

**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: «Вплив технологічних параметрів на міцність гранул
зносостійких елементів з карбиду вольфраму»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ФН-11

Пізнюк Ярина Ігорівна _____

Керівник:

асистент, доктор філософії,

Тесля С. Ю. _____

Консультант з економічно-організаційного розділу:

доцент, к. е. н., доцент,

Нараєвський С. В. _____

Консультант з охорони праці:

зав. каф, професор, д. т. н.,

Левченко О. Г. _____

Нормоконтроль:

доцент, к. т. н., доцент,

Бірюкович Л. О. _____

Рецензент:

доцент каф. ФМТО, к. т. н., доцент

Орлов А. К. _____

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

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

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Пізнюк Ярині Ігорівні

1. Тема роботи «Вплив технологічних параметрів на міцність гранул зносостійких елементів з карбиду вольфраму», керівник роботи Тесля Сергій Юрійович, доктор філософії, затверджені наказом університету від 26.05.2025 р. № 1733-с.

2. Термін подання студентом роботи 11.06.2025.

3. Вихідні дані до роботи: на сьогодні основним матеріалом, що використовується в інструментах, де затребувана висока зносостійкість, твердість і міцність, є карбід вольфраму або твердий сплав на його основі. Карбід вольфраму є основним компонентах у алмазовмісних композитах зокрема, де він виконує функцію матриці для захисту зв'язної фази від абразивного зношення внаслідок потрапляння алмазного порошку. Синтез частинок монокарбиду вольфраму WC має

фізичні обмеження їх максимального розміру. Великі розміри гранул карбиду вольфраму (200 мікрон і більше) мають вищу тріщиностійкість, зносостійкість. Тому отримання частинок карбиду вольфраму розміром більше 200 мкм залишається актуальним.

4. Зміст роботи: написання літературного огляду з основними вимогами до алмазовмісних композитів, обґрунтування вибору матеріалу та вплив різних розмірів і параметрів отримання карбиду вольфраму на його механічні властивості. Характеристика вихідних порошків, вибір методу отримання гранул, спікання і легування зразків. Дослідження мікроструктури зразків, випробування їх на міцність, статистична оцінка отриманих результатів за допомогою відповідного ПЗ. Обговорення отриманих результатів. Економічний розділ: 1) розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи; 2) розрахунок економічної ефективності науково-дослідної роботи. Розділ охорони праці: 1) встановлення правових та організаційних основ охорони праці на підприємствах; 2) аналіз можливих небезпек та загроз здоров'ю і життю виконавців науково-дослідної роботи. Формулювання та написання висновків на основі результатів дослідження.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): тема науково дослідницької роботи (слайд); мета і завдання (слайд); актуальність теми роботи (слайд); мезорівень (слайд); легування (слайд); методика отримання (слайд); методика дослідження (слайд); мікроструктура (слайд); міцність на стиск (слайд); висновки (слайд).

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 ОППЦБ		

7. Дата видачі завдання 12.03.2025 _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	12.03.2025	
2	Аналіз літератури за темою	21.04.2025	
3	Підготовка експериментального матеріалу для дослідження	28.04.2025	
4	Дослідження властивостей	09.05.2025	
5	Обробка та оформлення отриманих даних	30.05.2025	
6	Написання розділу охорони праці	04.05.2025	
7	Написання організаційно-економічного розділу	06.05.2025	
8	Оформлення дипломної роботи	10.05.2025	

Студент

Ярина ПІЗНЮК

Керівник

Сергій ТЕСЛЯ

РЕФЕРАТ

Робота вміщує: 71 сторінку; 17 рисунків; 8 таблиць; 52 літературних джерела.

ГРАНУЛИ, КАРБІД ВОЛЬФРАМУ, МІЦНІСТЬ НА СТИСК, СТАТИСТИКА.

Метою роботи є дослідження впливу температури спікання та наявності легування карбідом титану на структуру та міцність на стиск гранул з карбіду вольфраму розміром 400/315 мкм.

Об'єктом дослідження є гранули карбіду вольфраму з розміром більш, ніж 200 мікрон.

Методи дослідження:

- електронна мікроскопія;
- випробування на міцність;
- статистичний аналіз.

Отримані результати: дані випробувань склалися з вибірки 50 частинок для кожної групи гранул і були оброблені статистично. Проведено порівняння з гранулами карбіду вольфраму (реліту), що були отримані високотемпературним синтезом. Встановлено, що руйнівне навантаження гранул, спечених за різних умов, суттєво відрізняється. Найбільшу міцність мали гранули WC – 2 % TiC. Найбільший розкид значень руйнівного навантаження мали гранули спечені з чистого WC за температури 2200 °C. Нижчу міцність та найбільшу однорідність мали гранули WC–W₂C. Подальше збільшення вмісту карбіду титану до 4 % привело до несуттєвого зниження міцності порівняно з WC – 2 % TiC. Синтезовані гранули, незважаючи на нижчу міцність, характеризуються найбільшою стабільністю значень.

ABSTRACT

The work contains: 71 pages; 17 figures; 8 tables; 52 references.

GRANULES, TUNGSTEN CARBIDE, COMPRESSIVE STRENGTH, STATISTICS.

The objective of the present study is to examine the impact of sintering temperature and the presence of titanium carbide alloying on the structure and compressive strength of tungsten carbide granules with a diameter of 400/315 μm .

The object of study is tungsten carbide granules with a size greater than 200 microns.

Research methods:

- electron microscopy;
- strength tests;
- statistical analysis.

The results obtained from the statistical analysis of the test data are as follows: each group of granules was represented by a sample of 50 granules. A comparison was made with tungsten carbide granules obtained by high-temperature synthesis. The destructive load of the granules sintered under different conditions was found to differ significantly. The WC – 2 % TiC granules demonstrated the highest strength. The most significant variation in the values of the destructive load was observed for the particles sintered from pure WC at a temperature of 2200 °C. The WC–W₂C granules exhibited the lowest strength and the highest homogeneity. An increase in the titanium carbide content to 4 % resulted in a slight decrease in strength in comparison with WC – 2 % TiC. The synthesised granules, despite their lower strength, are characterised by the greatest stability of values.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Основні властивості матеріалів у алмазовмісних композитах.....	11
1.2 Карбід вольфраму та реліт	16
1.3 Діаграма стану W–C.....	18
1.4 Методи отримання карбіду вольфраму	21
1.4.1 Безпосереднє насичення вольфраму вуглецем	22
1.4.2 Відновлення оксиду вольфраму вуглецем з подальшою карбідизацією ..	23
1.4.3 Відновлення сполук вольфраму з подальшою карбідизацією	24
1.4.4 Осадження із газової фази.....	25
1.4.5 Електроліз розплавлених солей.....	26
1.4.6 Плазмохімічний метод	27
1.4.7 Метод саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС)	27
1.5 Висновки і постановка задачі дослідження	28
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	30
2.1 Методика проведення експерименту	30
2.1.1 Вибір матеріалів.....	32
2.1.2 Отримання заготовок	32
2.2 Методи дослідження структури та властивостей	33
2.2.1 Дослідження мікроструктури	33
2.2.2 Міцність на стиск	34
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	36
3.1 Дослідження мікроструктури отриманих гранул	36
3.2 Дослідження міцності на стиск.....	38
4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ	43
4.1 Характеристика об'єкту (комплексу) та умови його експлуатації	43
4.2 Аналіз освітленості приміщення	45
4.3 Аналіз впливу шуму та вібрації	47
4.4 Аналіз забрудненості повітря	47
4.5 Електробезпека	49

4.6 Аналіз пожежної безпеки	50
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	52
5.1 Науково-технічна актуальність НДР	52
5.2 Розрахунок витрат на проведення НДР	52
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	53
5.2.2 Єдиний соціальний внесок	55
5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень	55
5.2.4. Енергоносії для проведення досліджень	56
5.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій	56
5.2.6 Витрати на службові відрядження	56
5.2.7 Інші прямі невраховані витрати.....	56
5.2.8 Накладні витрати.....	57
5.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми.....	57
5.3 Науково-технічна ефективність НДР	58
ВИСНОВКИ.....	62
CONCLUSIONS	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	64

ВСТУП

Серед сучасних зносостійких матеріалів карбід вольфраму (WC) посідає чільне місце завдяки поєднанню високої твердості, міцності, термостійкості та стійкості до абразивного зношування. Його широке застосування зумовлене здатністю ефективно працювати в умовах високих температур та навантажень. Одним із використань карбіду вольфраму є бурове обладнання, зокрема елементи алмазобурового інструменту. Одним із ключових чинників ефективності буріння є зносостійкість матеріалу матриці, яка виконує функцію утримання алмазних зерен і забезпечує стабільність геометричних та експлуатаційних характеристик інструменту протягом усього терміну служби.

Традиційно карбід вольфраму використовується у вигляді композиту, в якому тверда фаза WC поєднується з металевою зв'язкою на основі кобальту (WC–Co). Однак, попри чудові механічні характеристики, такі композити мають низку недоліків: високу вартість і дефіцитність кобальту, його хімічну нестійкість, а також схильність до втрати властивостей при тривалому термічному навантаженні.

У зв'язку з цим усе більшої актуальності набуває розробка нових композиційних матеріалів на основі карбіду вольфраму без використання традиційної металевої зв'язки. Композити на основі WC, що не містять кобальту, характеризуються підвищеною термостабільністю, хімічною інертністю та високою твердістю, що робить їх перспективними для застосування у складних умовах експлуатації алмазобурового інструменту. Крім того, відсутність фази зв'язки дозволяє зменшити ймовірність корозійного руйнування та покращити довговічність інструменту.

Таким чином, дослідження властивостей і технологій виготовлення карбіду вольфраму без кобальтової зв'язувальної фази є актуальним і перспективним напрямом. Подальше удосконалення таких композитів сприятиме створенню більш ефективних та ресурсозберіжних бурових систем, здатних працювати у найскладніших умовах.

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Монокарбід вольфраму (WC) вперше синтезував французький хімік Анрі Муассан за допомогою винайденої ним електродугової печі. У своїй книзі «Електрична піч», опублікованій у 1897 році, він описав синтез різних нових тугоплавких сполук, у тому числі карбідів вольфраму, за допомогою цієї печі. Ймовірно, що Муассан отримав суміш WC і W_2C , оскільки точна ідентифікація фаз за допомогою рентгеноструктурного аналізу на той час не була добре розвинена.

Поштовх подальшій розробці матеріалів на основі карбиду вольфраму, його дослідженню дав той факт, що він був обраний як складова твердих сплавів серед різних твердих тугоплавких сполук: розробка твердих сплавів почалася на підприємствах, які виробляли вольфрамові порошки для виготовлення вольфрамових дротів для електричного освітлення [1], [2]. На таких підприємствах були доступні вихідні металеві порошки вольфраму та обладнання для їх науглецювання і спікання (водневі трубчасті печі) для проведення широкомасштабних експериментальних досліджень.

З моменту відкриття карбиду вольфраму і першого використання вольфраму для промислового виробництва твердих сплавів на початку ХХ століття фундаментальні дослідження з хімії та фізики тугоплавких карбідів вольфраму і зносостійких твердих металів проводилися протягом трьох десятиліть в основному в Австрії, Німеччині, США та СРСР [2], [3]. У 1950-х, 1960-х роках інтерес до досліджень твердих сплавів на основі WC, однак, дещо знизився.

На початку 1980-х років, коли з'явилися перші вказівки на можливість створення дрібнозернистого і нанокристалічного карбиду вольфраму для різних застосувань, ситуація змінилася. Цей аспект надзвичайно стимулював дослідження фазових рівноваг у системі «вольфрам-вуглець» та нових методів отримання дрібнодисперсних порошків карбиду вольфраму.

Карбід вольфраму наразі використовується у матеріалах зносостійкого призначення, до яких належать ріжучий інструмент, матриці для протягування

дроту, свердла, у алмазовмісних композитах для бурового інструменту зокрема. Саме про такі композити і піде мова у наступному пункті.

1.1 Основні властивості матеріалів у алмазовмісних композитах

Метали, що використовуються для алмазобурового інструменту, повинні володіти високою зносостійкістю, твердістю і міцністю. Також під час виготовлення бурового алмазного інструменту (шліфувальні камені, шабери, трубчасті свердла, бурильні коронки та ін.) на основі алмазних порошоків важливим є надійне закріплення зерен робочих алмазів у матриці [4].

Матриця забезпечує необхідну форму алмазного інструменту, концентрацію і розподіл алмазів, а також їх міцне утримання, що запобігає потраплянню алмазів до зв'язувальної речовини та, відповідно, її абразивному зношуванню. Тому вона повинна бути достатньо механічно міцною і зносостійкою під час тертя інструменту по оброблюваному матеріалу, достатньо не крихкою.

Поширеною технологією виготовлення алмазних інструментів є просочення суміші дрібнодисперсного порошку (основи, матриці) і великих алмазів металевим розплавом, якому попередньо надають форму. Створюється композитний алмазовмісний матеріал (КАМ).

Композити на основі металевих сплавів – це матеріали, що містять два чи більше елементів, які поєднують для досягнення унікальних фізико-механічних властивостей. Для КАМ карбід вольфраму (WC) є одним з основних компонентів, що забезпечує високу твердість і довговічність композиту. Однак, щоб забезпечити необхідну міцність і стійкість до руйнування, важливо використовувати також і відповідні металеві елементи як фази зв'язки.

Кобальт, який часто відіграє роль зв'язувальної фази, відіграє вирішальну роль у механічних характеристиках композиту. Його здатність утворювати міцні зв'язки з частинками карбиду вольфраму підвищує міцність на зсув, що особливо важливо в умовах інтенсивного механічного навантаження [5]. Завдяки цьому композити на основі WC–Co мають широкий спектр застосування в різних галузях

промисловості, включаючи металообробку, гірничодобувну промисловість та виробництво ріжучих інструментів, алмазобурового зокрема.

Однак використання кобальту призводить до погіршення твердості та стійкості до окислення, корозії, а також підвищеної термостійкості через гірші хімічні характеристики порівняно з карбідною фазою. Крім того, з'являються термічні напруження через різне значення коефіцієнтів теплового розширення [6]–[8]. Під час обробки металу з високою пластичністю, як-от чисте залізо, інструментом зі звичайного WC–Co цементованого карбіду, стружка часто налипає на поверхню ріжучого інструменту, що призводить до серйозного адгезійного зносу. Також доведено, що токсичність суміші карбіду вольфраму та кобальту є вищою, ніж WC і Co окремо, що робить такі тверді сплави канцерогенними для людини (згідно з класифікацією Міжнародного агентства з вивчення раку (IARC)) [9].

Тож незважаючи на ряд переваг, проблеми, пов'язані з використанням кобальту, такі як нестабільність цін, токсичність та погіршення деяких властивостей, останнім часом актуалізувалися у використанні композиту WC–Co, що вимагає виготовлення КАМ на основі карбіду вольфраму без зв'язки або заміни кобальту на інший матеріал. Так, для підвищення зносостійкості в абразивному зношуванні до складу алмазних композиційних матеріалів вводять частинки з високою твердістю, як-от SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC [10], [11]. Ці частинки можуть як замінити карбід вольфраму у композиті, так і стати зв'язкою для гранул WC замість кобальту.

Сплави на основі TiC, хоч і мають деякі переваги, зокрема вищу твердість і жаростійкість, не можуть зрівнятися з карбідом вольфраму за показниками міцності та стійкості до зношування. З усіх тугоплавких карбідів WC з високими мікротвердістю, модулем пружності ($E = 722$ ГПа) і енергією активації руху дислокацій ($U_0 = 1,5$ eV) найбільш пластичний. Межа його міцності на згин – 550 МПа, тоді як у другого за пластичністю карбіду титану – 240–390 МПа. Модуль пружності карбіду титану – приблизно 400 ГПа – майже удвічі менший, ніж WC [12].

Карбід титану (TiC) є одним з найбільш важливих карбідів металів для керамічних композитів на основі карбиду вольфраму завдяки своїм властивостям, таким як висока температура плавлення ($3067\text{ }^{\circ}\text{C}$), висока теплопровідність ($30 \times 10^6\text{ C cm}^{-1}$), висока твердість, високий модуль пружності (410–450 ГПа), висока термодинамічна стабільність разом з низьким коефіцієнтом тертя та густиною [13]. У 1982 році був вперше розроблений WC–TiC–TaC беззв’язувальний цементований карбід. Незважаючи на свої численні переваги, TiC часто має значення в’язкості руйнування близько $5\text{ МПа}\cdot\text{м}^{0.5}$, що є відносно низьким порівняно з іншими матеріалами [14].

Кубічний нітрид бору (c–BN) не зустрічається в природі і був штучно синтезований. Як і алмаз, c–BN складається з двох взаємо проникних гранецентрованих решіток, але одна з них складається з атомів бору, а інша – з атомів азоту. Як і алмаз, це дуже жорстка структура, але в цьому випадку не всі зв’язки між сусідніми атомами є ковалентними. Встановлено, що 25 % зв’язків є іонними. Утворений кубічний нітрид бору є наступною за твердістю речовиною після алмазу і має багато схожих, але не ідентичних властивостей. Твердість змінюється залежно від орієнтації досліджуваної поверхні відносно кристалічної решітки – між 40 ГПа і 55 ГПа (4000 HV і 5500 HV). Таким чином, він набагато твердіший за будь-який з металевих карбідів. Основною перевагою c–BN порівняно з алмазом є його більша стабільність за високих температур на повітрі або в контакті з залізом та іншими металами. Він стабільний на повітрі протягом тривалого часу за температури понад $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15].

Карбід кремнію (SiC) має високу твердість (понад 20 ГПа) разом з відносно високим модулем Юнга 440 ГПа та є дешевшим, ніж WC. SiC є зміцнюючою фазою для багатьох видів кераміки, включаючи WC. Отже, карбід кремнію може бути чудовим кандидатом для покращення спікання композиту. Попри це, механізм спікання карбиду вольфраму з карбідом кремнію все ще недостатньо досліджений, а композити WC–SiC, що займають лише невелику частку ринку, використовувалися обмежено і для спеціалізованих застосувань. Більше того,

відзначається, що додавання SiC призводило до аномального росту зерен карбіду вольфраму, що відповідно, впливає на властивості кінцевого матеріалу [16], [17].

Глинозем (Al_2O_3) широко використовується в промисловості завдяки своїм чудовим властивостям, таким як низька щільність, хороша термічна і хімічна стійкість, висока твердість [18]. Крім того, ціна Al_2O_3 нижча, ніж у Co та багатьох інших оксидів металів, таких як ZrO_2 . Глинозем має нижчу температуру плавлення порівняно з ZrO_2 , що є корисним для зниження температури армованих матеріалів за рахунок утворення рідкої фази. Тому Al_2O_3 може бути економічним і придатним кандидатом для заміни кобальту в матриці WC [19]. Однак, незважаючи на його чудові властивості та потенціал, його використання як конструкційного матеріалу значно ускладнюється через низьку міцність на злам та низьку в'язкість руйнування [18].

Цирконій (ZrO_2) є можливим заміником кобальту завдяки своїм чудовим властивостям, серед яких висока хімічна стабільність до досить високих температур (до близько $1400\text{ }^\circ\text{C}$), висока електрохімічна корозійна стійкість та підвищення в'язкості шляхом трансформаційного зміцнення [20]–[24]. Крім того, багато досліджень показали, що ZrO_2 полегшує спікання сплавів на основі карбіду вольфраму [25]–[27]. Автори [28] припускають, що недоцільно використовувати сам ZrO_2 як добавку для спікання, але цирконій діоксид, стабілізований Y_2O_3 , є ефективним для покращення спікання сплаву на основі WC.

Загальна залежність модуля Юнга від сили стиску для різних матеріалів наведена на рисунку 1.1. Перелічені можливі заміники складників WC і Co у КАМ все ж знаходяться нижче на графіку, ніж карбіди вольфраму. Відповідно практична більшість відомих керамічних матеріалів за своїми фізичними, механічними, термічними властивостями не можуть стати альтеративною WC та його композицій. Основною проблемою щодо заміни WC є підбір такого матеріалу, який володітиме не просто високою твердістю та зносостійкістю, але матиме високий рівень мікропластичності. В даному аспекті карбід вольфраму є беззаперечним лідером в області зносостійких матеріалів, твердих сплавів, та алмазовмісного інструменту. Твердість карбіду WC досить стабільна: під час підвищення

температури від 300 К до 1300 К мікротвердість HV карбіду вольфраму WC зменшується лише від ~ 18 ГПа до ~ 12 ГПа, тоді як HV інших карбідів знижується від максимальної величини до 3–8 ГПа; збільшення температури від 300 К до 1100 К супроводжується помітнішим зниженням твердості WC у приблизно 3 рази, але твердість інших карбідів у тому ж температурному інтервалі знижується ще більше – приблизно у 5 разів [31].

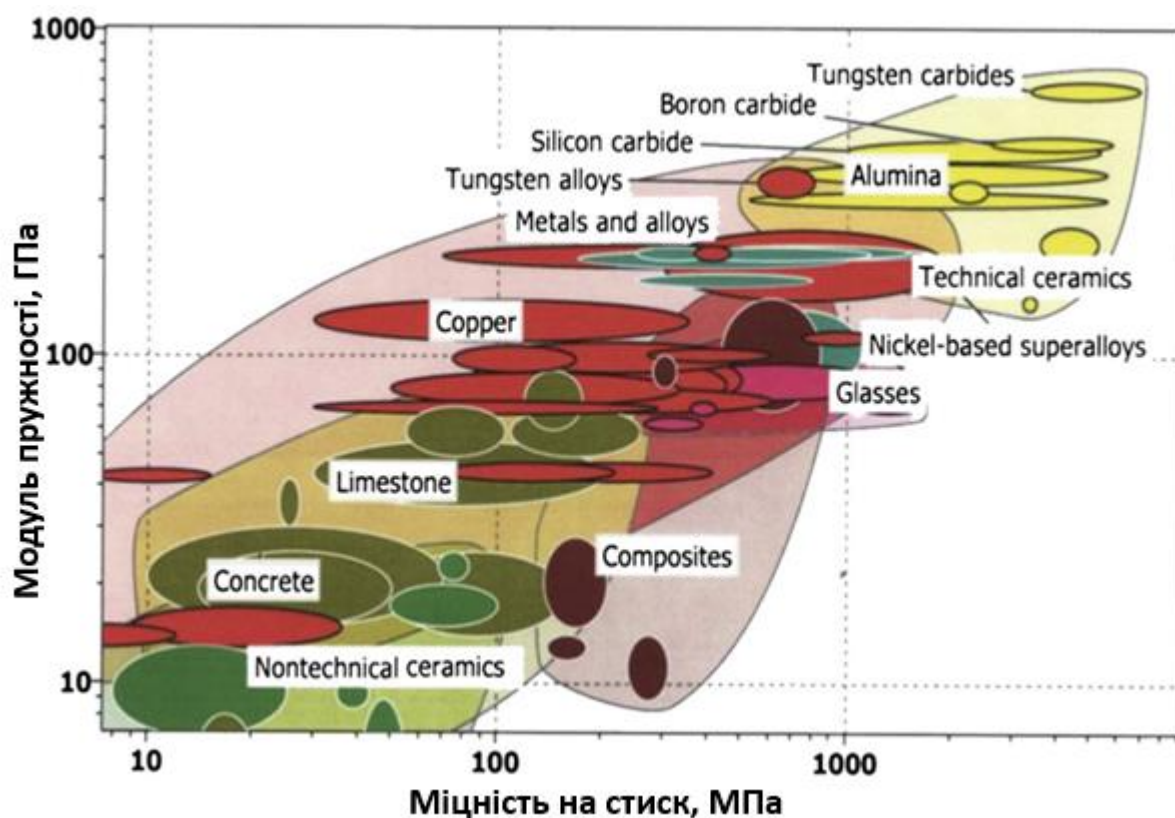


Рисунок 1.1 – Залежність модуля Юнга від сили стиску для деяких матеріалів [29]

У таблиці 1.1 наведено порівняння деяких матеріалів, що використовуються у КАМ. Зважаючи на переваги та недоліки перелічених матеріалів, можна зробити висновок, що поки немає жодного сплаву чи кермету, який сповна замінив би карбід вольфраму в алмазовмісних композитах. Це підтверджується і авторами роботи [32], які вивчали процес зношування карбідів TiC, NbC, WC в умовах зовнішнього тертя і встановили, що максимальну зносостійкість має карбід

вольфраму, на поверхні якого виявлено доволі великі області згладженого матеріалу без слідів глибинного руйнування. Останнє зумовлено здатністю WC витримувати значні знакозмінні навантаження без пошкодження поверхневих шарів, тобто в карбіді вольфраму висока твердість поєднується з достатньою міцністю, що є визначальним у разі втомного виду зносу.

Таблиця 1.1 – Порівняння матеріалів, що використовуються в КАМ [29], [30]

Матеріал	Модуль Юнга, E (ГПа)	Твердість (HV)	Міцність на стиск (МПа)
WC	625–700	2200–3600	3350–6830
Алмаз	1220	10000	9000
WC–Co	400–650	700–2200	3000–9000
Сталь	150–200	240–300	250–1760
SiC	400–460	2300–2600	1000–4500
Al ₂ O ₃	343–390	1200–2060	500–2700
TiC	410–450	2400–3500	3000–5000
cBN	680	4000	6000

1.2 Карбід вольфраму та реліт

Зважаючи на те, що карбід вольфраму є досі незамінним у КАМ, адже має виняткову твердість і зносостійкість, питання поліпшення його властивостей в межах композиту є досить актуальним як для класичного твердого сплаву WC–Co, так і для алмазовмісного композиту без фази-зв'язки. У КАМ широко використовується як монокарбід вольфраму, так і литий карбід вольфраму – реліт WC+W₂C. Однак автори дослідження [33] отримали, що зносостійкість наповнювача з монокарбиду вольфраму була вища, ніж у релітного, за однакових умов використання. У алмазних бурових коронок за використання наповнювача – карбиду вольфраму зернистістю 125/80 мкм, 160/125 мкм, 200/160 мкм і 250/200 мкм підвищення осьового навантаження з 750 даН до 1500 даН призводило до зростання інтенсивності зношування їхньої матриці в 1,43 раза (з 0,154 мм/м до 0,220 мм/м), в 1,37 раза (з 0,133 мм/м до 0,182 мм/м), в 1,27 рази (з 0,121 мм/м до 0,154 мм/м) і в 1,25 рази (з 0,118 мм/м до 0,148 мм/м). У коронок

за використання наповнювача – реліту зернистістю 125/80 мкм, 160/125 мкм, 200/160 мкм і 250/200 мкм підвищення осьового навантаження з 750 даН до 1500 даН приводило до зростання інтенсивності зношування їхньої матриці в 1,5 раза (з 0,178 мм/м до 0,267 мм/м), в 1,42 раза (з 0,148 мм/м до 0,210 мм/м), у 1,35 раза (із 0,129 мм/м до 0,174 мм/м) і в 1,34 раза (з 0,125 мм/м до 0,167 мм/м). Це свідчить про перевагу карбіду вольфраму над релітом, що складається з оболонки монокарбіду вольфраму та ядра дивольфраму карбіду. Це ядро є більш крихким, у таких зернах можуть виникати внутрішні мікротріщини, що значно зменшує міцність WC+W₂C. Структура показана на рисунку 1.2.

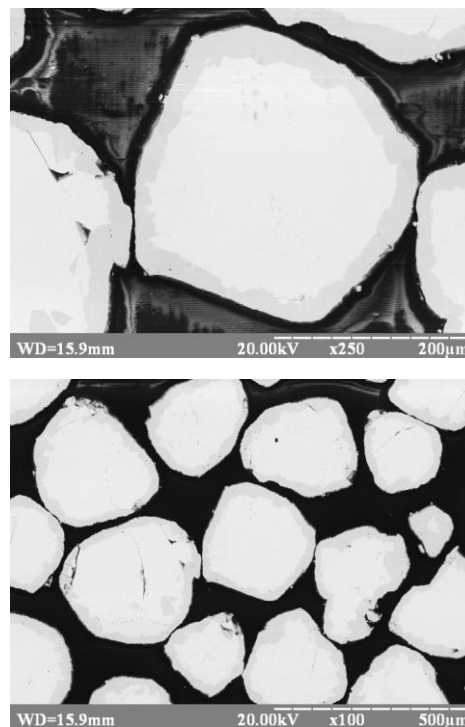


Рисунок 1.2 – Структура WC+W₂C на різних збільшеннях

1.3 Діаграма стану W–C

У системі W–C існують сполуки W₂C і WC. Обидві сполуки мають кілька поліморфних модифікацій, стабільних в різних температурних і концентраційних інтервалах (рис. 1.3).

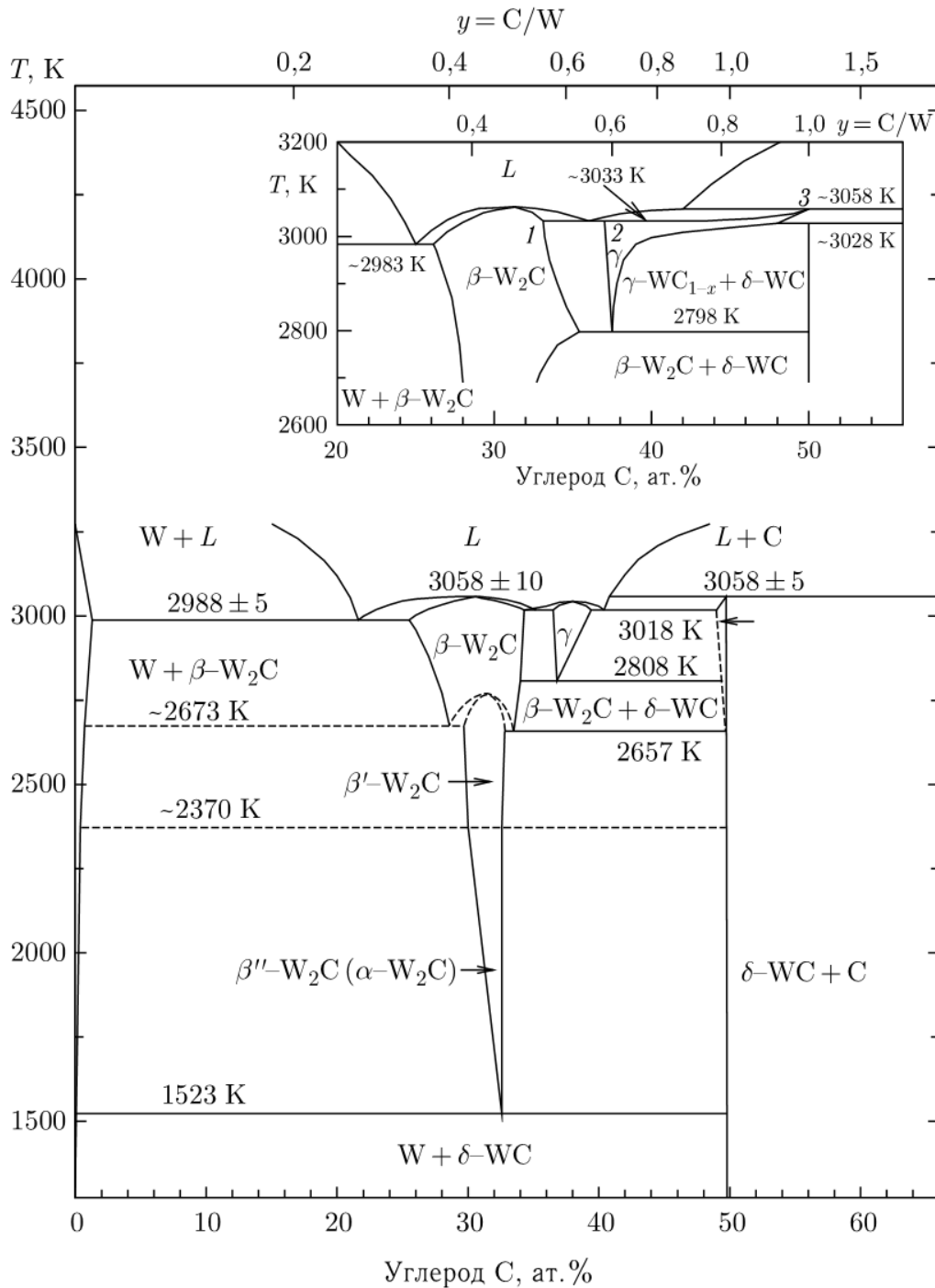


Рисунок 1.3 – Фазова діаграма системи W–C [34]

Металевий вольфрам W має ОЦК структуру. Таку структуру мають також лужні метали, ванадій, ніобій, тантал, хром, залізо α -Fe. Вищий карбід вольфраму WC має гексагональну структуру з параметрами ґратки $a = 0,2906$ нм і $c = 0,28375$ нм. Атоми W і C у WC утворюють прості гексагональні підґратки. Атоми вуглецю знаходяться в центральному положенні тригонально-

призматичних перетинів у підґратці вольфраму. Такий гексагональний WC стабільний між 300 °К і 3030–3050 °К. Структура вищого карбиду вольфраму зображена на рисунку 1.4.

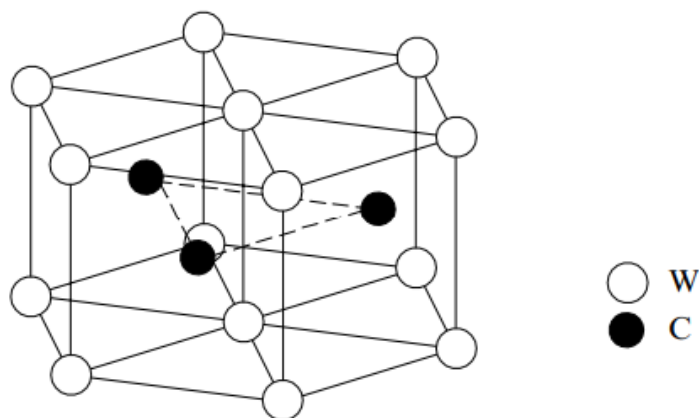


Рисунок 1.4 – Гексагональна ґратка карбиду вольфраму [35]

Нижчий карбід вольфраму β -W₂C (W₂C) спочатку вважався стабільним від 300 °К до температури плавлення. Однак пізніше було доведено, що нижче за 1523 К W₂C не існує в термодинамічній рівновазі, зазнаючи розпаду [31].

Нижчий карбід вольфраму W₂C існує у трьох модифікаціях – низькотемпературній (β''), проміжній (β') і високотемпературній (β), які також позначають як α -, β - і γ -W₂C відповідно [34]. В усіх трьох W₂C атоми W утворюють ГЦК підґратку, в якій половина октаедричних міжвузлів зайнята атомами вуглецю. Залежно від розташування атомів вуглецю, W₂C може бути неупорядкованим (за високих температур) або впорядкованим (за низьких температур). Фаза β' -W₂C має орторомбічну симетрію, хоча і має ГЦК підґратку вольфраму, як і високотемпературна фаза β -W₂C. Структура орторомбічної фази β' -W₂C може бути віднесена до типу структури PbO₂. Фаза β' -W₂C існує в інтервалі температур від 2370 °К до 2670–2750 °К [31]–[34].

Згідно з фазовою діаграмою системи W–C (рис. 1.3), найвисокотемпературніша фаза β -W₂C має гексагональну структуру. Однак не можна

виключити, що $\beta\text{-W}_2\text{C}$ і $\beta'\text{-W}_2\text{C}$ насправді є однією і тією ж гексагональною фазою з неупорядкованою вуглецевою підграткою (рис. 1.5). Неупорядкована гексагональна фаза $\beta\text{-W}_2\text{C}$ має діапазон гомогенності від $\text{WC}_{0,34}$ до $\text{WC}_{0,52}$ і є стабільною в інтервалі 2670–2720 К до температури плавлення (3000–3050 К) [31]–[34].

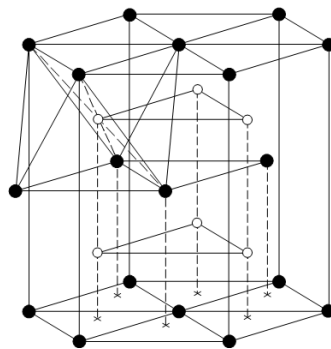


Рисунок 1.5 – Гексагональна гратка нижчого карбіду вольфраму [35]

Низькотемпературна фаза $\beta''\text{-W}_2\text{C}$ має примітивну гексагональну гратку. Нижче 1523 °К фаза $\beta''\text{-W}_2\text{C}$ розпадається на W і вищий карбід $\delta\text{-WC}$. У діапазоні складів між нижчим карбідом вольфраму $\beta\text{-W}_2\text{C}$ і вищим карбідом $\delta\text{-WC}$ існує кубічна фаза $\gamma\text{-WC}_{1-x}$ (також позначається $\beta\text{-WC}$, $\alpha\text{-WC}_{1-x}$ або просто WC_{1-x}). Ця фаза була вперше описана в роботах [36], [37] і спочатку вважалася ще однією модифікацією нижчого карбіду W_2C . Враховуючи, однак, що всі октаедричні проміжки в її ГЦК підгратці вольфраму можуть бути зайняті атомами вуглецю, що призводить до стехіометрії $\gamma\text{-WC}_{1,0}$, правильніше вважати її кубічним поліморфом вищого карбіду вольфраму WC. Дані про температурні межі і межі стабільності складу кубічного карбіду $\gamma\text{-WC}_{1-x}$ є найбільш суперечливими. Однофазний $\gamma\text{-WC}_{1-x}$ існує в діапазоні складів $\text{WC}_{0,58}$ – $\text{WC}_{0,65}$ за температур вищих, ніж 2790–2810 °К [32]–[35]. Крім того, $\gamma\text{-WC}_{1-x}$ може існувати в рівновазі з $\beta\text{-W}_2\text{C}$ або $\delta\text{-WC}$. Фазова діаграма системи W–C вказує на те, що область $\text{WC}+\text{W}_2\text{C}$, згадана вище, існує в нижньому температурному діапазоні, зокрема навколо температури евтектоїдного розпаду, де обидві фази співіснують за певних температурних і концентраційних умов.

1.4 Методи отримання карбїду вольфраму

Залежно від вимог до отримуваних карбїдів щодо складу, вмісту домішок, вартості, застосовують той чи інший метод їх отримання. До основних методів отримання карбїдів належать:

- прямиий синтез з елементів;
- відновлення оксидів металів вуглецем з одночасною карбїдизацією;
- плазмохімічний метод;
- метод СВС;
- осадження з газової фази;
- електроліз розплавлених середовищ.

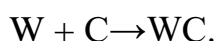
Класифікація методів отримання карбїдів зображена на рисунку 1.6.



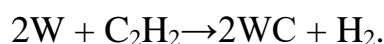
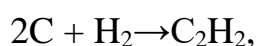
Рисунок 1.6 – Методи отримання карбїду вольфраму [38]

1.4.1 Безпосереднє насичення вольфраму вуглецем

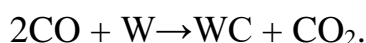
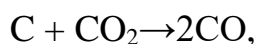
В основі процесу отримання карбіду вольфраму лежить пряма реакція:



Утворення WC відбувається з утворенням на поверхні частинок монокарбіду вольфраму, з якого всередину частинки дифундує вуглець і утворює нижчий шар складу W_2C . Для отримання WC використовують порошок вольфраму, відновлений з його оксиду, і сажу. Узяті в необхідному співвідношенні порошки змішують, брикетують або насипають з утрамбовуванням у графітові контейнери і поміщають у піч [38]. Для захисту порошку від окислення процес синтезу відбувається у середовищі водню, який, взаємодіючи з вуглецем за температури від 1300 °C, утворює ацетилен. Утворення карбіду вольфраму відбувається в основному через газову фазу за рахунок вуглецю, що міститься в газах. Протікають такі реакції карбідизації:



За наявності в середовищі оксиду вуглецю процес відбувається за реакцією:



Зазвичай процес отримання карбіду вольфраму ведуть за температури 1300–1350 °C для дрібнозернистих порошоків вольфраму і 1600 °C для грубозернистих, а час витримки становить від 1 години до 2 годин. Отримані блоки карбіду вольфраму, що злегка запеклися, подрібнюють і просівають через сита [38].

1.4.2 Відновлення оксиду вольфраму вуглецем з подальшою карбідизацією

Цей метод на відміну від вищеописаного поєднує процес відновлення і карбідизації вольфраму, водночас у шихту додають недостатню кількість сажі для утворення карбіду. Відновлення оксиду вольфраму WO_3 відбувається через газову фазу в середовищі CO і водню.

Для промислового виробництва карбідів як вихідну сировину використовують оксиди металів і сажу або чистий графіт. Сажу або графіт, які використовують як відновники і джерела вуглецю для науглецювання відновленого металу, попередньо піддають сушінню або прожарюванню для видалення вологи і легколетких домішок. Наявність вологи під час карбідизації призводить до знеуглецювання одержуваного продукту. Приготовані таким чином вихідні матеріали піддаються ретельному змішуванню в кульовому млині. У такому разі для приготування шихти вуглець беруть з надлишком 5–10 % для поповнення його втрат під час часткового вигорання. Приготовану шихту піддають брикетуванню або щільному пакуванню в графітові патрони. Для отримання карбідів використовують вакуумні печі з графітовим нагрівачем або печі Таммана [38]. В останніх процес ведуть у середовищі водню, осушеного й очищеного від домішок азоту. В основі процесів отримання карбідів лежить відновлення оксидів металів вуглецем і подальше науглецювання ним відновлених металів. За умови отримання карбідів у вакуумі процес відбувається швидше, і продукт виходить чистішим. Вища швидкість процесу в цьому випадку зумовлена видаленням з реакційного простору оксиду вуглецю (II), внаслідок чого його парціальний тиск постійно зберігається набагато меншим за рівноважний. Останнє зміщує рівновагу реакції $MeO + C = MeC + CO$ у бік утворення MeC . Наявність вакууму також сприяє рафінуванню за рахунок більш високої швидкості випаровування домішок. Під час отримання карбідів у середовищі водню певний вплив на швидкість процесу чинить регенерація оксиду вуглецю (II), що відновлює поряд із твердим вуглецем оксиди металів, а також утворення ацетилену C_2H_2 .

Наявність вуглецю в газовій фазі, як-от CO або C₂H₂, значно збільшує реакційну поверхню і тим самим прискорює процеси відновлення і карбідизації. Водночас на швидкість розглянутих процесів впливають температура, дисперсність частинок оксидів металів і відновника, наявність активувальних добавок. Оскільки процес отримання карбідів лімітується дифузією компонентів у твердій фазі, швидкість процесу підвищується з температурою. Отримані за оптимальними режимами карбіди надалі піддають дробленню, розмелу і просіву.

На цокових дробарках зазвичай дроблять спечені зразки з розміром шматків понад 15–20 мм. В іншому разі продукт одразу надходить на подрібнення. Залежно від вимог до кінцевого розміру частинок подрібнення проводять у кульових, вібраційних або планетарних млинах. Просівають матеріали після подрібнення, як правило, на вібраційних ситах [38].

1.4.3 Відновлення сполук вольфраму з подальшою карбідизацією

Ще одним способом отримання карбіду вольфраму є нагрівання суміші вольфрамової кислоти, вольфрамового ангідриду (WO₃) або паравольфрамату амонію ((NH₄)₁₀[H₂W₁₂O₄₂]·xH₂O) у середовищі водню та метану за температури 850–1000 °C.

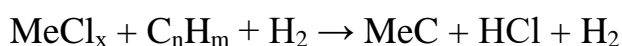
Порошки вольфраму виготовляються шляхом науглецювання металевого вольфрамового порошку, який, у свою чергу, виробляється з вольфрамових руд вольфраміту [(FeMn)WO₄] або вольфрамату кальцію (CaWO₄) за допомогою кількох етапів хіміко-екстракційних металургійних процесів. Основними проміжними продуктами є паравольфрамат амонію і оксиди вольфраму WO₂, WO₃. Оксиди вольфраму отримують з паравольфрамату амонію шляхом прожарювання. Ці оксиди вольфраму згодом відновлюються у водні з метою отримання металевого порошку вольфраму, який потім карбідизується в суміші з вуглецем за високих температур в атмосфері водню з утворенням вольфраму (WC) [29]–[31]. Прожарювання паравольфрамату амонію і відновлення оксидів вольфраму є критично важливими етапами загального процесу, оскільки розмір частинок

оксиду вольфраму має сильний вплив на розмір отриманих порошків металевого вольфраму. Розмір частинок вольфраму, отриманого за допомогою описаних вище процесів, може варіюватися від 0,1 до десятків мікрон [29]–[31].

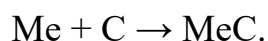
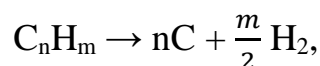
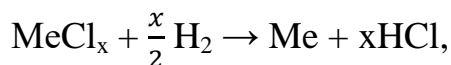
1.4.4 Осадження із газової фази

Отримання карбіду вольфраму з газової фази ґрунтується на розкладанні карбонілу вольфраму за температури 1000 °С. Цей метод отримання карбідів є перспективним для отримання карбідів високого ступеня чистоти у вигляді дрібних частинок, готових виробів, особливо складної конфігурації, монокристалів або щільних покриттів практично на будь-якій підкладці.

Метод осадження карбідів із газової фази ґрунтується на хімічних і фізичних взаємодіях, що виникають за високих температур, які протікають переважно на межах фаз і поблизу поверхні твердого тіла [38], [39]. Стосовно отримання карбідів процес здійснюється за схемою:



Відповідно до цієї схеми, відновником є водень, а вуглець, що утворюється в результаті розкладання вуглеводню, зв'язує метал, що виділяється внаслідок відновлення парів хлориду металу воднем, у карбід. Процес отримання карбіду можна представити у вигляді таких етапів:

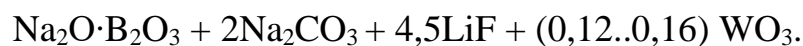


Найчастіше вихідними матеріалами в отриманні карбідів слугують хлориди металів, метан і водень. Процес здійснюється в установках, що складаються з таких

основних частин: системи очищення водню; газового блоку; реактора; вакуумної системи; силового блоку і системи контролю температури та інших технологічних параметрів [38], [39].

1.4.5 Електроліз розплавлених солей

Електроліз суміші розплавлених борату натрію, карбонату натрію, фториду літію і вольфрамового ангідриду дає змогу отримати карбід вольфраму, хоча не має широкого промислового застосування і використовується здебільшого в дослідницькій практиці. В отриманні карбідів електролізом джерелом металу є їхні оксиди, а постачальником вуглецю слугують карбонати лужних металів. Для збільшення розчинності оксидів процес ведуть у розплавах метаборату натрію і хлоридів або фторидів натрію або калію [38]. Так, для отримання карбиду вольфраму електроліт готують із таких компонентів:



Процес ведуть за сили струму 20 А, напруги 3 В і температури 800 °С [38]. У процесі електролізу з карбонатів виділяється вуглець, який, з'єднуючись з металом, утворює відповідний карбід. Осад у вигляді порошку виділяється на графітовому катоді. Під час проведення електролізу виникають труднощі, зумовлені малою стійкістю карбонатів за високої температури та низькою розчинністю оксидів металів, що утворюють карбіди. Як джерело вуглецю доцільніше використовувати карбонати барію і літію, під час електролізу яких виділяється більше вуглецю, ніж під час електролізу карбонату натрію. З даної технології зазвичай отримують порошки з високою питомою поверхнею. За інших рівних умов характерною формою частинок порошоків після електролізу є утворення дендритів різних розмірів.

1.4.6 Плазмохімічний метод

Плазмохімічний метод є перспективним для отримання порошків тугоплавких сполук з розміром частинок менше 1 мкм. Частинки карбідів у такому разі добувають в умовах низькотемпературної плазми, що характеризується температурами порядку 5000–10000 К. Як вихідні речовини використовують метали, їхні оксиди, галогеніди, а також вуглецевмісну сировину у вигляді різних вуглеводнів, інших органічних сполук і, в деяких випадках, вуглець у вигляді графіту. За температур низькотемпературної плазми всі її компоненти переходять в активний стан, унаслідок чого взаємодія між ними відбувається з підвищеною активністю і високими швидкостями утворення цільових продуктів [38]–[40].

Високі температури синтезу дають змогу переводити компоненти в парову фазу, де і відбувається їхня взаємодія. Подальше швидке охолодження парогазової суміші призводить до утворення ультрадисперсних або аморфних частинок. Завдяки високій концентрації енергії хімічні реакції в плазмовому потоці протікають практично миттєво, що забезпечує високу продуктивність методу. Процес можна здійснювати в дугових, високочастотних, надвисокочастотних плазмотронах і установках тліючого розряду [38]–[40]. Проте цей метод для отримання карбідів є досить непрактичним. Найзручніше нині отримувати карбіди в дуговому плазмотроні з використанням витратних електродів, виготовлених із суміші металу і вуглецю.

1.4.7 Метод саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС)

Метод СВС є одним із перспективних методів отримання тугоплавких сполук. В його основі лежить реакція екзотермічної взаємодії двох або кількох хімічних елементів, що протікає в режимі спрямованого горіння. У хімічному відношенні схема СВС-процесу отримання карбідів аналогічна схемі прямого синтезу карбідів з елементів, що проводиться в термічних печах. Для здійснення

процесу СВС використовують порошки металів з розміром частинок до 50 мкм і сажі – до 1 мкм. Чим менший розмір вихідних частинок, тим повніше й інтенсивніше протікає процес синтезу. Для зменшення розміру частинок вихідні порошки металів за необхідності піддають подрібненню. Отримані порошки металів змішують із ламповою або ацетиленою сажею у співвідношеннях, необхідних для отримання карбіду заданого складу в межах області гомогенності. Змішування зазвичай проводять у кульових млинах протягом 4–8 год. Після змішування з метою компактування шихти і збільшення площі контакту між компонентами проводять брикетування її за тиску 50–150 МПа [29], [38], [40]. Розмір і маса брикетів залежать від габаритів робочого простору агрегату для синтезу.

Замість високотемпературних печей використовують прості реактори. Реактор являє собою герметичну циліндричну посудину, здатну працювати у вакуумі (1 Па) і витримувати тиск до 1 ГПа. Внутрішню поверхню посудини футерують вогнетривким матеріалом, в якості якого найчастіше використовують графіт. Процес синтезу може здійснюватися як у вакуумі, так і під тиском інертного газу. Після завантаження шихти в реактор і його герметизації проводять ініціювання шихти (локальне нагрівання) за допомогою спеціального пристрою. Під час цього процесу потужність ініціювання має бути не менше 40 Дж/(см·с) за тривалості до 5 с [29], [40]. Надалі процес відбувається мимовільно в режимі горіння за рахунок інтенсивного тепловиділення, яке характерне під час отриманні сполук, що мають велику ентальпію утворення. Передача теплоти здійснюється від гарячих шарів гарячої суміші до холодних. СВС – процес, що характеризується швидкістю поширення фронту горіння 0,5–15 см/с і температурою 2000–4000 °С [29], [38].

1.5 Висновки і постановка задачі дослідження

За опрацьованими літературними даними було проведено аналіз матеріалів, що використовуються в алмазовмісних композитах. Описано, які саме властивості

повинен мати матеріал для алмазобурового інструменту. Доведено, що WC досі незамінний у твердих сплавах, зважаючи на переваги та недоліки матеріалів, що наразі використовуються у керметах (TiC, Al₂O₃, BN, SiC тощо). Властивості WC включають високу твердість (2200–3600 HV), зносостійкість і термостійкість, які сприяють його широкому використанню. Крім того, карбід вольфраму демонструє чудову хімічну стійкість і низький коефіцієнт тертя, що підвищує його ефективність у різних сферах застосування. Показано, що WC володіє кращими властивостями, ніж реліт WC+W₂C, та розглянуто методи отримання WC.

Метою роботи є дослідження і статистична оцінка впливу різних технологічних параметрів (часу, температури спікання) на властивості гранул карбиду вольфраму, та дослідження можливого підвищення міцності внаслідок легування порошку WC карбідом титану. Основою для порівняння порошків карбиду вольфраму буде реліт WC+W₂C. Оскільки отримання нанокристалічного WC досі є достатньо енергозатратним та складним через необхідність запобігання швидкому росту зерен під час спікання, вирішено синтезувати гранули карбиду вольфраму з розміром більш, ніж 200 мкм. Збільшення розмірів зерен карбиду вольфраму у твердих сплавах приводить до зниження їх міцності, модуля пружності, але разом з тим підвищує тріщиностійкість та ударну в'язкість [41]–[42], збільшує зносостійкість інструменту ударної дії. Для досягнення визначеної мети сформульовано такі задачі:

- а) отримати гранули WC за різних температур спікання та леговані TiC;
- б) дослідити мікроструктуру отриманих зразків;
- в) дослідити фазовий та хімічний склад;
- г) дослідити міцність гранул;
- д) провести статистичний аналіз результатів.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика проведення експерименту

З огляду на доступність та можливість отримання гранул карбіду вольфраму шляхом прямого синтезу, вирішено обрати цей метод з певними модифікаціями. Загальна схема отримання карбідів синтезом з елементів зображена на рисунку 2.1.

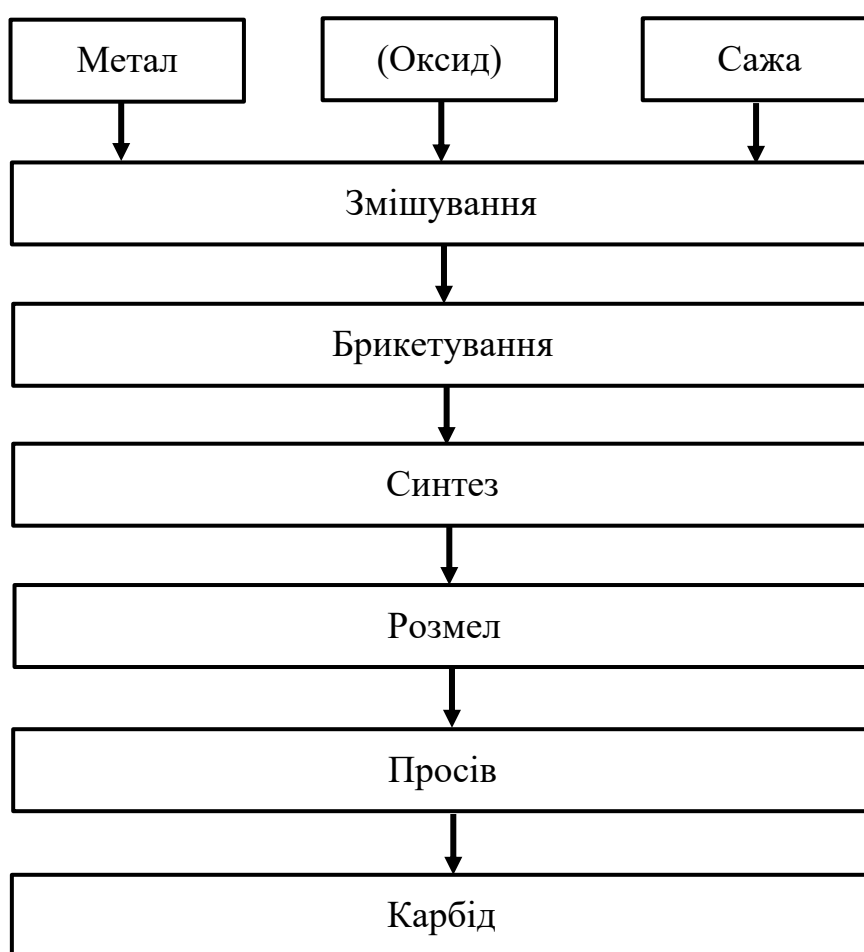


Рисунок 2.1 – Технологічна схема отримання карбідів синтезом з елементів

У нашому випадку карбід вольфраму уже готовий як вихідний порошок, а метою є добути гранули більші, ніж 200 мкм для дослідження їх міцності. Для цього є потреба у додаткових етапах, як-от руйнування брикетів (рис. 2.2). Зазвичай для подрібнення застосовують механічні методи подрібнення в кульових млинах. Оскільки за даної технології можливо більш чітко керувати розміром гранул.

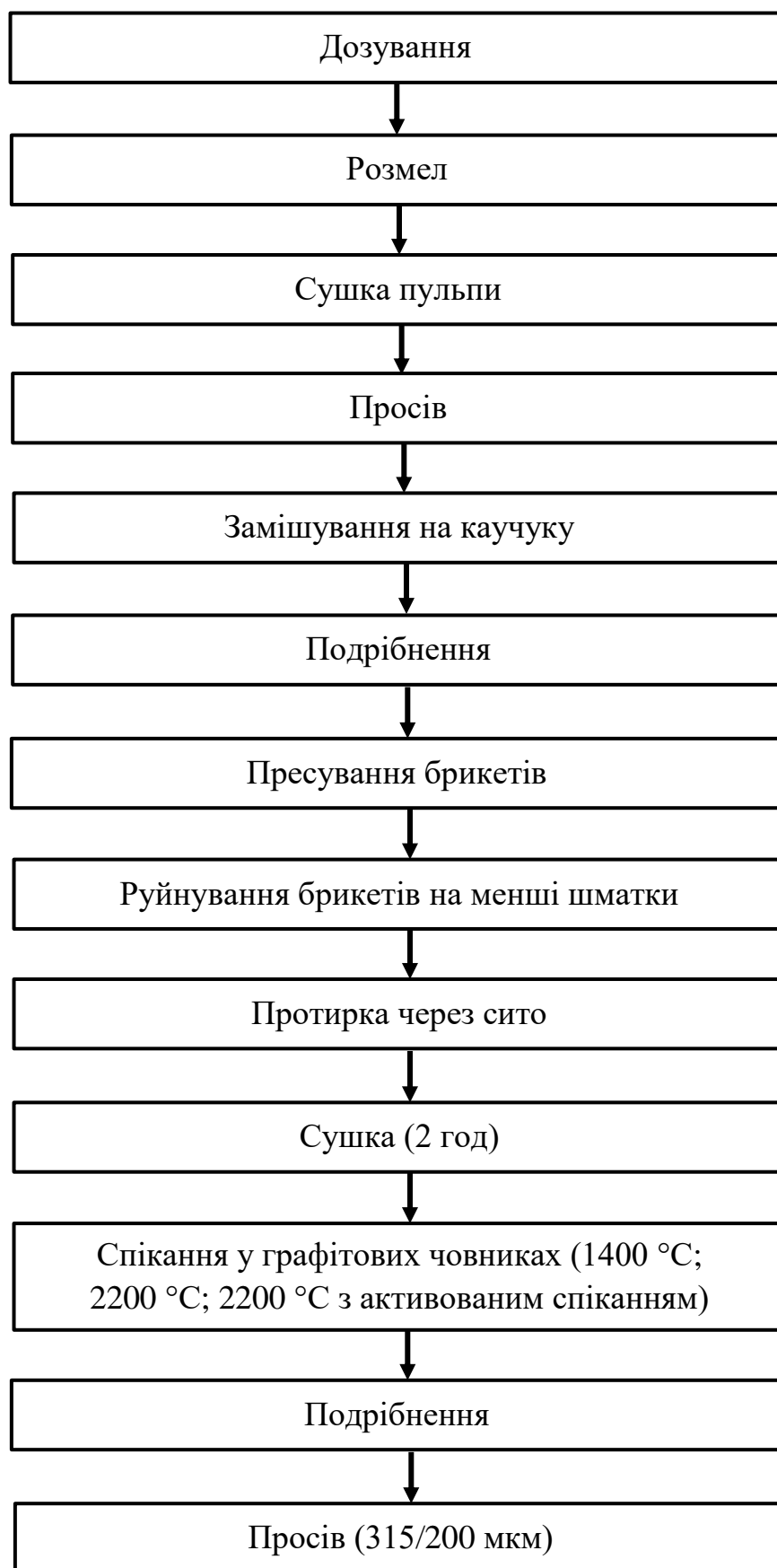


Рисунок 2.2 – Методика отримання гранул карбиду вольфраму

2.1.1 Вибір матеріалів

У якості вихідних матеріалів використовували порошки WC з розміром частинок $1,5 \pm 0,5$ мкм з вмістом загального вуглецю 6,19 % та порошок карбиду титану TiC як активатор процесу спікання.

2.1.2 Отримання заготовок

Порошки подрібнювали в кульовому млині протягом 48 годин в етиловому спирті. Співвідношення суміші до розмельних куль було 1:3. Кількість доданого спирту становила 300 мл на 1 кг суміші. Отриману суміш сушили дві години. Висушену після розмелу суміш просівали через сито з розміром комірки 0,1 мм.

Порошкову суміш після осушення було змішано з пластифікатором, яким був 5 % розчин синтетичного каучуку в бензині. З готових сумішей пресували брикети циліндричної форми діаметром 50 мм, висотою 70 мм.

Для формування виробу було використано одноосьове пресування у сталевих прес-формах під високим тиском, що становив 200 МПа. Спресовані циліндри руйнували за допомогою преса, а отримані в результаті руйнування шматки протирали через сито з коміркою 1000 мкм для утворення гранул. Гранули висушували в сушильній шафі 2 години за температури 120 °C для підвищення їх міцності.

Потім гранули висипали у графітові пластини, пластини поміщали в графітові човники і накривали кришкою з графіту (рис. 2.3). Гранули спікали у високотемпературній печі безперервної дії з графітовим нагрівачем в атмосфері водню за температури 2200 °C (1400 °C). Час ізотермічної витримки зразків за температури спікання становив 220 хв. Після спікання зразки очищали від графіту, подрібнювали, просівали на ситі 450/315 мкм. У результаті було отримано наступні матеріали: WC–W₂C, що були синтезовані за температури 2200 °C, 210 хв з частинок вольфраму відповідного розміру, ці гранули були базою для порівняння; WC, отриманий за 1400 °C, 20 хв; WC за температури 2200 °C, 220 хв;

WC – 2 % TiC, добутий за 2200 °C, 220 хв; WC – 4 % TiC, добутий за 2200 °C, 220 хв.



a

б

a – гранули карбіду вольфраму у зруйнованих брикетах;

б – гранули карбіду вольфраму, поміщені в графітовий човник

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд гранул з карбіду вольфраму

Порошок монокарбіду вольфраму активували шляхом механічного подрібнення за рахунок внесення дефектів, що є рушійною силою спікання. Також для збільшення міцності гранул карбіду вольфраму було активовано процес їх спікання шляхом легування їх карбідом титану в кількості 2 мас. % та 4 мас. %.

2.2 Методи дослідження структури та властивостей

2.2.1 Дослідження мікроструктури

Аналіз мікроструктури досліджуваних зразків проведено за допомогою електронного мікроскопа Zeiss EVO–50XVP (рис. 2.4). Цей скануючий електронний мікроскоп належить до методу трьох вимірної візуалізації зображень

з високою роздільною здатністю за допомогою сканування зразка сфокусованим променем електронів. Після цього зображення забарвлюється автоматично або вручну залежно від елемента досліджуваного зразка.

Отримання кінцевого зображення на електронному мікроскопі здійснюється детекторами вторинних та відбитих електронів. З метою аналізу топології поверхні гранул було використано сканування в режимі вторинних електронів. Це дозволяє проаналізувати формування зеренної структури та морфології синтезованих частино карбиду вольфраму.



Рисунок 2.4 – Скануючий електронний мікроскоп Zeiss EVO–50XVP [44]

2.2.2 Міцність на стиск

Міцність на стиск (а фактично зусилля руйнування зразків) було виміряно на установці DDA–33 (рис. 2.5).



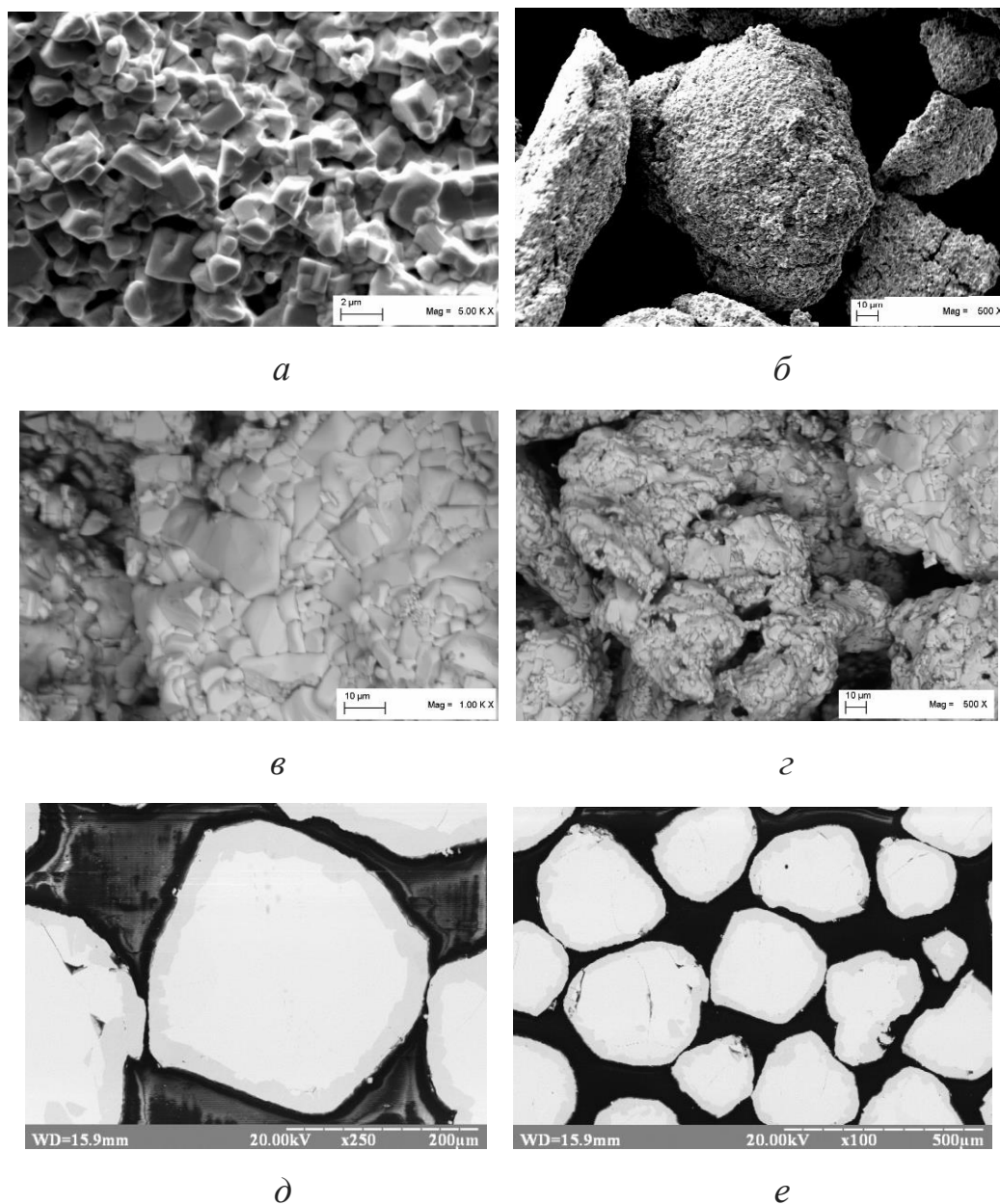
Рисунок 2.5 – Прилад для вимірювання міцності порошоків DDA–33

Показник статичної міцності порошоків під час стискання визначали за допомогою приладу ДДА–33А. Окремі гранули розміщували між лейкосапфіровими опорами діаметром 5 мм та висотою 1,5 мм і піддавали руйнуванню. Рекомендована кількість зерен складає 50 шт. Навантаження на опори в приладі подається в автоматичному режимі із записом руйнівного зусилля в інтервалі 0,05–180 Н. Згідно з ДСТУ 3292–95 [45], за руйнівне навантаження приймається досягнуте максимальне зусилля стиску безпосередньо в момент руйнування одиначної гранули.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Дослідження мікроструктури отриманих гранул

Зображення мікроструктури досліджуваних гранул, отриманих методом сканувальної електронної мікроскопії, показано на рисунку 3.1.

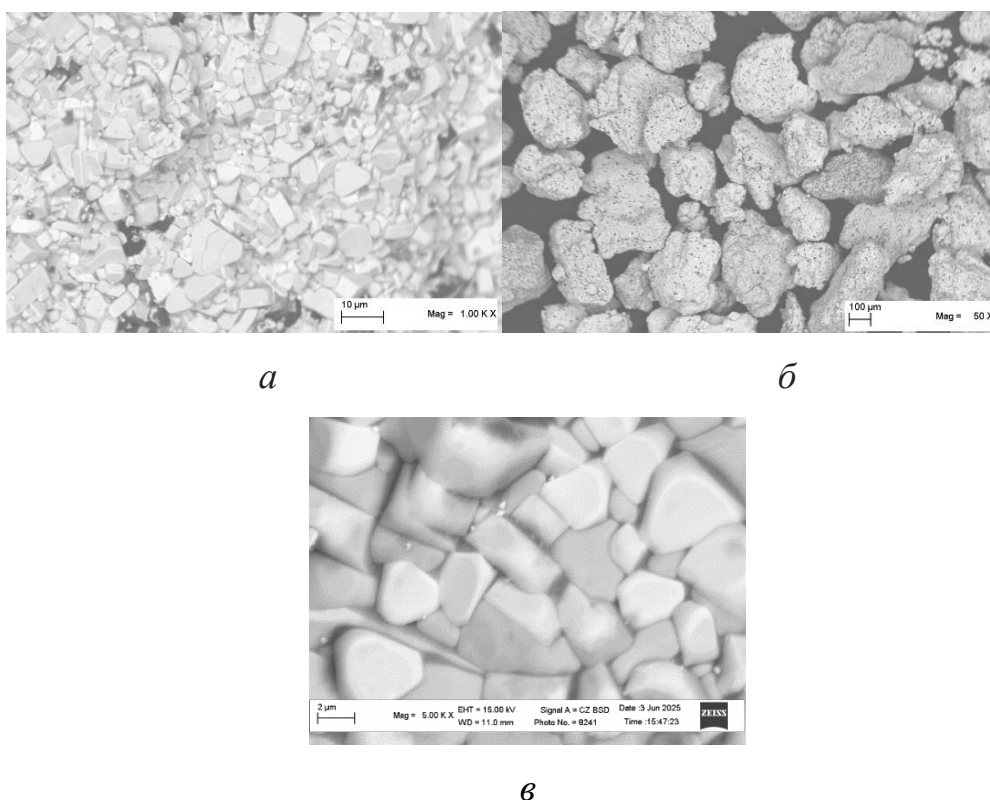


a, б – гранули карбіду вольфраму WC, спечені за температури 1400 °C;
в, г – гранули карбіду вольфраму WC, спечені за температури 2200 °C;

д, е – синтезований WC+W₂C

Рисунок 3.1 – Мікроструктура досліджуваних гранул карбіду вольфраму

Як добре видно з рисунку 3.1, *б*, спечені за температури 1400 °С гранули добре сформовані, складаються з дрібних мікрокристалів WC з усіченими гранями та вершинами. Мікрокристали в гранулі хаотично орієнтовані один відносно одного (рис. 3.1, *а*) і мають однорідну структуру, не спостерігаються зерна аномальних розмірів. Спінання за високої температури 2200 °С (рис. 3.1, *в*, *г*) призвело до аномального росту всіх зерен WC, розміри зерен становлять від 2 мкм до 20 мкм. На знімку видно темні включення – радше за все, це частинки сажі. На рисунку 3.1, *д*, *е* зображені частинки реліту з фазою W₂C всередині та оболонкою з WC. Бачимо, що W₂C досить крихкий, з мікротріщинами, викликаними внутрішніми напруженнями. Гранули карбіду вольфраму, леговані карбідом титану, зображено на рисунку 3.2.



а, *б* – гранули карбіду вольфраму WC, спечені за температури 2200 °С і леговані TiC (2 мас. %); *в* – гранули карбіду вольфраму WC, спечені за температури 2200 °С і леговані TiC (4 мас. %)

Рисунок 3.2 – Мікроструктура досліджуваних гранул карбіду вольфраму

З рисунка 3.2, *а* видно, що деякі зерна WC за рахунок збірної рекристалізації суттєво збільшилися в розмірах (майже у 10 разів) порівняно з зернами з рисунку 3.2, *в*. Поверхня гранул з чистого карбїду вольфраму є досить згладженою. Натомість, додавання карбїду титану змінює поверхневу енергію карбїду вольфраму і така частинка вже утворюється з поверхнею, що складається з огранених мікрокристалів.

З рисунків 3.2, *а*, *б*, *в* бачимо, що мікрокристали карбїду вольфраму почали змінювати форму. Так, ребра на цих зернах скруглилися, вершини стали усіченими. У композиті з такими частинками, відповідно, буде менше концентраторів напружень. З нерівномірності кольору та контрасту сірого на рисунку 3.2, *а* можемо зробити висновок, що не всі частинки рівномірно вкриті карбїдом титану, тоді як рисунок 3.2, *в*, де відсоток TiC вищий (4 мас. %), має більш однорідне забарвлення. Проте для точнішої оцінки необхідний фазовий аналіз.

3.2 Дослідження міцності на стиск

Міцність на стиск (а фактично руйнівне навантаження) гранул WC було виміряно на установці DDA-33. Для дослідження впливу температури спікання, впливу наявності легування карбїдом титану на величину руйнуючого навантаження гранул отримані дані були статистично оброблені за допомогою програми JASP, яка випущена під ліцензією Free and Open Source [45]. У таблиці 3.1 наведено результати випробувань на стиск гранул мезоелементів WC, WC-TiC. Для кожного стовпця таблиці, що відповідає різним умовам спікання гранул карбїду вольфраму, було розраховано основні статистичні показники: середнє значення, медіану, стандартне відхилення, мінімальне та максимальне значення (табл. 3.2).

Таблиця 3.1 – Величина руйнуючого навантаження гранул, Н/гранула

№	Синтезовані	Спечені			
	WC-W ₂ C +315 мкм 2200 °C, 240 хв	WC 400/315 мкм 1400 °C, 20 хв	WC 400/315 мкм 2200 °C, 270 хв	WC-TiC(2 %) 400/315 мкм 2200 °C, 270 хв	WC-TiC(4 %) 400/315 мкм 2200 °C, 270 хв
Позн	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
1	7,00	2,42	0,58	3,79	1,39
2	8,00	5,02	0,58	6,02	5,09
3	8,33	6,74	0,62	6,41	8,42
4	9,00	7,22	0,65	8,30	8,93
5	9,67	7,8	0,72	9,86	12,1
6	9,67	7,8	0,72	16,50	12,3
7	10,00	8,95	0,74	17,20	13,5
8	10,00	9,02	0,82	17,70	16,2
9	10,00	9,34	0,82	20,40	17,5
10	11,00	9,79	1,06	21,00	17,7
11	11,70	9,98	1,25	21,10	19,2
12	11,70	11,9	1,39	22,60	19,5
13	12,00	12,3	1,39	23,20	20,2
14	12,30	13	1,44	27,50	20,3
15	12,30	14,2	1,66	27,60	20,6
16	12,30	14,7	1,78	28,30	20,9
17	12,30	15,5	1,8	29,40	22,2
18	12,70	17,1	1,87	31,90	22,8
19	12,70	18,5	2,09	32,90	24,1
20	13,30	19,3	3,07	33,20	25
21	13,3	21,0	4,61	33,50	25,5
22	13,70	21,2	5,04	33,70	26
23	13,70	22	6,82	34,40	26,23
24	14,00	22,4	6,96	34,70	27
25	14,00	22,4	7,01	35,1	27
26	14,30	23	7,54	35,2	27,4

Продовження таблиці 3.1

№	СИНТЕЗОВАНИ	СПЕЧЕНІ			
	WC–W ₂ C +315 мкм 2200 °C, 240 хв	WC 400/315 мкм 1400 °C, 20 хв	WC 400/315 мкм 2200 °C, 270 хв	WC–TiC(2 %) 400/315 мкм 2200 °C, 220 хв	WC–TiC(4 %) 400/315 мкм 2200 °C, 270 хв
Позн	М ₁	М ₂	М ₃	М ₄	М ₅
27	14,70	24,2	8,71	35,40	28,2
28	15,00	24,2	10,9	35,70	28,23
29	15,00	24,5	11,6	36,20	28,5
30	15,30	26,5	13,9	37,9	28,7
31	15,30	26,9	14,6	38,3	28,8
32	15,70	28,8	15,2	39,2	30
33	16,00	31,6	18,7	41,4	30,6
34	17,00	31,9	20,3	41,8	31
35	17,00	33,2	21,9	41,8	31,1
36	17,30	34,22	23,8	41,9	32,4
37	17,30	34,6	25,2	44,9	34,3
38	17,70	35,5	26,8	47,2	34,9
39	18,00	36,2	29,4	50,6	35,9
40	18,30	42,1	33,6	51,0	36,9
41	19,70	45,8	36,0	55,0	38,1
42	20,00	46,8	39,0	61,6	39,1
43	20,70	47,0	40,3	62,4	40,2
44	21,0	47,5	43,0	64,0	44,7
45	22,00	48,3	43,5	65,1	47,1
46	24,30	65,4	56,9	67,4	49,7
47	25,30	83,2	61,8	68,9	54,4
48	27,00	120,7	69,0	71,6	57,4
49	27,00	150,4	71,6	79,7	61,8
50	35,70	150,8	73,6	88,5	63,7

На рисунку 3.3 зображено розподіл гранул за зростанням значення руйнівного навантаження.

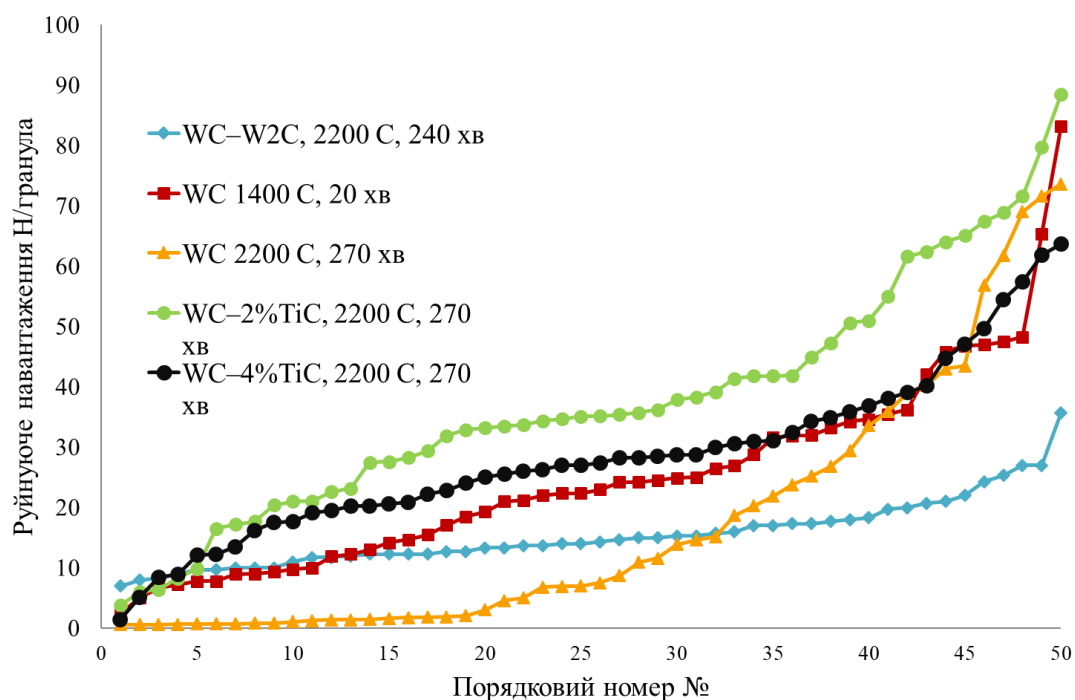


Рисунок 3.3 – Сортвані за зростанням значення руйнуючого навантаження гранули карбиду вольфраму

Таблиця 3.2 – Описова статистика результатів випробувань

Склад, параметри	Середнє (mean), Н	Стандартне відхилення (std), Н	Медіана (50 %)	Мінімум	Максимум
WC-W ₂ C, 2200 °C, 210 хв	15,43	5,60	14,15	7,00	35,7
WC – 1400 °C, 20 хв	25,06	16,13	22,70	2,42	83,2
WC – 2200 °C, 220 хв	17,45	21,06	7,28	0,58	73,6
WC-2 % TiC 2200 °C, 220 хв	37,58	19,52	35,15	3,79	88,5
WC-4 % TiC 2200 °C 220 хв	28,46	13,74	27,20	1,39	63,7

Середнє руйнівне навантаження для синтезованих гранул є найнижчим серед усіх розглянутих. Це пояснюється використанням більш однорідних вихідних матеріалів, які практично не містять дефектів та не потребують прикладання значних зусиль для їх розділення після спікання (є лише точкові контакти). Виготовлення синтезованих гранул WC–W₂C дає змогу отримати однорідний розподіл міцності, але водночас, треба зауважити, міцність є нижчою, ніж у монокарбїду вольфраму.

З рисунка бачимо, що навіть невисока температура спікання карбїду вольфраму WC забезпечує збільшення міцності гранул в 1,5 раза. Низька температура спікання дозволяє уникнути аномального росту зерен WC з міцністю, яка перевищує міцність гранул WC–W₂C, але такі гранули мають неоднорідні властивості.

Збільшення температури спікання чистого карбїду вольфраму до 2200 °C призводить до збільшення коефіцієнту варіації до 1,2 внаслідок присутності аномально великих зерен та їх хаотичної орієнтації, значного розкиду зерен за розмірами.

Як видно з таблиці 3.2, легування малими добавками зміцнює порошок карбїду вольфраму. Наявність легуючого доданка TiC дозволяє не тільки активувати процес спікання, а й зменшити розкид між найбільшим і найменшим значенням руйнівного навантаження за рахунок більшої кількості дрібніших зерен, як бачимо на прикладі WC–2 % TiC, що має найвищу середню міцність (39,81 Н/гранула) порівняно з чистим WC (25,84 Н/гранула) за тих самих температурних умов. Це вказує на зміцнювальний ефект TiC за цього відсотка.

Збільшення вмісту TiC до 4 мас. % призводить до зменшення руйнівного навантаження (26,65 Н/гранула) порівняно з 2 мас. % TiC, і майже повертає його до рівня чистого WC (2200 °C спікання). Це свідчить про те, що існує оптимальний відсоток TiC для досягнення потрібних міцнісних властивостей, і його надлишок може мати негативний вплив або вказувати на інші явища у структурі.

4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Охорона праці є ключовим аспектом гарантування безпеки та здоров'я працівників у виробничому середовищі. Її основна мета – запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням шляхом впровадження належних заходів і дотримання стандартів. Ефективна охорона праці сприяє підвищенню продуктивності, покращенню робочого клімату та зменшенню витрат на компенсацію наслідків нещасних випадків.

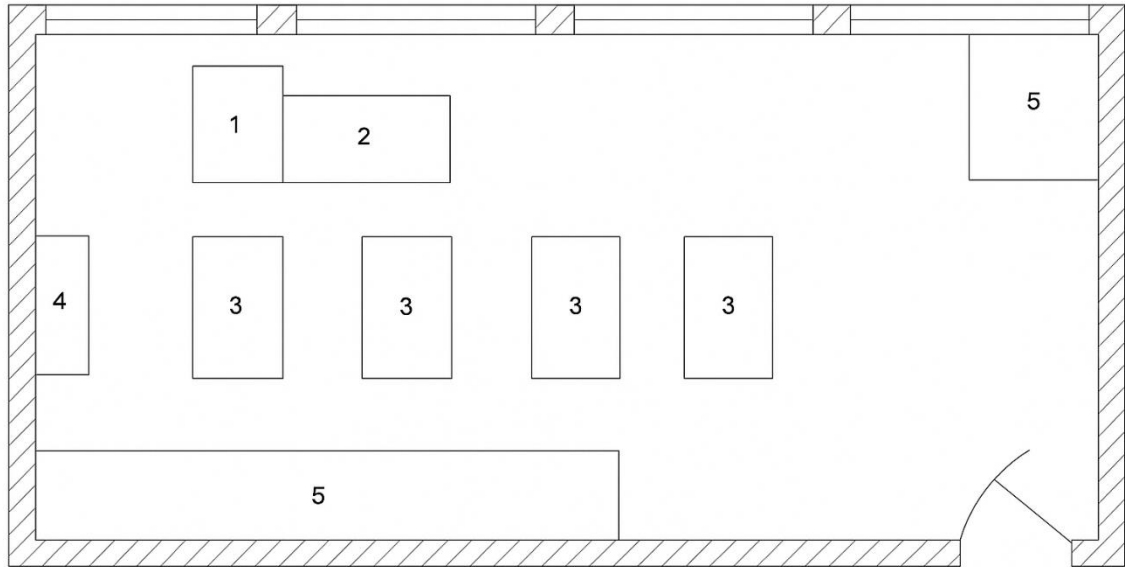
Цей розділ дипломної роботи присвячений дослідженню теоретичних аспектів охорони праці та практичних рекомендацій щодо її впровадження на підприємствах. Об'єктом дослідження є нормативно-правова база, методи оцінки ризиків, навчання персоналу та системи контролю безпеки.

Особливу увагу приділено аналізу небезпечних факторів, що виникають у роботі з гранулами WC (вольфрамового карбиду), матеріалом, який широко використовується для виготовлення інструментів, що піддаються високим навантаженням. Оскільки обробка WC пов'язана з високими температурами та механічними навантаженнями, необхідно розробити заходи для мінімізації ризиків, пов'язаних з його використанням, з метою забезпечення безпеки працівників.

Основною метою є визначення основних небезпек та розробка рекомендацій щодо їх усунення для створення безпечних умов праці в лабораторії Інституту надтвердих матеріалів.

4.1 Характеристика об'єкту (комплексу) та умови його експлуатації

Дослідження отриманих зразків проводилося в дослідницькій лабораторії інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля (рис. 4.1). Відповідно до основних вимог до будівель виробничого призначення, які викладені в ДБН В.2.2-28:2010, висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа – 15 м³ та 4,5 м² відповідно на кожного працівника [46].



1 – робоче місце з ПК; 2 – робоче місце зі сканувальним електронним мікроскопом; 3 – робочий стіл; 4 – сушильна шафа; 5 – робоче місце з ПК

Рисунок 4.1 – Схематичне зображення дослідницької лабораторії в Інституті надтвердих матеріалів

Відповідно до основних вимог до будівель виробничого призначення, які викладені в ДБН В.2.2-28:2010, висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа – 15 м³ та 4,5 м² відповідно на кожного працівника [46].

Дослідницька лабораторія займає площу 48 м², на якій працюють 2 людини. На кожного робітника припадає 24 м². З цього робимо висновок, що місце відповідає вимогам.

Категорія важкості робіт, які виконуються в цехах, Іб – легка, адже робота виконується сидячи і не потребує фізичного напруження згідно з [47].

Параметри мікроклімату у лабораторіях і цехах підтримуються на такому рівні: температура – 10–20 С в холодний період та 19–25 °С – в теплий період року; вологість – 40–60 %; швидкість руху повітря не більше 0,2 м/с. Значення показників температури, відносної вологості та швидкості руху повітря для легкої Іб категорії робіт у лабораторіях і цехах не відповідають оптимальним вимогам, але

знаходяться в області допустимих для непостійного робочого місця в холодний та теплий період року, окрім, звісно, значень температури у холодний період року, що є недопустимо низькими. Пропонується використання індивідуальних нагрівачів повітря у безпосередній зоні найчастішого робочого місця працівника аж до досягнення допустимих значень [47].

4.2 Аналіз освітленості приміщення

Освітлення на робочих місцях є важливим фактором, що впливає на продуктивність праці та збереження здоров'я працівників. Воно поділяється на три основні види: природне, штучне та суміщене.

Природне освітлення – це освітлення, яке надходить до приміщення через світлові прорізи (вікна, люки, світлові дахові конструкції). Воно має найбільш сприятливий спектральний склад для зору, що знижує навантаження на очі працівника і сприяє комфортним умовам праці. Природне освітлення може бути бічним, верхнім або комбінованим залежно від конструктивних особливостей приміщення. Оцінка ефективності природного освітлення проводиться за допомогою коефіцієнта природної освітленості (КПО). Охорона праці вимагає, щоб цей показник відповідав нормам для кожного типу приміщення, забезпечуючи безпечні умови роботи.

Штучне освітлення поділяється на два види: загальне і комбіноване. Загальне освітлення забезпечує рівномірне освітлення всього приміщення, що дозволяє уникнути тіней та забезпечити належну видимість. Воно розміщується, як правило, на стелі або в іншій верхній зоні приміщення. У випадку недостатньої природної освітленості на робочих місцях, загальне освітлення є основним джерелом світла.

Комбіноване освітлення – це поєднання загального освітлення з місцевим, яке використовується для освітлення конкретних робочих місць або об'єктів, що потребують більшої яскравості. Такий підхід є важливим з точки зору охорони праці, оскільки він дозволяє забезпечити оптимальні умови для виконання специфічних завдань, зменшуючи ризик втоми та помилок у роботі.

Суміщене освітлення застосовується в тих випадках, коли природного освітлення недостатньо для забезпечення нормальних умов праці. У таких ситуаціях штучне освітлення доповнює природне, щоб забезпечити належну видимість у робочих зонах. Недостатнє освітлення є однією з основних причин перенапруження зору, що призводить до швидкої втоми, зниження продуктивності праці та можливих помилок. Згідно з нормами охорони праці, недостатня освітленість може призвести до аварійних ситуацій або травм. Проблеми з зором можуть також погіршувати ефективність роботи та загальний стан працівників.

Надмірне освітлення, у свою чергу, також має негативні наслідки. Воно може викликати засліплення, болі в очах і швидку втомленість, що також впливає на якість праці. Згідно з нормативами, рівень освітленості на робочих місцях має бути оптимальним і відповідати вимогам безпеки, що дозволяє зберегти зорове здоров'я працівників та забезпечити ефективну роботу без ризику негативних наслідків для здоров'я.

Для створення сприятливих умов зорової роботи рівень освітленості робочих поверхонь має відповідати гігієнічним нормам для даного виду роботи згідно з [48], а саме:

- освітленість на робочій поверхні і в межах навколишнього простору повинна розподілятися по можливості рівномірно;
- на робочій поверхні не повинно бути різких тіней;
- блиск повинен бути відсутнім в полі зору;
- освітленість повинна забезпечувати необхідний спектральний склад світла для правильної кольоропередачі.

У лабораторії проводяться зорові роботи середньої точності (розряд зорової роботи IV), підрозряд зорової роботи «в».

У лабораторії проведення НДР освітлення є суміщеним. Кількість світильників в приміщенні становить 8 шт., в кожному світильнику знаходиться по 2 лампи. У лабораторії є 2 вікна загальною площею 12 м². Забезпечується нормоване значення освітленості.

4.3 Аналіз впливу шуму та вібрації

Шум – це неприємний або надмірний звук, який може виникати в різних виробничих умовах, зокрема на підприємствах, будівництві, у транспорті, а також у промислових зонах. Шум має значний вплив на організм людини, особливо за високих рівнів інтенсивності та тривалого впливу.

Вібрації – це механічні коливання, що передаються через поверхні, з якими контактує працівник (підлога, сидіння, інструменти). Вони можуть бути різного характеру: загальні, локальні, низькочастотні або високочастотні. Вібрації, як і шум, можуть призводити до різноманітних порушень здоров'я.

Головним шумовим агрегатом у лабораторії є сушильна шафа. Характер шуму тональний. Сушильна шафа працює цілодобово.

Фактичний шум складає 30 ДБА. Згідно з нормами [49], загальний рівень шуму в приміщенні лабораторії не повинен перевищувати 75 ДБА. Оскільки шум в лабораторії не перевищує встановлені норми, то шкідливого впливу на людину не відбувається.

4.4 Аналіз забрудненості повітря

Вплив пилу на організм людини залежить від складу пилу та його походження. Підвищена концентрація пилу в повітрі на робочих місцях є серйозною небезпекою для здоров'я працівників. Існують кілька можливих наслідків для організму в разі тривалого впливу пилу, наприклад, нетоксичний пил може викликати подразнення шкіри, також може з'явитися захворювання шкіри – дерматит. Якщо пил проникає в легені, то він може викликати таке професійне захворювання, як пневмоконіоз. Чистота повітря в лабораторії визначається вмістом пилу і шкідливих речовин. В повітрі робочої зони періодично контролюється вміст шкідливих речовин в повітрі лабораторії. У цій роботі можливим джерелом пилу є карбід вольфраму, але, оскільки порошки опрацьовуються у невеликих кількостях, для захисту органів дихання від

потрапляння в них пилю рекомендовано використовувати протипилові респіратори [50]. Протипилові респіратори є засобами захисту органів дихання від різних типів аерозолів. У складі протипилових респіраторів використовуються фільтрувальні матеріали з тонкими волокнами, які забезпечують ефективне утримання пилю та інших шкідливих частинок (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Приклад протипилового респіратора

Для локалізації шкідливих речовин також встановлена механічна витяжна вентиляція марки С4.70-3.2 (рис. 4.3).

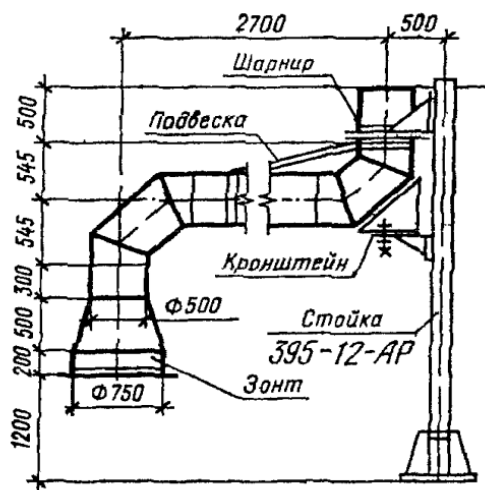


Рисунок 4.3 – Вентиляція марки С4.70-3.2

Під час роботи витяжної системи чисте повітря потрапляє в приміщення через нещільності в конструкціях. Це є суттєвим недоліком, оскільки неорганізований потік холодного повітря (протяги) можуть викликати простудні

захворювання, тому, як уже сказано вище, в холодний період року необхідна додаткова подача тепла.

4.5 Електробезпека

Живлення всього обладнання в лабораторії забезпечується від мережі з напругою 220 В. Для підвищення безпеки всі електричні пристрої, зокрема мікроскопи, комп'ютери та інше обладнання, оснащені посиленою ізоляцією. Це допомагає знижувати ризик ураження електричним струмом. Крім того, комп'ютери мають закриті корпуси, що захищають їх від проникнення пилу, тим самим зменшуючи ймовірність коротких замикань чи інших несправностей, пов'язаних із забрудненнями.

Лабораторія Інституту надтвердих матеріалів належить до приміщень, що не мають підвищеної небезпеки з точки зору електробезпеки. Однак, навіть в таких приміщеннях, на дотримання норм електробезпеки слід звертати особливу увагу. Важливими факторами, що впливають на рівень небезпеки, є вологість і температура повітря у приміщенні, а також електропровідність підлоги і стін. У разі високої вологості або наявності в повітрі хімічних речовин, електропровідного пилу чи вологи, ризик ураження електричним струмом може значно зростати.

Безпека експлуатації роботи електроустаткування гарантується такими захисними заходами, як періодична перевірка стану ізоляції та недоступність струмоведучих частин [51]. На дію електричного ураження впливає ряд факторів: величина струму (1 мА), характер струму (струм перемінний), частота струму (50 Гц), шлях струму в організмі, тривалість дії струму, стан організму, виробниче середовище.

Під час розробки захисних заходів вважають небезпечним струм у 25 мА, за якого важко самотійно відірватись від провідника, а струм величиною 100 мА може призвести до смертельного наслідку. У лабораторії, де проводилися дослідження, правильно виконане захисне заземлення корпусів, електроустаткування і приладів. Розташування робочих місць таке, що

виключається можливість одночасного доторкання до корпусів, електроустаткування і приладів.

Можливими випадками ураження електричним струмом у лабораторії є ураження під час пошкодження ізоляції і заземлення мікроскопу та електричного обладнання або під час пошкодження розетки.

4.6 Аналіз пожежної безпеки

Категорія приміщень та будівель за вибухопожежною та пожежною небезпекою визначає вимоги щодо конструктивних та планувальних рішень промислових об'єктів. Ці вимоги враховують показники пожежовибухонебезпечності речовин та матеріалів, що знаходяться або використовуються у приміщенні. Згідно зі стандартом ДСТУ Б В.1.1-36:2016, приміщення поділяються на п'ять категорій (А, Б, В, Г, Д) [52].

Залежно від категорії приміщень, лабораторії можуть відноситися до різних категорій вибухопожежної небезпеки. Наприклад, категорія Д включає лабораторії для приготування порошкових сумішей та проведення досліджень, де знаходяться негорючі матеріали. Категорія В може включати лабораторії з апаратами високого тиску, вакуумними печами та дробарками, де наявні негорючі порошки у розжареному стані та може випускатися горючий газ, наприклад, водень.

У приміщеннях, де розташовані лабораторії, критично важливо забезпечити надійну систему пожежної сигналізації. Ця система повинна складатися з технічних засобів, що виконують такі функції, як виявлення пожежі, передача сигналу про пожежу, а також автоматичне включення систем пожежогасіння та протидимного захисту.

Залежно від схеми підключення сповіщувачів, системи пожежної сигналізації можуть бути променевими (де сповіщувачі встановлюються по одній лінії і виявляють зміни в рівні світла або тепла) або кільцевими, де сповіщувачі розміщуються по колу і забезпечують більшу надійність у випадку пошкодження однієї лінії зв'язку. Залежно від чутливості і технології виготовлення, сповіщувачі

можуть бути оснащені біметалами, термопарами, напівпровідниками або іншими матеріалами, що дозволяє підвищити точність виявлення пожежі на різних етапах її розвитку. Це також знижує ймовірність хибних спрацьовувань сигналізації.

Кожна лабораторія також має мати схему евакуації людей під час пожежі (рис. 4.4).

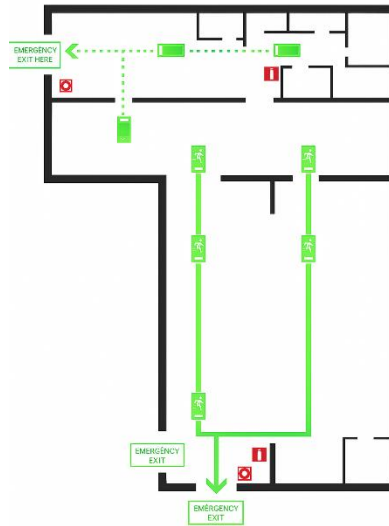


Рисунок 4.4 – План евакуації

У Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ України значна частина обладнання працює на електриці, тому основним засобом гасіння пожежі є вогнегасники типу ОУ-2. Для виявлення пожеж у лабораторіях використовується автоматична пожежна сигналізація, яка включає плавкові датчики. Ці датчики активуються під час підвищення температури, що спричиняє плавлення їхніх елементів, і спрацьовують, сповіщаючи про виникнення пожежі.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Науково-технічна актуальність НДР

Карбід вольфраму – це універсальний матеріал, відомий своїми винятковими властивостями, що робить його цінним у різних галузях промисловості. Його переваги включають високу твердість (2200–3600 за Віккерсом), зносостійкість і термостійкість, які сприяють його широкому використанню в ріжучих інструментах і абразивних матеріалах. Крім того, карбід вольфраму демонструє чудову хімічну стійкість і низький коефіцієнт тертя, що підвищує його ефективність у різних сферах застосування, зокрема в алмазному буровому інструменті.

Зважаючи на переваги та недоліки матеріалів, що наразі використовуються у керметах (титан карбід, глинозем, нітрид бору, карбід кремнію тощо) можна зробити висновок, що поки немає жодного сплаву чи кермету, який сповна замінив би карбід вольфраму в алмазовмісних композитах.

Особливо економічно вигідним є застосування WC без кобальтової зв'язки, адже є певні проблеми, пов'язані з використанням Co, такі як, в першу чергу, нестабільність цін, токсичність та погіршення деяких властивостей, що вимагає виготовлення КАМ на основі карбиду вольфраму без зв'язки або заміни кобальту.

Ці фактори в сукупності доводять, що питання поліпшення властивостей карбиду вольфраму в межах алмазовмісного композиту є досить актуальним як для класичного цементованого карбиду WC–Co, так і для КАМ без зв'язної фази.

Гранули карбиду вольфраму, що досліджувались, повинні мати досить високу твердість та міцність, адже дослідження спрямоване на отримання властивостей потенційно кращих, ніж у вже відомих матеріалів.

5.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Розрахунок усіх витрат організації, яка виконує науково-дослідну роботу (НДР) з реалізації певної теми, є необхідною умовою для визначення її собівартості

або кошторисної вартості. Цей розрахунок дозволяє детально проаналізувати усі етапи проекту та забезпечити належне фінансування на кожному етапі досліджень. Кошторис формується безпосередньо виконавцем робіт на основі розробленого календарного плану, що деталізує строки та етапи проведення досліджень. Після цього кошторис має бути затверджений замовником або органом, який здійснює фінансування.

Кошторис зазвичай розробляється до початку виконання робіт і є плановим документом, тобто, його мета – передбачити всі можливі витрати на майбутній період. Він охоплює різноманітні статті витрат, зокрема, витрати на оплату праці, матеріали, обладнання та інші необхідні ресурси. Визначення величини витрат по кожній статті кошторисної вартості (калькуляції собівартості) допомагає отримати точну картину фінансових потреб на кожен етап проекту та забезпечити ефективне управління фінансами під час реалізації НДР. Перелік типових статей кошторисної вартості НДР подано нижче.

5.2.1 Витрати на оплату праці

Витрати, які входять до цієї категорії, включають заробітну плату працівників усіх рівнів, зайнятих виконанням завдань, що стосуються конкретної теми. Для тем, що фінансуються за рахунок державного бюджету, прибуток не враховується, тому в цю категорію витрат включають лише основну заробітну плату, без премій та інших додаткових виплат, які здійснюються з прибутку. Це означає, що додаткові виплати, які можуть бути пов'язані з досягненням фінансових результатів або виконанням плану, не враховуються у загальному розрахунку.

Розрахунок витрат на оплату праці здійснюється на основі даних про трудомісткість окремих робіт, що виконуються в рамках теми. Трудомісткість визначається в людино-днях (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Трудомісткість робіт з теми

Найменування робіт за темою дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людиноднів		
	Старший науковий співробітник	Інженер-дослідник	Лаборант
1. Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	2	2	–
2. Аналіз науково-технічних публікацій по темі дослідження	–	15	–
3. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	2	5	2
4. Розробка методики проведення дослідження	3	3	3
5. Проведення дослідження	–	20	6
6. Обговорення результатів НДР	2	15	–
Усього	9	60	11

Згідно з цими даними, розраховується денна заробітна плата для кожного працівника, яка визначається як відношення місячного окладу до умовного числа днів у місяці. Для науково-дослідних робіт (НДР) з п'ятиденним робочим тижнем це становить 21,2 дня.

Далі, щоб визначити загальний фонд заробітної плати, перемножують середньоденну заробітну плату для кожної категорії працівників на відповідну планову трудомісткість робіт. Завдяки цьому можна точно спланувати витрати на оплату праці всіх виконавців, враховуючи як їхню роль у виконанні завдання, так і загальну трудомісткість робіт, що має бути виконана. Результати розрахунків наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
Старший науковий співробітник	9	17828	840,9	7568,1
Інженер-дослідник	60	9840	464,2	27852
Лаборант	11	7473	352,5	3877,5
Разом оплата праці з теми				39297,6

5.2.2 Єдиний соціальний внесок

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

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22 ,$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

У цьому випадку ЄСВ становитиме:

$$\text{ЄСВ} = 39297,6 \cdot 0,22 = 8645,5 \text{ грн.}$$

5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Витрати на матеріали, які необхідні для проведення даної НДР, вираховуються з ціни одиниці і загальної кількості використаного матеріалу. Результати розрахунків зведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн	Сума, грн
1. Карбід вольфраму	6,1 % С	кг	0,9	1900	1710
2. Карбід титану		кг	0,06	1400	84
Загальні витрати на матеріали					1794

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

$$T_B = 1794 \cdot 0,1 = 179,4 \text{ грн.}$$

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

$$B_M = 1794 + 179,4 = 1973,4 \text{ грн.}$$

5.2.4. Енергоносії для проведення досліджень

У цій роботі використовувались уже наявні засоби обладнання, включаючи піч безперервної дії, гідравлічний прес лабораторний ПГ–100А, прилад для вимірювання міцності порошків DDA–33, мікроскоп сканувальний електронний Zeiss EVO–50XVP.

5.2.5 Вартість послуг сторонніх організацій

Витрат на послуги сторонніх організацій не передбачено, адже усе обладнання було наявне.

5.2.6 Витрати на службові відрядження

Витрати на виробничо-наукові відрядження не передбачені.

5.2.7 Інші прямі невраховані витрати

У цій статті поєднуються всі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей. Під час проведення роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10 % від суми врахованих витрат на виконання НДР.

$$I_B = (ЗП + ЄСВ + B_M) \cdot 0,1 ,$$

Наразі I_B буде становити:

$$I_B = (39297,6 + 8645,5 + 1973,4) \cdot 0,1 = 4991,65 \text{ грн.}$$

5.2.8 Накладні витрати

Накладні витрати включаються до калькуляції кошторисної вартості теми пропорційно обсягам витрат на оплату праці основних виконавців або пропорційно сумі прямих витрат на виконання теми досліджень по нормативам організації-виконавця цього дослідження.

Ця стаття включає витрати, пов'язані з управлінням організацією-виконавцем теми, витрати на винахідництво і раціоналізацію; витрати на амортизацію основних засобів; витрати на науково-технічну інформацію; витрати на забезпечення нормальних умов праці і техніки безпеки; витрати на оплату послуг банків; податки, збори та інші обов'язкові платежі і витрати тощо.

Для цієї роботи накладні витрати пропорційні сумі прямих витрат на рівні 20 %.

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

Наразі H_B буде становити:

$$H_B = (39297,6 + 8645,5 + 1973,4 + 4991,65) \cdot 0,2 = 10981,63 \text{ грн.}$$

5.2.9 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

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

Таблиця 5.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1. Витрати на оплату праці	39297,6	Відповідно до розрахунків
2. Єдиний соціальний внесок	8645,5	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3. Матеріали для проведення досліджень	1973,4	Відповідно до розрахунків
4. Енергоносії для проведення досліджень	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5. Спецобладнання для наукових цілей	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6. Вартість послуг сторонніх організацій	–	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7. Витрати на службові відрядження	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8. Інші невраховані прямі витрати по темі	4991,65	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9. Накладні витрати	10981,63	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10. Усього витрат по темі	65889,78	Сума попередніх статей

5.3 Науково-технічна ефективність НДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту НДР необхідний для визначення доцільності проведення даної роботи. Проте він може бути розрахований лише по НДР, які безпосередньо спрямовані на створення нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції, а також створення нових конструкцій.

Для визначення річного економічного ефекту скористаємося бальною системою оцінювання економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може мати значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може мати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;
- д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може мати такі значення:

- а) робота є аналізом, узагальненням або класифікацією відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;
- б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;
- в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;
- г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;
- д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може мати такі значення:

- а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;
- б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;
- в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;
- г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;
- д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

У нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно таблиці 5.5 становить:

$$B = 3 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 5 = 225$$

Таблиця 5.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	5
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4. Складність дослідження	K_4	Робота виконується декількома підрозділами, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

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

де 500 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3);

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

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 225 - 0,3 \cdot 65889,78 = 92733,1 \text{ грн.}$$

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

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{V_{\text{НДР}}}.$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = \frac{92733,1}{65889,78} = 1,407$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 1,407 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

ВИСНОВКИ

1. Під час виконання дипломної роботи було проаналізовано літературу за темою. Розглянуто інформацію про властивості поширених складових алмазовмісних композитів, розглянуто роль матриці і фази зв'язки у них. Показано, що карбід вольфраму є незамінним матеріалом, що виконує роль зносостійкої матриці. Розглянуто методи отримання карбіду вольфраму.

2. За різних умов спікання отримано зразки гранул карбіду вольфраму, також отримано гранули, леговані карбідом титану.

3. Проаналізовано мікроструктуру, міцність на стиск отриманих зразків та порівняно їх з синтезованим карбідом вольфраму (інакше релітом).

4. Встановлено, що руйнівне навантаження гранул, спечених за різних умов, суттєво відрізняється. Найбільшу міцність мали гранули WC–2 % TiC. Найбільший розкид значень руйнівного навантаження мали гранули спечені з чистого WC за температури 2200 °C. Нижчу міцність та найбільшу однорідність мали гранули WC–W₂C. Подальше збільшення вмісту карбіду титану до 4 % привело до несуттєвого зниження міцності порівняно з WC–2 % TiC. Синтезовані гранули, незважаючи на нижчу міцність, характеризуються найбільшою стабільністю значень.

5. Проведено аналіз загроз здоров'ю і життю працівників, що брали участь у виконанні роботи. Сформовано і описано заходи безпеки, ідентифіковано ймовірний шкідливий вплив на працівника під час виконання завдання. Розроблено варіанти протидії небажаному і шкідливому впливу на організм працівника.

6. Опрацьовано методики розрахунків і проектування економічно-організаційного завдання, завдяки якому було побудовано кошторис на проведення науково-дослідницької роботи. Розраховано науково-технічну ефективність роботи і доведено, що вона є економічно вигідною.

CONCLUSIONS

1. In the course of the thesis, the literature on the topic was analyzed. Information on the properties of common components of diamond-containing composites was reviewed, and the role of the matrix and binder phase in them was considered. It is shown that tungsten carbide is an indispensable material that serves as a wear-resistant matrix. The methods of producing tungsten carbide are considered.

2. Under different sintering conditions, samples of tungsten carbide particles were obtained, and samples with addition of titanium carbide were obtained.

3. The microstructure and compressive strength of the obtained samples were analyzed and comparison with the synthesized tungsten carbide was made.

4. It was found that the destructive load of the particles sintered under different conditions differs significantly. WC–2 % TiC granules had the highest strength. The largest variation in the values of the destructive load was observed for the particles sintered from pure WC at 2200 °C. The lowest strength and highest homogeneity were observed in WC–W₂C granules. A further increase in the titanium carbide content to 4 % led to a slight decrease in strength compared to WC–2 % TiC. The synthesized particles, despite their lower strength, are characterized by the highest stability of values.

5. An analysis of threats to the health and life of workers involved in the work was carried out. Safety measures are formulated and described, and possible harmful effects on the worker during the task are identified. Options for counteracting undesirable and harmful effects on the employee's body have been developed.

6. The methods of calculation and design of the economic and organizational task were developed, thanks to which an estimate for the research work was built. The scientific and technical efficiency of the work is calculated and it is proved that it is economically viable.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Upadhyaya G. S. Cemented tungsten carbides: Production, properties, and testing [Text] / G. S. Upadhyaya. – Westwood, N. J : Noyes Publications, 1998. – 403 p.
2. Konyashin I. Approaching the 100th anniversary of the Hardmetal invention: From first WC-Co samples towards modern advanced Hardmetal grades [Electronic resource] / I. Konyashin // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2023. – Vol. 111. – P. 106–113. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106113>. – Title from screen. – Date of access: 09.05.2025.
3. Konyashin I. History of cemented carbides in the Soviet Union [Electronic resource] / I. Konyashin, L. I. Klyachko // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2015. – Vol. 49. – P. 9–26. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.08.011>. – Title from screen. – Date of access: 09.05.2025.
4. The effect of matrix and processed material properties on the performance of diamond drills [Electronic resource] / V. P. Umansky, N. P. Brodnikovskiy, O. A. Bashchenko [et al.] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2020. – Vol. 59, № 7–8. – P. 477–482. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00181-2>. – Title from screen. – Date of access: 09.06.2025.
5. Properties, advantages, and prospects of using cobalt-free composites based on tungsten carbide in industry [Electronic resource] / Sherzod Kurbanbekov, Yernat Kozhakhmetov, Mazhyn Skakov [et al.] // Materials. – 2024. – Vol. 18(1). – P. 129. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/ma18010129>. – Title from screen. – Date of access: 10.05.2025.
6. Krawitz A. Residual stresses in cemented carbides – An overview [Electronic resource] / Aaron Krawitz, Eric Drake // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2015. – Vol. 49. – P. 27–35. – Mode of access:

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.07.018>. – Title from screen. – Date of access: 10.05.2025.

7. Krawitz A. D. Residual Stresses [Electronic resource] / Aaron D. Krawitz, Eric F. Drake // *Comprehensive Hard Materials*. – 2014. – Vol. 1. – P. 385–404. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096527-7.00013-1>. – Title from screen. – Date of access: 10.05.2025.

8. Residual stress in WC-Co measured by neutron diffraction [Electronic resource] / D. Mari, A.D. Krawitz, J. W. Richardson [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 1996. – Vol. 209, no. 1–2. – P. 197–205. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10147-0](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10147-0). – Title from screen. – Date of access: 10.05.2025.

9. Cobalt in hard metals and cobalt sulfate, gallium arsenide, indium phosphide, and vanadium pentoxide [Text] / Mario Altamirano-Lozano, Detmar Beyersmann, Dean E. Carter [et al.]. – Lyon : International Agency for Research on Cancer ; Geneva : Distributed by WHO Press, 2006. – 330 p.

10. Верещагин В. А. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия [Текст] / В. А. Верещагин, В. В. Журавлёв – Минск : Навука и тэхніка, 1991. – 208 с.

11. Влияние легирования композиционного наполнителя на износостойкость алмазосодержащего материала матрицы породоразрушающего инструмента [Текст] / В. П. Бондаренко, В. П. Ботвинко, А. М. Исонкин, Н. А. Юрчук // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. – 2012. – Вып. 15. – С. 51–56.

12. Влияние зернистости высокопрочного тугоплавкого наполнителя на работоспособность алмазных буровых коронок [Текст] // В. П. Бондаренко, А. М. Исонкин, Р. К. Богданов, А. А. Матвейчук // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения* : Сб. науч. тр. – Київ : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2010. – Вып. 13. – С. 168–173.

13. Rajabi A. Chemical composition, microstructure and sintering temperature modifications on mechanical properties of TiC-based cermet – A review [Electronic resource] / A. Rajabi, M. J. Ghazali, A. R. Daud // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 67. – P. 95–106. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.081>. – Title from screen. – Date of access: 11.05.2025.

14. A review on the microstructure and properties of TiC and Ti(C,N) based cermets [Electronic resource] / Atefeh Aramian, Zohreh Sadeghian, Mohammad Narimani [et al.] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2023. – P. 106–320. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106320>. – Title from screen. – Date of access: 12.05.2025.

15. Trent E. M. Metal cutting [Text] / Edward M. Trent, Paul K. Wright. – 4th ed. – Boston [et al.]: Butterworth-Heinemann Ltd, 2000. – 464 p.

16. Taimatsu H. Effects of Cr_3C_2 and V_8C_7 on the Microstructure and Mechanical Properties of WC-SiC Whisker Ceramics [Electronic resource] / Hitoshi Taimatsu, Shigeaki Sugiyama, Masanori Komatsu // *Materials transactions*. – 2009. – Vol. 50, no. 10. – P. 2435–2440. – Mode of access: <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2009169>. – Title from screen. – Date of access: 13.05.2025.

17. Microstructure and Mechanical Properties of WC-SiC Composites [Electronic resource] / Akihiro Nino, Yoshinao Nakaibayashi, Shigeaki Sugiyama [et al.] // *Materials transactions*. – 2011. – Vol. 52, no. 8. – P. 1641–1645. – Mode of access: <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2011045>. – Title from screen. – Date of access: 13.05.2025.

18. Ighodaro O. L. Fracture toughness enhancement for alumina systems : a review [Electronic resource] / Osayande L. Ighodaro, Okenwa I. Okoli // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. – 2008. – Vol. 5, no. 3. – P. 313–323. – Mode of access: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02224.x>. – Title from screen. – Date of access: 15.05.2025.

19. A Review on Binderless Tungsten Carbide: Development and Application [Electronic resource] / Jialin Sun, Jun Zhao, Zhifu Huang [et al.] // *Nano-Micro Letters*. –

2019. – Vol. 12, № 1. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0346-1>. – Title from screen. – Date of access: 15.05.2025.

20. Mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ composites [Electronic resource] / W. H. Tuan, R. Z. Chen, T. C. Wang [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2002. – Vol. 22, № 16. – P. 2827–2833. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(02\)00043-2](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(02)00043-2). – Title from screen. – Date of access: 15.05.2025.

21. ZrO_2 (3Y) toughened WC composites prepared by spark plasma sintering [Electronic resource] / Donghai Zheng, Xiaoqiang, Yuanyuan Li [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 572. – P. 62–67. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.259>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

22. Yang F. Z. Effect of initial particulate and sintering temperature on mechanical properties and microstructure of WC– ZrO_2 –VC ceramic composites [Electronic resource] / F. Z. Yang, J. Zhao, X. Ai // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209, № 9. – P. 4531–4536. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.027>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

23. Venkateswaran T. WC– ZrO_2 composites: processing and unlubricated tribological properties [Electronic resource] / T. Venkateswaran, D. Sarkar, B. Basu // Wear. – 2006. – Vol. 260, № 1–2. – P. 1–9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.005>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

24. Venkateswaran T. Tribological Properties of WC– ZrO_2 Nanocomposites [Electronic resource] / T. Venkateswaran, D. Sarkar, B. Basu // Journal of the American Ceramic Society. – 2005. – Vol. 88, № 3. – P. 691–697. – Mode of access: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00129.x>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

25. Basu B. Development of WC– ZrO_2 Nanocomposites by Spark Plasma Sintering [Electronic resource] / Bikramjit Basu, Jong-Heun Lee, Doh-Yeon Kim // Journal of the American Ceramic Society. – 2004. – Vol. 87, № 2. – P. 317–319. – Mode

of access: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00317.x>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

26. Processing of ultrafine ZrO_2 toughened WC composites [Electronic resource] / Olivier Malek, Bert Lauwers, Yeczain [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. – 2009. – Vol. 29, № 16. – P. 3371–3378. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.07.013>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

27. Influence of grain refinement on microstructure and mechanical properties of tungsten carbide/zirconia nanocomposites [Electronic resource] / Ali Nasser, Mohamed A. Kassem, Ayman Elsayed [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 25, № 11. – P. 5065–5075. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2341-8>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

28. Basu B. Pressureless sintering and tribological properties of WC– ZrO_2 composites [Electronic resource] / B. Basu, T. Venkateswaran, D. Sarkar // Journal of the European Ceramic Society. – 2005. – Vol. 25, № 9. – P. 1603–1610. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.05.021>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.

29. Fang Z. Z. Cemented Tungsten Carbide Hardmetal-An Introduction [Electronic resource] / Z. Zak Fang, Mark C. Koopman, Hongtao Wang // Comprehensive hard materials. – [S. 1.], 2014. – P. 123–137. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096527-7.00004-0>. – Title from screen. – Date of access: 20.05.2025.

30. Prakash L. Fundamentals and general applications of hardmetals [Electronic resource] / Leo Prakash // Comprehensive Hard Materials. – 2014. – P. 29–90. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096527-7.00002-7>. – Title from screen. – Date of access: 20.05.2025.

31. Курлов А. Физика и химия карбидов вольфрама : монография [Текст] / А. Курлов, А. Гусев. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 272 с.

32. Алексеев В. И. Некоторые закономерности изнашивания металлов и металлоподобных карбидов в вакууме при низких температурах [Текст] / В. И. Алексеев, М. С. Ковальченко // ФХММ. 1971. – Т. 7, № 3. – С. 38–42.

33. Исонкин А. М. Использование карбида вольфрама газофазной карбидизации для повышения износостойкости алмазосодержащих материалов породоразрушающего инструмента [Текст] / Исонкин А. М., Матвейчук А. А. // Український гірничий форум : збірник. – Т. 3. Геологія. Рудникова аерологія та безпека праці. Проблеми та перспективи вдосконалення гірничого обладнання. Автоматизація у гірництві. Технології економічного і безпечного використання електроенергії. Екологічні і правові проблеми техногенно навантажених регіонів. Економіка і управління у гірничій промисловості. – [Б. м.] : Вид-во НГУ, 2015. – С. 70–76.

34. Kurlov A. S. Tungsten carbides and W-C phase diagram [Electronic resource] / A. S. Kurlov, A. I. Gusev // Inorganic Materials. – 2006. – Vol. 42, no. 2. – P. 121–127. – Mode of access: <https://doi.org/10.1134/s0020168506020051>. – Title from screen. – Date of access: 22.05.2025.

35. Kurlov A. S. Phase equilibria in the W–C system and tungsten carbides [Electronic resource] / Aleksei S. Kurlov, Aleksandr I. Gusev // Russian Chemical Reviews. – 2006. – Vol. 75, № 7. – P. 617–636. – Mode of access: <https://doi.org/10.1070/rc2006v075n07abeh003606>. – Title from screen. – Date of access: 22.05.2025.

36. Lander J. J. Plating Molybdenum, Tungsten, and Chromium by Thermal Decomposition of Their Carbonyls [Text] / Lander J. J. and Germer L. H. // AIME. – 1948. – Vol. 175. – P. 661–691.

37. Goldschmidt H. J. The tungsten-rich region of the system tungsten-carbon [Electronic resource] / H. J. Goldschmidt, J. A. Brand // Journal of the Less Common Metals. – 1963. – Vol. 5, № 2. – P. 181–194. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(63\)90012-2](https://doi.org/10.1016/0022-5088(63)90012-2). – Title from screen. – Date of access: 09.06.2025.

38. Степанчук А. Н. Технология порошковой металлургии [Текст] / А. Н. Степанчук, И. И. Билык, П. А. Бойко. – Киев : Выща школа, 1989. – 415 с.
39. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide – A review [Electronic resource] / Z. Zak Fang, Xu Wang, Taegong Ryu [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2009. – Vol. 27, no. 2. – P. 288–299. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.07.011>. – Title from screen. – Date of access: 23.05.2025.
40. Liu. K. Tungsten Carbide – Processing and Applications [Electronic resource] / K. Liu. – London : InTech, 2012. – Mode of access: <https://doi.org/10.5772/3148>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.
41. Milman Yu. V. The effect of structural state and temperature on mechanical properties and deformation mechanisms of WC-Co hard alloy [Electronic resource] / Yu V. Milman // Journal of Superhard Materials. – 2014. – Vol. 36, № 2. – P. 65–81. – Mode of access: <https://doi.org/10.3103/s1063457614020014>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.
42. Peculiarities of preparation and properties of cemented carbide WC + 20 mass % Ni with ultra-coarse-grained microstructure [Electronic resource] / O. O. Matviichuk, I. V. Andreiev, N. V. Litoshenko [et al.] // Materials Science. – 2024. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00786-7>. – Title from screen. – Date of access: 16.05.2025.
43. Instrument Database: Carl Zeiss AG – EVO® 50 Series [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://speciation.net/Database/Instruments/Carl-Zeiss-AG/EVO-50-Series-;i663>. – Назва з екрану. – Дата звернення: 17.05.2025.
44. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 161 с.
45. JASP Team (2025) – JASP – JASP (Version 0.19.3) [Electronic resource] // JASP – Free and User-Friendly Statistical Software. – Mode of access: <https://jasp-stats.org/download/>. – Title from screen. – Date of access: 23.05.2025.
46. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення [Текст] : ДБН В.2.2-28:2010. – [Чинний від 2011-10-01 ; На заміну

СНиП 2.09.04-87]. – Вид. офіц. – Київ : Мінрегіонбуд та житло комунгосп, 2010. – 52 с.

47. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Текст] : ДСН 3.3.6.042-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 10 с.

48. Державні будівельні норми України. Природне і штучне освітлення [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – [На заміну ДБН В.2.5-28:2006 ; чинний від 2019-03-01]. – Вид. офіц. – Київ : Мінбуд України, 2006. – 137 с.

49. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.037-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – Вид. офіц. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99#Текст>. – Назва з екрану. – Дата звернення: 01.06.2025.

50. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація [Текст] : ДСТУ 7239:2011. – [Уведено вперше ; чинний від 2011-08-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2011. – 11 с.

51. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту [Текст] : ДСТУ 7237:2011. – [Чинний від 2011-08-01 ; на заміну ГОСТ 12.1.019-79]. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2011. – 9 с.

52. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Текст] : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. – [На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. – 66 с.