії 3 людини займають певну площу. Знайдем площу на одного дослідника:

$$S_{ч} = 63,25/3 = 21,0833 \text{ м}^2 / \text{чол.}, \quad (5.3)$$

Об'єм:

$$V_{ч} = 284,625/3 = 94,875 \text{ м}^3 / \text{чол.} \quad (5.4)$$

Таким чином, геометричні характеристики приміщення відповідають основним вимогам до виробничих будівель. План приміщення наведено на рис. 4.1



1 - раковина; 2 - сховище; 3 - шафа для сушіння; 4 - верстат для електро-ерозійної обробки; 5 - робоча поверхня; 6 - апарат «Кристал-106»; 7 - шаф; 8 - апарат «Кристал-206» 9 – вакуумна установка

Рисунок 4.1 – План лабораторії

Таблиця 4.4 – містить інформацію про фактичні та встановлені нормативні характеристики приміщення..

№	Параметр приміщення	Реальне значення	Нормативні значення
1	Площа на 1 працюючого	21,0833	4,5 м ²
2	О б'єм на 1 працюючого	94,875 м ³	15 м ³
3	Мінімальна ширина проходу	1,5	1,5 м

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

Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення (нормалізації) умов праці є важливим етапом у системі управління охороною праці. Цей процес передбачає ідентифікацію, оцінку та управління ризиками, пов'язаними з впливом небезпечних і шкідливих факторів на здоров'я та безпеку працівників.

Оцінка небезпечних та шкідливих виробничих факторів включає аналіз умов праці, виробничого середовища та взаємодії з ними працівників. Вона передбачає виявлення потенційних небезпек та оцінку їх впливу на здоров'я працівників. Це можуть бути фактори, такі як шум, вібрація, пил, хімічні речовини, радіація, тепло, холод, напруженість роботи та інші.

Після оцінки небезпечних та шкідливих факторів розробляються заходи поліпшення або нормалізації умов праці. Це можуть бути технічні, організаційні або профілактичні заходи, спрямовані на зниження рівня впливу небезпечних факторів або на управління ризиками. Наприклад, це можуть бути заходи щодо заміни шкідливих речовин безпечними аналогами, встановлення систем вентиляції, використання засобів індивідуального захисту, навчання працівників правилам безпеки та інші.

Важливо постійно оновлювати та вдосконалювати оцінку небезпечних та шкідливих факторів, а також розробляти нові заходи поліпшення умов праці. Це

допоможе забезпечити безпечне та здорове робоче середовище для працівників і зменшити ризики професійних захворювань та травм.

4.2.1. Фізичні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів

У приміщенні лабораторії 028 присутні джерела шуму, зокрема верстат електроерозійного різання та установка "Кристал-206" для безтигельної зонної плавки кристалів. Ця інформація може бути знайдена в таблиці 4.5

За характеристикою часу, шум, що виникає в лабораторії, можна віднести до постійного, оскільки рівень звуку протягом усього робочого дня при роботі обладнання не змінюється більше, ніж на 5 децибел. Щодо походження шуму, він поділяється на дві категорії: механічний, який походить від вакуумного насоса, та електромагнітний, що виникає від установки "Кристал-206".

Таблиця 4.5 – основні фізичні ризики які створює технологічний процес

№ п.п	Найменування обладнання	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1	верстат електроерозійного різання	генератор	Механічний шумвід роботи генератора	робітник
2	«Кристал – 206»	механічний вакуумний насос	Механічний шум	робітник

При одночасній роботі всього устаткування, рівень шуму в лабораторії може перевищувати допустимі норми, встановлені ДСН 3.3.6.037-99, що може призвести до виникнення професійних захворювань [36]. Однак, в даній дипломній роботі вдалося виконати вимоги щодо рівня шуму. Згідно з таблицею 5.5, рівень шуму в лабораторії 028 становить 65 дБА. Для забезпечення дотримання вимог, рівень шуму періодично вимірюється шумоміром не рідше одного разу в шість місяців.

Таблиця 4.6 – Реальні та нормативні фактори небезпеки, що створюються в технологічному процесі

	Фактор небезпеки	Реальне значення	Нормативні значення
	Шум	65 дБА	75 дБА

Шум може спричиняти різноманітні загальнобіологічні реакції, патологічні зміни, функціональні порушення та механічні ушкодження. Працюючи в умовах шуму, продуктивність ручної роботи може знизитись до 60%, а при виконанні розрахунків навіть до 50%.

Тривала робота в шумовому середовищі найбільше впливає на нервову систему, серцево-судинну систему та органи дихання. Постійна потреба голосно розмовляти в умовах виробництва має негативний вплив на психіку людей. Для зменшення негативного впливу шуму на працівників шумних виробництв використовуються заходи звукоізоляції, віброізоляції та звуко- і вібропоглинання, а також шумові глушники [37]. Додатково, індивідуальні засоби захисту від шуму та обмеження часу перебування в зоні підвищеного шуму використовуються для зменшення шкідливого впливу шуму.

4.2.2. Хімічні джерела небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Під час виконання досліджень не використовувалися шкідливі речовини. Однак, при процесах змішування, дозування та пресування порошків карбиду бору, дибориду титану та дибориду цирконію може виникати утворення дрібнодисперсного пилу.

Пил, особливо дрібнодисперсний, має фіброгенний вплив на організм людини, спричиняючи подразнення слизових оболонок дихальних шляхів. Хоча пил практично не потрапляє до кровообігу через його погану розчинність у біологічних середовищах, найбільша небезпека становить саме дрібнодисперсний пил. Він знаходиться у підвішеному стані у повітрі і легко потрапляє до легень. У

лабораторних умовах концентрація шкідливих речовин, що створюють пил, не перевищує гранично допустимих значень. Для запобігання вдиханню пилу порошків, використовуються протипилові респіратори типу "Лепесток". Шкідливі речовини, що утворюють пил, зберігаються у щільно закритих посудинах, розташованих у витяжній шафі. Люди, які перебувають у зоні впливу пилу, забезпечуються спеціальним захисним одягом. При роботі з пресом важливо постійно перевіряти стан його магістралей і правильно встановлювати прес-форму, уникати перекосів. Для випадку розриву прес-форми використовується металевий щит, який захищає робочу зону.



Рисунок 4.2 – Зображення вентиляції у різних лабораторіях

4.2.3. Небезпека ураження людини електричним струмом.

В лабораторії 028 використовуються електричні джерела живлення для роботи обладнання. Для живлення сушильної шафи та верстата електроерозійного різання використовується струм напругою 220 В, тоді як для живлення установки "Кристал 206" використовується струм напругою 380 В (див. табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Основні небезпеки, які створюються в технологічному процесі при роботі з електричними приборами

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

У процесі роботи з електричними приладами виникають певні ризики та потенційні небезпеки. Ці небезпеки пов'язані з використанням електричного струму та можуть включати наступні аспекти:

Ризик ураження електричним струмом: Під час виконання робіт з електричними приладами може виникнути можливість отримання удару електричним струмом, що може призвести до травм та навіть смерті.

Пожежна небезпека: Неправильне використання або несправність електричного обладнання можуть спричинити коротке замикання, перевантаження або інші умови, що можуть сприяти виникненню пожежі.

Механічні пошкодження: Неконтрольовані рухи частин обладнання, некоректне використання інструментів або недотримання правил безпеки можуть призвести до механічних ушкоджень, таких як порізи, подряпини, забої і травми.

Ризик перенапруги: При некоректному підключенні електричного обладнання або при несправності може виникнути перенапруга, що може пошкодити обладнання або навіть загрожувати безпеці працівників.

Небезпека вибуху: У деяких випадках, особливо при роботі з легкозаймистими речовинами або вибухонебезпечними середовищами, використання електричного обладнання може створювати ризик вибуху.

З метою запобігання цим небезпекам необхідно дотримуватись правил безпеки, проводити регулярну перевірку та обслуговування обладнання, використовувати відповідні методи захисту та забезпечувати належну підготовку та навчання працівників, які працюють з електричними приладами.

Ризик ураження електричним струмом може виникнути внаслідок різних ситуацій. Це може статися через прямий контакт з елементами установок, що перебувають під напругою, або через дотик до металевих частин електрообладнання, таких як кожухи та корпуси. Також ризик існує у разі пошкодження ізоляції, наявності напруги на невимкнутих струмопровідних частинах, з якими працює персонал, або внаслідок помилкового включення установок. Крім того, може виникнути небезпека через появу крокової напруги на поверхні землі внаслідок замикання дроту на землю. Категорія приміщення визначається наявністю підвищеної або особливої небезпеки електротравм, що присутня в приміщенні [38]. Серед факторів, що підвищують ризик, варто відзначити такі: висока температура в приміщенні, яка протягом доби перевищує 35 °С; висока відносна вологість, яка перевищує 75%, але не досягає повного насичення (100%); наявність струмопровідної підлоги, такої як металева, бетонна, цегляна або земляна; присутність струмопровідного пилу; можливість одночасного контакту людини з неструмопровідними частинами електроустановки та металевими конструкціями, що мають контакт з землею [39]. Лабораторія 0-28 відноситься до класу приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом (ІІ-й клас), оскільки в ній використовуються провідні порошки і підлога зроблена з бетону. Можливі ситуації, які можуть спричинити ураження електричним струмом, включають пробій на корпусі обладнання, пошкодження проводки, відсутність заземлення електричного обладнання або пошкодження розеток. Для забезпечення безпеки, обладнання, яке працює під напругою 220 В і

380 В, повинно мати надійне захисне заземлення. У лабораторії 0-28 вже виконано захисне заземлення корпусів електроустаткування і електроприладів, а також забезпечена надійна ізоляція струмопровідних частин [40]. У лабораторії були встановлені захисні огорожі у формі сіток (ППЕУ-89), як заходи безпеки для уникнення випадкового контакту з елементами електричного обладнання, які перебувають під напругою.

4.2.4. Пожежна безпека

Приміщення лабораторії 028 відноситься до категорії Г з вибухонебезпечною та пожежною небезпекою. Це означає, що в приміщенні знаходяться негорючі речовини та матеріали, які можуть перебувати у гарячому, розжареному або розплавленому стані, і процес їх обробки супроводжується виділенням променистого тепла, іскор або полум'я. Також в приміщенні можуть бути присутні горючі гази, спалімі рідини і тверді горючі речовини, які можуть спалюватись або використовуватись як паливо. У зв'язку з цим, існує можливість виникнення пожеж класу А, які характеризуються горінням твердих речовин, яке може супроводжуватись або не супроводжуватись тлінням [41]. Проте лабораторія обладнана необхідними засобами пожежогасіння. Пожежонебезпечна зона відноситься до класу II-IIa (простір у приміщенні, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали) (табл 4.8) .

Відповідно до класифікації, вибухонебезпечна зона відноситься до другого класу. Це означає, що в даному просторі за звичайних умов експлуатації вибухонебезпечне середовище відсутнє, а якщо таке середовище все ж виникає, то це стається рідко і триває недовго. Тобто, існує незначна ймовірність появи вибухових речовин або газів, але цей стан є рідкісним та має незначну тривалість [42].

У приміщенні лабораторії можуть виникати пожежі з різних причин, таких як електричні замикання в ланцюгах електрообладнання, порушення правил пожежної безпеки при використанні побутових електронагрівальних приладів, небезпечне поводження з відкритим вогнем або недотримання заходів безпеки під час вогневих робіт.

Таблиця 4.8 – Основні пожежні небезпеки, які створюються в технологічному процесі

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

У приміщенні лабораторії вживаються різноманітні заходи для забезпечення пожежної безпеки. Ці заходи включають технічні, організаційні та режимні заходи. До технічних заходів належить установка пожежних сигналізаторів типу ИП-105, які спрацьовують при підвищенні температури до 72 °С. Сигнал з цих сигналізаторів надходить на основну панель пожежної сигналізації, що дозволяє оперативно виявити можливу загрозу пожежі.

Додатково, у коридорі розташований пожежний кран з приєднаним пожежним рукавом, що забезпечує доступ до води для швидкого гасіння пожежі.

Також важливо відзначити, що будівля лабораторії відповідає I ступеню вогнестійкості відповідно до ДБН В.1.1-7-2002. Це означає, що будівельні конструкції виконані з негорючих матеріалів, таких як природні або штучні кам'яні матеріали, бетон та залізобетон, що сприяє запобіганню поширенню пожежі.

Ці заходи покликані забезпечити максимальний рівень пожежної безпеки у лабораторії та зменшити ризик виникнення та поширення пожежі у разі небезпеки [43]

У плані забезпечення пожежної безпеки в лабораторії виконуються ряд основних заходів. Важливим аспектом є регулярна перевірка працездатності засобів гасіння пожежі та систем пожежної сигналізації, щоб переконатися в їхній готовності до надання ефективної реакції в разі виникнення пожежі.

Також проводиться перевірка справності електричної проводки, що має велике значення для запобігання короткого замикання та виникнення пожежі внаслідок електричних несправностей. Це може включати огляд і тестування електричних мереж та забезпечення належного заземлення.

Щорічне випробування опору ізоляції підвищеною напругою (близько 500В) є важливим етапом для перевірки ефективності ізоляційних систем та виявлення можливих проблем, які можуть призвести до виникнення пожежі.

Крім того, важливо дотримуватися обережного поводження з легкоплавкими речовинами, такими як хімічні речовини або легкозаймісті матеріали. Необхідно дотримуватися правил їх зберігання, використання та утилізації, а також установлених процедур безпеки при роботі з цими речовинами.

Всі ці заходи спрямовані на забезпечення безпеки в разі виникнення пожежі та мінімізацію ризиків для персоналу та майна лабораторії.

4.3. Застосування засобів індивідуального захисту

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) використовуються з метою уникнення або зменшення небезпеки, яку створюють шкідливі фактори на робочому місці, а також для захисту від забруднення. Вони застосовуються тоді, коли безпеку роботи не можна забезпечити шляхом використання безпечного обладнання, організаційних заходів або колективних засобів захисту.

Для безпечного проведення даного науково-дослідного проекту необхідно враховувати такі засоби індивідуального захисту:

а) засоби захисту органів слуху, наприклад, протишумові навушники, які допомагають зменшити ризик пошкодження слуху від шуму; (рис 4.3)



Рисунок 4.3 – протишумові навушники

б) засоби захисту органів дихання, такі як фільтрувальні пристрої, що захищають від пилу, шкідливих газів або аерозолей; (рис. 4.4)



Рисунок 4.4 – напівмаска-респіратор

в) спеціальний захисний одяг, включаючи халати, фартухи, плащі, які забезпечують захист від механічних ушкоджень, електричних ризиків, бризок металу та інфрачервоного випромінювання, а також теплозахисний одяг; (рис 4.5)



Рисунок 4.5 – лабораторні халати

г) засоби захисту ніг та стегон, такі як електроізолююче взуття, що допомагають запобігти електричним ушкодженням;

д) засоби захисту шкіри, які включають захисні креми, мазі, гелі, очисники шкіри та репаративні засоби, для попередження подразнень та пошкоджень шкіри від робочих речовин.

Застосування цих засобів індивідуального захисту допоможе забезпечити безпеку та запобігти можливим ризикам, пов'язаним з виконанням науково-дослідної роботи [44].

Застосування засобів індивідуального захисту є необхідним для забезпечення ефективного захисту людини в умовах виробництва, особливо там, де інші методи захисту, такі як конструкція обладнання, організація виробничих процесів або колективні засоби захисту, недостатньо ефективні. Проте, науковий досвід фахівців з промислової гігієни і профзахворювань показує, що використання засобів індивідуального захисту є менш надійним методом і слід використовувати його лише у випадках, коли інші способи захисту не можуть бути застосовані або не забезпечують достатнього рівня безпеки.

Важливо зазначити, що застосування засобів індивідуального захисту повинно бути супроводжуване заходами, спрямованими на удосконалення технологій та умов праці. Це може включати зміну технології, автоматизацію шкідливих процесів, герметизацію устаткування, ефективну вентиляцію, повітряні душі, дистанційне керування та інші заходи, спрямовані на зменшення шкідливої дії до безпечного рівня.

Таким чином, використання засобів індивідуального захисту має бути комплексним підходом, поєднуючи їх з іншими ефективними методами захисту, щоб максимально забезпечити безпеку працівників [45].

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Науково-технічна актуальність

У даному дослідженні було проведений аналіз диборидів перехідних металів, зокрема $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$, з метою їх застосування у виготовленні деталей для приладів електронної техніки. Використання керамічних матеріалів у катодно-підігрівних вузлах електронно-променевих пристроїв має декілька переваг, таких як зниження робочих температур, зменшення енергетичних витрат, збільшення строку служби та покращення характеристик електронно-оптичних систем. Також це сприяє покращенню процесів плавлення, зварювання, випаровування, прошивання отворів, різання та гартування хімічно активних і тугоплавких матеріалів, а також автоматизації процесу керування електронними і іонними пучками. Використання таких матеріалів відкриває нові можливості для технологічного інструменту у сучасній електроніці

Даний композит може бути використаний як матеріал для нагрівачів катодних вузлів. Цей тип нагрівача володіє значно вищою температурою плавлення порівняно з робочими температурами катоду, виявляє значно більший електричний опір та високу хімічну стійкість до матеріалу катоду та струмопідводів. Однією з переваг такого матеріалу є його достатня механічна міцність, яка дозволяє зберегти жорсткість конструкції при високих температурах завдяки армуванню. Також він має стабільні термоелектричні властивості, зокрема електропровідність, завдяки спрямованій кристалізації методом безтигельної зонної плавки.

Міцність нагрівачів, виготовлених з композитів системи $V_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$, перевищує міцність графіту в декілька разів. Така заміна матеріалу сприяє зниженню потужності нагрівання катодних вузлів на 2-2,5 рази. Це дозволяє зменшити теплові навантаження на конструкційні елементи та збільшити їх строк служби в 2-4 рази шляхом збільшення електричного опору.

Експерименти, проведені як в лабораторних умовах, так і на технологічному устаткуванні, показали, що виготовлення нагрівачів катодних вузлів із евтектичних сплавів $V_4C - (Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ з одночасною заміною вольфрамового катоду на катод з композитного матеріалу $LaB_6-V_4C-ZrB_2$ дозволяє зменшити потужність нагрівання в 4 рази. Це призводить до значного покращення характеристик

електронних пучків, зокрема щодо накульних, енергетичних та просторово-геометричних параметрів. Також це дозволяє спростити конструкцію, оскільки натягуючі елементи можуть бути вилучені, завдяки тому, що спрямовано армована боридна кераміка має температуру початку інтенсивної повзучості вищу за робочу температуру катода, а саме 1500°C (0,8Тпл).

Вбудовані емітери із LaB6 та нагрівачі, виготовлені з композитів системи V_4C - $(\text{Ti}_x, \text{Zr}_{1-x}) \text{V}_2$, що застосовуються в керамічних катодних вузлах, демонструють стабільність накульних, енергетичних та просторово-геометричних характеристик, а також виявляються технологічно ефективними. Ці матеріали не поступаються найкращим світовим аналогам і рекомендуються для використання як у вітчизняних, так і у зарубіжних електронних мікроскопах.

В цьому контексті, актуальною є робота, спрямована на одержання кераміки на основі V_4C , яка армується диборидами титану та цирконію, за допомогою спрямованої кристалізації евтектичних сплавів методом безтигельної зонної плавки. Це виробництво має велике значення для електронної техніки.

5.2 Розрахунок планових витрат

Проведемо розрахунок планових витрат, пов'язаних з проведенням експериментів та досліджень. Витрати будуть включати придбання необхідних матеріалів, засобів випробування, лабораторного обладнання та інших ресурсів. Детальний розрахунок планових витрат дозволить оцінити бюджет дослідження та забезпечити необхідні фінансові ресурси для успішної реалізації проекту.

Планова собівартість визначається за наступними статтями витрат:

а) заробітна плата науково-дослідницького персоналу: це включає витрати на оплату праці спеціалістів, які безпосередньо займаються проведенням досліджень та експериментів.

б) єдиний соціальний внесок: це витрати, пов'язані зі сплатою соціального внеску за працівників, задіяних у проекті.

в) вартість спеціального обладнання: це включає витрати на придбання або оренду необхідного спеціалізованого обладнання для проведення досліджень.

г) вартість матеріалів: це витрати, пов'язані з придбанням необхідних матеріалів для проведення досліджень, включаючи компоненти та пробні зразки.

д) витрати на відрядження: це включає витрати, пов'язані з поїздками співробітників для участі у конференціях, семінарах або взаємодії з партнерами.

е) інші прямі витрати по темі: це додаткові витрати, які прямо пов'язані з дослідженням і не були враховані у попередніх статтях витрат. Це можуть бути витрати на спеціальне програмне забезпечення, ліцензії, консультантські послуги тощо.

ж) накладні витрати: це включає витрати, які виникають у зв'язку з загальними адміністративними та управлінськими функціями, не пов'язаними безпосередньо з проведенням досліджень.

5.3 Витрати на оплату праці

Витрати за цією категорією включають оплату праці працівників, які зайняті виконанням робіт з даної теми. Заробітна плата розраховується на основі трудомісткості окремих робіт і посадових окладів виконавців. Розрахунок заробітної плати проводиться в днях праці людини. У таблиці 5.1 наведено перелік робіт та їх трудомісткість. Денні зарплати визначаються як відношення місячного окладу до кількості робочих днів в умовному місяці (21,2 дня при п'ятиденному робочому тижні).

Таблиця 5.1 – перелік робіт та їх трудомісткість

Етапи НДР	Трудомісткість, людино-днів		
	Інженер-дослідник	Завідувач кафедри	Лаборант
Підготовчий етап	3	2	3
Проведення експерименту	25	7	10
Написання записки	20	5	–
Оформлення, перевірка та захист	7	5	–
Разом	55	19	13

Шляхом перемноження середньоденної заробітної плати для кожної категорії виконавців на відповідну заплановану трудомісткість робіт розраховується плановий фонд заробітної плати для всіх виконавців. Результати цього розрахунку фонду заробітної плати з даної теми представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – розрахунок фонду заробітної плати

Посада	Планова трудомісткість, людино-днів	Заробітна плата, грн		
		Місячний вклад	Денна заробітна плата	Усього за виконавцями
Інженер-дослідник	55	7730	364,62	20054,1
Завідувач кафедри	19	20560	969,81	18426,39
Лаборант	13	6245	294,58	3829,54
Разом				42310,03

5.4. Визначення розміру єдиного соціального внеску

Органи соціального страхування здійснюють відрахування у вигляді єдиного соціального внеску (ЄСВ), який обчислюється відсотком від заробітної плати виконавців, що займаються темою дослідження. Норматив єдиного соціального внеску становить 22% від заробітної плати.

$$\text{ЄСВ} = 42310,03 \cdot 0,22 = 9308,2 \text{ грн.} \quad (4.1)$$

5.5. Матеріали необхідні для проведення досліджень

Розрахунок витрат на матеріали, які потрібні для здійснення даної науково-дослідної роботи (НДР), проводиться шляхом множення ціни одиниці матеріалу на загальну кількість використаного матеріалу. Результати цих розрахунків представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Фінансові витрати, пов'язані з здійсненням НДР, включають вартість придбання необхідних матеріалів

Найменування матеріалів	Стандарт	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Порошок V_4C	98%	кг	0,053	445	23,6
Порошок TiB_2	99,5%	кг	0,01	1300	13
Порошок ZrB_2	99,5%	кг	0,013	3600	46,8
Разом		-	-	-	83,4

Витрати на транспорт та підготовку, що включають в себе витрати на доставку та обробку матеріалів, становлять 10% від загальної планової вартості використаних матеріалів.

$$T_v = 83,4 \cdot 0,1 = 8,34. \quad (5.2)$$

Тоді загальні витрати V_m по цій статті будуть:

$$V_m = 83,4 + 8,34 = 91,74 \text{ грн.} \quad (5.3)$$

5.6. Витрати на спеціальне обладнання

Для проведення досліджень в цій роботі використовується наявне обладнання, зокрема безтигельна зонна плавка Кристал-206, металографічний мікроскоп НЕОРНОТ-21, растровий електронний мікроскоп Selmi РЭМ-106И, RIGAKU ULTIMA IV та мікротвердомір MHV-1000. Спеціального устаткування не було закуплено спеціально для цієї роботи.

5.7. Вартість послуг сторонніх організацій

У даному дослідженні не було залучено сторонніх організацій для співпраці або участі

5.8. Витрати на службові відрядження

У процесі досліджень всі етапи були виконані з використанням наявного обладнання, яке знаходиться в лабораторіях Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського. З цим урахуванням, не було потреби витратити кошти на виробничо-наукові відрядження.

5.9. Інші прямі невраховані витрати по темі

У цьому розділі ми опишемо всі витрати які були проведенні у данній роботі та що не увійшли до попередніх пунктів, (данний розділ включає в себе витрати, пов'язані з оплатою спеціалістів з інших організацій, консультаціями, а також використанням обладнання, належного іншим організаціям та інші подібні витрати. Провівши данну роботу також були проведенні витрати ($C_{\text{інш}}$) складають 10 % від суми врахованих витрат на ДР.

$$C_{\text{інш}} = (42310,03 + 9308,2 + 91,74) \times 0,1 = 5171 \text{ грн.} \quad (5.4)$$

5.10. Накладні витрати

Витрати, пов'язані з організаційними витратами (Нв), визначаються як відсоток від суми прямих витрат по НДР. В Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» відсоток накладних витрат складає 20% від загальної суми прямих витрат на дослідження

$$H_v = (42310,03 + 9308,2 + 83,4 + 8,34 + 5171) \times 0,2 = 11376,2 \text{ грн.} \quad (5.5)$$

5.11. Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

В таблиці 5.4 наведено планову калькуляцію вартості проведення досліджень з урахуванням всіх елементів витрат.

Таблиця 5.4 – Плановий кошторис витрат на виконання НДР

Назва статей	Умовне позначення	Сума, грн.	Обґрунтування
Заробітна плата виконавців теми	ЗП	42310,03	За розрахунками
Єдиний соціальний внесок	В _с	9308,2	22 % від ЗП
Вартість основних матеріалів	В _м	91,74	За розрахунками
Вартість спецобладнання	В _{об}	–	Не планується
Витрати на послуги сторонніх організацій	В _{со}	–	Не планується
Інші прямі витрати	С _{інш}	5171	10 % від усіх
Накладні витрати	Н _в	11376,2	20 % від усіх витрат
Всього		68257,17	

5.12 Науково-технічна ефективність НДР

У даній роботі проводяться дослідження, які мають пошуковий та теоретичний характер. Прямий розрахунок очікуваного річного економічного ефекту є надзвичайно складним через відсутність повних даних щодо сфери використання результатів роботи та вихідних даних для розрахунку витрат. У такому випадку, для оцінки економічної ефективності використовується бальна система з оцінювання на основі наступних показників:

- а) важливість розробки;
- б) можливість використання результатів;

- в) теоретичне значення та рівень новизни дослідження;
- г) складність виконання теми.

Кожному з цих показників відповідає певний коефіцієнт (К1, К2, К3, К4).

Система оцінки для кожного показника включає такі значення:

Коефіцієнт К1:

- а) ініціативна робота - 1 бал;
- б) робота здійснюється за угодою про науково-технічне співробітництво - 3 бали;
- в) робота є частиною відомчої програми - 5 балів;
- г) робота є частиною комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів - 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми - 8 балів.

Коефіцієнт К2:

- а) результати розробки використовуються тільки в даному підрозділі - 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані однією організацією - 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями - 5 балів;
- г) результати розробки можуть користуватися споживачами в межах однієї галузі - 8 балів;
- д) результати розробки можуть користуватися споживачами в різних галузях - 10 балів.

Коефіцієнт К3:

- а) робота представляє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації - 2 бали;
- б) робота доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів новою інформацією - 3 бали;
- в) робота частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів новою інформацією - 5 балів;

г) робота впроваджує нові теорії, методики або інші подібні знання - 6 балів;

д) робота відкриває принципово нові уявлення, які раніше були невідомі - 8 балів.

Коефіцієнт К4:

а) робота виконується одним підрозділом з витратами до 10 000 гривень - 1 бал;

б) робота виконується одним підрозділом з витратами від 10 000 до 50 000 гривень - 3 бали;

в) робота виконується одним підрозділом з витратами від 50 000 до 100 000 гривень - 5 балів;

г) робота виконується багатьма підрозділами з витратами від 100 000 до 200 000 гривень - 7 балів;

д) робота виконується багатьма організаціями з витратами більше 200 000 гривень - 9 балів

Згідно з таблицею 4.5, Бальна оцінка економічної ефективності (Б) даної науково-дослідної роботи складає 240, що впливає з розрахунку

$$B = 1 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 5 = 240. \quad (5.6)$$

Умовний річний економічний ефект науково-дослідної роботи визначається за формулою (4.7):

$$E_{НДР} = 500 \cdot Б - E_{Н} \cdot В_{НДР}, \quad (5.7)$$

Де 500 є умовною вартістю одного балу (грн).

$E_{Н}$ представляє нормативний коефіцієнт економічної ефективності (значення 0,1–0,5, для цього розрахунку вибрано $E_{Н} = 0,25$), а $В_{НДР}$ є витратами на виконання науково-дослідної роботи (планова річна кошторисна вартість виконання НДР).

У нашому розрахунку $В_{НДР}$ дорівнює 68257,17 грн.

Таблиця 5.5 – 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	10
Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методи чи що-небудь подібне	6
Складність проведення дослідження	K_4	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50000 до 100000 гривень.	3

Таким чином, умовний економічний ефект ($E_{\text{НДР}}$) становить:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 240 - 0,25 \cdot 68257,17 = 102935,7 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

Коефіцієнт економічної ефективності ($K_{\text{НДР}}$):

$$K_{\text{НДР}} = 102935,7 / 68257,17 = 1,508 \quad (5.9)$$

Розрахований коефіцієнт економічної ефективності НДР (КНДР = 1,508) підтверджує раціональність проведення даної роботи.

5.13. Висновки до розділу

Після проведення економічного аналізу виявлено, що проведення даного науково-дослідного проекту є економічно виправданим. Розрахована планова кошторисна вартість склала 68 257,17 грн.

ВИСНОВКИ

Таким чином, методом безтигельної зонної плавки вирошено спрямовано закристалізований евтектичний сплав системи $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$.

Дослідження мікроструктури отриманого композиту $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ показало, що вона представляє собою матрицю карбиду бору темного кольору спрямовано армовану високоентропійним диборидом світлого кольору. Інші фази на макроструктурі не виявлено.

Дослідження хімічного складу показали, що бор та вуглець знаходяться переважно в області матричної фази, що підтверджує, що матриця являє собою карбід бору. З іншого боку атоми Ti, Zr, Hf, Nb і Ta спостерігаються та рівномірно розподіляються в області армованих включень.

Рентгенофазовий аналіз показав, що отримані сплави складаються з 2 фаз: карбиду бору та високоентропійного дибориду $(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$.

Експериментальні дослідження показали, що рівень макропружень у композиті лежить в діапазоні 495.88 - 2779.58 МПа, причому, помітне деяке збільшення їх величини зі збільшенням швидкості вирощування. При цьому рівень мікропружень склав від 4,5 МПа при 1 мм/хв. до 702 МПа при 4 мм/хв.

Результати розрахунків по методу найменших квадратів показали, що рівень макропружень варіюється від 380 МПа при малих швидкостях вирощування до 760 МПа при підвищених швидкостях вирощування матеріалів, що задовільно співпадає з експериментальними даними, враховуючи властивості матеріалу та точність вимірювання.

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.

CONCLUSIONS

Thus, a directionally crystallized eutectic alloy of the $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ system was grown by the method of crucibleless zone melting.

The study of the microstructure of the obtained $B_4C-(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$ composite showed that it is a matrix of dark-colored boron carbide directionally reinforced with light-colored high-entropy diboride. No other phases were detected on the macrostructure.

Studies of the chemical composition showed that boron and carbon are mainly in the matrix phase, which confirms that the matrix is boron carbide. On the other hand, Ti, Zr, Hf, Nb and Ta atoms are observed and uniformly distributed in the region of reinforced inclusions.

X-ray phase analysis showed that the resulting alloys consist of 2 phases: boron carbide and high-entropy diboride $(Ti,Zr,Hf,Nb,Ta)B_2$.

Experimental studies have shown that the level of macrostresses in the composite is in the range of 495.88 - 2779.58 MPa, and a certain increase in their value is noticeable with an increase in the growth rate. At the same time, the level of microstresses was from 4.5 MPa at 1 mm/min. up to 702 MPa at 4 mm/min.

The results of calculations using the least squares method showed that the level of macrostress varies from 380 MPa at low growth rates to 760 MPa at increased material growth rates, which is in satisfactory agreement with experimental data, taking into account the material properties and measurement accuracy.

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 occurrence of threats during the study were also identified and substantiated.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Change in mistbelt mixed Podocarpus forest area between 1944 and 1996 in the Midmar catchment of KwaZulu-Natal, South Africa [Electronic resource] / N. A. Rivers-Moore [et al.] // South African Journal of Botany. – 2003. – Vol. 69, no. 2. – P. 148–150. – Mode of access : [https://doi.org/10.1016/s0254-6299\(15\)30337-9](https://doi.org/10.1016/s0254-6299(15)30337-9) . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023
2. Caputo M. V. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil [Electronic resource] : PhD dissertation / Caputo Mário Vicente. – [S. l.], 1984. – 583 p. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/35842332_Stratigraphy_tectonics_paleoclimatology_and_paleogeography_of_northern_basins_of_Brazil – Title from screen. date of access: 10.06.2023.
- 3 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 / Seth Iwan, Christopher Perreault, Yogesh K. Vohra // Materials - 2022. - Vol. 16, Issues 1. – P. 158 – Mode of access : <https://doi.org/10.3390/ma16010158> -Title from the screen. – Date of the review : 04.06.2023.
4. High-Entropy Borides under Extreme Environment of Pressures and Temperatures [Electronic resource] / Seth Iwan [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, no. 9. – P. 3239. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma15093239> – Title from screen. Date of access: 10.06.2023
5. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics [Electronic resource] / Joshua Gild [et al.] // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6, no. 1. – Mode of access: <https://doi.org/10.1038/srep37946> (date of access: 10.06.2023). – Title from screen.
6. Katoh Y. Silicon carbide and its composites for nuclear applications – Historical overview [Electronic resource] / Yutai Katoh, Lance L. Snead // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 526. – P. 151849. – Mode of access :

<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151849>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

7. B₄C-(Hf,Zr,Ta,Nb,Ti)B₂ composites prepared by reactive and non-reactive spark plasma sintering [Electronic resource] / Liang Xu Liang Xu a, Kun-Heng Huang a, Wei-Ming Guo [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.047> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

8. Caputo M. V. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil [Electronic resource] : PhD dissertation / Caputo Mário Vicente. – [S. l.], 1984. – 583 p. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/35842332_Stratigraphy_tectonics_paleoclimatology_and_paleogeography_of_northern_basins_of_Brazil . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

9. . McCullough H. SCP Foundation Wiki, <https://scp-wiki.wikidot.com/> [Electronic resource] / Hayley McCullough // American Journalism. – 2022. – P. 1–3. – Mode of access: <https://doi.org/10.1080/08821127.2022.2064167> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

10. McCullough H. SCP Foundation Wiki, <https://scp-wiki.wikidot.com/> [Electronic resource] / Hayley McCullough // American Journalism. – 2022. – P. 1–3. – Mode of access: <https://doi.org/10.1080/08821127.2022.2064167> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

11. Hytowitz A. N. Review of using the Dyop optotype for acuity and refractions per the article: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1888429622000656> [Electronic resource] / Allan N. Hytowitz // Journal of Optometry. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.optom.2022.12.002> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

12 Atomic structure and vibrational properties of icosahedral α -boron and B₄C boron carbide [Электронный ресурс] / N. Vast [та ін.] // Computational Materials Science. – 2000. – Т. 17, № 2-4. – С. 127–132. – РЕЖИМ

доступу: [https://doi.org/10.1016/s0927-0256\(00\)00009-4](https://doi.org/10.1016/s0927-0256(00)00009-4) (дата звернення: 10.06.2023). – Назва з екрана. Date of access: 10.06.2023

13. Investigation of structural and electronic properties of boron carbide based on SCAN meta-GGA functional [Electronic resource] / Muhammad R. Ramadhan [et al.] // 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION SCIENTIFIC DEVELOPMENT (ICAISD) 2021: Innovating Scientific Learning for Deep Communication, Jakarta, Indonesia. – [S. l.], 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1063/5.0114223> – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

14. B.Basu. and other "Procedures and properties of materials-based monolithic TiB₂(2006)". Journal of Materials Reviews, Vol.51, p.352

15. . Andreeva A. F. Zirconium diboride low resistance layers [Electronic resource] / A. F. Andreeva, V. M. Statsenko, L. A. Klatchkov // European Workshop Materials for Advanced Metallization. MAM'97 Abstracts Booklet, Villard de Lans, France, 16–19 March 1997. – [S. l.], 1998. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/mam.1998.887583> – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

16. ZrB₂ – SiC ceramics: Residual stresses and mechanical properties [Electronic resource] / O. N. Grigoriev [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41, no. 9. – P. 4720–4727. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.02.053> (date of access: 10.06.2023). – Title from screen.

17. Venugopal S. Synthesis and processing of sub-micron hafnium diboride powders and carbon-fibre hafnium diboride composite [Electronic resource] : thesis / Venugopal Saranya. – [S. l.], 2013. – Mode of access: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/12532> (date of access: 10.06.2023). – Title from screen.

18. Effect of Fe and Cr Addition on the Sintering Behavior of ZrB₂ Produced by Self-Propagating High-Temperature Synthesis [Electronic resource] / Suman Kumari Mishra, Swapan Kumar Das, Ajoy Kumar Ray [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. – 2004. – Vol. 85, no. 11. – P. 2846–2848. – Mode of access :

<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00540.x>. – Title from screen. – Date of access : 19.05.2023.

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

20. Zhao W. J. Structural, mechanical, and electronic properties of , TaB, , and IrB: First-principle calculations [Electronic resource] / Wen Jie Zhao, Yuan Xu Wang // Journal of Solid State Chemistry. – 2009. – Vol. 182, no. 10. – P. 2880–2886. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2009.07.054>. – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

21. Zhang X. Synthesis, densification, and mechanical properties of TaB₂ [Electronic resource] / Xiaohong Zhang, Gregory E. Hilmas, William G. Fahrenholtz // Materials Letters. – 2008. – Vol. 62, no. 27. – P. 4251–4253. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.06.052>. – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

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

23. 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. – Назва з екрану. – Дата перегляду : 2.06.2023.

24. B4C-(Hf,Zr,Ta,Nb,Ti)B₂ composites prepared by reactive and non-reactive spark plasma sintering [Electronic resource] / Liang Xu [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.047> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

25. B4C-(Hf,Zr,Ta,Nb,Ti)B2 composites prepared by reactive and non-reactive spark plasma sintering [Electronic resource] / Liang Xu [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.047> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

26. B4C-(Hf,Zr,Ta,Nb,Ti)B2 composites prepared by reactive and non-reactive spark plasma sintering [Electronic resource] / Liang Xu [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.047> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

27. Caputo M. V. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil [Electronic resource] : PhD dissertation / Caputo Mário Vicente. – [S. l.], 1984. – 583 p. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/35842332_Stratigraphy_tectonics_paleoclimatology_and_paleogeography_of_northern_basins_of_Brazil . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

28. B4C-(Hf,Zr,Ta,Nb,Ti)B2 composites prepared by reactive and non-reactive spark plasma sintering [Electronic resource] / Liang Xu [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.047> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

29. Абдуллаєва Е. Р. Структура та властивості спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів на основі карбиду бору [Текст] : магiст. дис. ... магістра : спец. 05.16.06 “Порошкова металургія та композиційні матеріали” /Е. Р. Абдуллаєва. – Київ, 2019. – 136 с

30. Fortsch A. R. The thermal conductivity of tellurium [Electronic resource] : thesis / Fortsch Arthur Roy. – [S. l.], 1916. – Mode of access: <https://ir.uiowa.edu/etd/3970> (date of access: 10.06.2023). – Title from screen.

31. B4C-(Hf,Zr,Ta,Nb,Ti)B2 composites prepared by reactive and non-reactive spark plasma sintering [Electronic resource] / Liang Xu [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.047> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

32. B4C-(Hf,Zr,Ta,Nb,Ti)B2 composites prepared by reactive and non-reactive spark plasma sintering [Electronic resource] / Liang Xu [et al.] // Ceramics International. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.047> . – Title from screen. Date of access: 10.06.2023

33. JoshuaGild. High-Entropy Metal Diborides: A New Class of High-Entropy Materials and a New Type of Ultrahigh Temperature Ceramics / JoshuaGild, YuanyaoZhang, Tyler Harrington etc. // Scientific reports. – 2016. – Vol. 6, no. 1. – P. 37946 - 37946.

35. 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.

36. 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.

37. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны [Текст] : ГОСТ 12.1.005-88. – [Введены с 1989-01-01] – Москва : ИПК издательство стандартов, – 2008. – 38 с.

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

39. 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.

40. Правила улаштування електроустановок [Текст] : ПУЕ-2017. – [Чинний від 2017-07-21] – Київ : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

41. 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.

42.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.

43.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.

44.Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація [Текст] : ДСТУ 7239:2011. – [Чинний від 2011-08-01] – Київ : Національний стандарт України, 2011. – 11 с.

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