

**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

«__» _____ 2025 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Отримання композитів системи В₄С-Si методом 3D друку»**

Виконав:

студент ІV курсу, групи ФН-11

Процюк Гліб Борисович _____

Керівник:

асистент, PhD

Втерковський Михайло Ярославович _____

Консультант з економічно-організаційного розділу:

доцент, к.е.н., доцент

Нараєвський Сергій Вікторович _____

Консультант з охорони праці:

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

Левченко Олег Григорович _____

Нормоконтроль:

доцент, к. т. н., доцент,

Бірюкович Ліна Олегівна _____

Рецензент:

асистент, PhD

Смірнова Яна Олександрівна _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій БОГОМОЛ

« ___ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Процюк Гліб Борисович

1. Тема роботи «Отримання композитів системи B_4C-Si методом 3D друку», керівник роботи Втерковський Михайло Ярославович, асистент каф. ВТМ та ПМ, PhD, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1733-с.
2. Термін подання студентом роботи: 09.06.2025
3. Вихідні дані до роботи: Карбід бору (B_4C) є одним із найтвердіших матеріалів, що поступається лише алмазу та кубічному нітриду бору. Його унікальні властивості, такі як висока твердість, зносостійкість, низька густина ($2,52 \text{ г/см}^3$), хімічна стійкість і здатність поглинати нейтрони, зумовлюють широке застосування у бронезахисті (бронепластини), ядерній енергетиці (поглиначі нейтронів), аерокосмічній промисловості (зносостійкі компоненти)

та обробці матеріалів (абразивні інструменти, сопла). Вироби з карбіду бору традиційно виготовляються методами порошкової металургії, такими як гаряче пресування, спікання без тиску або ізостатичне гаряче пресування (HIP). Процес включає підготовку порошку B_4C , формування заготовки та її ущільнення при високих температурах (зазвичай 2000–2200 °C) і тиску. Для покращення спікання часто додають зв'язуючі матеріали, такі як кремній (Si), який сприяє формуванню щільної структури композиту B_4C -Si.

Основною проблемою при виготовленні виробів складної форми методами порошкової металургії є нерівномірний розподіл щільності в об'ємі заготовки. Під час пресування та спікання порошок ущільнюється неоднорідно, особливо в зонах зі складною геометрією, що призводить до появи градієнтів щільності. Це негативно впливає на механічні властивості виробів, зокрема на їх міцність, твердість і тріщиностійкість. Крім того, нерівномірна щільність може спричинити появу внутрішніх напружень і мікротріщин, що знижує надійність і довговічність готових виробів. Обмеження традиційних методів ускладнюють створення деталей зі складною конфігурацією, які потрібні для сучасних застосувань, таких як легкі бронепанелі або складні елементи ядерних реакторів.

Це робить актуальним дослідження нових технологій, таких як адитивні технології, зокрема 3D-друк, які дозволяють створювати складні форми з високою точністю та контролем структури. Поєднання унікальних властивостей B_4C із можливостями 3D-друку відкриває перспективи для створення високоефективних композитів B_4C -Si, що можуть відповідати сучасним вимогам до функціональних матеріалів у високотехнологічних галузях.

4. Зміст роботи: а) Провести літературно-патентний пошук за темою дослідження. Вибір та обґрунтування методу отримання виробів з карбіду бору методами адитивних технологій. Характеристика вихідних матеріалів. Отримання пористих зразків з карбіду бору методом SLS з наступним просоченням кремнієм для отримання щільної структури зразків. Аналіз зміни

щільності, мікроструктури та механічних властивостей зразків в залежності від технологічних параметрів SLS (потужності лазера та зміни швидкості сканування лазера). Вибір оптимального технологічного режиму. Провести обговорення результатів та зробити відповідні висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація повинна містити матеріал, який характеризує в стислій формі ключові результати досліджень. Тобто: а) титульний лист; б) актуальність; в) мета та завдання; г) характеристика вихідних матеріалів; д) Технологічна схема проведення дослідження; е) дані зміни щільності зразків; є) дані щодо досліджень мікроструктури та механічних властивостей; ж) дані щодо охорони праці та економічної складової дослідження.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічний	Нараєвський С.В. доцент		
Охорона праці	Левченко О. Г завідувач кафедри		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних джерел з теми дипломної роботи.		
2.	Дослідження зміни щільності отриманих зразків в залежності від параметрів 3D друку.		
3.	Дослідження мікроструктури отриманих зразків методами електронної мікроскопії.		
4.	Дослідження механічних характеристик отриманих зразків.		
5.	Аналіз та систематизація отриманих експериментальних даних.		
6.	Написання економічного розділу та розділу охорони праці.		
7.	Оформлення дипломної роботи.		
8.	Підготовка презентації.		
9.	Захист дипломної роботи.		

Студент

Гліб ПРОЦЮК

Керівник

Михайло ВТЕРКОВСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Робота вміщує: 85 с., 13 рис., 6 табл., 42 джерел.

КАРБІД БОРУ, КРЕМНІЙ, КОМПОЗИТИ B_4C-Si , СЕЛЕКТИВНЕ ЛАЗЕРНЕ ПЛАВЛЕННЯ, 3D-ДРУК

У роботі наведено огляд сучасних підходів до отримання та дослідження керамічних композитів на основі карбїду бору (B_4C) з додаванням кремнію (Si) методами селективного лазерного плавлення (SLM) та спікання (SLS).

Об'єктом дослідження є керамічні композити системи B_4C-Si .

Метою роботи є дослідити вплив параметрів 3D-друку на мікроструктуру та властивості композитів B_4C-Si .

Методи дослідження:

- скануюча електронна мікроскопія (SEM);
- вимірювання мікротвердості (HV);
- аналіз пористості та щільності.

В межах роботи були отримані кубічні зразки розмірами $1 \times 1 \times 1$ см з різним співвідношенням компонентів B_4C та Si (14 зразків), надруковані з використанням змінних режимів потужності та швидкості лазера. Проведено аналіз впливу зазначених параметрів на фазовий склад, структуру, щільність та механічні характеристики композитів.

Згідно з результатами, зміна параметрів 3D-друку (потужність та швидкість лазерного променя) впливає на формування у композитах системи B_4C-Si . Оптимальні режими сприяють утворенню щільної, однорідної структури з покращеною міжфазною адгезією та зниженим рівнем пористості. Спостерігається підвищення щільності, зменшення мікротріщин та дефектів, що підвищує загальну структурну цілісність матеріалу. Водночас перевищення цього вмісту або надмірне теплове навантаження призводить до формування надлишкових крихких фаз та локальних структурних напружень.

Результати демонструють перспективність застосування методу SLM для виготовлення конструкційної кераміки на основі карбиду бору з кремнієм для екстремальних умов експлуатації.

ABSTRACT

The work contains: 85 p., 13 fig., 6 tab., 42 sources.

BORON CARBIDE, SILICON, B₄C–Si COMPOSITES, SELECTIVE LASER MELTING, 3D PRINTING

This work presents an overview of modern approaches to the fabrication and investigation of ceramic composites based on boron carbide (B₄C) with the addition of silicon (Si), using selective laser melting (SLM) and selective laser sintering (SLS) methods.

The object of the study is ceramic composites of the B₄C–Si system. The aim of the work is to investigate the influence of 3D printing parameters on the microstructure and properties of B₄C–Si composites.

Research methods:

- scanning electron microscopy (SEM);
- microhardness measurement (HV);
- porosity and density analysis.

As part of the study, cubic samples measuring 1×1×1 cm with different B₄C-to-Si ratios (14 samples) were fabricated using variable laser power and scanning speed. The influence of these parameters on the phase composition, structure, density, and mechanical characteristics of the composites was analyzed.

According to the results, variation in 3D printing parameters (laser power and scanning speed) affects the phase formation in B₄C–Si composites. Optimal regimes promote the formation of a dense and homogeneous structure with improved interfacial adhesion and reduced porosity. Increased density, fewer microcracks, and fewer defects were observed, leading to enhanced structural integrity of the material. However, exceeding the optimal silicon content or applying excessive thermal energy can result in the formation of excess brittle phases and local structural stresses.

The findings highlight the potential of the SLM method for the fabrication of structural ceramics based on boron carbide with silicon, suitable for operation under extreme conditions.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	14
1.1 Загальна характеристика карбїду бору (B_4C) та його композитів....	14
1.2 Властивості B_4C-Si композитів: механічні, термічні та хімічні.....	16
1.3 Методи отримання композитів на основі B_4C	19
1.4 Технологія 3D-друку (SLS/SLM) для тугоплавких композитів.....	22
1.5 Вплив кремнію на структуру і властивості карбїдів.....	26
1.6 Застосування B_4C-Si композитів у промисловості.....	29
1.7 Висновки та постановка завдань дослідження.....	32
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	34
2.1 Методика проведення експерименту.....	34
2.2 Вихідні порошкові матеріали.....	34
2.3 Виготовлення композитів методом 3Д друка	35
2.4 Дослідження мікроструктури композитів	38
2.5 Визначення мікротвердості та пористості.....	39
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	40
3.1 Вплив технологічних параметрів 3Д друку на щільність отриманих композитів.....	40
3.2 Мікроструктурні особливості композитів B_4C-Si залежно від параметрів друку.....	41
3.3 Вплив режимів 3D-друку на механічні властивості.....	45
4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	47
4.1. Характеристика об'єкта дослідження та аналіз потенційно небезпечних факторів.....	47
4.2. Оцінка ключових небезпечних та шкідливих факторів, розробка заходів з охорони праці.....	50
4.2.1. Фізичні небезпеки (вібрація, шум, температура, випромінення).....	51
4.2.2. Хімічні небезпеки (робота з порошками).....	52

	11
4.2.3. Електробезпека.....	53
4.2.4. Пожежна безпека.....	54
4.2.5. Засоби індивідуального захисту.....	56
4.3. Висновки до розділу.....	58
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	59
5.1. Науково-технічна актуальність НДР.....	59
5.2. Розрахунок витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	60
5.2.1. Витрати на оплату праці.....	62
5.2.2. Єдиний соціальний внесок.....	63
5.2.3. Витрати на матеріали.....	64
5.2.4. Витрати на використання обладнання.....	66
5.2.5. Витрати на зовнішні послуги.....	66
5.2.6. Витрати на службові відрядження.....	66
5.2.7. Інші прямі витрати.....	67
5.2.8. Накладні витрати.....	68
5.2.9. Загальна калькуляція кошторисної вартості.....	69
5.3. Очікувана науково-технічна та економічна ефективність.....	70
5.4. Висновки до розділу.....	74
ВИСНОВКИ.....	75
CONCLUSIONS.....	77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	79

ВСТУП

У сучасному матеріалознавстві спостерігається стійка тенденція до впровадження новітніх технологій для створення матеріалів з унікальними властивостями, що задовольняють вимоги до термо- та зносостійкості в екстремальних умовах експлуатації. Одним із таких перспективних матеріалів є карбід бору (B_4C) – надтвердий керамічний матеріал, який поєднує надзвичайно низьку густину, високу твердість, хімічну стійкість та термостійкість. Проте його висока крихкість та складність у формуванні традиційними методами значно обмежують застосування B_4C у виготовленні складних деталей [1].

В останнє десятиліття активного розвитку набули адитивні технології, зокрема селективне лазерне спікання (SLS) та селективне лазерне плавлення (SLM), які відкривають нові можливості для формування виробів складної геометрії з тугоплавких та керамічних матеріалів. Проте пряме формування з чистого B_4C залишається викликом через його погане лазерне поглинання та тенденцію до утворення тріщин при швидкому охолодженні. Одним із ефективних підходів до вирішення цієї проблеми є використання кремнію (Si) як добавки або інфільтруючої фази, що дозволяє покращити спікання, зменшити пористість та підвищити характеристики міцності виробу [2].

Таким чином, актуальність теми полягає в розробці оптимальної технології отримання композитів системи B_4C-Si за допомогою методів 3D-друку, яка дозволить поєднати високу твердість карбіду бору з оброблюваністю та технологічністю, що забезпечує кремній [3].

Метою даної роботи є дослідження можливостей отримання композитів системи B_4C-Si методом адитивного формування, аналіз структурних та фізико-механічних характеристик отриманих зразків залежно від технологічних параметрів друку, складу та подальшої обробки .

Для досягнення мети в роботі ставляться такі основні завдання:

- проаналізувати сучасні підходи до адитивного формування керамічних композитів;
- визначити оптимальні умови приготування сумішей на основі B_4C і Si ;
- виготовити зразки методом SLS/SLM та провести їх структурно-фазовий аналіз;
- оцінити вплив параметрів технології на властивості композитів;
- обґрунтувати доцільність використання B_4C - Si матеріалів у високотемпературному машинобудуванні або оборонній галузі [3].

Практична цінність дослідження полягає у створенні технологічного підходу до формування високоміцних виробів складної форми з керамічних матеріалів, що поєднує переваги B_4C і можливості 3D-друку.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Загальна характеристика карбіду бору (B_4C) та його композитів

Карбід бору (B_4C) є одним із найтвердіших відомих матеріалів, поступаючись у цьому показнику лише алмазу та кубічному нітриду бору. Його унікальні фізико-механічні властивості зумовлюють високий інтерес до B_4C у сфері сучасного машинобудування, авіації, оборонної промисловості, атомної енергетики, а також для виготовлення надтвердих і зносостійких деталей [1].

B_4C – кераміка, яка має надзвичайно низьку густину ($\sim 2,52$ г/см³) при високій твердості (30–40 ГПа) та високій температурі плавлення (~ 2450 °C). Він характеризується хімічною інертністю до багатьох агресивних середовищ, термостійкістю, а також високою здатністю до поглинання нейтронів, що робить його ефективним у якості захисного матеріалу в ядерних реакторах [2].

З кристалографічної точки зору, B_4C має складну ромбоєдричну структуру (просторова група $R-3m$) з квазіперіодичною побудовою, що включає ікосаєдричні кластери B_{12} , з'єднані лінійними атомами C–B–C. Структуру карбіду бора зображено на рисунку 1.1.

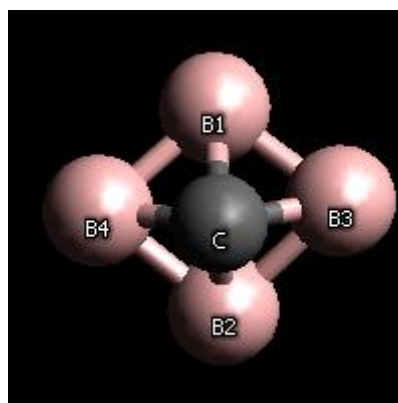


Рисунок 1.1 – Структура карбіду бора [2]

Саме така структура забезпечує комбінацію високої твердості й низької густини. Проте B_4C вважається крихким матеріалом, особливо при кімнатних

температурах, що значно ускладнює його обробку і обмежує використання без модифікації [4].

Синтез карбіду бору здійснюється здебільш за температур вище 2000 °С реакцією бору або оксиду бору з вуглецем. Основними промисловими методами є: реакційне спікання, карботермічне відновлення та хімічне осадження з газової фази. У порошковій формі B_4C застосовується для виготовлення абразивів, захисних покриттів, елементів броні, а також в адитивному виробництві [5].

З огляду на обмеження чистого B_4C – зокрема, труднощі з досягненням повної спікання без значного росту зерна, схильність до утворення пор та тріщин – широкого поширення набули композити на його основі. Найчастіше композити створюють із додаванням кремнію (Si), кремнійвмісних речовин або металів (Ti, Al, Ni). Важливим типом є B_4C –Si-композити, які поєднують твердість і термічну стабільність B_4C із здатністю кремнію поліпшувати змочуваність і щільність структури при спіканні [5].

У системі B_4C –Si утворюється реакційний фазовий компонент SiC, який покращує міцнісні властивості композиту. Такий композит має вищу тріщиностійкість, краще поглинання ударної енергії та більшу надійність при термоцикуванні. Рівномірний розподіл фаз B_4C /SiC забезпечує композиційним матеріалам хорошу зносостійкість при збереженні відносно низької густини [6].

Відомо, що кремній може бути введений у структуру композиту шляхом інфільтрації розплавленого кремнію у пористу B_4C матрицю, яка була попередньо сформована або надрукована. Під час інфільтрації відбувається реакція Si з B_4C з утворенням карбіду кремнію, що ущільнює структуру і зменшує дефекти [7].

B_4C –Si композити показують високі показники твердості (до 25–30 ГПа), термостійкості (>1400 °С), низьку зносостійкість, а також стабільність у вакуумі й агресивних середовищах. Це робить їх придатними для бронювання

(наприклад, корпусів бойових машин), елементів термозахисту, форсунок, різучих інструментів і деталей, що працюють при високих температурах [7].

Застосування адитивних технологій у виробництві таких композитів дозволяє значно розширити геометричні та структурні можливості – створювати складні вироби з оптимізованою топологією, локальним варіюванням складу та мікроструктури. Крім того, методи селективного лазерного спікання (SLS) та селективного лазерного плавлення (SLM) дозволяють отримувати достатньо щільні та однорідні композити з контрольованою мікроструктурою без потреби у використанні зв'язуючих речовин [7].

Таким чином, карбід бору та композити на його основі – зокрема, система B_4C-Si – є одними з найбільш перспективних матеріалів для високотемпературних, зносостійких і ударостійких застосувань. Розробка ефективних підходів до їх формування методом 3D-друку відкриває нові горизонти у галузі конструкційної кераміки.

1.2 Властивості B_4C-Si композитів: механічні, термічні та хімічні

Композити на основі карбиду бору з кремнієм (B_4C-Si) становлять особливий інтерес серед сучасних керамічних матеріалів завдяки поєднанню низької густини, високої твердості, зносостійкості та стабільності при високих температурах. Введення кремнію до складу B_4C дозволяє суттєво покращити технологічність виготовлення виробів, забезпечити більш щільне спікання та досягти кращої структурної цілісності. Властивості композитів визначаються не лише самими компонентами, але й утворенням вторинних фаз, зокрема карбиду кремнію (SiC), а також їх мікроструктурною організацією [8].

Механічні властивості

Основною перевагою B_4C-Si композитів є поєднання високої твердості (вища за 25 ГПа) із кращою, порівняно з чистим B_4C , ударною в'язкістю. Уведення кремнію знижує внутрішні напруження в матеріалі та сприяє

зменшенню крихкості за рахунок утворення реакційного шару SiC, який має вищу тріщиностійкість. Завдяки цьому композити краще переносять локальні навантаження, що критично для бронювання, фрикційних деталей або інструментів.

Механічні властивості таких композитів залежать від:

- вмісту кремнію: при надмірній кількості надлишковий Si може знижувати твердість і жаростійкість;
- розподілу фаз: рівномірне розташування B_4C/SiC забезпечує баланс між жорсткістю і в'язкістю;
- мікроструктури: дрібнозерниста структура зменшує імовірність зародження та поширення тріщин;
- густини: чим нижча пористість, тим вища міцність.

Типові значення властивостей:

- твердість (HV): 25–30 ГПа (залежно від режиму обробки та мікроструктури);
- модуль Юнга: ~450–480 ГПа;
- міцність на згин: 300–450 МПа;
- тріщиностійкість: 3–5 МПа·м^{1/2}.

Порівняно з чистим B_4C , тріщиностійкість композиту зростає до 30–50%, що є суттєвим для забезпечення надійності в динамічно навантажених конструкціях [9].

Термічні властивості

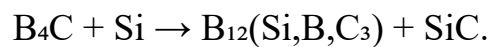
Композити B_4C-Si демонструють відмінну термостійкість, що дає змогу використовувати їх у високотемпературних умовах (вище 1500 °C). Завдяки високій температурі плавлення основних фаз (B_4C – 2450 °C, SiC – ~2730 °C) і термохімічній стабільності, матеріал зберігає цілісність та властивості в агресивних термічних середовищах.

Важливі термічні характеристики:

- температура експлуатації: до 1600–1800 °C (короткочасно);

- коефіцієнт теплопровідності: 30–120 Вт/(м·К), залежно від співвідношення фаз і щільності;
- коефіцієнт лінійного термічного розширення: $4,5\text{--}5,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- термічна ударостійкість: вища, ніж у монофазних керамік, завдяки наявності реакційних проміжних фаз [10].

В композитах, отриманих із застосуванням розплаву кремнію, останній інфільтрує (просочує) пористу структуру B_4C , і при цьому відбувається реакція утворення SiC за схемою:



Ця реакція супроводжується ущільненням матеріалу, що знижує пористість і підвищує термостійкість [10].

Хімічна стійкість та поведінка в агресивних середовищах

Композити $\text{B}_4\text{C}\text{--Si}$ проявляють високу хімічну інертність щодо більшості кислот, розплавлених металів та газових середовищ. Як B_4C , так і SiC мають стабільну поверхню, не схильну до окислення при температурах до 1000–1100 °С. Зовнішній шар SiC за підвищених температурах утворює захисну оксидну плівку SiO_2 , яка слугує бар'єром для подальшого окислення.

Основні хімічні властивості:

- стійкість до кислот: не розчиняється в HCl , H_2SO_4 , HNO_3 ; руйнується в гарячій HF ;
- стійкість до основ: чутливий до розплавів NaOH , KOH за високих температурах;
- газостійкість: окислення починається >1100 °С; утворення SiO_2 стабілізує структуру;
- корозійна стійкість: зберігається навіть у високотемпературних потоках газів (N_2 , CO_2 , H_2).

Також важливою є стійкість до нейтронного опромінення, завдяки чому такі композити застосовують у ядерній енергетиці як захисні матеріали.

Високе поперечне перерізання поглинання нейтронів бору дозволяє поглинати теплові нейтрони й мінімізувати вторинне опромінення [10].

1.3 Методи отримання композитів на основі В₄С

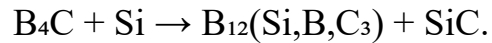
Отримання композитів на основі карбіду бору (В₄С) є складним завданням, що пов'язане з особливостями фізико-хімічної природи цього матеріалу. Висока температура плавлення (~2450 °С), крихкість, низька здатність до спікання без добавок, а також інертність поверхні обумовлюють потребу у спеціалізованих підходах до формування готових виробів. У зв'язку з цим, впродовж останніх десятиліть було розроблено кілька основних методів отримання композитів В₄С, серед яких традиційне спікання, реакційне інфільтраційне спікання, гаряче пресування, іскрове плазмове спікання та адитивні технології, такі як селективне лазерне плавлення (SLM) та селективне лазерне спікання (SLS) [11].

Традиційне твердофазне спікання. Цей метод передбачає змішування порошків В₄С з іншими компонентами (наприклад, Si, TiB₂, Al₂O₃), формування пористого тіла (наприклад, методом пресування) і його подальше спікання у вакуумі або інертній атмосфері при температурі 2000–2200 °С. Спікання В₄С без добавок є малоефективним через слабку дифузію атомів на границях зерен та обмежену здатність до ущільнення. У зв'язку з цим широко застосовуються рідкофазні або реакційно-індуковані методи, які передбачають введення легкоплавких або реакційноздатних домішок для полегшення процесу спікання.

Найчастіше в таких випадках додають кремній (Si) або металеві сплави, які при нагріванні вступають у реакцію з В₄С з утворенням вторинних фаз (зокрема SiC), що призводить до ущільнення структури та покращення зв'язку між зернами [12].

Реакційне інфільтраційне спікання (Reactive Melt Infiltration). Цей метод вважається одним із найбільш ефективних для виготовлення В₄С–Si

композитів. Він полягає у попередньому формуванні пористої матриці з B_4C (наприклад, шляхом пресування або 3D-друку), після чого у вакуумі або інертному середовищі проводять інфільтрацію розплавленим кремнієм (при ~ 1420 °C). У процесі інфільтрації кремній реагує з B_4C , утворюючи SiC:



Утворення SiC супроводжується ущільненням, зниженням пористості та покращенням механічних характеристик. Ключовими перевагами цього методу є:

- можливість виготовлення виробів складної форми;
- висока ступінь ущільнення (>98 % теоретичної щільності);
- формування структур з оптимізованою мікроструктурою.

Обмеженням є вимоги до контрольованого рівня пористості до інфільтрації та складність контролю поширення розплаву по всьому об'єму деталі [3].

Гаряче пресування та іскрове плазмове спікання. Гаряче пресування (Hot Pressing) — це комбінована технологія, що поєднує спікання з механічним стисканням під тиском (до 30–50 МПа) за високих температур (1900–2100 °C). Такий підхід дозволяє значно зменшити пористість і досягти високої щільності при збереженні порівняно дрібної зернистості [3].

Іскрове плазмове спікання (SPS) — більш сучасний і ефективний метод, при якому порошок ущільнюється за допомогою коротких імпульсних струмів високої напруги. Це забезпечує:

- швидке нагрівання (до 1000 °C/хв);
- короткий час спікання (хвилини замість годин);
- збереження наноструктурованої мікроструктури;
- кращий контроль над ростом зерен.

Однак обидва методи потребують складного обладнання та мають обмеження щодо розміру і форми зразків [4].

Адитивні технології (SLM/SLS). Останнім часом активно розвиваються методи селективного лазерного спікання (SLS) та селективного лазерного плавлення (SLM), які є основою 3D-друку порошкових матеріалів. Для В₄С ці методи мають низку переваг:

- можливість виготовлення виробів складної топології;
- точне керування мікроструктурою;
- локальна зміна властивостей;
- мінімізація обробки після формування.

Недоліками є:

- низька здатність чистого В₄С до поглинання лазерного випромінювання;
- ймовірність утворення тріщин через термічні напруження;
- потреба у модифікації складу або використанні попереднього зв'язуючого компонента.

Одним із підходів до вирішення цих проблем є використання композитних сумішей В₄С + Si. Під час лазерного нагрівання відбувається реакційне формування SiC, що забезпечує ущільнення і зміцнення структури. У подальшому зразки можуть інфільтруватися розплавом Si для підвищення щільності [7].

Інша стратегія – двоступеневий підхід: 1) друк В₄С за допомогою SLS або Binder Jetting; 2) постінфільтрація Si в печі. Цей підхід поєднує гнучкість 3D-друку і ефективність реакційного спікання.

Альтернативні методи

- шлікерне лиття – формування виробів з В₄С у вигляді суспензії;
- гібридне пресування з в'язучими компонентами;
- CVI/CVD-методи (інфільтрація або осадження парової фази).

Хоча ці методи менш поширені для масового виробництва, вони можуть бути актуальними у специфічних випадках – наприклад, при виготовленні тонких покриттів або деталей з пористою структурою [13].

Різноманітність методів отримання композитів на основі В₄С дає змогу адаптувати процеси під конкретні вимоги: від простих абразивних елементів до високоміцних структур для оборонної промисловості або авіакосмічного сектору. Вибір методу залежить від бажаної структури, механічних характеристик, геометрії виробу, вартості та наявного обладнання. На сьогодні особливо перспективними є методи, що поєднують 3D-друк з реакційною інфільтрацією кремнієм, які дозволяють отримувати складні вироби з В₄С–Si композитів із заданими властивостями [14].

1.4 Технологія 3D-друку (SLS/SLM) для тугоплавких композитів

У ХХІ столітті адитивні технології стали одним з головних рушіїв прогресу в матеріалознавстві, особливо у сфері виготовлення конструкційних матеріалів складної геометрії. Особливу зацікавленість викликає застосування адитивного виробництва для тугоплавких керамічних та композитних матеріалів, зокрема на основі карбиду бору (В₄С). Це відкриває нові шляхи до виготовлення теплозахисних елементів, броні, деталей для ядерної енергетики та аерокосмічної техніки [14].

Серед різноманітних технологій 3D-друку, селективне лазерне спікання (SLS) та селективне лазерне плавлення (SLM) найбільш адаптовані для порошкових керамічних систем. Обидві технології дозволяють створювати вироби із заданими характеристиками з інженерних тугоплавких матеріалів, до яких належить і В₄С.

Принципи SLS та SLM. SLS (Selective Laser Sintering) — це методика, що полягає у частковому спіканні порошкових частинок за рахунок локального нагрівання лазером. При цьому матеріал не досягає температури плавлення, а утворює зв'язки між частинками завдяки поверхневій дифузії. Після завершення друку деталь проходить постобробку: додаткове спікання, інфільтрацію або просочення зв'язуючими речовинами [7].

SLM (Selective Laser Melting) – методика, в якій порошок повністю розплавляється у зоні дії лазерного променя. Це дає змогу досягти вищої щільності (~99 % теоретичної), проте потребує точного контролю процесу, щоб уникнути деформацій, напружень і тріщиноутворення.

На рисунку 1.2 зображено відмінності SLM і SLS.

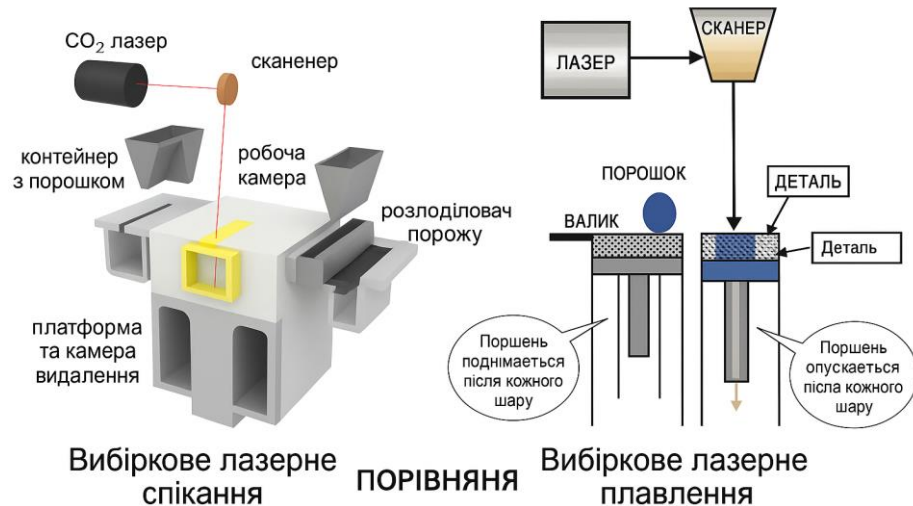


Рисунок 1.2 – відмінності вибіркового лазерного спікання і плавлення [15]

Основні етапи технологічного процесу:

- розподіл порошку тонким шаром по робочій платформі;
- локальне опромінення ділянок відповідно до цифрової CAD-моделі;
- опускання платформи на задану висоту шару;
- повторення кроків до завершення формування всієї деталі;
- охолодження та видалення не використаного порошку;
- постобробка (термічна, механічна, інфільтрація) [7].

Особливості роботи з тугоплавкими композитами. Тугоплавкі керамічні матеріали, як-от В₄С, НfС, ZrС або ТiВ₂, мають температури плавлення, що перевищують 2500 °С, низьку теплопровідність і високу крихкість. Це створює низку унікальних проблем для реалізації їх друку методами SLS/SLM [15]:

- недостатня енергія лазера: більшість лазерів не можуть ефективно розплавити чистий В₄С через його високу температуру плавлення;
- низька абсорбція лазерного випромінювання: В₄С має низьке поглинання у ближньому інфрачервоному діапазоні, що ускладнює прогрів;
- термічні напруження: унаслідок нерівномірного охолодження часто утворюються тріщини та деформації;
- висока пористість: при недостатньому плавленні порошку у SLS деталі виходять пористими й потребують ущільнення.

Для подолання цих труднощів застосовують кілька підходів:

- модифікація складу порошку: додавання кремнію, металів або полімерів для зниження температури обробки.
- оптимізація лазерних параметрів: контроль потужності, швидкості, розміру плями, перекриття треків;
- підігрів робочої камери: зменшення градієнтів температури;
- подальша термічна обробка: спікання або інфільтрація після друку.

Досвід друку матеріалів на основі В₄С. У численних дослідженнях, продемонстровано ефективність використання технологій 3D-друку для формування композитів В₄С–Si, де кремній виконує роль інфільтруючого та реакційного елемента.

Процес реалізується в кілька етапів:

- формування пористої структури В₄С методом SLS або Binder Jetting;
- інфільтрація розплавленим Si при температурі ~1420 °С;
- реакція між В₄С і Si з утворенням SiC та вторинного В₄С;
- ущільнення структури, зменшення пор та стабілізація мікроструктури.

У таких композитах спостерігається підвищення міцності, тріщиностійкості, а також збереження низької густини (~2.6 г/см³) при високій твердості (~25–30 ГПа) [7].

Комбіновані методи: друк + спікання + інфільтрація. Щоб досягти повної щільності та механічної стабільності, сучасні підходи передбачають поєднання адитивного формування із традиційними методами ущільнення. Така гібридна схема включає:

- Binder Jetting → формування пористої структури з V_4C ;
- дебіндеринг → видалення зв'язуючого;
- інфільтрація Si (просочення розплавом із реакційним формуванням SiC та вторинного V_4C).

Це дозволяє отримати V_4C -Si композити з високою однорідністю та точною геометрією.

Обладнання та технологічні режими. Типове обладнання для SLS/SLM включає:

- лазери потужністю 100–500 Вт (Yb-волоконні, Nd:YAG);
- атмосфера — інертна (аргон, азот) або вакуум;
- платформа з підігрівом до 200–600 °C;
- системи рекоутера для нанесення порошку.

Технологічні параметри, які впливають на якість виробів:

- потужність лазера (200–400 Вт);
- швидкість сканування (200–1000 мм/с);
- товщина шару (20–100 мкм);
- відсоток перекриття треків (30–60 %);
- температура камери (до 600 °C для зменшення термонапружень).

Перспективи розвитку. Адитивне виготовлення композитів на основі V_4C має ряд потенційних напрямів розвитку:

- формування багатофазних структур (V_4C -Si-SiC-TiB₂);
- топологічна оптимізація – створення пористих або градієнтних структур;
- інтеграція з нано- і мікропорошками для управління структурою;
- створення функціональних покриттів на основі V_4C ;
- автоматизація процесів інфільтрації після 3D-друку.

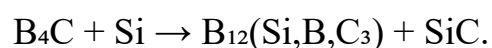
У довгостроковій перспективі поєднання SLS/SLM з термічно-індукованими хімічними реакціями (Reactive Additive Manufacturing) відкриває шлях до адаптивного проектування матеріалів з керованим фазовим складом і властивостями.

Таким чином, технології SLS/SLM є потужним інструментом для виготовлення тугоплавких композитів, особливо системи B_4C-Si . Незважаючи на складність реалізації через високу температуру плавлення та крихкість карбідів, завдяки інтеграції з методами інфільтрації та реакційного спікання вдається досягти високих показників щільності, міцності та точності. 3D-друк B_4C -композитів поступово переходить від лабораторного масштабу до промислового застосування, формуючи новий підхід до створення високотехнологічних деталей майбутнього [7].

1.5 Вплив кремнію на структуру і властивості карбідів

Кремній (Si) є одним із найважливіших модифікаторів, які застосовуються для поліпшення технологічних і експлуатаційних характеристик керамічних композитів, зокрема на основі карбіду бору (B_4C), карбіду кремнію (SiC), карбіду титану (TiC) тощо. Його роль у формуванні мікроструктури, фазового складу та властивостей матеріалів є багатогранною: від функції сполучного і інфільтруючого до активного компонента реакційного спікання [7].

Реакції кремнію з карбідами. При контакті з карбідами за підвищених температур (1300–1600 °C) кремній може вступати у реакції, що призводять до утворення нових фаз або покращення зв'язку між зернами. Найбільш вивченою є система B_4C-Si , де під час інфільтрації розплавом Si у пористу матрицю B_4C відбувається реакція:



У результаті формується новий композитний матеріал, що включає первинні зерна W_4C , новоутворений SiC та залишковий вільний кремній. Таке поєднання забезпечує високу щільність, покращену тріщиностійкість та оптимальне співвідношення твердості/в'язкості [16].

Аналогічні реакції можуть відбуватися в інших системах:



Зміна мікроструктури при введенні кремнію. Одна з найважливіших функцій кремнію — модифікація мікроструктури карбідів під час спікання або інфільтрації. У порівнянні з чистим W_4C , який має низьку дифузійну здатність, кремній сприяє утворенню щільної зв'язної структури [17]:

- підвищення щільності: Si розплавлений ефективно заповнює пори, забезпечуючи ущільнення до $>98\%$;
- формування реакційних меж зерен: утворення SiC покращує зв'язок між кристалами W_4C , зменшуючи ризик міжзернових тріщин;
- формування композитної мікроструктури: SiC утворюється як вторинна фаза, рівномірно розподілена між зернами W_4C , що забезпечує гомогенність.

Наявність кремнію дозволяє регулювати зернорозмірний склад: при високих температурах спікання без добавок W_4C схильний до надмірного росту зерен, що знижує механічні характеристики. Введення Si обмежує зерноріст і стабілізує структуру [17].

Вплив на механічні властивості. Вплив кремнію на механічні характеристики карбідних матеріалів є позитивним у більшості випадків, особливо коли йдеться про композити $\text{W}_4\text{C-Si}$ [17]:

- збільшення тріщиностійкості: за рахунок утворення гетерогенної мікроструктури з м'якими межами розділу (наприклад, $\text{B}_4\text{C}/\text{SiC}$), які поглинають енергію тріщин.

- зниження крихкості: утворення SiC у структурі зменшує ймовірність раптового руйнування;

- оптимальний баланс між твердістю і в'язкістю: хоча чистий B_4C є твердішим, введення Si призводить до менш крихкої, але більш міцної структури;

- зменшення мікропористості, що напряду призводить до зростання міцності на вигин та ударне навантаження.

За даними експериментальних досліджень, композити $\text{B}_4\text{C}-\text{Si}$ демонструють:

- твердість 25–30 ГПа,

- міцність на згин 400–600 МПа,

- тріщиностійкість $\sim 4\text{--}6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, що є вищими за відповідні

показники для чистого B_4C .

Термічна та хімічна стабільність

Вплив кремнію проявляється і в термічній поведінці карбідів:

- SiC має вищу температуру плавлення (~ 2730 °C) і кращу стійкість до термічних ударів, ніж B_4C .

- Окислення: в присутності кремнію утворюється захисна плівка SiO_2 , яка пасивує поверхню та знижує швидкість деградації при температурі >1100 °C.

- Хімічна інертність: SiC інертний до більшості кислот і лугів, що підвищує хімічну стійкість композиту в агресивних середовищах.

Таким чином, інтеграція кремнію як структурного модифікатора підвищує довговічність і термохімічну стабільність карбідних композитів [18].

Оптимальний вміст кремнію. Оптимальний вміст Si залежить від методу формування:

- при інфільтрації в пористу B_4C матрицю — 20–30 об.% Si ;

- у сумішах для SLS — 10–15 об.% Si, що забезпечує достатнє поглинання лазерної енергії і сприяє утворенню SiC;
- надлишок кремнію може знижувати твердість через утворення залишкового вільного Si.

У багатьох практичних дослідженнях встановлено, що баланс між Si та B₄C критичний: він впливає на фазовий склад, густину, здатність до спікання і кінцеві властивості композиту [19].

1.6 Застосування B₄C–Si композитів у промисловості

Композити на основі карбіду бору та кремнію (B₄C–Si) є високофункціональними матеріалами, що поєднують у собі надзвичайну твердість, низьку густину, термічну та хімічну стійкість, а також здатність ефективно працювати в агресивних або екстремальних умовах. У результаті численних досліджень та випробувань ці матеріали довели свою ефективність у широкому спектрі промислових застосувань — від військової техніки до високотемпературної енергетики та авіації. Зокрема, композити B₄C–Si є альтернативою традиційним металам та керамікам у ситуаціях, де необхідне поєднання механічної міцності, жаростійкості, легкості та довговічності [20].

Однією з головних сфер використання композитів на основі B₄C–Si є бронезахист. Завдяки поєднанню високої твердості (~30 ГПа) та наднизької густини (~2,6 г/см³), такі матеріали є ідеальними для виготовлення балістичних плит у складі бронезилетів, захисних панелей для бойових машин, вертольотів і спеціалізованих транспортних засобів. Застосування саме композитної системи дозволяє забезпечити не тільки ефективне зупинення куль чи уламків, а й підвищену тріщиностійкість і енергоємність структури. Додатковим фактором є термостійкість, що дозволяє матеріалу зберігати цілісність навіть під дією високотемпературного удару чи запального ефекту.

У ядерній та енергетичній промисловості композити B₄C–Si також демонструють себе як критично важливі матеріали. Завдяки високому перерізу

захоплення теплових нейтронів карбід бору традиційно використовується у системах контролю та захисту реакторів. У поєднанні з кремнієм, який виступає як фаза ущільнення та стабілізації структури, ці композити формують конструкції поглиначів, захисних панелей, екранів та контейнерів для поводження з радіоактивними речовинами. Їх хімічна інертність та здатність витримувати тривалий радіаційний вплив без деградації мікроструктури робить такі матеріали довговічними та безпечними для тривалого використання в активних зонах реакторів [21].

Особливо перспективним є використання B_4C-Si композитів у виробництві теплозахисних конструкцій для авіаційної та космічної техніки. В умовах надвисоких температур, які виникають при гіперзвуковому русі або входженні в атмосферу, необхідні матеріали, що не лише витримують навантаження, а й не змінюють геометрію чи властивості при багаторазовому термоциклуванні. Композити B_4C-Si демонструють стабільність при температурах понад $1500\text{ }^\circ\text{C}$, мають низький коефіцієнт теплового розширення та здатні утворювати на поверхні захисну плівку SiO_2 , яка перешкоджає окисленню. У результаті вони можуть бути використані для виготовлення теплозахисних елементів обшивки, сопел, дифузорів, ізолюючих плиток і опорних конструкцій космічних систем.

Не менш важливим є застосування таких композитів у загальному машинобудуванні та переробній промисловості. Завдяки поєднанню зносостійкості та хімічної стійкості, B_4C-Si використовується у вузлах тертя, форсунках для абразивних середовищ, насосних елементах, ущільненнях, гальмівних системах високого класу. У багатьох випадках вони перевершують традиційні матеріали як за експлуатаційним ресурсом, так і за стабільністю параметрів в агресивних середовищах – кислотах, лугах, високотемпературних газах. Наприклад, при плавленні кольорових металів такі композити не вступають у реакцію з розплавом, що значно подовжує термін служби робочого обладнання [22].

Окрему нішу застосування становлять галузі точного приладобудування, оптики та новітніх технологій. Карбід бору має високий модуль Юнга, низьку густину та добру стабільність розмірів, що дозволяє використовувати B_4C-Si композити для виготовлення деталей високоточної механіки, лазерних систем, оптичних опор, дзеркал і позиціонерів. Особливо ефективними вони є там, де важливо поєднати жорсткість і термічну стабільність у вакуумі або в умовах швидких змін температур.

Важливо зазначити, що впровадження адитивних технологій (особливо селективного лазерного спікання або плавлення) дає змогу виготовляти вироби з B_4C-Si складної просторової геометрії, внутрішніми каналами, пористими структурами або локальними зонами з різними характеристиками. Це відкриває нові можливості для функціональної інтеграції в конструкціях, де, наприклад, одна частина має виконувати опорну функцію, а інша – тепловідвід або абсорбцію механічної енергії. Такі рішення уже застосовуються в аерокосмічній, оборонній та ядерній промисловості у формі топологічно оптимізованих деталей [22].

Таким чином, композити системи B_4C-Si мають широке та зростаюче застосування в промисловості. Їх ефективність підтверджується багаторічною практикою використання в жорстких умовах, а потенціал продовжує зростати завдяки розвитку технологій їх формування, зокрема методів 3D-друку. З огляду на поєднання легкості, міцності, жаростійкості, хімічної інертності та здатності до складної обробки, ці композити можна впевнено віднести до матеріалів наступного покоління, які формуватимуть основу високотехнологічного машинобудування та оборонного виробництва в найближчі десятиліття.

1.7 Висновки та постановка завдань дослідження

На основі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що композити на основі карбіду бору з додаванням кремнію (B_4C-Si) є

перспективними матеріалами для використання в умовах високих температур, механічних навантажень та агресивних середовищ. Вони поєднують надвисоку твердість, низьку густину, хімічну інертність та підвищену тріщиностійкість у порівнянні з чистим карбідом бору. Введення кремнію сприяє поліпшенню спікання, зменшенню пористості, утворенню зміцнюючої фази SiC, що в цілому позитивно впливає на механічні властивості композиту.

Особливий інтерес становлять адитивні технології — зокрема селективне лазерне спікання (SLS) або плавлення (SLM), які дозволяють формувати складні за геометрією вироби з B_4C-Si системи. Водночас формування таких матеріалів є технологічно складним завданням через високу температуру плавлення B_4C , низьку абсорбцію лазерного випромінювання та схильність до утворення тріщин при швидкому охолодженні. Тому актуальним є вибір оптимальних технологічних параметрів SLS для отримання виробів з карбіду бору. Для цього потрібно виконати наступні завдання:

- провести аналіз сучасних методів отримання виробів з карбіду бору;
- обґрунтувати та обрати оптимальні технологічні параметри SLS;
- охарактеризувати вихідні матеріали, провести дослідження морфології порошків, хімічного та гранулометричного складу;
- отримати пористі зразки карбіду бору методом SLS
- дослідити вплив комбінацій потужності лазера і швидкості сканування на щільність та рівномірність формування зразків B_4C-Si ;
- провести просочення пористих зразків карбіду бору розплавом кремнію;
- дослідити мікроструктуру та механічні властивості отриманих зразків;
- провести обговорення результатів та зробити відповідні висновки.

З метою вивчення впливу технологічних параметрів 3D-друку на структуру і властивості композитів системи B_4C-Si було проведено експериментальні дослідження. Пористі зразки(кубики з розмірами $1 \times 1 \times 1$ см)

виготовлялися при фіксованому співвідношенні компонентів – 70% В₄С і 30% Si, а змінними параметрами виступали потужність лазера (20,25,30,35 Вт) і швидкість сканування (50, 100, 200, 300 мм/с). За кожною комбінацією параметрів визначалися лінійні розміри, маса, щільність, а також гідростатична маса і маса після парафінування, що дозволило оцінити рівень ущільнення, об'ємну усадку та загальну однорідність зразків.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Методика проведення експерименту

Метою експерименту було отримання композитного матеріалу системи B_4C-Si із заданими структурно-фазовими характеристиками шляхом використання адитивної технології селективного лазерного плавлення/спікання (SLM/SLS). Для цього було проведено підготовку порошкової сировини, її попередню обробку, формування порошкового шару та наступне лазерне сканування з подальшим вивченням отриманих зразків. Технологічна схема проведення експерименту зображена на рисунку 2.1

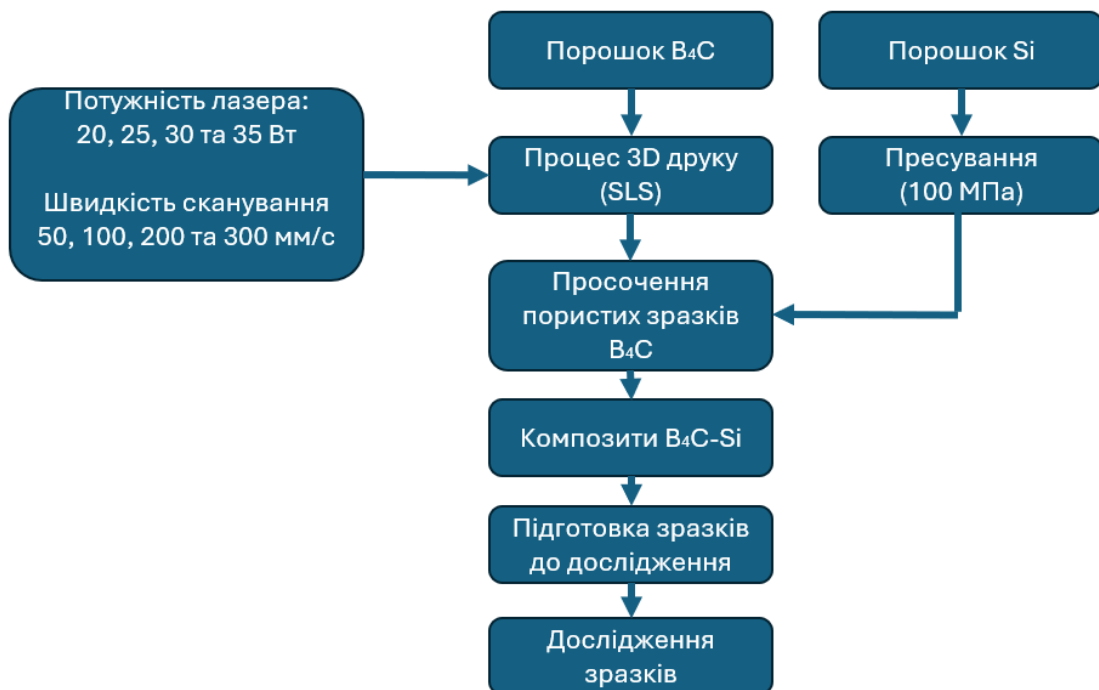
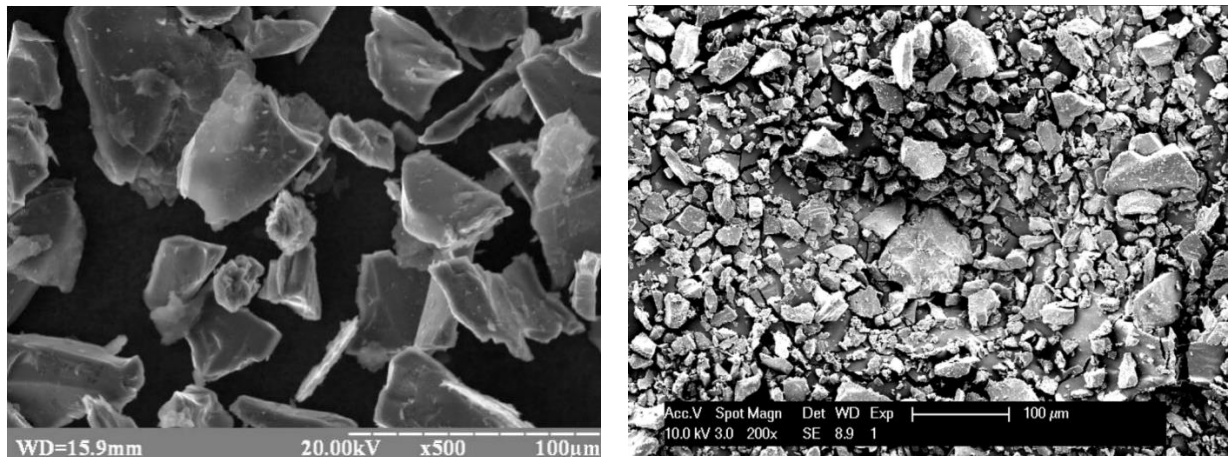


Рисунок 2.1 – Технологічний схема отримання композитів B_4C-Si

2.2 Вихідні порошкові матеріали

Для виготовлення композитів системи B_4C-Si у даній роботі використовувалися порошки карбиду бору (B_4C) та кремнію (Si). Основним

компонентом композиції є порошок карбиду бору (рис. 2.2 а), середній розмір зразків становив 50-150 мкм. Доповнення структури кремнієм (рис. 2.2 б), середній розмір 10-70 мкм, дозволяє активізувати формування нових фаз під час інфільтрації, а також позитивно впливає на спікання та щільність кінцевого матеріалу.



a

б

a – порошок B_4C , *б* – порошок Si

Рисунок 2.2 – Вихідні порошки B_4C та Si

2.3 Виготовлення композитів методом 3Д друку

Виготовлення зразків композиту B_4C –Si здійснювалося в 2 етапи: 3Д-друку на основі селективного лазерного спікання (SLS) з отриманням пористих каркасів B_4C та наступне просочення пористих зразків розплавом кремнію.

Селективне лазерне спікання відбувалося на установці Concept Laser GmbH, в атмосфері високочистого аргону. Як джерело нагріву порошку використовувався 100 Ватний волоконний лазер безперервної дії з довжиною 1064 нм. Сканування відбувалося способом нанесення безперервного зигзагоподібного візерунку з поворотом на 90° між шарами. Загальний вигляд пористих зразків після 3Д друку зображений на рисунку 2.3.

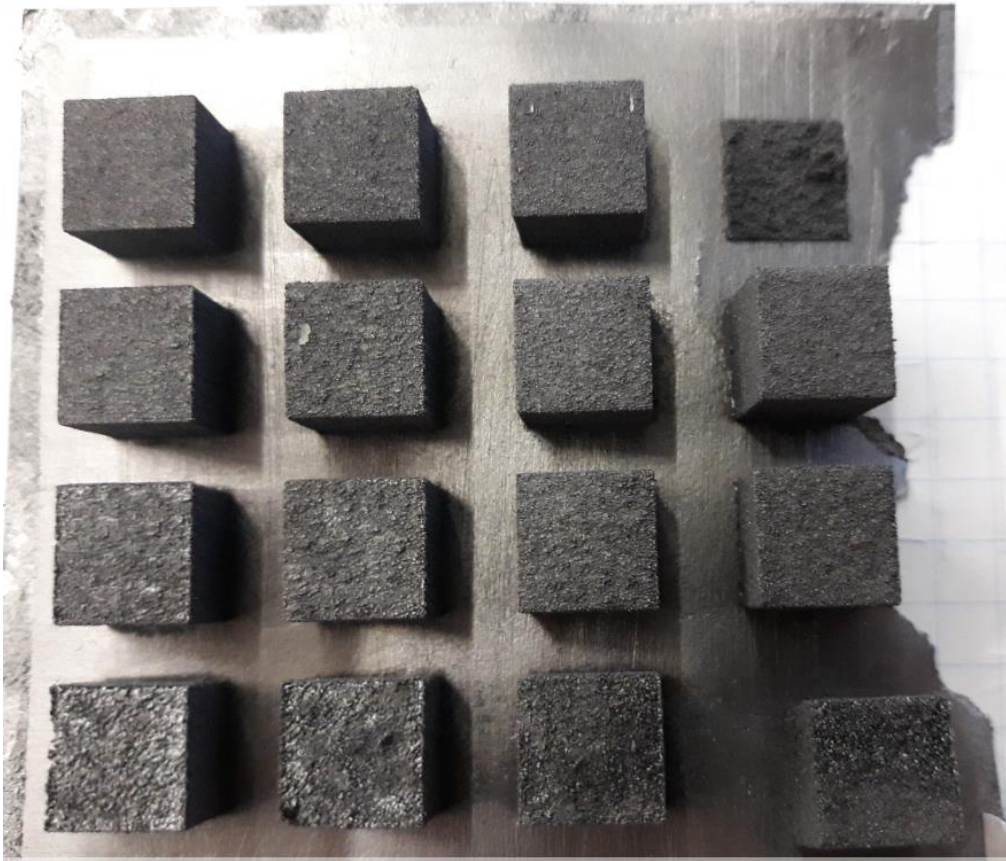


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд пористих зразків В₄С після SLS

Після вирівнювання першого шару порошку товщиною ~ 30 мкм на робочій платформі здійснювалося його лазерне сканування за допомогою волоконного лазера. Режими сканування змінювалися в межах заданих параметрів – лазерна потужність, швидкість переміщення променя, міжтрековий інтервал. Формування зразків відбувалося пошарово: після кожного сканування платформа опускалася на фіксовану висоту, наносився новий шар порошку, і процес повторювався.

В процесі друку використовувалося інертне газове середовище (аргон), що забезпечувало захист від окиснення і сприяло стабільності формування структури. Контроль температури плавлення та подачі матеріалу здійснювався через вбудовану систему моніторингу.

У процесі виготовлення було використано декілька режимів, що відрізнялися за швидкістю сканування (50, 100, 200 та 300 мм/с) та потужністю

лазера (20, 25, 30, 35 Вт), щоб визначити оптимальні умови формування зразків із мінімальною пористістю та без утворення тріщин.

Після завершення друку зразки залишалися на платформі до повного охолодження. Далі вони вилучалися для подальших досліджень структури та властивостей. Зразки після процесу 3 Д друку були пористими та достатньо крихкими. Зразок, надрукований з використанням параметрів 20 Вт та швидкістю сканування 300 мм/с зруйнувався після процесу друку.

Далі зразки просочувалися пресовками кремнію в вакуумній печі за температури 1500 °С за витримки 30 хв.

Після просочення зразки були оброблені на ручному шліфувально-полірувальному верстаті Grinder-Polisher Beta. Процес проводився за частоти обертання абразивного диска до 400 об/хв. Для шліфування послідовно застосовувалися абразивні папери з карбіду кремнію BuehlerMet із зернистістю P120, P320, P600 та P1200. Після завершення шліфування зразки піддавалися промиванню та очищенню ізопропіловим спиртом.

Щільність зразків визначалася з використанням методики Архімеда, відповідно до використання стандарту ASTM В 963-08. Результати вимірювання щільності зразків наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювання щільності композитів B_4C-Si

Швидкість сканування, мм/с	Потужність лазера, Вт			
	20	25	30	35
50	2,536	2,52	2,49	2,52
100	2,46	2,53	2,51	2,42
200	2,4	2,26	2,51	2,25
300		2,48	2,35	

2.4 Дослідження мікроструктури композитів

Дослідження мікроструктури виготовлених зразків проводилось з метою визначення однорідності розподілу фаз, наявності пор, тріщин, зон неповного спікання, а також виявлення вторинних структур, що могли утворитися внаслідок взаємодії компонентів під дією лазерного випромінювання.

Аналіз проводився за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM) на попередньо підготовлених шліфах.

Дослідження мікроструктури зразків проводилося з використанням сучасного скануючого електронного мікроскопа Axia ChemiSEM, розробленого компанією Thermo Scientific (рис. 2.4).

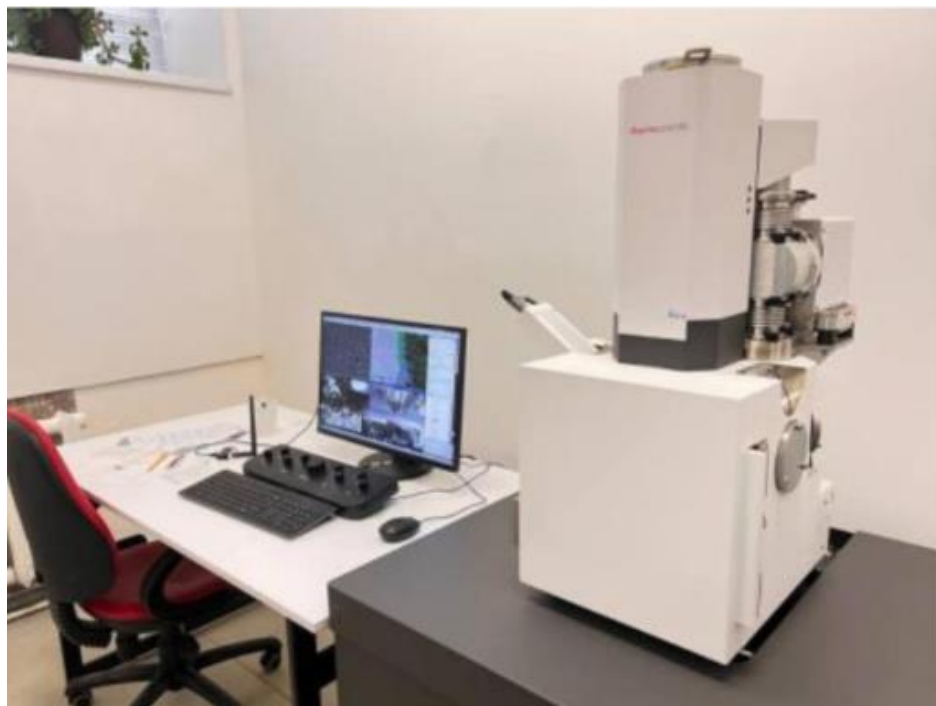


Рисунок 2.4 - Скануючий електронний мікроскоп Axia ChemiSEM, компанії Thermo Scientific

SEM-дослідження дозволило візуалізувати внутрішню мікроструктуру зразків, зокрема:

- розподіл частинок V_4C у матриці;

- утворення зон із вторинною фазою, імовірно β -SiC;
- наявність порожнин або мікротріщин, особливо по границях спікання;
- ступінь щільності структури при різних режимах друку.

2.5 Визначення мікротвердості та пористості

Визначення мікротвердості важливий етап аналізу фізико-механічних властивостей одержаних композитів, оскільки ці показники безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики матеріалу.

Мікротвердість

Вимірювання мікротвердості проводилось методом Віккерса за допомогою мікротвердоміра типу ПМТ-3 або його аналога. Навантаження на індентор становило 0,3 Н, час витримки під навантаженням — 15 секунд. Для кожного зразка виконували щонайменше десяти відбитків у різних зонах для отримання усередненого значення.

Мікротвердість розраховували за стандартною формулою:

$$HV = (1.8544 \times P) / d^2.$$

Мікротвердість за Віккерсом (HV) визначається як відношення навантаження на індентор (P), вираженого в ньютонах, до площі поверхні відбитку, яка розраховується за середнім діагональним розміром відбитку (d), виміряним у міліметрах.

Значення мікротвердості використовувались для оцінки впливу режимів лазерної обробки (швидкість сканування, потужність лазера) на структурну однорідність і ступінь ущільнення матеріалу. Найвищі значення мікротвердості були зафіксовані для зразків із мінімальним рівнем пористості та наявністю фаз типу β -SiC.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Вплив технологічних параметрів 3Д друку на щільність отриманих композитів

Зміна щільності композитів B_4C-Si в залежності від швидкості сканування та потужності лазера наведена на рисунку 3.1.

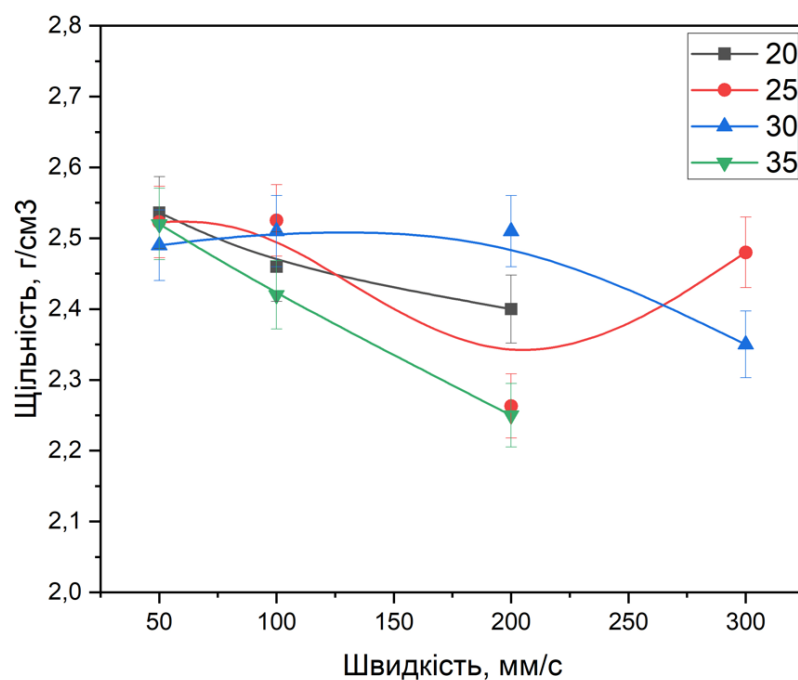


Рисунок 3.1 – Залежність щільності композитів B_4C-Si в залежності від технологічних параметрів 3Д друку

Щільність отриманих зразків змінюється в межах від $2,1 \text{ г/см}^3$ до $2,7 \text{ г/см}^3$ і демонструє нелінійну залежність від швидкості сканування лазера. Із зростанням швидкості від 50 мм/с до 300 мм/с щільність загалом зменшується, що вказує на вплив процесу спікання та просочення на структуру матеріалу.

При потужності 20 Вт (чорна крива) щільність знижується поступово з $2,5 \text{ г/см}^3$ до приблизно $2,3 \text{ г/см}^3$, що свідчить про недостатнє енергетичне введення для повного спікання при високих швидкостях.

При 25 Вт (червона крива) щільність починається на рівні $2,6 \text{ г/см}^3$, досягає піку ($\sim 2,7 \text{ г/см}^3$) при середніх швидкостях ($\sim 100 \text{ мм/с}$), а потім знижується до $2,4 \text{ г/см}^3$ при 300 мм/с , відображаючи оптимальне спікання на середніх швидкостях.

При 30 Вт (синя крива) щільність демонструє хвилясту поведінку з максимумом ($\sim 2,6 \text{ г/см}^3$) при $100\text{--}150 \text{ мм/с}$ і подальшим зниженням до $2,3 \text{ г/см}^3$, що може вказувати на перевищення енергії спікання та часткову деградацію структури.

При 35 Вт (зелена крива) щільність спочатку висока ($\sim 2,6 \text{ г/см}^3$ при 50 мм/с), але різко падає до $2,3 \text{ г/см}^3$ при 150 мм/с , а потім стабілізується, що може бути пов'язано з надмірним нагріванням і пошкодженням матеріалу.

Така зміна тенденції щільності також може пов'язана з тим, що під час просочення розплавленим кремнієм у структурі зразків утворюються вторинні фази: карбід бору (B_4C), карбід кремнію (SiC) і незначна кількість залишкового кремнію. Формування SiC , який має вищу щільність ($3,21 \text{ г/см}^3$) порівняно з B_4C ($2,52 \text{ г/см}^3$), може збільшувати загальну щільність у зонах з ефективним просоченням. В той час, як наявність залишкового кремнію (густина $2,33 \text{ г/см}^3$) у незначних кількостях може дещо знижувати щільність, особливо якщо просочення нерівномірне. З іншого боку, нерівномірність розподілу фаз через різницю в швидкості сканування та потужності лазера призводить до коливань щільності, особливо при високих швидкостях, де просочення може бути неповним.

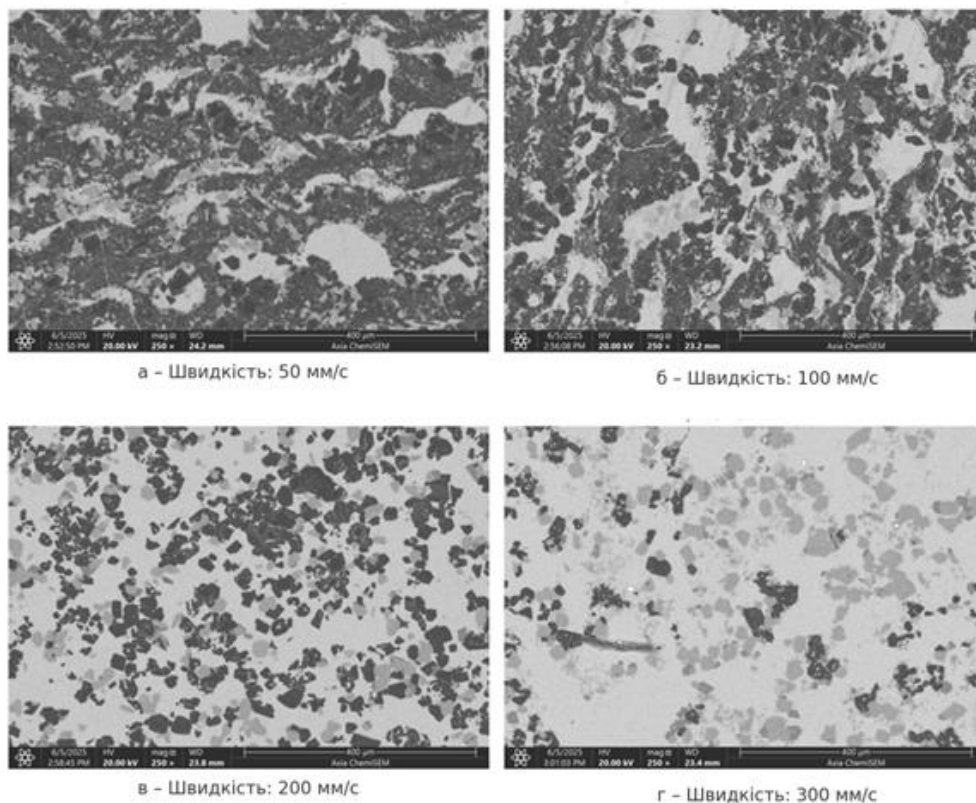
3.2 Мікроструктурні особливості композитів $\text{B}_4\text{C}\text{--Si}$ залежно від параметрів друку

Особливу увагу було приділено аналізу впливу швидкості сканування та лазерної потужності на якість з'єднання частинок, глибину плавлення та межі між шарами. При вищих швидкостях спостерігалось часткове

непроварювання, а при надмірній потужності – ризик утворення пор через локальне перегрівання матеріалу.

Для дослідження впливу параметрів селективного лазерного спікання (SLS) на формування структури композиту B_4C-Si було виготовлено зразки при постійній лазерній потужності 25 Вт та змінній швидкості сканування: 50, 100, 200 та 300 мм/с. Аналіз мікроструктури проводився за допомогою електронної мікроскопії при двох рівнях збільшення.

На знімках при малому збільшенні (рис. 3.2) спостерігається тенденція до зменшення щільності структури зі збільшенням швидкості сканування.



а – швидкість сканування 50мм/с, б – швидкість сканування 100мм/с,
в – швидкість сканування 200мм/с, г – швидкість сканування 300мм/с

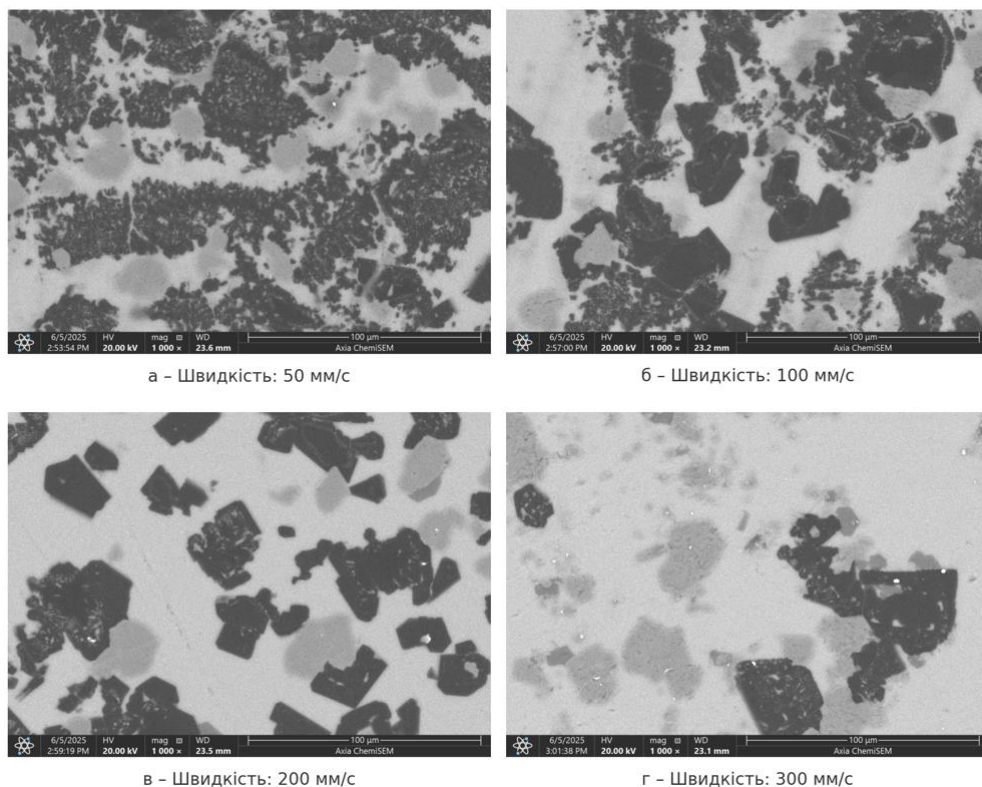
Рисунок 3.2 – Мікроструктура композитів B_4C-Si при різній швидкості за потужності лазера 25 W

При швидкості 50 мм/с сформувалася найбільш щільна структура з мінімальною кількістю пор та рівномірним розподілом фаз. Це свідчить про достатню енергію для повного або часткового плавлення Si та забезпечення

ефективної змочуваності зерен B_4C . Темні ділянки на мікрофотографіях відповідають фазі карбиду бору (B_4C), у той час як світлі області – це переважно кремній та продукти його взаємодії, зокрема карбід кремнію (SiC).

При 100 мм/с структура залишається відносно щільною, проте в деяких зонах з'являються мікропористі області. Зі збільшенням швидкості до 200 мм/с чітко спостерігається зростання кількості пор, а також поява дефектів у міжзерновому з'єднанні. Це вказує на зниження температури локального нагріву та, відповідно, зменшення ступеня плавлення кремнію. Найгіршу структуру отримано при швидкості 300 мм/с — характерною є пористість, нерівномірність та часткове “розшарування” фаз, що є наслідком недостатньої енергії лазера для спікання порошку.

Детальний аналіз при високому збільшенні (рис. 3.2) підтверджує ці висновки.



а – швидкість сканування 50мм/с, б – швидкість сканування 100мм/с,
в – швидкість сканування 200мм/с, г – швидкість сканування 300мм/с
Рисунк 3.3 – Мікроструктура композитів B_4C -Si при різній швидкості при збільшенні 1000

При низьких швидкостях (50–100 мм/с) спостерігається чіткий контакт між зернами, змочування частинок кремнію навколо B_4C та утворення евтектичної фази. Світлі ділянки Si частково взаємодіють із вуглецем, що міститься в B_4C , з утворенням карбїду кремнію (SiC) на межах зерен. У зразках, виготовлених при 200–300 мм/с, виявлено наявність пор, мікротріщин, а також порушення цілісності фазового контакту, що вказує на недосконале структурне формування. Зі зростанням швидкості спостерігається також інтенсивніше утворення вторинної фази SiC на поверхні B_4C , що є результатом часткової взаємодії залишкового кремнію з борвмісними зернами.

Таким чином, із зростанням швидкості сканування при сталому значенні лазерної потужності структура композиту переходить від щільної, добре сформованої до дефектної, пористої. Оптимальними умовами для формування мікроструктури композиту B_4C –Si в умовах проведеного дослідження є швидкість сканування не більше 100 мм/с при потужності 25 Вт.

Детальний аналіз мікроструктури отриманих композитів дозволив виявити явище процесу «зародження та осідання» зерен SiC на поверхні зерен B_4C (рис. 3.3).

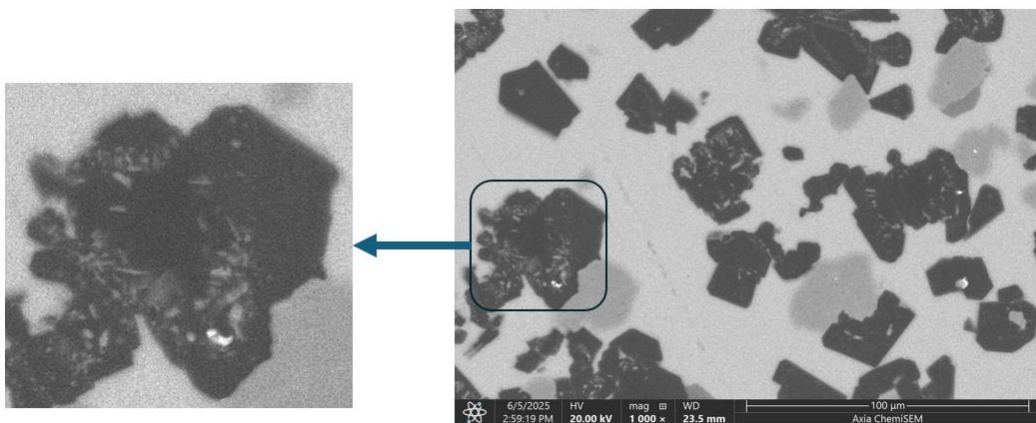


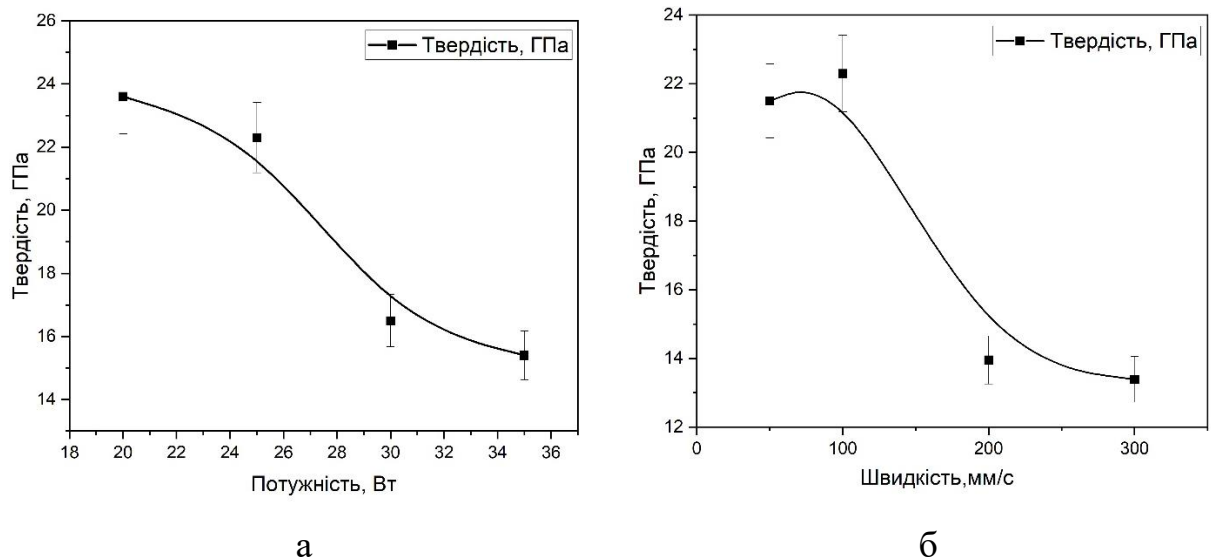
Рисунок 3.4 – Детальний аналіз структури зерен карбїду бору після інфільтрації

Кремній дифундує в поверхневий шар зерен B_4C , взаємодіючи з вуглецем, що входить до складу карбіду бору. Це призводить до локального утворення шару SiC на межах зерен, що видно як сірі включення. Товщина цього шару залежить від часу, температури та концентрації кремнію в розплаві.

SiC є термодинамічно стабільною фазою при високих температурах, що сприяє його формуванню як продукту реакції. Наявність залишкового кремнію в матриці вказує на надлишок Si , який не прореагував повністю через обмежену кількість доступного вуглецю в B_4C або нерівномірність інфільтрації.

3.3 Вплив режимів 3D-друку на механічні властивості

У процесі селективного лазерного спікання композиту B_4C-Si параметри друку мають істотний вплив на формування структури, що безпосередньо відображається на його механічних властивостях, зокрема на мікротвердості (рис. 3.4).



а – зміна потужності лазера, б – зміна швидкості сканування

Рисунок 3.5 – Вплив технологічних параметрів 3D друку на мікротвердість композитів B_4C-Si

Встановлено, що зі зростанням швидкості друку (при фіксованій потужності лазера 25 Вт) від 50 до 300 мм/с відбувається поступове зменшення мікротвердості композиту. Зразки, виготовлені зі швидкістю 50 мм/с, демонструють найвищу щільність та найменшу кількість пор, що створює умови для ефективного передавання навантаження через матрицю та армуючі частинки. Мікроструктура при цій швидкості свідчить про добру змочуваність зерен B_4C розплавленим Si , що сприяє формуванню міцних міжфазних з'єднань.

У зразках, отриманих зі швидкістю 100 мм/с, спостерігається незначне зниження мікротвердості, що пов'язано з появою мікропор. Тим не менш, структура ще залишається порівняно щільною. Найбільше зниження механічних властивостей спостерігається для зразків, надрукованих при швидкостях 200 та 300 мм/с. Це зумовлено тим, що при таких режимах енергія, яка передається в зону спікання, є недостатньою для повноцінного плавлення кремнію та формування суцільної матриці. Як наслідок, утворюється пориста структура з нез'єднаними ділянками, що слугує концентраторами напружень та знижує мікротвердість матеріалу.

Таким чином, для досягнення високих механічних характеристик композиту $\text{B}_4\text{C}\text{--Si}$ критично важливо дотримуватися оптимального режиму 3D-друку. Згідно з проведеним аналізом, оптимальною швидкістю для забезпечення достатньої мікротвердості та цілісної структури є 50–100 мм/с при потужності лазера 25 Вт.

4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Характеристика об'єкта дослідження та аналіз потенційно небезпечних факторів

У межах даної бакалаврської роботи дослідження зразків композиційного матеріалу на основі бориду бору та кремнію (B_4C-Si), отриманих методами селективного лазерного плавлення (SLM) та селективного лазерного спікання (SLS), проводились у спеціалізованому навчально-науковому лабораторному приміщенні кафедри матеріалознавства та перспективних технологій НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського".

Приміщення лабораторії належить до категорії лабораторій з обробки порошкових матеріалів і лазерних технологій, обладнане відповідно до вимог ДБН В.2.2-10-2001 [30] та СанПіН 2.2.4.548-96 [31]. У лабораторії встановлено обладнання для підготовки порошкових сумішей, формування зразків, а також апаратно-програмний комплекс для дослідження їхніх фізико-механічних властивостей. Основне устаткування включає лазерну установку для SLS/SLM, електропіч для додаткової термообробки та засоби неразруйного контролю.

У процесі виконання експериментальних робіт і підготовки зразків виявлено низку потенційно небезпечних та шкідливих факторів:

Фізичні фактори:

- лазерне випромінювання (інфрачервоного діапазону);
- локальне підвищення температури робочої зони при спіканні;
- підвищений рівень шуму від вентиляційної системи та електрообладнання;
- електромагнітні випромінювання височастотних пристроїв (лазерні джерела живлення).

Хімічні фактори:

- утворення пилу при роботі з B_4C і Si -порошками;
- ймовірність утворення оксидів при термічній обробці матеріалу;

– залишкові гази або пари від адгезивних і технологічних рідин (змащувальні чи охолоджувальні компоненти).

Ергономічні та психофізіологічні фактори:

– напружене зорове навантаження під час моніторингу процесів SLM/SLS;

– тривале перебування у вимушеній позі при виконанні точних маніпуляцій із зразками;

– ризик виникнення емоційного перенапруження внаслідок аварійного завершення дослідів або поломок обладнання.

Електробезпека:

– лабораторне обладнання живиться від мережі 220/380 В, що потребує особливої уваги до заземлення, цілісності ізоляції та справності ПЗВ (пристроїв захисного відключення).

Дослідна робота була проведена на базі Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона. Дані специфікації наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики науково-дослідної лабораторії

Довжина, м	6
Ширина, м	9
Висота, м	4,5
Площа, м ²	54
Об'єм, м ³	243

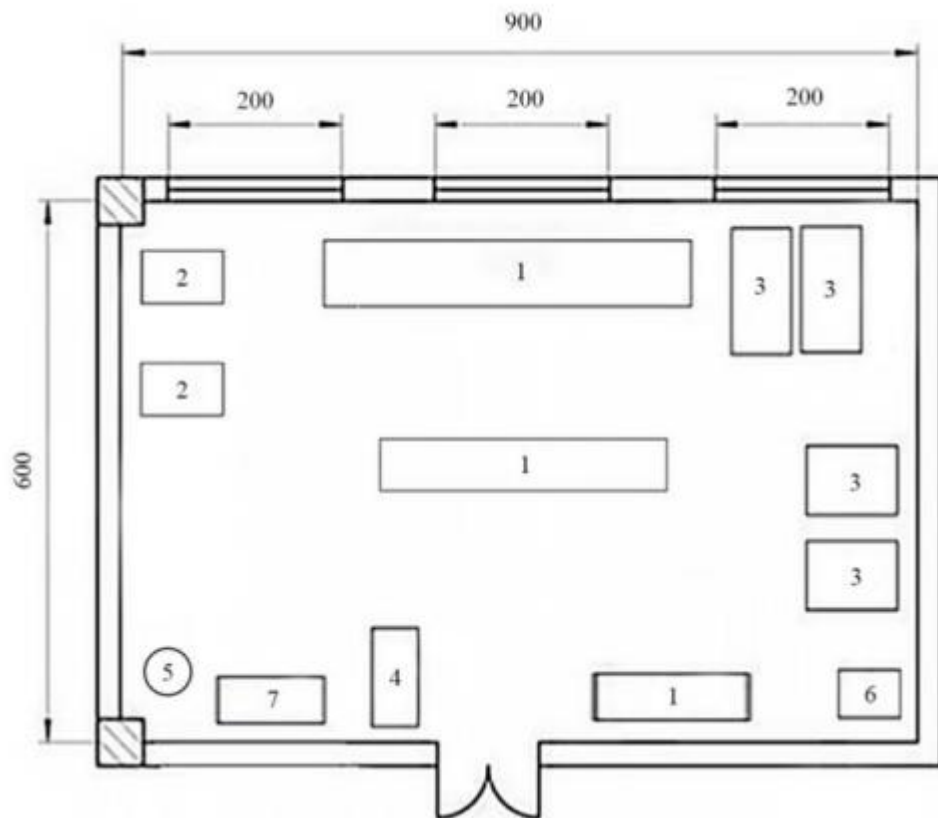
Оскільки в нашому випадку площа становить:

$$S = 6 \cdot 9 = 54 \text{ м}^2 .$$

Об'єм приміщення:

$$V = 6 \cdot 9 \cdot 4,5 = 243 \text{ м}^3 .$$

План приміщення зазначено на рисунку 5.1.



1 – робочий стіл; 2 – гідравлічний прес; 3 – піч спікання; 4 – сушильна шафа
5 – вогнегасник; 6 – умивальник; 7 – шафа

Рисунок 5.1 – План дослідної лабораторії

Відповідно до вимог нормативної документації, було виконано розрахунок площі та об'єму приміщення лабораторії на одну особу. Враховуючи, що в лабораторії працюють 3 працівники, розрахунки мають наступний вигляд:

$$S_o = 54 / 3 = 18 \text{ м}^2$$

$$V_o = 243 / 3 = 81 \text{ м}^3.$$

Отримані результати свідчать про те, що лабораторія відповідає вимогам державних будівельних норм для виробничих будівель, згідно з ДБН В.2.2-28:2010 [32].

4.2 Оцінка ключових небезпечних та шкідливих факторів, розробка заходів з охорони праці

Експериментальні дослідження в рамках даної дипломної роботи проводилися в дослідницькій лабораторії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Це приміщення обладнане для роботи з порошковими матеріалами та лазерною технікою, що дозволяє проводити процеси селективного лазерного плавлення та спікання композиційних матеріалів на основі В₄С–Si.

У ході експериментів було виявлено ряд потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів. До основних з них належать: інтенсивне лазерне випромінювання, підвищені температури в зоні опромінення, утворення дрібнодисперсного пилу карбіду бору та кремнію, шум від роботи вентиляційного обладнання, а також ризики, пов'язані з електроживленням високої потужності. Робота з порошковими матеріалами створює додаткову загрозу пилового забруднення повітряного середовища, що може призводити до подразнення дихальних шляхів. Високотемпературні процеси SLM/SLS можуть супроводжуватися виділенням тепла та локальним перегрівом конструктивних елементів обладнання, що вимагає дотримання заходів термічного захисту [39].

До факторів, що потребують врахування, також належать можливі порушення ергономіки робочого місця при тривалому моніторингу процесу друку та підготовці зразків, ризик ураження електричним струмом у разі несправності ізоляції електропроводки, а також можливість виникнення

коротких замикань. Робота з лазерною установкою передбачає наявність захисного екранування та спеціалізованих засобів захисту органів зору.

Для зниження дії виявлених небезпечних факторів у лабораторії передбачено низку інженерних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів. Зокрема, всі операції з порошками проводяться у витяжних шафах або герметичних камерах; забезпечено природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [33] застосовуються засоби індивідуального захисту (респіратори, рукавиці, лазерозахисні окуляри); передбачено технічне обслуговування та перевірку справності електрообладнання. Організовано проходження вступного та періодичного інструктажу з охорони праці. У приміщенні наявні первинні засоби пожежогасіння.

4.2.1 Фізичні небезпеки

У ході проведення досліджень із застосуванням технологій селективного лазерного плавлення та спікання в лабораторному середовищі було ідентифіковано кілька фізичних факторів, які можуть негативно впливати на стан здоров'я осіб, що перебувають у приміщенні. Найбільш суттєвими серед них є:

Високоенергетичне лазерне випромінювання, що використовується під час SLM/SLS-процесів. Діапазон довжин хвиль включає інфрачервону частину спектра, яка є невидимою для ока, але може спричинити серйозні термічні ушкодження сітківки або шкіри навіть при короткочасному опроміненні. Відбиті або розсіяні промені також становлять небезпеку, особливо при відкритому доступі до робочої зони установки.

Температурні ризики виникають через локальне нагрівання порошкового шару до температур, які перевищують 1000 °С. У результаті можливе випадкове контактування з перегрітими елементами обладнання або щойно виготовленими деталями, що загрожує опіками першого та другого ступеня.

Підвищений рівень шуму, що створюється вентиляторами охолодження, компресорами повітря та іншими електромеханічними пристроями, може призвести до тимчасового зниження слуху при тривалому перебуванні в лабораторії без використання захисту слуху. Рівень шуму у певних режимах може перевищувати допустимі норми (80 дБ).

Висока яскравість плазми в зоні обробки, яка іноді спостерігається при SLS-процесі, створює небезпеку зорового подразнення, особливо за відсутності захисного екранування [39].

Для мінімізації впливу наведених факторів у лабораторії застосовуються технічні й організаційні засоби безпеки: установка повністю екранована; передбачено блокування роботи при відкритих дверцятах; використовується система примусового охолодження та сигналізації температури; персонал забезпечується засобами індивідуального захисту (зокрема, окулярами, що поглинають ІЧ-випромінювання); встановлено нормативи тривалості безперервного перебування біля обладнання[37].

4.2.2 Хімічні небезпеки

Під час досліджень, пов'язаних із виготовленням та обробкою зразків композиційного матеріалу на основі карбиду бору та кремнію, виникає низка потенційно небезпечних хімічних факторів. Особливої уваги вимагає робота з порошковими матеріалами, які характеризуються високою дисперсністю та здатністю до аерозольного розповсюдження в повітрі лабораторного простору.

До найбільш суттєвих хімічних небезпек належить пил бор-карбідного (B₄C) та кремнієвого (Si) походження, що може проникати в дихальні шляхи та викликати подразнення слизових оболонок, алергічні реакції, а при тривалому впливі – професійні захворювання легень. Через високу абразивність та хімічну інертність частинок вони погано виводяться з організму, що посилює потенційний ризик.

Окрім пилю, в процесі лазерного плавлення або спікання можливе утворення побічних газів або парів, зокрема оксидів бору або кремнію, внаслідок локального перегріву та окиснення матеріалу. У поєднанні з поганою вентиляцією такі речовини можуть призводити до токсичного навантаження на організм оператора.

Для мінімізації впливу хімічних небезпек у лабораторному приміщенні організовано локальну витяжну вентиляцію, що забезпечує видалення пилю й пар безпосередньо з робочої зони. Порошки зберігаються у герметичних контейнерах, а роботи з ними виконуються в захисних респіраторах класу P3. Усі учасники досліджень проходять обов'язковий інструктаж з безпеки поводження з порошкоподібними матеріалами та токсичними речовинами. При виникненні надзвичайних ситуацій передбачено використання засобів промивання слизових оболонок та вентиляції приміщення [38].

4.2.3 Електробезпека

У ході проведення досліджень з використанням адитивних технологій SLM/SLS виникає потреба в експлуатації складного технічного обладнання, яке працює під напругою промислової частоти. Основні лазерні установки, системи охолодження, вентилятори, печі для термообробки та допоміжне електронне устаткування підключені до мережі 220 В або 380 В і споживають значну електричну потужність.

До основних ризиків, пов'язаних з електробезпекою, належать: ураження електричним струмом при дотику до струмопровідних частин, пробій ізоляції проводів, коротке замикання, а також вихід з ладу обладнання внаслідок перевантаження або неправильного заземлення. Особливо небезпечними є випадки, коли доступ до елементів з високим потенціалом є відкритим або відсутній належний захист.

В умовах лабораторії для зменшення електротехнічних ризиків упроваджено комплекс превентивних заходів. Зокрема, всі установки

підключені через автоматичні вимикачі, що відключають подачу струму у разі аварійної ситуації. Крім того, усі металеві корпуси обладнання заземлені відповідно до вимог ПУЕ [34], а електрощитові пристрої захищені від стороннього доступу.

Перед початком роботи студенти та співробітники лабораторії проходять інструктаж з правил безпечного користування електроприладами, знайомляться з розташуванням аварійного відключення напруги, а також з порядком дій у разі пожежі чи ураження струмом. Встановлені індикатори напруги, сигнальні лампи, що показують стан живлення системи, та блокувальні механізми, які унеможливають запуск установки при порушенні цілісності корпусу [34].

Окрім того, регулярне технічне обслуговування та профілактичний огляд електромереж, перевірка справності автоматичних вимикачів і цілісності ізоляції дозволяють своєчасно виявити і усунути потенційно небезпечні дефекти.

4.2.4 Пожежна безпека

Зважаючи на використання високотемпературного обладнання, лазерного випромінювання та дрібнодисперсних порошкових матеріалів, під час проведення досліджень у лабораторії виникає низка факторів, що становлять потенційну загрозу пожежної безпеки. Хоча карбід бору та кремній не є легкозаймистими речовинами, у вигляді пилу та в умовах підвищених температур вони можуть створювати вибухонебезпечне аерозольне середовище в обмеженому об'ємі повітря.

Основну пожежну небезпеку становлять такі чинники, як локальні перегріву в зоні лазерного впливу, несправності електрообладнання, наявність пилу на нагрітих поверхнях, а також випадкове коротке замикання. У разі несанкціонованого розповсюдження тепла або іскри, це може стати джерелом

загоряння залишків технологічних матеріалів, елементів корпусів приладів або навіть меблів лабораторії.

Кожне робоче місце забезпечено первинними засобами пожежогасіння – вогнегасниками вуглекислотного або порошкового типу, що відповідають класу можливих загорянь. Встановлені вказівники евакуаційних виходів та розміщено плани евакуації, що дозволяє оперативно покинути приміщення в разі пожежі. Регулярно проводяться навчання та інструктажі з протипожежної безпеки для студентів і персоналу [29].

На рисунку 5.2 зазначено фотографію плану евакуації, розміщеного в лабораторії.



Рисунок 5.2 – план евакуації

4.2.5 Засоби індивідуального захисту

Одним із ключових аспектів забезпечення безпечних умов праці в лабораторіях, де проводяться дослідження з використанням високотехнологічного обладнання та небезпечних матеріалів, є використання ефективних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). У випадку виконання досліджень за темою дипломної роботи – адитивного виготовлення зразків із композиту V_4C-Si методом селективного лазерного плавлення (SLM) та спікання (SLS) – потреба в ЗІЗ є особливо актуальною через наявність декількох небезпечних факторів: лазерне випромінювання, дрібнодисперсний пил, високі температури, шум, електричне напруження та психофізіологічні навантаження.

Засоби індивідуального захисту, що застосовуються у даній лабораторії, класифікуються залежно від характеру небезпеки та специфіки виконуваних операцій.

Захист органів дихання [38]

У зв'язку з роботою з порошками V_4C та Si , які легко пилять і здатні тривалий час залишатися у зваженому стані, захист дихальних шляхів є обов'язковим під час підготовки, завантаження або очищення матеріалів. Для цього застосовуються фільтрувальні респіратори типу FFP3 або P3, здатні затримувати частинки розміром до 0,3 мкм. Використання побутових або хірургічних масок є неприпустимим, оскільки вони не забезпечують потрібного ступеня фільтрації дрібного технічного пилу.

Особлива увага приділяється щільному приляганню респіратора до обличчя, наявності клапанів видиху, а також заміні фільтрів після тривалої роботи.

Захист органів зору [39]

Основну небезпеку для зору під час SLM/SLS-процесів становить лазерне випромінювання, яке у разі прямого або навіть відбитого потрапляння на сітківку може призвести до термічного ураження ока. Тому під час

обслуговування лазерної установки використовується захисні окуляри, які поглинають випромінювання відповідного спектру (найчастіше – інфрачервоного).

Крім того, у фазі підготовки та після обробки зразків, особливо при механічному шліфуванні або очищенні залишків порошку, використовуються захисні окуляри з боковим екрануванням, що запобігають потраплянню твердих частинок в очі.

Захист шкіри та рук [40]

При роботі з нагрітими деталями, формами, платформами для друку або з поверхнею, що піддалася термічному впливу, є ризик опіків. Для цього використовуються термостійкі рукавиці, здатні витримувати контакт з об'єктами температурою до 300–400 °С.

Під час підготовки порошків і завантаження їх у камеру рекомендовано використовувати нітрилові рукавички, які не пропускають дрібнодисперсні частинки, не викликають алергії, стійкі до механічного стирання та не порушують точність рухів.

Також персонал повинен бути одягнений у робочий халат або комбінезон, виготовлений із антистатичної тканини, яка перешкоджає накопиченню пилу на одязі та зменшує ризик електростатичного розряду.

Захист від шуму та вібрацій [40]

Під час роботи витяжної системи, охолоджувальних компресорів і обертальних вузлів рівень шуму у лабораторії може перевищувати допустимі норми. З метою захисту слуху використовуються вкладиші або навушники протишумові, що знижують звуковий тиск до комфортного рівня.

У випадках тривалої експлуатації вібруючих пристроїв — наприклад, при шліфуванні зразків або механічному очищенні — рекомендується переривчастий режим роботи та використання антивібраційних прокладок на поверхнях столів.

Інші засоби індивідуального захисту [40]

До допоміжних ЗІЗ також належать:

- бахіли або змінне взуття для збереження чистоти робочого середовища;
- засоби гігієни (серветки, дезінфікуючі розчини), особливо при прямому контакті з порошками;
- індивідуальні аптечки першої допомоги.

Використання зазначених засобів є обов'язковим для всіх осіб, які допускаються до роботи в лабораторії. Кожен співробітник проходить вступний інструктаж із охорони праці та пожежної безпеки, а також ознайомлюється з інструкцією з експлуатації ЗІЗ [40].

4.3 Висновки до розділу охорони праці

У межах дипломної роботи з дослідження композитів на основі B_4C-Si , виготовлених методами SLM/SLS, проведено аналіз умов праці в дослідницькій лабораторії НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського". Встановлено та класифіковано основні шкідливі і небезпечні фактори: лазерне випромінювання, електричний струм, пил B_4C і Si , високі температури, шум.

Для їх мінімізації впроваджено вентиляцію, екранування лазерного обладнання, пожежну безпеку, техобслуговування систем, а також використання ЗІЗ: респіраторів, окулярів, рукавиць, спецодягу та засобів захисту слуху. Працівники проходять інструктаж з охорони праці, ознайомлюються з документацією та правилами дій у надзвичайних ситуаціях.

Забезпечено ергономіку, освітлення й вентиляцію робочого місця. Завдяки вжитим заходам рівень безпеки визнано прийнятним, а ризики — зведеними до мінімуму при дотриманні інструкцій і норм охорони праці.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Науково-технічна актуальність НДР

Стрімкий розвиток адитивних технологій в останні десятиліття суттєво розширив можливості обробки складних матеріалів, у тому числі таких, що раніше вважались важкоформованими через їхні фізико-хімічні властивості. Одним із таких матеріалів є карбід бору (B_4C), який характеризується надзвичайною твердістю, хімічною інертністю, низькою густиною та високою термостійкістю. У поєднанні з кремнієм цей матеріал утворює перспективні композити, що демонструють підвищену зносостійкість, термічну стабільність і відмінні механічні характеристики, що робить їх придатними для застосування в екстремальних умовах – зокрема, в аерокосмічній, оборонній, ядерній та електротехнічній галузях.

Традиційні методи виготовлення деталей із B_4C -Si-композитів мають низку обмежень, зокрема пов'язаних з високими температурами спікання, ризиком утворення тріщин, нерівномірністю структури та труднощами обробки жорстких форм. У цьому контексті методи селективного лазерного плавлення (SLM) та селективного лазерного спікання (SLS) виступають як сучасні технологічні підходи, що дозволяють отримувати вироби складної геометрії з високим ступенем контролю мікроструктури та локальних властивостей матеріалу.

Наукова актуальність даного дослідження полягає у вивченні можливості ефективного застосування технологій SLM/SLS для створення композитів B_4C -Si з регульованим співвідношенням компонентів, а також у визначенні впливу режимів обробки на структуру та експлуатаційні властивості одержаних зразків. Практична значущість роботи визначається тим, що результати можуть бути використані для розробки технічної документації, рекомендацій щодо режимів обробки, а також у подальших прикладних дослідженнях.

Крім того, вивчення фізико-механічних характеристик композиту в умовах лабораторного виробництва створює підґрунтя для масштабування процесу в умовах малого та середнього промислового виробництва, де все активніше впроваджуються адитивні технології як засіб підвищення продуктивності та гнучкості обробки складних матеріалів.

5.2 Розрахунок витрат на виконання науково-дослідної роботи

Організація та виконання науково-дослідної роботи, пов'язаної з вивченням властивостей композиційного матеріалу B_4C-Si , виготовленого методами селективного лазерного плавлення (SLM) та спікання (SLS), потребує комплексного обліку матеріальних, трудових і технічних ресурсів. Для забезпечення повного та якісного проведення експериментів, аналізу отриманих даних і підготовки результатів було виконано розрахунок основних статей витрат.

Загальний обсяг витрат формується з урахуванням специфіки лабораторного процесу, який включає підготовку порошкових сумішей, друк та обробку зразків, їх фізико-хімічне і механічне тестування, а також оформлення технічної документації. Витрати згруповано за економічними елементами, що відповідають типовій структурі кошторису науково-дослідних робіт.

Провідну частку становлять витрати на оплату праці науково-дослідного персоналу, який бере участь у всіх етапах роботи: від підготовки сировини та програмування режимів SLM/SLS, до інтерпретації результатів і оформлення звітної частини. Обсяг витрат на оплату праці залежить від розрахункових трудовитрат, обсягу експериментальних операцій та термінів виконання роботи. До цієї статті також належить єдиний соціальний внесок, що нараховується згідно із законодавством.

Наступним важливим компонентом є матеріальні витрати, які включають вартість порошків B_4C та Si відповідної дисперсності й чистоти,

витратні технологічні засоби (наприклад, адгезиви, змочувальні речовини, допоміжні інструменти для обробки), а також пакувальні та маркувальні матеріали для зберігання зразків. Витрати формуються відповідно до нормативів витрати матеріалу на один зразок і загальної кількості виготовлених кубиків.

Використання спеціалізованого обладнання (лазерної установки, електропечі, мікротвердоміра, шліфувально-полірувальних машин, мікроскопа тощо) вимагає включення витрат на оренду, амортизацію або умовно-розрахункову вартість експлуатації обладнання. Розрахунок здійснюється на основі часу роботи та питомої собівартості експлуатації за одиницю часу.

Також враховано витрати на зовнішні послуги, зокрема за необхідності – хімічний або спектральний аналіз, консультації зі спеціалістами суміжних напрямків, обробку статистичних даних за допомогою ліцензійного програмного забезпечення тощо.

Витрати на службові відрядження, пов'язані з відвідуванням технічних семінарів, лабораторій партнерських кафедр або участю в науково-практичних заходах, визначаються індивідуально, виходячи з конкретних потреб науково-дослідної частини роботи.

Інші прямі витрати включають обслуговування техніки, витрати на енергоносії, транспортування матеріалів у межах лабораторії, а також супутні витрати на оргтехніку, витратні матеріали для оформлення звітної документації.

До повної собівартості також додаються накладні витрати, пов'язані з організаційним забезпеченням роботи лабораторії: адмініструванням, комунальними платежами, технічним супроводом і охороною приміщення. Їх розрахунок ведеться у вигляді частки від прямих витрат, згідно встановлених нормативів [42].

Після деталізованого обліку всіх статей витрат буде сформована загальна калькуляція кошторисної вартості НДР, яка дозволить оцінити повну вартість

виконання дослідження та економічну ефективність отриманих результатів. Такий підхід дозволяє не лише обґрунтувати бюджет роботи, а й оцінити комерційний потенціал технології з погляду впровадження в промисловість [42].

5.2.1 Витрати на оплату праці

Однією з основних складових кошторису науково-дослідної роботи є витрати на оплату праці виконавців, які залучені до реалізації всіх етапів дослідження. З огляду на міждисциплінарний характер роботи, яка охоплює як матеріалознавчий аналіз, так і використання високотехнологічного обладнання, до виконання проєкту можуть бути залучені фахівці різного профілю, зокрема: студент-дослідник, науковий керівник, інженер-лаборант, оператор лазерної установки, спеціаліст із термічної обробки та спеціаліст з аналізу даних.

Розрахунок витрат на оплату праці є обов'язковим елементом формування загального кошторису науково-дослідної роботи. З урахуванням специфіки виконання дипломної роботи студентом в умовах лабораторії кафедри, витрати формуються на основі тривалості окремих етапів дослідження, відповідних обсягів робіт та тарифних ставок, що застосовуються в навчально-науковій сфері.

У реалізації дипломного проєкту були задіяні:

- студент-дослідник, який виконував основну частину практичної роботи – підготовку порошків B_4C і Si , їх змішування, запуск процесу SLM/SLS-друку, термообробку зразків, вимірювання фізико-механічних властивостей та обробку результатів;
- науковий керівник, який забезпечував контроль якості, підбір параметрів друку, методичне керівництво і затвердження результатів;

– за потреби – лаборант (інженер-консультант), який надавав технічну допомогу під час запуску обладнання та контролю безпечної експлуатації [42].

Таблиця 5.1 – Загальні трудовитрати

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість, люд-днів	Посадовий місячний оклад, грн	Середньоденна зарплата, грн	Усього за виконавцями, грн
Асистент	22	20 000	943,40	20 754,80
Лаборант	7	7 000	330,19	2 311,33
Інженер-дослідник	60	8 500	400,94	24 056,40
Разом оплата праці з теми				47 122,53

Усі розрахунки проводяться згідно з нормами чинного трудового законодавства України, з дотриманням вимог щодо обліку робочого часу та обов’язкових нарахувань, які будуть враховані у наступному підпункті (4.2.2).

5.2.2 Єдиний соціальний внесок

У структурі витрат на оплату праці обов’язковим елементом є нарахування єдиного соціального внеску (ЄСВ) до державного бюджету. ЄСВ є загальнообов’язковим платежем, який сплачується з фонду заробітної плати згідно із Законом України «Про збір та облік єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування». Цей внесок забезпечує фінансування системи пенсійного страхування, тимчасової втрати працездатності, безробіття та інших соціальних гарантій.

Ставка ЄСВ для нарахування на заробітну плату працівників, згідно з чинним законодавством, становить 22% від нарахованої суми оплати праці.

У межах даної науково-дослідної роботи витрати на оплату праці були розраховані в обсязі 11 000 грн (таблиця 4.1). Відповідно, сума ЄСВ становить [42]:

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

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 47112,53 \cdot 0,22 = 10364,75 \text{ грн.}$$

Це нарахування обов'язково включається до кошторисної частини витрат, оскільки воно є складовою фактичної вартості праці працівника і входить до повної собівартості виконання науково-дослідної роботи. Такі нарахування повинні бути передбачені в бюджеті на стадії фінансового планування, навіть у випадку виконання роботи студентом або на умовах короткострокового договору.

5.2.3 Витрати на матеріали

У структурі витрат на виконання науково-дослідної роботи важливе місце займають матеріальні ресурси, необхідні для реалізації експериментальної частини. У випадку дослідження композиційного матеріалу $\text{B}_4\text{C-Si}$, виготовленого за допомогою селективного лазерного плавлення (SLM) та спікання (SLS), до основних матеріалів належать порошки компонентів, допоміжні технологічні речовини, а також витратні матеріали, пов'язані з підготовкою, обробкою та зберіганням зразків [42].

Основу матеріального забезпечення становлять:

- Порошок карбіду бору (B_4C) – надтвердий матеріал високої чистоти, що використовується як базова фаза для формування композиту.

- Порошок кремнію (Si) – добавка, яка вводиться для поліпшення спікання та формування реакційно-утворених зв’язуючих фаз.
- Контейнери, шпателі, чаші для змішування порошків – забезпечують точне дозування та рівномірність суміші.
- Фольга, підкладки та формувальні оснастки – використовуються для збереження геометрії зразків під час друку.
- Захисні середовища або засоби обробки (наприклад, ізопропіловий спирт, змочувальні рідини) – застосовуються для очищення деталей перед та після друку.
- Засоби маркування, пакування та зберігання зразків – етикетки, зіп-пакели, контейнери.

У цій статті враховано вартість основних матеріалів, що використовуються для проведення науково-дослідної роботи, включаючи порошкові компоненти для формування композиту В₄С–Si методом SLM/SLS. Оцінка виконана з урахуванням розрахункової кількості матеріалу, необхідної для виготовлення 14 зразків кубічної форми (1 × 1 × 1 см), з масовим співвідношенням компонентів 70% В₄С і 30% Si.

Розрахунки наведено у таблиці 4.2:

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Стандарт	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за 1 кг, грн	Сума, грн
Порошок В ₄ С	99%	кг	0,0282	20 000	564
Порошок Si	99,9%	кг	0,0121	5 000	61
Допоміжні матеріали	—	—	—	—	500
Разом:	—	—	—	—	1 125

Для врахування логістичних витрат, витрат на зберігання, пакування та оформлення матеріалів, додаються транспортно-заготівельні витрати (Тв) у розмірі 10% від загальної вартості матеріалів [42]:

$$T_B = 1\,125 \times 0,10 = 112,5 \text{ грн,}$$

Таким чином, загальна сума витрат на закупівлю матеріалів з урахуванням транспортно-заготівельних витрат становить:

$$B_M = 1\,125 + 112,5 = 1\,237,5 \text{ грн}$$

Зазначені матеріали забезпечують повне проведення запланованих експериментів та підготовку зразків для аналізу, з урахуванням технологічного надлишку (~10–15%), який компенсує втрати при змішуванні та друці.

5.2.4 Витрати на використання обладнання

Використовувалось обладнання яке вже було і ніяке спеціальне не закуповувалось.

5.2.5 Витрати на зовнішні послуги

У процесі виконання цієї роботи участь сторонніх організацій не була.

5.2.6 Витрати на службові відрядження

Під час проведення досліджень усі роботи виконувалися виключно з використанням наявного обладнання в лабораторіях КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона, тому витрати на науково-виробничі відрядження не передбачалися.

5.2.7 Інші прямі витрати

У цій статті об'єднуються всі витрати на проведення НДР, що не були враховані у попередніх статтях. До таких витрат належать витрати на електроенергію, обслуговування обладнання, допоміжні технічні ресурси, санітарно-технічне забезпечення, оргтехніку, витратні матеріали тощо.

Відповідно до прийнятої методики, інші прямі витрати розраховуються як 10 % від суми основних витрат [42]:

$$I_{\text{в}} = (\text{ЗП} + \text{ЄСВ} + \text{Вм}) \times 0,1$$

де:

$I_{\text{в}}$ — інші прямі витрати, грн

ЗП — заробітна плата, грн

ЄСВ — єдиний соціальний внесок, грн

Вм — витрати на матеріали, грн

Підставимо значення:

$$\text{ЗП} = 47\,122,53 \text{ грн}$$

$$\text{ЄСВ} = 10\,364,75 \text{ грн}$$

$$\text{Вм} = 1\,237,5 \text{ грн}$$

$$I_{\text{в}} = (47\,122,53 + 10\,364,75 + 1\,237,5) \times 0,1 = 58\,724,78 \times 0,1 = 5\,872,48$$

грн

Таким чином, інші прямі витрати на виконання науково-дослідної роботи становлять 5 872,48 грн.

5.2.8 Накладні витрати

Накладні витрати включаються до калькуляції кошторисної вартості теми пропорційно до витрат на оплату праці основних виконавців або до суми прямих витрат на виконання дослідження. Вони враховують витрати, пов'язані з організаційним супроводом науково-дослідної роботи: обслуговуванням інфраструктури, науково-технічною підтримкою, амортизацією обладнання, адміністративним управлінням, забезпеченням безпеки праці, комунальними послугами, зв'язком тощо.

У межах цієї теми до складу накладних витрат входять: витрати на управління темою, витрати на амортизацію основних засобів, витрати на використання інформаційних ресурсів, витрати на забезпечення нормальних умов праці, витрати на електроенергію, водопостачання, опалення, податки, збори та інші обов'язкові платежі.

Розрахунок накладних витрат здійснюється пропорційно сумі прямих витрат у розмірі 20 %, за формулою [42]:

$$Нв = (ЗП + ЄСВ + Вм + Ів) \times 0,2$$

де Нв — накладні витрати, грн

ЗП — заробітна плата = 47 122,53 грн

ЄСВ — єдиний соціальний внесок = 10364,75 грн

Вм — витрати на матеріали = 1 237,5 грн

Ів — інші прямі витрати = 5 872,48 грн

$$Нв = (47\,122,53 + 10\,364,75 + 1\,237,5 + 5\,872,48) \times 0,2 = 12\,919,45 \text{ грн}$$

Таким чином, загальна сума накладних витрат на виконання науково-дослідної роботи становить 12 919,45 грн.

5.2.9 Загальна калькуляція кошторисної вартості

На основі проведеного аналізу основних статей витрат, пов'язаних з виконанням науково-дослідної роботи з виготовлення та вивчення властивостей композитів В₄С–Si методом селективного лазерного плавлення (SLM) та спікання (SLS), було здійснено узагальнення повної кошторисної вартості проєкту. Розрахунок охоплює всі прямі та непрямі витрати, включаючи оплату праці, матеріальні ресурси, технічне забезпечення, зовнішні послуги, організаційні та адміністративні витрати [42].

На таблиці 4.3 продемонстровано планову калькуляцію кошторисної вартості НДР:

Таблиця 5.3 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

№	Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3	4
1	Витрати на оплату праці	47 122,53	Відповідно до розрахунків
2	Єдиний соціальний внесок (22%)	10364,75	22,0 % від витрат на оплату праці
3	Матеріали для проведення досліджень	1 237,5	Відповідно до розрахунків
4	Енергоносії для проведення досліджень	—	У нашому випадку включаються до накладних витрат
5	Спецобладнання для наукових цілей	—	У нашому випадку включаються до накладних витрат
6	Вартість послуг сторонніх організацій	—	У нашому випадку включаються до статті інших витрат

Продовження таблиці 5.3

1	2	3	4
7	Витрати на службові відрядження	—	У нашому випадку не передбачено
8	Інші прямі витрати по темі (10%)	5 872,48	10 % від суми прямих витрат (ЗП + ЄСВ + Вм)
9	Накладні витрати (20%)	12 919,45	20 % від суми прямих витрат (ЗП + ЄСВ + Вм + Ів)
10	Усього витрат по темі	77 516,71	Сума попередніх статей

5.3 Очікувана науково-технічна та економічна ефективність

Оцінювання очікуваної ефективності науково-дослідної роботи дає змогу визначити доцільність її реалізації. Такий аналіз є особливо доцільним у випадках, коли дослідження спрямовані на розробку нових матеріалів, покращення технічних характеристик продукції або створення принципово нових технологічних рішень [42].

Для обґрунтування ефективності цієї роботи використано бальну модель оцінювання, яка враховує чотири ключові показники:

- К1 – значущість та рівень пріоритетності виконаної теми;
- К2 – масштаби потенційного використання результатів;
- К3 – глибина наукової новизни та вагомість отриманих знань;
- К4 – складність виконання проєкту та рівень ресурсного забезпечення.

Критерії оцінювання:

Коефіцієнт К1 (важливість розробки) може приймати такі значення:

- 1 бал – ініціативне дослідження, яке виконується без зовнішнього замовлення або програмної належності;
- 3 бали – робота виконується в межах науково-технічного співробітництва;
- 5 балів – дослідження є складовою частиною відомчої програми;

- 7 балів – тема інтегрована в міжвідомчу програму з очікуваним впровадженням результатів;

- 8 балів – дослідження здійснюється в рамках міжнародної наукової програми.

Коефіцієнт К2 (масштаб використання результатів):

- 1 бал – розробка має обмежене застосування тільки в межах одного підрозділу;

- 3 бали – результати потенційно корисні для однієї організації;

- 5 балів – результати можуть бути застосовані кількома установами;

- 8 балів – впровадження можливе на рівні всієї галузі;

- 10 балів – результати мають універсальне значення й можуть застосовуватись у кількох галузях.

Коефіцієнт К3 (наукова новизна і значущість):

- 2 бали – узагальнення або аналіз відомих даних;

- 3 бали – отримані уточнені або додаткові знання про існуючі процеси;

- 5 балів – результати частково змінюють наукові уявлення про явище;

- 6 балів – створено нові підходи, методики або теоретичні моделі;

- 8 балів – робота відкриває принципово нові напрямки досліджень.

Коефіцієнт К4 (рівень складності та обсяг витрат):

- 1 бал – дослідження виконане одним підрозділом з бюджетом до 10 000 грн;

- 3 бали – робота в межах 10 000–50 000 грн;

- 5 балів – вартість проєкту становить 50 000–100 000 грн;

- 7 балів – залучено декілька структурних підрозділів з бюджетом 100 000–200 000 грн;

- 9 балів – до роботи залучено кілька організацій, витрати перевищують 200 000 грн.

Загальна бальна оцінка ефективності:

$$B = K1 \times K2 \times K3 \times K4$$

Наша загальна бальна оцінка ефективності становить:

$$B = 3 \times 8 \times 3 \times 5 = 360$$

Таблиця 5.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

№	Показник оцінки ефективності	Умовне позначення	Характеристика для нашої роботи	Кількість балів
1	Важливість розробки	K1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2	Можливість використання	K2	результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	8
3	Теоретична значущість	K3	Отримано нову інформацію, яка доповнює уявлення про процеси SLM/SLS	3
4	Складність дослідження	K4	роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Умовний ефект виконання науково-дослідної роботи розраховується з метою оцінки її доцільності та ефективності. Для цього застосовується формула:

$$ЕНДР = 500 \times B - E_n \times ВНДР,$$

де 500 – умовна вартість одного бала,

Б – бальна оцінка ефективності роботи,

Ен – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (у межах 0,1–0,3),

а ВНДР – загальні витрати на виконання науково-дослідної роботи.

У нашому випадку, за результатами бального оцінювання, Б становить 45 балів, ВНДР дорівнює 23 534,94 грн, а коефіцієнт Ен приймається на рівні 0,25.

Підставляючи значення, отримаємо:

$$\text{ЕНДР} = 500 \times 360 - 0,25 \times 77\,516,71 = 180\,000 - 19\,379,18 = 160\,620,82$$

грн.

Додатково, для кількісної оцінки результату, розраховується коефіцієнт умовної економічної ефективності за формулою:

$$E_e = \text{ЕНДР} / \text{ВНДР}.$$

У нашому випадку:

$$E_e = 160\,620,82 / 77\,516,71 \approx 2,07.$$

Це свідчить про те, що отриманий економічний ефект перевищує одиницю, а коефіцієнт умовної економічної ефективності становить 2,07, що є позитивним показником для науково-дослідної роботи. Це означає, що на кожну вкладену гривню очікується економічна віддача понад дві гривні. Такий результат підтверджує доцільність і практичну цінність дослідження, а також свідчить про його високий науково-технічний потенціал, перспективність для подальших досліджень, удосконалення технології SLM/SLS для тугоплавких композитів, зокрема на основі В₄С–Si, і можливість широкого впровадження результатів у промисловість.

5.4 Висновки до розділу

У межах даного розділу було здійснено комплексне економічне обґрунтування виконання науково-дослідної роботи, присвяченої виготовленню та дослідженню композиційного матеріалу на основі V_4C-Si із використанням технологій селективного лазерного плавлення (SLM) та спікання (SLS). Загальна кошторисна вартість дослідження, з урахуванням прямих і непрямих витрат, склала 77 516,71 грн.

Бальна оцінка науково-технічної ефективності проекту, проведена за чотирма ключовими показниками, становить 360 балів, що свідчить про високу значущість теми, можливість широкого впровадження результатів, помітну наукову новизну та достатню складність виконання.

Розрахований умовний ефект НДР дорівнює 160 620,82 грн, а коефіцієнт умовної економічної ефективності становить 2,07, що значно перевищує порогове значення. Це свідчить про економічну доцільність реалізації проекту, а також підтверджує його наукову й прикладну цінність, зокрема у сферах, де необхідні високотемпературні, зносостійкі та надтверді матеріали, такі як авіація, оборонна промисловість, машинобудування та енергетика.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень було встановлено, що технологічні параметри селективного лазерного спікання (SLS), зокрема потужність лазера та швидкість сканування, суттєво впливають на фізичні, структурні та механічні властивості композитів $\text{V}_4\text{C}-\text{Si}$.

Зі збільшенням швидкості сканування від 50 до 300 мм/с спостерігається тенденція до зменшення щільності зразків, що пояснюється зниженням обсягу переданої теплової енергії та, відповідно, неповним спіканням частинок і неефективним просоченням розплавленим кремнієм. Особливо це проявляється при низьких потужностях (20–25 Вт), коли спостерігається поступове зменшення щільності, а при потужностях 30–35 Вт – хвиляста або навіть нестабільна поведінка, пов'язана з перегрівом і формуванням дефектів.

Встановлено, що найщільніша структура формується при низьких швидкостях (50–100 мм/с), де спостерігається ефективне змочування зерен V_4C кремнієм, утворення рівномірного шару SiC і мінімальна пористість. Натомість при швидкості 200–300 мм/с зростає кількість пор, з'являються мікротріщини та ознаки міжфазного розшарування. Аналіз на високому збільшенні виявив утворення евтектичних фаз та шару карбиду кремнію (SiC) на межі зерен V_4C внаслідок дифузії та хімічної взаємодії з розплавленим кремнієм. Це підтверджує складний характер фазоутворення під час інфільтрації. Щодо механічних властивостей, то мікротвердість композитів також демонструє чітку залежність від параметрів друку: максимальні значення досягаються при 50 мм/с завдяки високій щільності й міцним міжфазним зв'язкам, тоді як при 300 мм/с твердість істотно знижується внаслідок пористості та дефектної структури.

Загалом, оптимальними умовами для формування щільної, однорідної мікроструктури з високою мікротвердістю є швидкість сканування в межах 50–100 мм/с при потужності лазера 25 Вт. Ці параметри забезпечують найкращий

баланс між енергією спікання, ступенем просочення та стабільністю фазових переходів у системі $\text{W}_4\text{C}-\text{Si}$.

Ідентифіковано небезпечні та шкідливі фактори, які впливають на працівника під час виконання НДР, і розроблено комплекс заходів для зниження рівня травматизму та реагування на надзвичайні ситуації.

Виконано розрахунки організаційних заходів під час проведення НДР, встановлено, що коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 2,07 (більше за одиницю), що засвідчує її економічну обґрунтованість.

CONCLUSIONS

As a result of the conducted research, it has been established that the technological parameters of selective laser sintering (SLS), including laser power and scan speed, significantly influence the physical, structural, and mechanical properties of B₄C–Si composites.

An increase in scan speed from 50 to 300 mm/s is associated with a trend toward reduced sample density, attributable to a decrease in the volume of transferred thermal energy, resulting in incomplete particle sintering and ineffective impregnation with molten silicon. This effect is particularly pronounced at lower power levels (20–25 W), where a gradual density reduction is observed, whereas at higher power levels (30–35 W), a wavy or even unstable behavior is noted, linked to overheating and defect formation.

It has been determined that the densest structure is achieved at low scan speeds (50–100 mm/s), where effective wetting of B₄C grains by silicon, formation of a uniform SiC layer, and minimal porosity are observed. In contrast, at scan speeds of 200–300 mm/s, an increase in porosity, the appearance of micro-cracks, and signs of interphase delamination are evident. High-magnification analysis revealed the formation of eutectic phases and a silicon carbide (SiC) layer at the boundaries of B₄C grains, resulting from diffusion and chemical interaction with molten silicon. This confirms the complex nature of phase formation during infiltration. Regarding mechanical properties, the microhardness of the composites also exhibits a clear dependence on printing parameters: maximum values are achieved at 50 mm/s due to high density and robust interphase bonding, while at 300 mm/s, hardness significantly decreases due to porosity and a defective structure.

Overall, the optimal conditions for forming a dense, homogeneous microstructure with high microhardness are a scan speed of 50–100 mm/s at a laser power of 25 W. These parameters provide the best balance between sintering energy, impregnation efficiency, and stability of phase transitions in the B₄C–Si system.

Hazardous and harmful factors affecting personnel during the execution of R&D have been identified, and a comprehensive set of measures has been developed to reduce the incidence of injuries and manage emergency situations.

Organizational effort calculations for R&D execution have been performed, establishing that the coefficient of conditional economic efficiency of the research work is 2.07 (exceeding unity), thereby confirming its economic viability.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Thévenot F. Boron carbide—A comprehensive review [Electronic resource] / Francois Thévenot // Journal of the european ceramic society. – 1990. – Vol. 6, no. 4. – P. 205–225. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(90\)90048-K](https://doi.org/10.1016/0955-2219(90)90048-K). – Title from screen. – Date of access: 26.05.2025.
2. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress [Electronic resource] / Vladislav Domnich [et al.] // Journal of the american ceramic society. – 2011. – Vol. 94, no. 11. – P. 3605–3628. – Mode of access: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x>. – Title from screen. – Date of access: 26.05.2025.
3. Pierson H. O. Handbook of refractory carbides and nitrides: properties, characteristics, processing, and applications / Hugh O. Pierson. – Park Ridge, N.J : Noyes Publications, 1996. – 340 p.
4. Emin D. Structure and single-phase regime of boron carbides [Electronic resource] / David Emin // Physical review B. – 1988. – Vol. 38, no. 9. – P. 6041–6055. – Mode of access: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.38.6041>. – Title from screen. – Date of access: 26.05.2025.
5. Microstructural characterization of boron-rich boron carbide [Electronic resource] / Kelvin Y. Xie [et al.] // Acta materialia. – 2017. – Vol. 136. – P. 202–214. – Vol. 136. – P. 202–214. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.06.063>. – Title from screen. – Date of access: 25.05.2025.
6. Gu D. Laser additive manufacturing of high-performance materials [Electronic resource] / Dongdong Gu. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2015. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46089-4>. – Title from screen. – Date of access: 27.05.2025.
7. Meyers, S. Additive manufacturing of technical ceramics: laser sintering of alumina and silicon carbide [Electronic resource] : Dissertation. –

KU Leuven, 2019. – Mode of access: <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/546808>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

8. Review of selective laser melting: materials and applications [Electronic resource] / C. Y. Yap [et al.] // Applied physics reviews. – 2015. – Vol. 2, no. 4. – P. 041101. – Mode of access: <https://doi.org/10.1063/1.4935926>. – Title from screen. – Date of access: 23.05.2025.

9. Kumar, S., Tanveer, W. H., Chattopadhyaya, S. State-of-the-art review on selective laser sintering technology and future perspectives // Journal of Manufacturing Systems. – 2020. – Vol. 59. – P. 251–267.

10. Bouabbou A. Understanding laser-metal interaction in selective laser melting additive manufacturing through numerical modelling and simulation: a review [Electronic resource] / Abdelkrim Bouabbou, Sebastien Vaudreuil // Virtual and physical prototyping. – 2022. – Vol. 17, no. 3. – P. 543–562. – Mode of access: <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2052488>. – Title from screen. – Date of access: 24.05.2025.

11. Additive manufacturing of ceramic materials by selective laser melting: challenges and opportunities [Electronic resource] / Gao, K., Li, W. // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, No. 15. – P. 24140–24152. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.080>. – Title from screen. – Date of access: 27.05.2025.

12. Selective laser sintering of advanced ceramics: A review [Electronic resource] / Sun, J., Bai, J., Ming, W., Zhu, Y. // Ceramics International. – 2022. – Vol. 48, No. 4. – P. 4462–4479. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.095>. – Title from screen. – Date of access: 27.05.2025.

13. Bai, Y., Williams, C. B. An exploration of binder jetting of ceramics for additive manufacturing // Ceramics International. – 2015. – Vol. 41, No. 7. – P. 8883–8894.

14. Zhai, Y., Wang, H., Jiang, D., Liu, C., Wang, J., Li, Y., та ін. Microstructure and mechanical properties of B₄C–Si composites fabricated by selective laser melting [Electronic resource] / Zhai, Y. [et al.] // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49, No. 13. – P. 22043–22052. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.210>. – Title from screen. – Date of access: 28.05.2025.

15. Selective laser sintering of boron carbide-silicon ceramic composites: densification, microstructure, and properties [Electronic resource] / Ren, X. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2022. – Vol. 42, No. 8. – P. 3734–3745. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.12.015>. – Title from screen. – Date of access: 26.05.2025.

16. Microstructure and mechanical properties of B₄C-based composites: A review [Electronic resource] / Zheng, Y. [et al.] // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47, No. 17. – P. 24735–24753. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.124>. – Title from screen. – Date of access: 29.05.2025.

17. Progress in additive manufacturing of ceramics: A review [Electronic resource] / Zhang, X. [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2020. – Vol. 40, No. 10. – P. 3697–3718. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.006>. – Title from screen. – Date of access: 30.05.2025.

18. A review on laser additive manufacturing of ceramic matrix composites [Electronic resource] / Hu, Z., Li, Z., Chen, M. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 41, No. 6. – P. 3350–3364. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.11.031>. – Title from screen. – Date of access: 30.05.2025.

19. Selective laser sintering of boron carbide (B₄C) and silicon carbide (SiC) ceramic components [Electronic resource] / Hao, L. [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering*

Manufacture. – 2010. – Vol. 224, No. 6. – P. 947–961. – Mode of access: <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1558>. – Title from screen. – Date of access: 29.05.2025.

20. Additive manufacturing of SiC ceramics by selective laser sintering: Microstructure, mechanical properties, and densification [Electronic resource] / Cao, J., Li, Z., Wu, Y. // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – Vol. 41, No. 6. – P. 3396–3403. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.11.044>. – Title from screen. – Date of access: 25.05.2025.

21. Additive manufacturing of advanced ceramics: From powders to products [Electronic resource] / Zou, J., Zhang, Y., Zhang // Journal of Materials Science & Technology. – 2022. – Vol. 112. – P. 193–220. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.10.036>. – Title from screen. – Date of access: 28.05.2025.

22. Boron carbide as a reinforcement of advanced ceramic matrix composites: A review [Electronic resource] / Reyes-Betanzo, C., Gómez, A., Martínez-Sánchez, R., Matías, E. // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49, No. 11. – P. 18770–18792. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.049>. – Title from screen. – Date of access: 26.05.2025.

23. Laser additive manufacturing of ceramics: A review of advances, challenges and prospects [Electronic resource] / Liu, J., Ma, H., Du, Z. // Journal of Advanced Ceramics. – 2021. – Vol. 10, No. 3. – P. 319–348. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40145-020-0411-x>. – Title from screen. – Date of access: 24.05.2025.

24. Upadhyaya, G.S. Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties, and Testing. – William Andrew Publishing, 1998. – 489 p.

25. Samal, P.K., Hwang, J.Y. (Eds.). Powder Metallurgy of Iron and Steel. – Metal Powder Industries Federation, 2017. – 748 p.

26. Про охорону праці [Електронний ресурс] // Офіційний вебпортал парламенту України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>. – Назва з екрана. – Дата перегляду : 01.06.2025.

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

28. Розділ з охорони праці в дипломних роботах: рекомендації до виконання [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О.Г. Левченко, Г.В. Демчук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 16 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30051>. – Назва з екрана. – Дата перегляду : 01.06.2025.

29. Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд : ДБН В.2.5-13-98. – [Чинний від 1999-04-01]. – Київ : Держбуд України, 1999. – 247 с.

30. Державні будівельні норми України. Будівлі та споруди. Будівлі навчальних закладів : ДБН В.2.2-10-2001. – [Чинний від 2002-01-01]. – Київ : Держбуд України, 2001. – 97 с.

31. Санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до повітря робочої зони : СанПіН 2.2.4.548-96. – [Чинний від 1996-11-01]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 1996. – 52 с.

32. Державні будівельні норми України. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення : ДБН В.2.2-28:2010. – [Чинний від 2011-10-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 52 с.

33. Державні будівельні норми України. Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5-28:2018. – [Чинний від 2019-01-01]. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 94 с.

34. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) [Текст]. – 7-е вид. – Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2012. – 856 с.
35. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників : НАПБ Б.01.008-2018. – [Чинний від 2018-03-30]. – Київ : МВС України, 2018. – 24 с.
36. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. – [Чинний від 2017-01-01]. – Київ : Мінрегіон України, 2016. – 34 с.
37. Охорона праці та цивільний захист [Текст] : навч. посіб. / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний [та ін.] ; [за ред. О. Г. Левченка]. – Київ : Основа, 2019. – 472 с.
38. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація [Текст] : ДСТУ EN 133:2005. – [Чинний від 2005-06-14] – Київ : Національний стандарт України, 2006. – 14 с.
39. Safe Design and Operation of Additive Manufacturing Facilities / R. Wilson, S. Patel // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 57. – Article 102911.
40. Personal Protective Equipment - Overview [Electronic resource] // Occupational Safety and Health Administration. – Mode of access: <https://www.osha.gov/personal-protective-equipment>. – Title from screen. – Date of access: 01.06.2025.
41. Основи ергономіки : навч. посібник / В. Г. Брусенцов, О. В. Брусенцов, І. І. Бугайченко [та ін.]. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – 141 с.
42. Магістерська дисертація за освітньо-професійною програмою [Електронний документ] : рекомендації до проєктування : навч. посіб. для 80 студ. спеціальності 132 “Матеріалознавство” освітньої програми “Нанотехнології та комп’ютерний дизайн матеріалів” : 2 частини / НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” ; уклад.: А. М. Степанчук, А. В. Мініцький, С. В. Нараєвський. – Частина 2. – Київ : 93 НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2021. – 87 с. – Режим доступу :

https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/45852/1/Magistr_dys_rekom.pdf. – Назва з
екрана. – Дата перегляду : 02.06.2025.