

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

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

**Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Мирослав КАРПЕЦЬ

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2025 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп'ютерне  
моделювання в матеріалознавстві»  
спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

**на тему: «Вплив параметрів електронно-променевої обробки на мікроструктуру  
та властивості твердого сплаву WC-15Co»**

Виконав:

здобувач ВО IV курсу, групи ФМ-11

Веремієнко Артем Євгенович \_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н., доцент Конорев Сергій Ігорович \_\_\_\_\_

Консультант з охорони праці:

зав. каф., д.т.н., професор Левченко О. Г. \_\_\_\_\_

Консультант з економічно-організаційного розділу

к.е.н., доцент Нараєвський С. В. \_\_\_\_\_

Консультант з питань нормоконтролю:

ст. викл. Шаповалова Н.А. \_\_\_\_\_

Рецензент:

д.т.н., професор Мініцький А. В. \_\_\_\_\_

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

Здобувач ВО \_\_\_\_\_

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Навчально-науковий інститут матеріалознавства  
та зварювання ім. Є.О. Патона  
Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Мирослав КАРПЕЦЬ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу здобувачу ВО**

**Веремієнку Артему Євгеновичу**

1. Тема роботи «Вплив параметрів електронно-променевої обробки на мікроструктуру та властивості твердого сплаву WC-15Co», керівник роботи Конорев Сергій Ігорович, к.т.н., затверджені наказом по університету від «26» \_\_05\_\_ 2025 р. № \_\_1733-с\_\_
2. Термін подання здобувачем ВО роботи 12.06.2025
3. Вихідні дані до роботи: зразки у вигляді фільєр зі сплаву WC-15Co; дані з літературних джерел та результатів попередніх особистих експериментів; результати переддипломної практики.
4. Зміст роботи: літературний огляд; матеріали та методика досліджень; результати та їх обговорення; економічна частина; охорона праці.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 99 сторінки, 8 таблиць; 43 рисунка; 1 презентація.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно економічна частина	Нараєвський С.В. доцент		
Охорона праці	Левченко О.Г. зав. каф., професор		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А. ст. викл.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання	14.04.2025	виконав
2	Опрацювання літературних джерел	20.05.2025	виконав
3	Опанування методик дослідження	02.05.2025	виконав
4	Проведення експерименту	11.05.2025	виконав
5	Аналіз отриманих результатів	18.05.2025	виконав
6	Оформлення дипломної роботи	02.06.2025	виконав
7	Попередній захист	03.06.2025	виконав
8	Захист на засідання ЕК	17.06.2025	

Здобувач ВО

Артем ВЕРЕМІЄНКО

Керівник

Сергій КОНОРЕВ

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 99 сторінок, 8 таблиць, 43 рисунків, 55 літературних джерел.

ЕВОЛЮЦІЯ МІКРОСТРУКТУРИ, ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ОБРОБКА, МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНІ, РОЗМІР ЗЕРЕН, ТВЕРДІ СПЛАВИ.

**Об'єкт досліджень:** сплав WC-15Co у формі філь'єри після обробки електронним променем.

**Предмет досліджень:** зміни мікроструктури в поверхневих шарах твердого сплаву WC-15C при електронно-променевій обробці.

**Мета роботи:** встановити закономірності зміни структури та властивостей поверхневого шару твердого сплаву WC-15Co при зміні параметрів електронно-променевої обробки.

**Методи досліджень:** скануюча електронна мікроскопія, енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія, аналіз мікротвердості за Віккерсом, рентгеноструктурний фазовий аналіз, енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналіз.

**Результати досліджень та їх новизна:** встановлено, що електронно-променева обробка поверхні сплаву WC-15Co з силою струму 20 мА та 17 мА призводить до росту зерен WC та зменшення мікротвердості у межах приповерхневої області.

**Сфера застосування:** виробництво різальних інструментів для чорної металургії, клапанів, прокладок, ножів для рубання та роликів для протяжки, бурове обладнання.

## ABSTRACT

**Diplom:** 99 pages, 43 figures, 8 tables, 55 literature sources.

### **ELECTRON-BEAM TREATMENT, GRAIN SIZE, HARD ALLOYS, MICROSTRUCTURE EVOLUTION, SURFACE MODIFICATION,**

**Object of research:** WC-15Co alloy in the form of a drawing die after electron beam treatment.

**Subject of research:** microstructural changes in the surface layers of the WC-15Co hard metal after electron beam treatment.

**Objective of the work:** to determine the patterns of structural and property changes in the surface layer of WC-15Co hardmetal depending on the parameters of electron beam treatment.

**Research methods:** scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), Vickers microhardness testing, X-ray diffraction (XRD) phase analysis, energy-dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) analysis.

**Research results and novelty:** it was established that electron beam treatment of the WC-15Co alloy surface at beam currents of 20 mA and 17 mA leads to WC grain growth and a decrease in microhardness within the near-surface region.

**Field of application:** manufacturing of cutting tools for rough metallurgy, valves, gaskets, chopping knives, drawing dies, and drilling equipment.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ .....	9
ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	12
1.1 Діаграма стану твердого сплаву W-C-Co .....	12
1.2 Механічні та зносостійкі властивості сплавів на основі WC-Co .....	14
1.3 Застосування твердих сплавів на основі WC-Co.....	16
1.4 Особливості синтезу тугоплавких композитів на основі WC-Co .....	19
1.5 Способи модифікації структури поверхневого шару твердих сплавів на основі WC-Co .....	21
1.6 Структурно-фазові перетворення в системі WC-Co під дією безперервного високострумове електронного опромінення .....	23
1.7 Висновок до розділу 1 .....	25
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	26
2.1 Вибір матеріалів дослідження.....	26
2.2 Синтез об'єктів дослідження. Виготовлення філь'єри .....	26
2.3 Електронно-променева обробка поверхні .....	32
2.4 Скануюча електронна мікроскопія .....	34
2.5 Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія .....	36
2.6 Рентгеноструктурний фазовий аналіз.....	38
2.7 Аналіз мікротвердості за Віккерсом .....	40
2.8 Енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналіз .....	41
2.9 Висновок до розділу 2 .....	43
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	45
3.1 Хімічний, фазовий склад та морфологія поверхні вихідного порошку WC та Co .....	45
3.2 Еволюція мікроструктури твердого сплаву WC-15Co під дією електронно-променевого опромінення.....	49

3.3 Зміна мікротвердості поверхневого шару твердого сплаву на основі WC-Co в результаті електронно-променевого опромінення.....	65
3.4 Висновок до розділу 3 .....	67
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....</b>	<b>69</b>
4.1 Науково-технічна актуальність.....	69
4.2 Розрахунок собівартості роботи.....	69
4.2.1 Витрати на оплату праці .....	70
4.2.2 Відрахування до єдиного соціального внеску .....	72
4.2.3 Витрати на матеріали та дослідження.....	72
4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання та приладдя .....	72
4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання та приладдя .....	72
4.2.6 Витрати на послуги сторонніх організацій.....	72
4.2.7 Енергоносії для проведення дослідження.....	72
4.2.8 Інші прямі невраховані витрати .....	73
4.2.9 Накладні витрати.....	73
4.2.10 Визначення планової коштовної вартості теми .....	73
4.3 Науково-технічна ефективність НДР .....	74
4.4 Висновок до розділу 4 .....	78
<b>РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>79</b>
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виконанні дослідження .....	79
5.1.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення.....	80
5.1.2 Небезпечні чинники при роботі з електронно-променевою установкою .....	82
5.1.3 Аналіз шуму та вібрацій .....	84
5.1.4 Аналіз освітленості приміщення .....	85
5.1.5 Електробезпека .....	86
5.1.6 Інженерні рішення та засоби індивідуального захисту.....	87
5.1.7 Пожежна безпека.....	88
5.2 Висновок до розділу 5 .....	89

	8
ВИСНОВКИ.....	90
CONCLUSIONS .....	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	94

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ**

ЕПО – електронно-променева обробка

НРА – твердість за Роквеллом

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія

ЕДРС – енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія

ЕДРФА – енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналіз

РФА – рентгеноструктурний фазовий аналіз

$K_{IC}$  – тріщиностійкість за умови плоскої деформації

ФЗП – фонд заробітної плати

ЄСВ – єдиний соціальний внесок

Ів – інші прямі витрати

Нв – накладні витрати

НДР – науково-дослідна робота

ЕПУ – електронно-променева установка

ЗІЗ – засоби індивідуального захисту

## ВСТУП

Електронно-променева обробка поверхні є однією з найбільш ефективних сучасних технологій модифікації матеріалів, яка широко застосовується у матеріалознавстві та інженерії поверхні для покращення фізико-механічних властивостей конструкційних і функціональних матеріалів. Завдяки високій концентрації енергії, електронний промінь дозволяє проводити надшвидку модифікацію структури поверхневих шарів та змінювати хімічний склад без порушення об'ємної структури матеріалу. Особливу увагу останніми роками приділяють дослідженню електронно-променевої модифікації сплавів системи WC-Co, які поєднують в собі надвисоку твердість WC та в'язкість Co зв'язки, що робить їх незамінними для виготовлення ріжучих інструментів та зносостійких деталей.

Серед широкого спектра сплавів системи WC-Co, сплав WC-15Co вирізняється помірною зносостійкістю у поєднанні з відносно високою ударною в'язкістю. Завдяки вмісту 15 мас.% Co, цей сплав демонструє покращену здатність до поглинання енергії удару, що є важливою характеристикою для інструментів і деталей, які працюють в умовах динамічних навантажень. У той же час, такий склад зберігає високу твердість і зносостійкість, що властиві для WC, і робить сплав WC-15Co одним із найперспективніших матеріалів для модифікації електронно-променевою обробкою.

Однією з перспективних цілей електронно-променевої обробки твердого сплаву WC-15Co є контрольований ріст зерен WC з метою підвищення ударної в'язкості матеріалу. Такий ефект досягається завдяки локальному нагріву поверхневих шарів, що активує процеси рекристалізації та сприяє росту зерен карбідних включень WC. У порівнянні з дрібнозернистою структурою, більші зерна можуть знизити площу границь зерен, а отже і енергію системи, які часто виступають концентраторами мікротріщин при ударних або циклічних навантаженнях. Це дозволяє покращити опір матеріалу до руйнування,

зберігаючи при цьому прийнятний рівень твердості та зносостійкості, що особливо важливо для деталей, які працюють в умовах ударно-абразивного зносу.

Попри наявність теоретичних передумов, механізм впливу параметрів електронно-променевої обробки (сила струму, швидкість сканування, кількість проходів тощо) на ріст зерен WC та механічні властивості сплаву WC-15Co залишається малодослідженим. Тому метою даної роботи є встановлення впливу електронно-променевої обробки на мікроструктуру сплаву WC-15Co, зокрема на ріст зерен карбідних включень WC, та виявлення можливостей підвищення ударної в'язкості оброблених деталей шляхом оптимізації технологічних параметрів.

## РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Діаграма стану твердого сплаву W-C-Co

Діаграму стану W-C-Co за температури спікання (1200 °C) наведено на рисунку 1.1. Даній системі не притаманне формування твердого розчину через обмежену розчинність Co в WC. Проте, під час спікання в рідкому Co частково розчиняється W та C. Гранична розчинність WC в Co за температури плавлення евтектики приблизно від 10 мас.% до 15 мас.%.

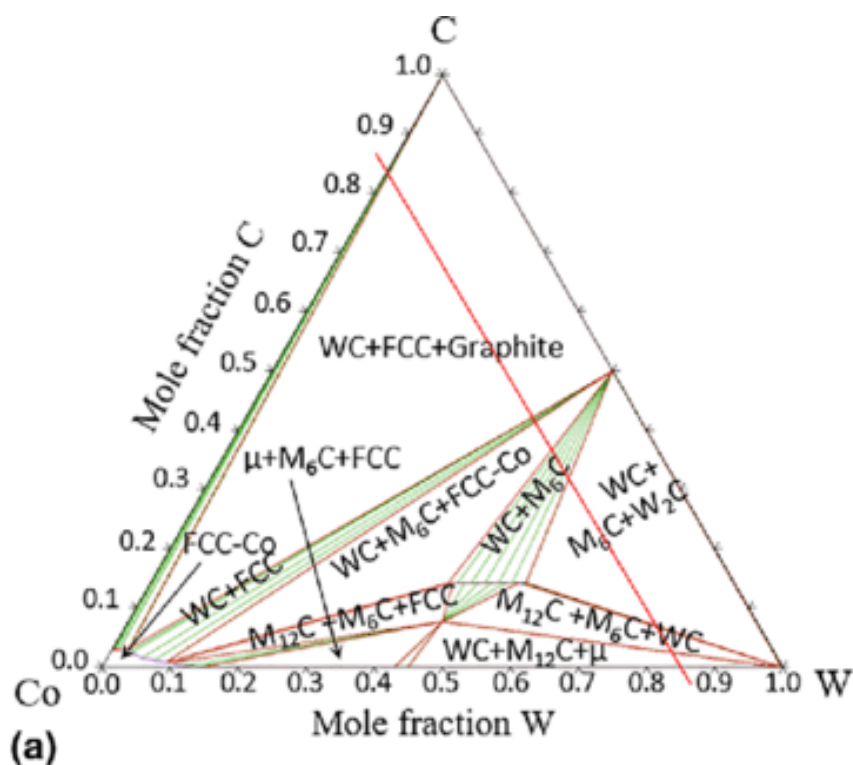


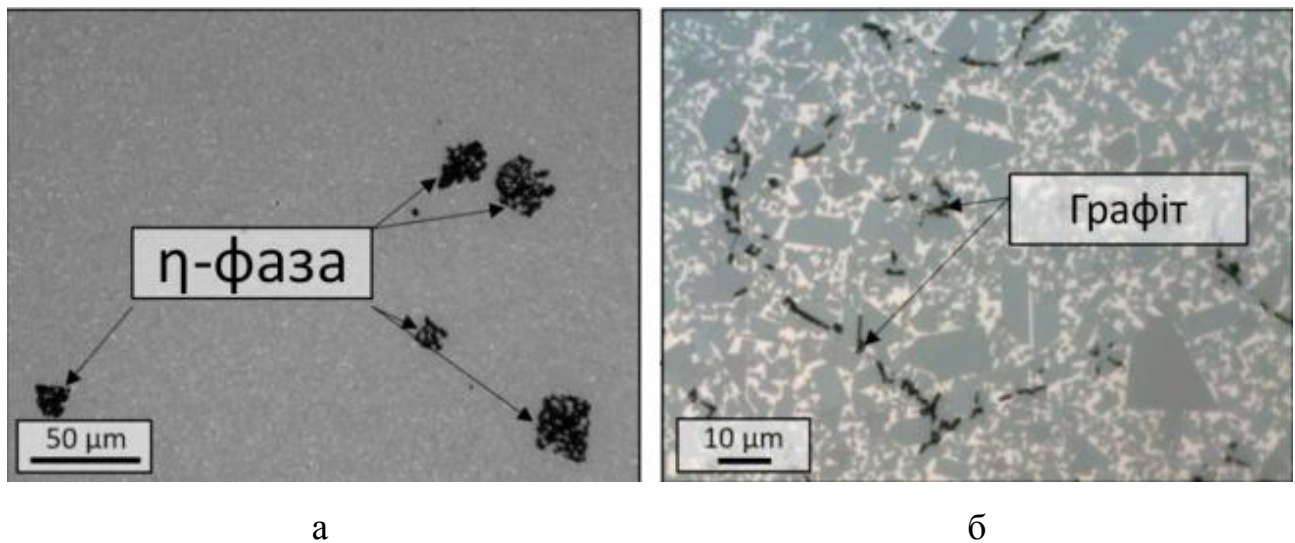
Рисунок 1.1 – Діаграма стану W-C-Co за температури 1200 °C [1]

WC являє собою тугоплавку фазу, що містить 6,1 мас.% C, при цьому WC має вузьку область існування з відсутньою областю гомогенності. Характерною особливістю кристалів WC є анізотропія твердості. В залежності від орієнтації кристалічної площини твердість може варіюватися від 13 ГПа до 20 ГПа [2].

У промислових твердих сплавах WC, кобальт є основним зв'язуючим елементом. Застосування кобальту пояснюється ідеальним змочуванням

частинки WC, що створює щільний композитний матеріал з високою зносостійкістю та механічною міцністю [3].

Розташування WC +  $\beta$ -Co на діаграмі стану має важливе практичне значення, бо вказує на допустимі зміни кількості вуглецю в промислових сплавах, що не призведуть до появи третьої фази, а саме графіту та  $\eta$ -фази (рис. 1.2) [4].  $\eta$ -фаза (карбіди типу  $M_6C$  або  $M_{12}C$ ) це збіднена вуглецем фаза, яка має вищу твердість але меншу в'язкість, особливо, якщо вона осідає у вигляді дендритів. Якщо ж система буде навпаки містити забагато вільного вуглецю, то він осідатиме у вигляді графіту, що негативно впливатиме на механічні властивості сплаву [5].



а –  $\eta$ -фаза, б – вільний графіт

Рисунок 1.2 – Небажані фази в сплавах WC-Co [6]

Сплав WC-15Co лежить у полі WC +  $\beta$ -Co або дуже близько до нього, за умови що вміст вуглецю відповідає WC-насиченню. При перегріві або втраті вуглецю вона може потрапити у зону утворення  $\eta$ -фази, а при надлишку вуглецю в зону утворення вільного графіту.

Таким чином, Co практично не розчиняється в WC, що сприяє структурній стабільності сплаву WC-15Co та полегшує прогнозування фазових перетворень.

Водночас, вміст вуглецю відіграє ключову роль у формуванні мікроструктури, істотно впливаючи на властивості сплаву.

## 1.2 Механічні та зносостійкі властивості сплавів на основі WC-Co

Сплави на основі WC-Co демонструють високу міцність на стиск, межу поперечного згину та поєднують в собі рідкісну комбінацію високої твердості й ударної в'язкості, які зазвичай є взаємовиключними властивостями [7]. Найпоширеніший вид твердого сплаву складається з твердих зерен WC, закріплених у пластичній Co матриці – така структура часто узагальнено називається просто "карбідом". Сам по собі WC має модуль пружності більш ніж удвічі вищий за сталь і твердість за Віккерсом на рівні від 1800 кгс/мм<sup>2</sup> до 2000 кгс/мм<sup>2</sup>, що можна порівняти із такими надтвердими керамічними матеріалами, як карбід кремнію. Co історично застосовується в авіакосмічній промисловості у складі суперсплавів завдяки своїм високим термічним, корозійним та зносостійким властивостям. Об'єднання таких різнопланових фаз у єдиний сплав й забезпечує виняткові характеристики у реальних умовах експлуатації.

Основними чинниками, що визначають властивості твердосплавних деталей, є розмір і розподіл зерен карбіду, склад і вміст зв'язувальної фази, а також наявність легувальних добавок. Класифікація зерен за розміром наведена на рисунку 1.3.

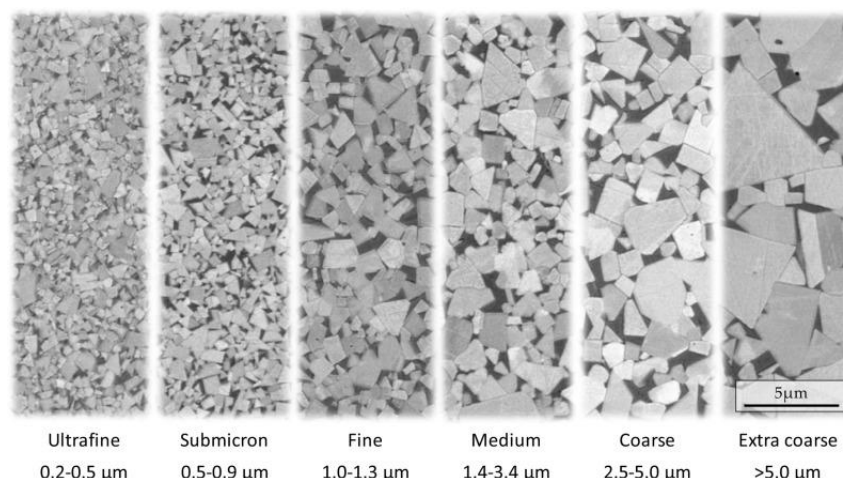


Рисунок 1.3 – Класифікація зерен WC за розміром [8]

Розмір зерен та вміст зв'язки впливають на співвідношення "твердість – в'язкість": збільшення вмісту зв'язувальної фази, як правило, підвищує в'язкість за рахунок збільшення об'єму пластичної кобальтової фази, тоді як зменшення розміру зерен – підвищує твердість (рис. 1.4), але водночас знижує в'язкість через зменшення складності траєкторії поширення тріщин. Правильний баланс між цими параметрами є ключовим для забезпечення бажаних експлуатаційних властивостей [9].

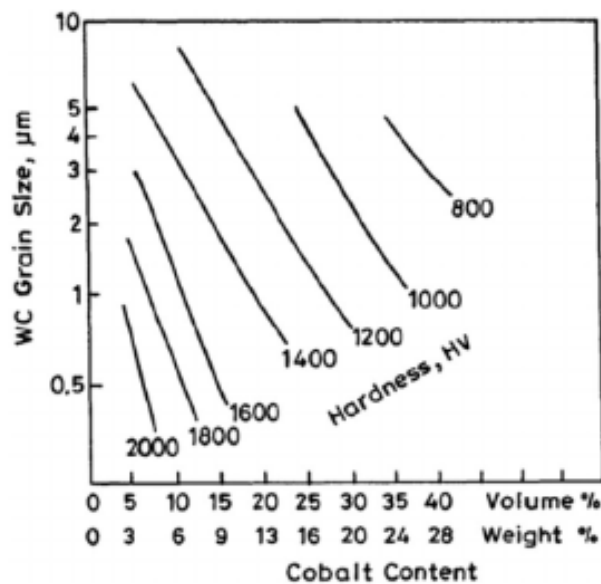


Рисунок 1.4 – Залежність твердості сплаву WC-Co від розміру зерен WC та вмісту Co [10]

Розмір зерен також впливає на в'язкість сплаву, зі зменшенням границь зерен зменшується й кількість місць концентрації напружень. Також в більших зернах більша частина об'єму зайнята Co зв'язкою, що й є основною причиною росту в'язкості (рис. 1.5).

Помітною є закономірність, що при збільшенні розміру зерна WC від 3,5 мкм до 5 мкм за того самого вмісту Co, сплав має більший опір руйнуванню при плоскому деформуванні. Сплав який має крупнозернисту структуру та вміст Co близько 15 мас.% має кращу ударну в'язкість в порівнянні зі сплавом, в

якому розмір зерен менший (порівнювались зерна розміром 3,4 мкм та 1,4 мкм відповідно).

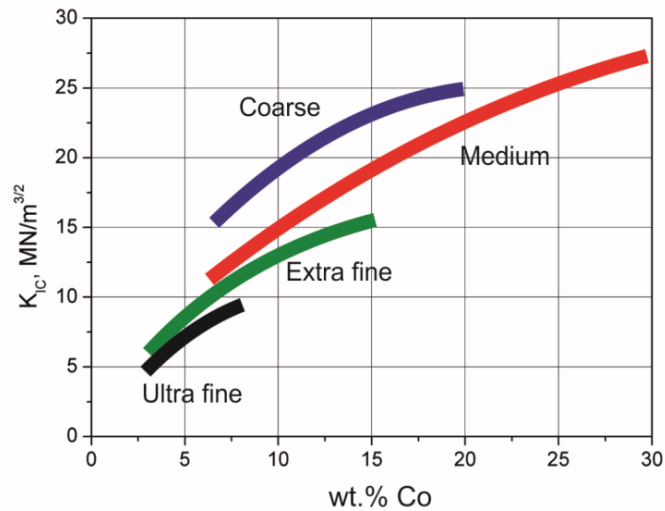


Рисунок 1.5 – Здатність сплавів WC-Co чинити опір руйнуванню при плоскому деформуванні ( $K_{IC}$ ) як функція вмісту Co для різних розмірів зерен [11]

Подрібнення зерна WC та зменшення вмісту Co призводить до збільшення твердості але зменшення в'язкості. Для деталей які працюють в умовах ударних навантажень в'язкість є ключовою характеристикою, тому сплави з більшим вмістом Co та крупнозернистою структурою є бажаними для такого типу виробів.

### 1.3 Застосування твердих сплавів на основі WC-Co

Сплави на основі WC-Co є найпопулярнішими матеріалами порошкової металургії сучасного різального виробництва. Завдяки широкому спектру властивостей ці сплави часто застосовуються в різноманітних галузях промисловості (рис. 1.6). Основні напрями використання сплавів WC-Co це різучі інструменти та зносостійкі деталі.

Використання сплавів системи WC-Co у різучих інструментах, перш за все, обумовлено його високою твердістю, зносостійкістю та непоганою ударною в'язкістю, забезпечуючи тривалий термін служби та стабільні режими різання, навіть при високих температурах. І тому ці сплави є ідеальним вибором для

різноманітних токарних різців, свердел, фрез та пластин для механічної обробки металів [12].

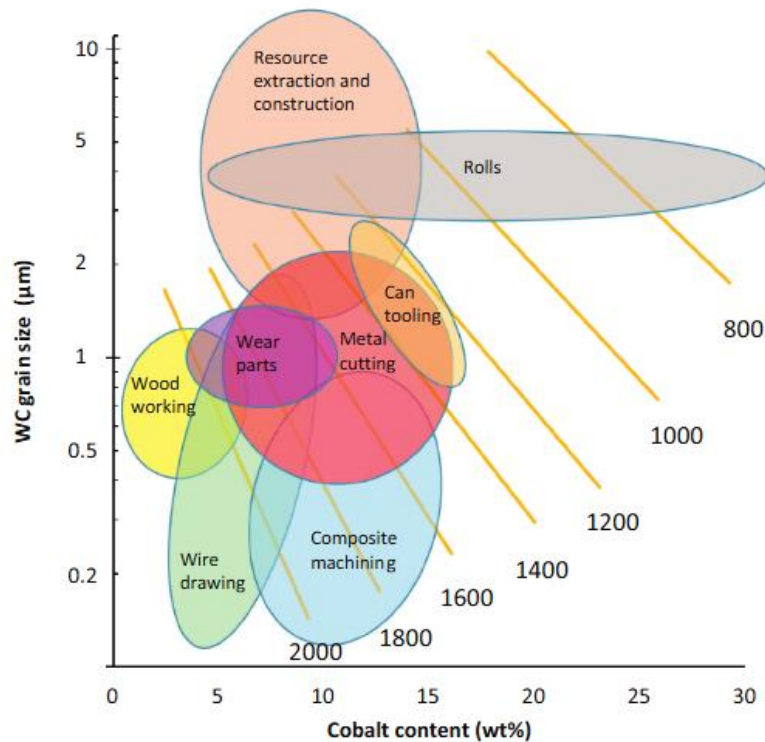


Рисунок 1.6 – Комбінації розміру зерен WC та вмісту Co в твердих сплавах, які демонструють широкий спектр застосувань. Лінії вказують значення ізотвердості (за шкалою Віккерса, умовні одиниці) [8]

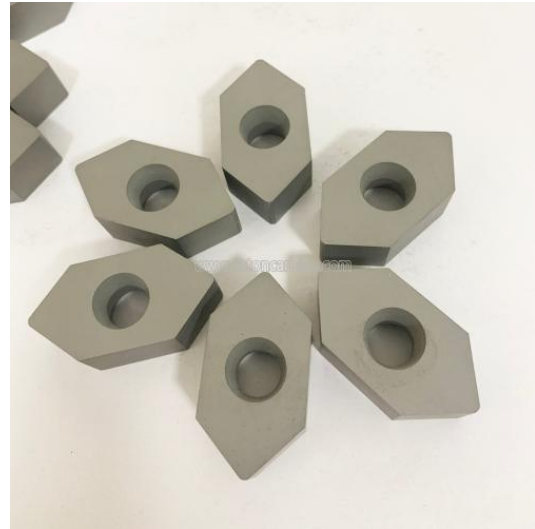
Окрім частого використання в різальній промисловості WC сплави з невеликим вмістом кобальтом, наприклад сплав WC-6Co, також є популярною композицією для деталей, що працюють на знос, таких як розпилювачі, підшипники, клапани, ущільнювачі, ролики для прокату та різні елементи механізмів [13]. Також WC-Co сплави використовують для формувальних штампів та пресформ [14]. Завдяки вище зазначеним властивостям застосування WC-Co дозволяє значно підвищити довговічність обладнання [15].

Сплави з більшим вмістом Co, такі як WC-15Co, використовується в різальних інструментах для чорнової металургії, клапанів, прокладок [16], ножів для рубання та роликів для протяжки (рис. 1.7) [8]. Це пов'язано з тим, що сплави з більшим вмістом Co мають вищу в'язкість, зберігаючи високу твердість. Наявність такого незвичайного поєднання властивостей й забезпечило

вибір саме цього сплаву, для інструментів, які працюють в умовах ударних навантажень.



а



б

а – ролики з WC-15Co [17], б – леза подрібнювача, що використовуються для різання пластику та металевих ножів [18]

Рисунок 1.7 – Приклади виробів зі сплаву WC-15Co

Отже, сплав WC-15Co, завдяки поєднанню високої твердості та підвищеної в'язкості, є придатним для використання в деталях, що зазнають ударних навантажень. Наявність 15 % кобальту забезпечує оптимальний баланс між зносостійкістю та здатністю матеріалу поглинати енергію удару, що робить його ефективним у складних експлуатаційних умовах.

Таким чином, сплави системи WC-Co знаходять широке застосування в галузях де необхідна висока зносостійкість і механічна міцність. Сплав WC-15Co вирізняється збалансованими властивостями, поєднуючи твердість WC з підвищеною в'язкістю завдяки вмісту 15 % Co. Це робить його особливо перспективним для виготовлення деталей, що працюють в умовах інтенсивних ударних навантажень та абразивного зносу.

## 1.4 Особливості синтезу тугоплавких композитів на основі WC-Co

WC є тугоплавкою сполукою ( $T_{пл} = 2870 \text{ }^\circ\text{C}$ ), через що, отримати виробі шляхом лиття майже неможливо, і тому при виробництві використовуються технології порошкової металургії. Поєднуючи порошок WC з пластичним зв'язуючим металом (наприклад порошком Co) при вмісті тугоплавкої фази більше 50 %, отримують тугоплавкий композит де порошок WC є матрицею.

Основним джерелом вольфрамового порошку у промисловості є мінеральні руди такі як: вольфраміт, шесліт, феберит, гюбнерит [19]. Альтернативним варіантом синтезу порошку вольфраму є брукт, що містить у своєму складі вольфрам.

Порошок  $\text{WO}_3$  є вихідною сировиною для порошку вольфраму, завдяки його відновленню в парах  $\text{CH}_3\text{OH}$  за температури від  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  [20]. Відновлення оксиду відбувається в декілька проміжних стадій (рис. 1.8). Спочатку гратка починає деформуватися через втрату кисню, потім збільшується пористість і зі зменшенням об'єму залишаються дрібні металеві частинки W [19].

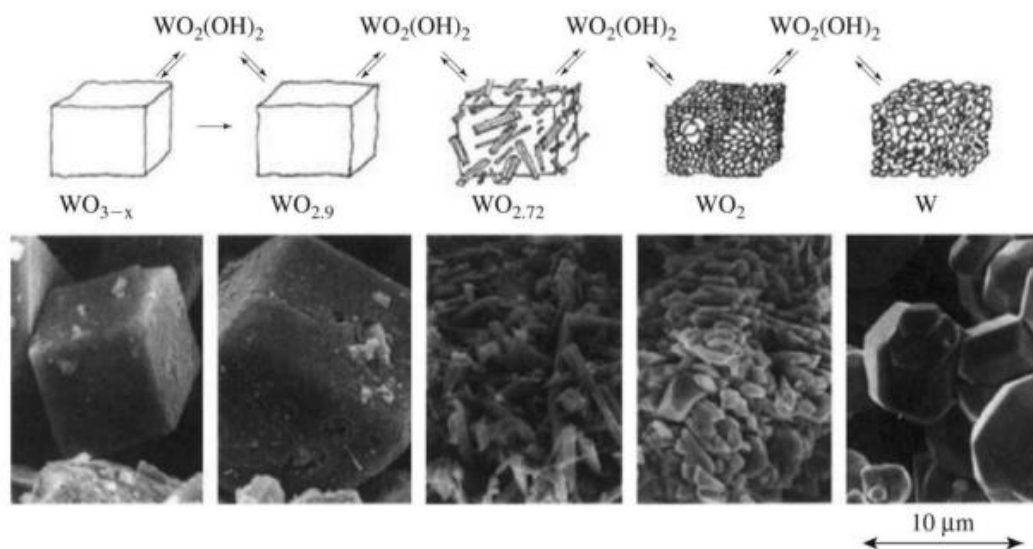


Рисунок 1.8 – Морфологічні зміни при відновленні  $\text{WO}_3$  [19]

Отриманий порошок вольфраму карбюризують у вуглецевій атмосфері. Температури карбюризації зазвичай складають від  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$  [19].

Отриманий порошок WC перемішують з порошком Co та подрібнюють, зазвичай на кульових млинах. Отриману суміш гранулюють та висушують, для покращення текучості порошку.

Пресовка може відбуватися декількома методами: звичайним холодним пресуванням, гарячим пресуванням, методом екструзії та ін. Обов'язково до порошку WC-Co додають зв'язку, наприклад віск чи пластифікатор (часто це парафін або поліетиленгліколь), щоб зменшити тертя виробу об стінки пресу та забезпечити утримання форми.

На першому етапі спікання відбувається видалення зв'язки (воску чи пластифікатору), так як неповне видалення зв'язки може призвести до утворення пор у кінцевому виробі. Видалення відбувається, як розчиненням зв'язки, так і її термічним випаровуванням. При розчиненні, заготовку занурюють у розчинник, наприклад гексан чи ацетон, а потім додатково термічно оброблюють, щоб видалити залишки зв'язки, які могли залишитися в об'ємі. При термічному методі, видалення зв'язки відбувається в печі, в контрольованій атмосфері (наприклад водневій чи аргоновмісній). Спочатку температуру піднімають до температури випаровування зв'язки, потім випарувана зв'язка витискається атмосферним газом, після чого може потрапляти у воскові пастки, де осідає віск та зчищається, або просто спалюватися разом з надлишком газу. Перед початком спікання важливо провести попереднє спікання (приблизно 1000 °C), щоб заготовка не зруйнувалася після видалення зв'язки. Такий підхід використовується у випадку, коли деталь переносять до іншої печі [21].

Спікання може відбуватися в тій самій вакуумній печі де відбувалося видалення пластифікатора, це значно спрощує процес спікання. Перевагою використання другої печі є час, (можна поставити на відгонку зв'язки наступну партію) та чистота кінцевого продукту (після відгонки потрібно очищати залишки зв'язки, аби вони не потрапили у кінцевий продукт). Ущільнення твердого сплаву досягається шляхом спікання в рідкій фазі, тобто металева зв'язуюча фаза плавиться при наближенні до температури спікання, і карбіди частково розчиняються в рідкій фазі. Насправді, спікання через тверді розчини у

системі WC-Co є дуже обмеженим і потребувало б надзвичайно тривалого часу. Саме тому необхідні металеві зв'язуючі речовини, що утворюють евтектичні системи з низькою температурою плавлення. Наприклад, евтектика між WC і Co утворюється приблизно при 1320 °C, хоча наявність вільного вуглецю у великій кількості може призвести до утворення евтектики Co-C при нижчій температурі. З цієї причини WC-Co зазвичай спікають у діапазоні від 1350 °C до 1500 °C. Вищі температури використовують для сплавів з низьким вмістом Co, які утворюють меншу кількість рідкої фази. І навпаки – нижчі температури – для сплавів з вищим вмістом Co [22].

Загалом, процес синтезу сплавів WC-Co являє собою досить трудомісткий процес, який складається з: синтезу порошку, його подрібнення та перемішування, пресування, відгонки пластифікатора, попереднього спікання та спікання. Такий порядок забезпечує отримання композитних сплавів WC-Co з найменшим відсотком дефектів структури.

### **1.5 Способи модифікації структури поверхневого шару твердих сплавів на основі WC-Co**

Вироби зі сплаву WC-15Co підлягають додатковій обробці, для покращення поверхневих властивостей – наприклад, зробити твердішими або підвищити в'язкість. Існує багато різних способів такої обробки, і кожен із них має свої переваги, залежно від того, яких саме змін потрібно досягти. Найперспективнішими методами обробки поверхні є лазерний, електронно-променевий, термічний, та метод іонної імплантації. Вибір методу визначається умовами, в яких працюватиме деталь, і тим, які властивості потрібно покращити на поверхні.

**Лазерна обробка.** На відміну від класичного спікання сплаву WC-Co, процес лазерного прецизійного плавлення супроводжується високолокалізованим енергетичним впливом і тепловим навантаженням тривалістю в межах мікросекунд. Лазерна обробка з подальшим швидким охолодженням зразка може призвести до зменшення зерен WC, або, якщо не

охолоджувати, то до росту зерна через швидке випаровування Co з поверхні. В обох випадках у лазерної обробки існує проблема виникнення неоднорідної структури, через високий коефіцієнт відбивання від поверхні. Неоднорідність прогріву поверхні також може викликати пори (через випаровування Co) та тріщини (термічне розтріскування через градієнт температур ззовні та всередині матеріалу). Також є ризик випаровування вуглецю, що призведе до утворення  $\eta$ -фази [23].

**Обробка високострумовим імпульсним електронним пучком.** Одним із найперспективніших методів поверхневої обробки є електронно-променева обробка (ЕПО), одним з підвидів якої є імпульсна обробка електронним пучком. Імпульсна ЕПО передбачає вплив на поверхню матеріалу серією швидкісних (від 3 мкс до 5 мкс) імпульсів електронного пучка високої щільності струму (до  $10^9$  А/м<sup>2</sup>). Поверхневий шар при цьому зазнає миттєвого нагрівання, плавлення, та швидкого охолодження, що призводить до мікроструктурних змін на глибину до 20 мкм.

Імпульсна ЕПО призводить до мікроструктурних змін, що впливають на механічні властивості поверхневих шарів. Одним з таких є зменшення розміру зерен, що призводить до збільшення твердості на поверхні, а також більш рівномірного розподілу Co навколо зерен WC [24].

**Іонна імплантація.** Іонна імплантація – це технологія модифікації поверхні, яка дозволяє створювати нові матеріальні зі структурованою поверхнею шляхом бомбардування її високоенергетичними іонами. Ця технологія особливо підходить для обробки поверхні прецизійних механічних деталей, тому що вона не змінює геометрію деталі, але підвищує її механічні властивості.

Іонна імплантація значно підвищує зносостійкість та міцність ріжучих лез на основі WC-Co. Наприклад, імплантація іонами азоту призводить до утворення міжвузлових нітридів, що призводить до зміцнення сплаву [25]. А при імплантації поверхні мастильним вуглецем покращуються антифрикційні властивості карбідвольфрамових сплавів [26].

Недоліків іонної імплантації не багато, основним з яких є неможливість ефективно обробляти велику площу, що унеможливорює використання цього методу у виробництві.

**Хімічна модифікація та легування.** Хімічна модифікація використовується для зміни хімічного складу та структури поверхневих шарів шляхом введення легуючих елементів. Процес може здійснюватися різними методами: хімічним осадженням, дифузійним легуванням або хімічним травленням.

Легування поверхневого шару підвищує твердість та зносостійкість. Наприклад, легування нікелем призводить до утворення твердих розчинів з Со, що впливає на збільшення твердості сплаву й зменшує пластичність. Легування хромом призводить до утворення карбідів (наприклад,  $Cr_3 C_2$ ).

Хімічна модифікація має певні недоліки, серед яких складність контролю процесу та можливе утворення небажаних сполук. Наприклад, Ni та Cr можуть утворювати інтерметаліди типу  $Ni_3 W$  або  $Cr_7 C_3$ , які призводять до зменшення ударної в'язкості, а іноді до локального розшарування та утворення тріщин [27].

Всі розглянуті вище методи поверхневої обробки є дуже перспективними та мають свої переваги та недоліки. Вони застосовуються за різних умов та для модифікації різних поверхневих властивостей сплавів на основі WC-Co. Для того щоб покращити в'язкість матеріалу можна використати, як лазерну, так і електронно-променеву обробку. Електронно-променева обробка, на відмінну від лазерної, забезпечує більш рівномірний нагрів та дозволяє отримати стабільну структуру без ризику тріщиноутворення, тому варто детальніше розглянути її вплив на систему WC-Co.

## **1.6 Структурно-фазові перетворення в системі WC-Co під дією безперервного високострумowego електронного опромінення**

Електронно-променева обробка являє собою високоефективний метод модифікації поверхні матеріалів, що базується на концентрованому впливі потоком електронів, які модифікують поверхневі шари твердофазних тіл.

Порівнюючи імпульсну ЕПО з безперервною, можна відмітити, що остання забезпечує більш рівномірний нагрів у часі, що дозволяє точніше контролювати глибину обробки, забезпечуючи стабільні структурно-фазові перетворення.

Під впливом безперервного електронного опромінення відбувається інтенсивне нагрівання поверхневих шарів до температур, близьких до температури плавлення  $Co$  фази, при незмінності твердої фази  $WC$ . Результатом чого є часткова перекристалізація, дифузія компонентів, виникнення нових фаз та зміна розміру зерен. Термічний вплив такого роду сприяє утворенню структур із меншою кількістю внутрішніх напружень, зменшеною кількістю міжфазних дефектів та поліпшує адгезію між зернами  $WC$  і  $Co$ .

Основні структурно-фазові зміни, що відбуваються у поверхневих шарах сплавів  $WC-Co$  під дією безперервного електронного променя пов'язані з: перерозподілом фаз, релаксацією залишкових напружень та ростом зерен  $WC$ .  $Co$  при нагріванні частково переплавляється, утворюючи більш рівномірні зони змочування навколо зерен карбиду. Цей ефект забезпечує підвищення міцності на згин на 15,8 %, та збільшення ударної в'язкості на 21,2 % [28]. Повільніше охолодження ніж при імпульсній ЕПО, призводить до релаксації структури, що в свою чергу, зменшує внутрішні напруження та підвищує стабільність матеріалу під циклічними навантаженнями. При тривалій обробці за підвищених температур відбувається ріст зерен  $WC$ , як результат злиття малих зерен. Ріст зерна зменшує кількість міжфазних границь розділу, що знижує ризик тріщиноутворення та покращує ударну в'язкість матеріалу [29].

Таким чином, безперервна електронно-променева обробка може демонструвати високу ефективність, як інструмент керованої модифікації мікроструктури сплавів на основі  $WC-Co$ . Вибір режиму обробки – зокрема сили струму та тривалості опромінення – має вирішальне значення, оскільки безпосередньо впливає на характер фазових перетворень, масштаби росту зерен та розподіл зв'язуючої фази [30]. Надмірна інтенсивність опромінення, зокрема при перевищенні оптимальних значень струму, може спричинити локальне перегрівання поверхні зразка, що, у свою чергу, веде до часткового

випаровування кобальтової фази. Таке випаровування не лише змінює хімічний склад матеріалу, а й може призвести до формування пор, зниження щільності структури та погіршення механічних властивостей [31].

Безперервна електронно-променева обробка є перспективним методом керування мікроструктурою твердих сплавів типу WC-Co. Її застосування відкриває можливості для цілеспрямованої модифікації структури матеріалу, з урахуванням конкретних умов експлуатації. Контроль над параметрами обробки дозволяє досягти збалансованих механічних характеристик та підвищити в'язкість без суттєвого зниження твердості, що є особливо важливим для матеріалів, призначених для роботи в екстремальних умовах навантаження.

### **1.7 Висновок до розділу 1**

1. Тверді сплави на основі WC-Co є широко застосовуваними матеріалами завдяки поєднанню високої твердості, ударної в'язкості та зносостійкості. Такі властивості забезпечують їх ефективну роботу в умовах інтенсивних механічних навантажень, особливо у сфері інструментального виробництва.

2. Для розуміння поведінки сплавів WC-Co під час термічної обробки було проаналізовано діаграму стану системи W-C-Co. Це дало змогу оцінити діапазони стабільності фаз та ймовірні структурні зміни за різних температурних умов, зокрема під час рекристалізації або фазових переходів.

3. Електронно-променева обробка (ЕПО) поверхні металевих деталей широко використовується у виробництві завдяки унікальним перевагам та широким можливостям, а саме: досягати високих температур за короткі проміжки часу; забезпечувати максимальну чистоту оброблюваної поверхні; варіювати глибину термічного впливу в широкому діапазоні, починаючи з декількох нанометрів і т.і.

## РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Вибір матеріалів дослідження

Використання WC сплавів з Co зв'язкою є поширеним в таких галузях промисловості як, машинобудування, виготовлення різальних інструментів, пресформ і тп. [8]. Доцільність поєднання WC з Co пояснюється тим, що WC має чудові механічні характеристики, а саме високу твердість, міцність та зносостійкість, але через свою високу температуру плавлення (2870 °C) його важко отримувати литтям. Додавання Co значно спростило виготовлення виробів, оскільки Co менш тугоплавкий (1495 °C), що дозволяє, розплавивши його, зв'язати ним більш тугоплавкі зерна карбіду вольфраму. Ще однією важливою особливістю Co є його змочуваність у розплавленому стані, що дозволяє отримати малу кількість пор та міцне з'єднання частинок WC [3].

Сплави з більшим вмістом Co мають меншу твердість та міцність, але більшу ударну в'язкість. Це пояснюється, тим що Co є більш м'яким компонентом (від 86 HRA до 87 HRA) ніж WC (від 92 HRA до 94 HRA) [3]. Так, наприклад, твердість сплаву WC-6Co складає 88,5 HRA, а сплаву WC-8Co більше 87,5 HRA, в той час як для WC-15Co це значення зменшується до 86 HRA. Але межа міцності на вигин у WC-15Co буде 1862 Н/мм<sup>2</sup>, в той час як у WC-6Co вона буде 1519 Н/мм<sup>2</sup> [32]. Отже зменшення вмісту Co у сплавах призводить до збільшення твердості але зменшення ударної в'язкості. Тому доцільно підвищувати ударну в'язкість шляхом контрольованого росту зерен WC саме в тих сплавах, де ударна в'язкість є критично важливою характеристикою, зокрема у WC-15Co.

### 2.2 Синтез об'єктів дослідження. Виготовлення філь'єри

Процес синтезу зразків сплаву WC-Co є багатоетапним і включає низку взаємопов'язаних технологічних операцій, кожна з яких істотно впливає на кінцеві властивості матеріалу. Від синтезу вихідного порошку, проведення попереднього контролю його якості, змішування, сушіння, пресування до

спікання – кожен етап вимагає точного дотримання режимів і контролю умов. Блок схема процесу синтезу об'єктів дослідження наведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Схематичне зображення етапів синтезу та формування філь'єри

Вихідною сировиною для порошку WC є порошок  $WO_3$  який отримують з металобрухту окисленням вольфрамівмісного металобрухту в кисневій атмосфері за температури  $500\text{ }^\circ\text{C}$ . Порошок  $WO_3$  відновлюють в парах  $CH_3OH$  за температури від  $850\text{ }^\circ\text{C}$  до  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  отримуючи порошок вольфраму, який потім вже насичують вуглецем за температур від  $1400\text{ }^\circ\text{C}$  до  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ .

Вихідний матеріал проходить попередній контроль якості, який складається з: рентгенофлуорисцентної спектроскопії (перевірка вихідного порошку на наявність домішок, які залишилися після синтезу з металобрухту), скануючої електронної мікроскопії (форма та розмір гранул порошку) та рентгеноструктурного фазового аналізу (визначається наявність небажаної  $W_2C$  фази у WC та тип кристалічної ґратки Co).

Процес синтезу фільєри починається з подрібнення та змішування порошку Co та WC з пластифікатором у млинах з відношенням молотильних тіл до порошку 1:2, час подрібнення 72 години. Пластифікатор, що складається з поліетиленгліколю, олеїнової кислоти та спирту, виступає зв'язуючою

речовиною, щоб утримувати запресовку у межах певної форми до спікання. Кількість пластифікатору береться у співвідношенні на 2,5 кг порошку 555 мл пластифікатору. Порошок з пластифікатором висушують протягом від 6 год. до 8 год. за температури 60 °С, після чого пропускають через 400 мікроні сита для розділення агломерованих порошинок.

Отриманий порошок з пластифікатором дозується по 86 грам. Дозований порошок засипається на нижній пуансон, навколо якого розміщується пресформа. Вилка, що розміщена під пресформою, піднімає її трохи над пуансоном для забезпечення явища двухстороннього пресування. Засипаний порошок накривається верхнім пуансоном та обмежувачем (що допомагає уникнути глибшого проникнення пуансону у пресформу і, як результат, зміни геометричних розмірів кінцевого виробу). Зображення пресформи з фільерою наведено на рисунку 2.2.

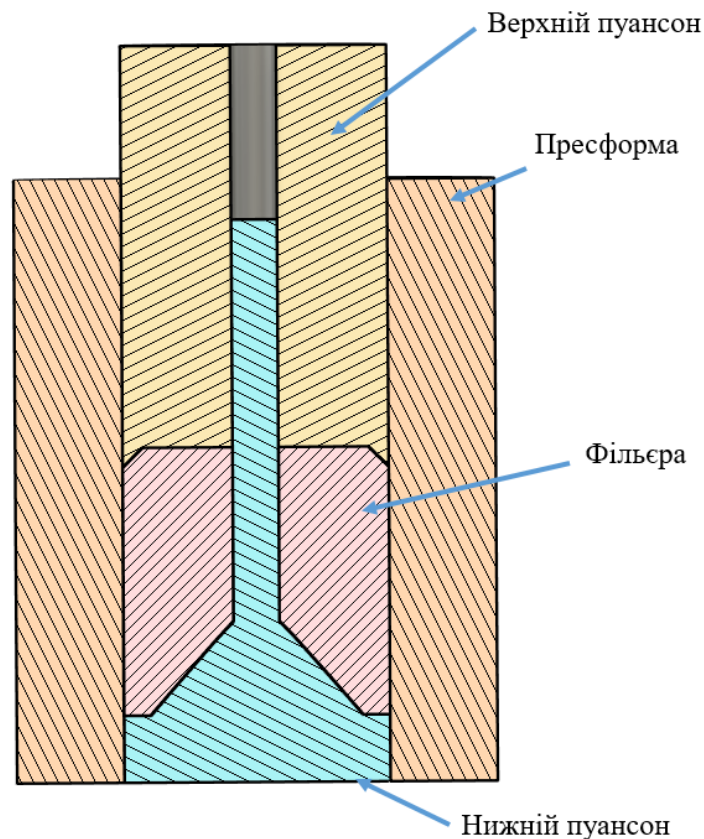


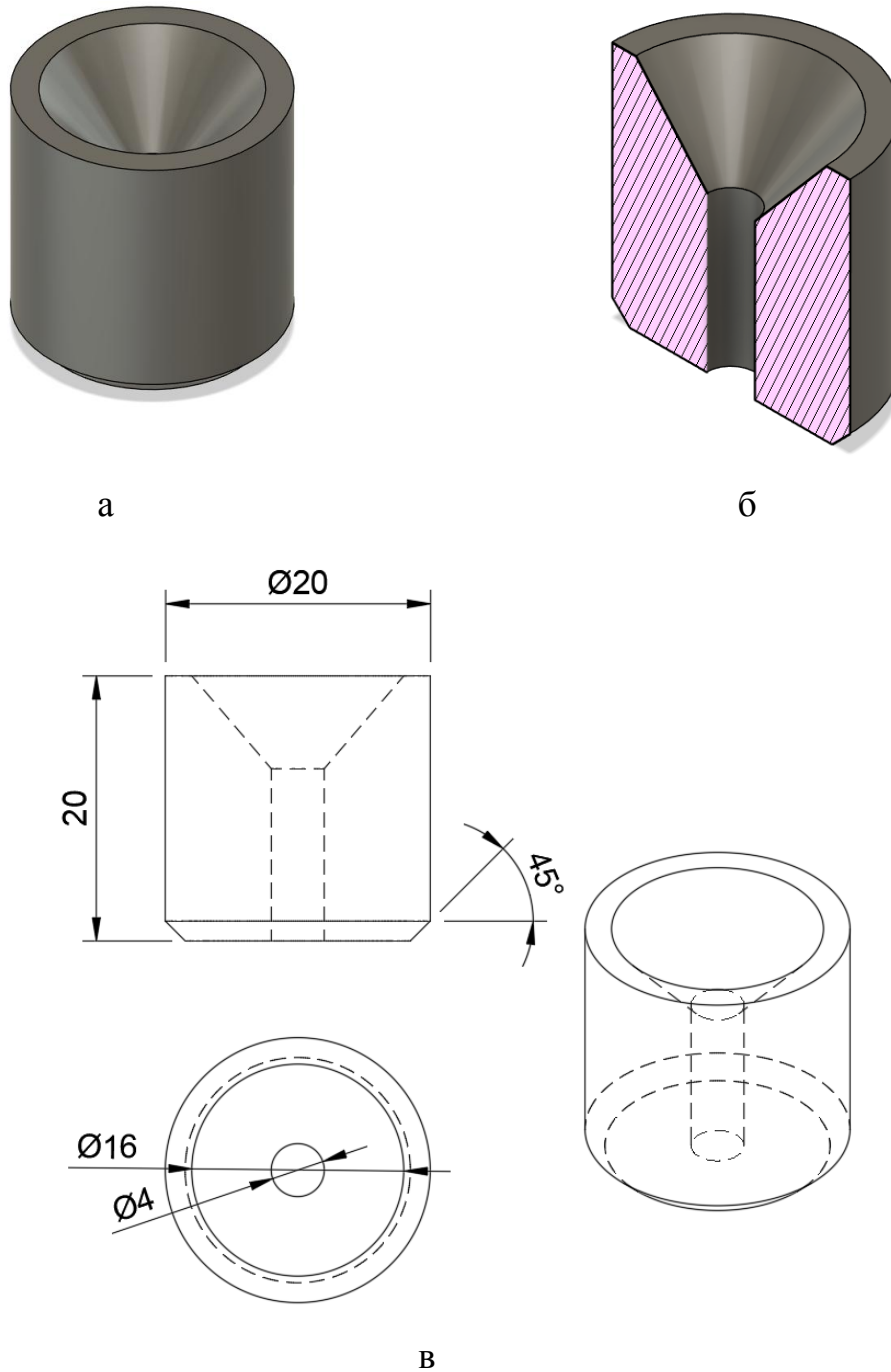
Рисунок 2.2 – Схематичне зображення поперечного перерізу пресформи для формування фільери

Конструкцію обережно переміщують під гідравлічний прес, де спочатку реалізовується явище двухстороннього пресування (при 60 кН) з подальшим видаленням вилки з під пресформи. Після підпресовки відбувається пресування за 170 кН з витримкою приблизно 10 секунд. З пресформи знімають обмежувач та за допомогою невеликого металевого стержня, що називається голкою, обережно витискають нижній пуансон, так, щоб не пошкодити внутрішній отвір. Наступним кроком йде випресування фільтери з пресформи, для цього притримуючи нижній пуансон пресформа перевертається та ставиться випресовочне кільце(для того щоб рухати пресформу так щоб не пошкодити фільтеру), на це кільце гідравлічним пресом подається невелике навантаження, через що пресформа починає потрохи відлипати від виробу. Коли цей процес закінчується, отриманий виріб візуально перевіряють на наявність зовнішніх дефектів пресування.

Відпресовані фільтери після формування завантажують у човники. Для запобігання знеуглецюванню матеріалу, фільтери вкладають у човники разом зі шматками графіту. Поверхню фільтер додатково посипають тонким шаром порошку оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ), який виконує подвійну функцію: по-перше, він слугує роздільником, що запобігає прилипанню фільтери до поверхонь човника, а по-друге – забезпечує стабільність форми виробу під час термічної обробки.

Підготовлені човники з фільтерами завантажують у піч із контролем атмосфери. На першому етапі термообробки проводиться видалення пластифікатора. Цей процес відбувається у водневій атмосфері за температури 700 °C протягом 2 годин. Водень тут виконує роль відновника, перешкоджаючи окисненню компонентів фільтери при нагріванні.

Після завершення етапу відгонки пластифікатора фільтери залишають у тій же печі для проведення попереднього спікання. Температуру підвищують до 1150 °C, і витримують заготовки в цих умовах 6 годин. Попереднє спікання дозволяє досягти початкового зміцнення структури фільтери, зберігаючи при цьому її форму. Схематичне зображення моделі фільтери подано на рис. 2.3.



а – 3D-модель фільтри, б – 3D-модель в розрізі, в – креслення фільтри  
 Рисунок 2.3 – 3D-модель досліджуваного зразка у вигляді фільтри

Спiкання вiдбувається в електронно-променевiй установцi (рис. 2.4(а)) в середовищi високого вакууму ( $5 \times 10^{-5}$  Торр).

Основою електронно-променевого спiкання є електронна гармата з вольфрамовим катодом. Вакуум в робочому просторi гармати складає близько  $4 \times 10^{-6}$  Торр. Досягти таких показникiв вакууму дозволяє система насосiв, яка

складається з форвакуумного насоса та турбомолекулярного насоса. Виріб розміщується на валках, що обертаються (рис. 2.4(б)), для рівномірного прогріву, швидкість обертання валків 360 об/хв. По краям, притискаючи зразок на валки, ставлять графітові обмежувачі, що слугують тримачами і допомагають уникнути зневуглецювання виробу. Ширина пучка складає 7 мм, фокусуюча сила струму 450 мА, відстань від гармати до зразка 50 см. Сила струму що подається на катод залежить від сплаву який оброблюється, так наприклад, для WC-6Co сила струму складає 120 мА, а для WC-15Co – 80 мА.



а



б

а – зовнішній вигляд установки, б – робоча камера

Рисунок 2.4 – Вакуумна камера для електронно-променевої обробки

Спикання проходить у декілька етапів, спочатку проводиться нагрів зразка (360 °С) до температури 1300 °С, з витримкою 240 °С, потім зменшують силу струму. Подальше охолодження деталі в установці триває 360 °С. Після завершення спикання вироби дістають з установки та дають їм час додатково охолонути на повітрі.

### 2.3 Електронно-променева обробка поверхні

Серед сучасних методів модифікації матеріалів електронно-променева обробка (ЕПО) посідає особливе місце завдяки своїй здатності забезпечувати локальний термічний вплив з високим рівнем керованості. Існує два основні типи електронно-променевої обробки поверхні: безперервна та імпульсна. Ці режими істотно відрізняються між собою, насамперед, за швидкістю нагрівання та охолодження оброблюваного матеріалу. Зокрема, в імпульсному режимі швидкість охолодження може сягати значень до  $10^9$  К/с, тоді як у безперервному режимі – приблизно  $10^5$  К/с. Такі відмінності зумовлюють формування різної мікроструктури та функціональних характеристик поверхневого шару [33].

В обох типах технологій вирішальне значення мають енергетичні параметри електронного променя, зокрема: прискорююча напруга  $U$  [В], струм променя  $I_w$  [А], та діаметр променя  $d_b$ . Щільність внесеної енергії визначається за формулою [30]:

$$E = \frac{U \cdot I_w \cdot \tau}{S}, \quad (2.1)$$

де  $E$  – щільність прикладеної енергії, Дж/мм<sup>2</sup>;

$\tau$  – час опромінення, с;

$S$  – площа опроміненої зони, мм<sup>2</sup>.

Сучасні експериментальні установки, які використовуються, як у лабораторних дослідженнях, так і в промислових умовах, базуються на застосуванні електронної гармати, що генерує електронний промінь високої інтенсивності. Електрони, що емітують з катода, прискорюються під дією електричного поля, після чого формуються у спрямований пучок за допомогою фокусуєчих елементів. Далі промінь проходить через систему магнітних лінз і відхиляючих котушок, які забезпечують його направлення на поверхню зразка.

До додаткових параметрів, які впливають на результат обробки належать частота сканування променя та швидкість переміщення зразка, оскільки вони

безпосередньо пов'язані з часом опромінення та процесами теплопередачі, охолодження і кристалізації [34].

Під час електронно-променевої обробки матеріалів кінетична енергія електронів перетворюється на теплову, що призводить до утворення теплового градієнта від поверхні до об'єму матеріалу. Водночас не всі електрони, що падають на поверхню, проникають у глибину матеріалу та віддають свою енергію у вигляді тепла. Частина з них втрачає енергію у формі відбитих електронів, теплового випромінювання, вторинних електронів або рентгенівського випромінювання.

У процесі поверхневої обробки матеріалів електронним променем реалізуються високі швидкості нагрівання та охолодження, що, у свою чергу, призводить до зміни мікроструктури, фазового складу, і, як результат, покращення функціональних властивостей матеріалу.

Електронно-променева обробка поверхні проводилася на тій самій електронно-променевій установці, що використовувалася для спікання (рис. 2.3). Параметри обробки наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри електронно-променевої обробки

Матеріал	Сила струму	Час обробки
WC-15Co	20 мА	5 хв
		10 хв
	17 мА	5 хв
		10 хв

До параметрів, що залишалися незмінними відноситься фокусуєча сила струму 600 мА, швидкість обертання валків 36 обертів в хвилину, відстань до зразку 150 мм, ширина пучка 1 мм, а довжина променя відповідає довжині зразка, температура нагрівання від 1300 °С до 1400 °С. Схема процесу безперервної променевої обробки наведена на рисунку 2.5.

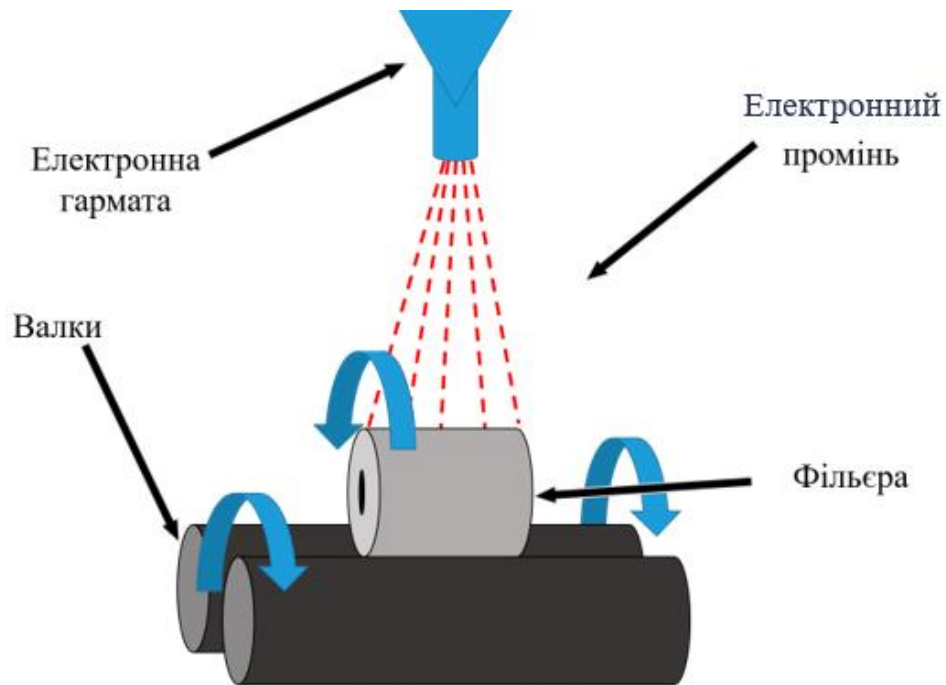


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення процесу ЕПО філь'єри

## 2.4 Скануюча електронна мікроскопія

Скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) один з найбільш універсальних приладів для дослідження та аналізу мікроструктури поверхні. В порівнянні з оптичним мікроскопом дозволяє з високою роздільною здатністю та глибиною різкості формувати зображення мікрорельєфа твердих, провідних об'єктів.

Поверхня, що досліджується, опромінюється сфокусованим електронним пучком, який може знаходитися у певній точці об'єкту, так і розгортатися в растр на поверхні зразка. В момент взаємодії електронного пучка з поверхневим шаром зразка виникають вторинні електрони, відбиті електрони, характеристичне рентгенівське випромінювання та Оже-електрони, які використовуються для отримання характеристик зразка.

На катод електронної гармати подається напруга, в результаті чого з катоду емітують електрони (рис. 2.6). За допомогою прискорюючої напруги, що прикладається між катодом та анодом, емітовані електрони пришвидшуються, та за допомогою відхиляючих котушок сканують поверхню зразка. Кінцева котушка фокусує промінь у дуже вузький пучок, який потім і потрапляє на зразок.

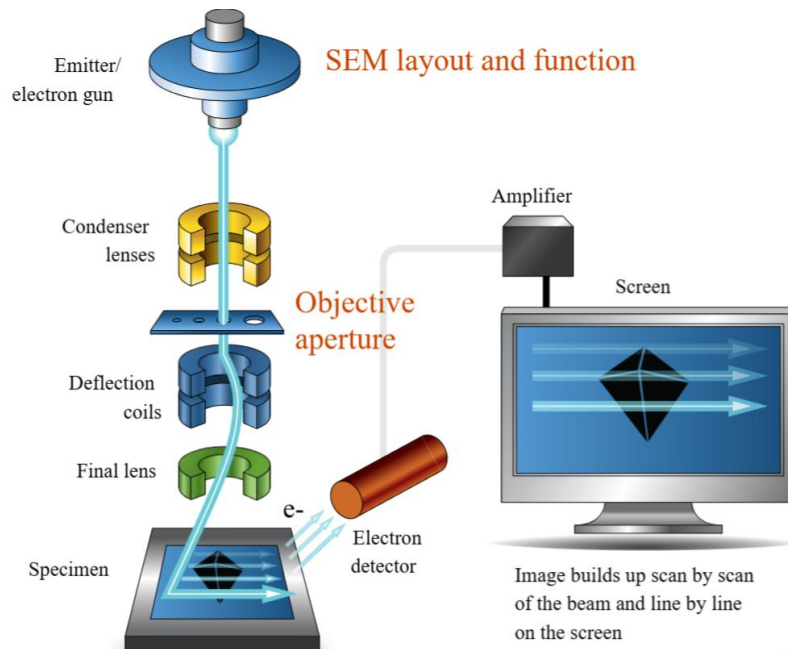


Рисунок 2.6 – Схема формування зображення в СЕМ [35]

Для зчитування характеристик матеріалів використовуються різні типи детекторів, які встановлюються в камері СЕМ. Найчастіше використовують детектори вторинних та зворотно розсіяних вторинних електронів.

Зображення у режимі вторинних електронів є ідеальним для отримання про морфологію поверхні зразка. Вторинні електрони мають низьку енергію (від 2 еВ до 50 еВ). Вони вибиваються лише з приповерхневих шарів зразка. Щоб зібрати низькоенергетичні електрони, на передню частину детектора подається невеликий потенціал (зазвичай близько від 200 В до 300 В), що притягує негативно заряджені електрони до детектора.

Детектор зворотно розсіяних електронів встановлюється під полюсним наконечником об'єктивної лінзи по центру навколо оптичної осі. Зворотно розсіяні електрони утворюються під час сканування поверхні зразка падаючим електронним пучком. Їхній вихід залежить від топографічних, фізичних та хімічних властивостей зразка. Зворотно розсіяні електрони мають вищу енергію, ніж вторинні електрони, і можуть надавати інформацію з-під поверхні зразка [36].

Під час експерименту використовувався мікроскоп TESCAN Vega 3 (рис. 2.7). Оснащений приставкою для проведення енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії, що дозволяє визначати хімічний склад у межах певного поля зору.

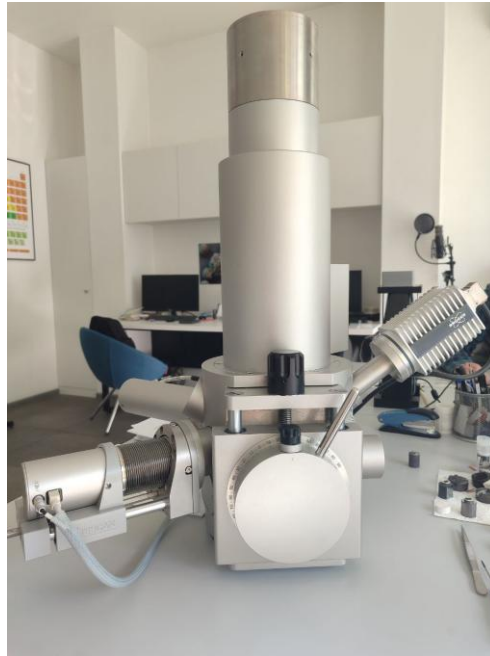


Рисунок 2.7 – Скануючий електронний мікроскоп TESCAN Vega 3

Сканування відбувалося при напрузі – 20 кВ, що дозволяє електронам проникати на глибину приблизно від 0,5 мкм до 1 мкм та отримувати зображення з високою деталізацією поверхні.

## **2.5 Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія**

Метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (ЕДРС) дозволяє проводити кількісний аналіз матеріалів на мікрорівні. ЕДРС часто поєднують з СЕМ, що дозволяє отримувати як зображення з високою роздільною здатністю, так і аналізувати хімічний склад.

Пучок високоенергетичних електронів спрямовується на певну зону зразка бомбардуючи атоми речовини. В результаті взаємодії вибиваються електрони з внутрішніх оболонок атомів (найчастіше К або L оболонки), через що, в свою чергу, утворюється «дірка» у внутрішній електронній оболонці атома. Електрони

з вищих енергетичних рівнів переходять на нижчий, заповнюючи вільне місце. Під час цього переходу вивільняється надлишкова енергія у вигляді характеристичного рентгенівського випромінювання (рис. 2.8). Кожен хімічний елемент має свої унікальні енергетичні рівні, тому енергія, що випромінюється, буде різною. ЕДРС детектор зчитує кванти, які вказують на енергії наявних хімічних елементів у матеріалі [37].

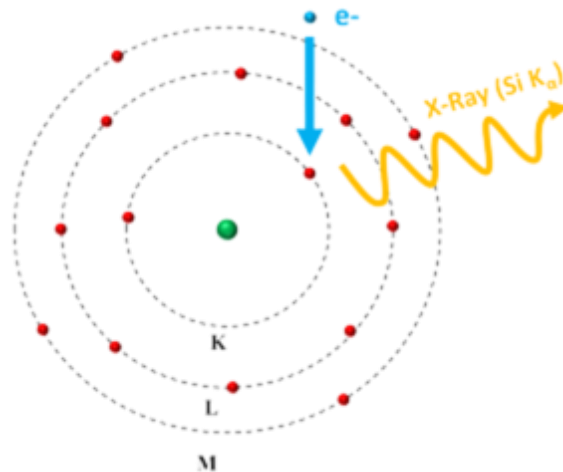


Рисунок 2.8 – Принцип утворення квантів рентгенівського випромінювання [38]

ЕДРС детектор BRUKER, що використовувався у СЕМ під час проведення хімічного аналізу поверхні зразків наведено на рисунку 2.9.

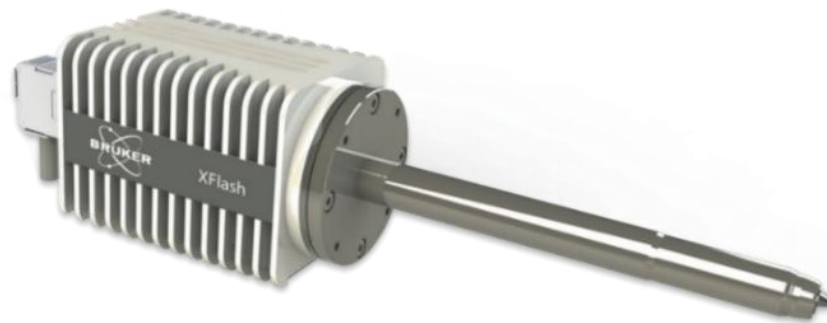


Рисунок 2.9 – ЕДРС детектор BRUKER, що використовувався у СЕМ

## 2.6 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РФА) є високоточним методом дослідження кристалічної структури матеріалу. РФА дозволяє провести фазовий аналіз, визначити їх кількісний вміст, параметри кристалічної ґратки, ступінь кристалічності структури, розмір кристалітів та внутрішні напруження.

Метод базується на явищі дифракції рентгенівського випромінювання при взаємодії з атомними площинами кристалічних речовин. Рентгенівські промені з довжинами хвиль близькими до міжатомних (від 0,05 нм до 0,2 нм), при падінні на кристалічний матеріал під кутом, інтерферують згідно закону Вульфа-Брегга [39]:

$$2d \sin\theta = n\lambda, \quad (2.2)$$

де  $d$  – міжплощинна відстань у кристалі,

$\theta$  – кут падіння (і відбиття) променів,

$n$  – порядок дифракції,

$\lambda$  – довжина хвилі рентгенівського випромінювання.

Рентгенівське випромінювання, генерується в рентгенівській трубці. Сформований пучок рентгенівських променів через систему щілин та коліматорів спрямовується на зразок кристалічного матеріалу, який фіксується на гоніометричному столі. Гоніометр забезпечує точне позиціонування зразка в просторі та дозволяє змінювати кут падіння випромінювання відповідно до вимог експерименту. Детектор реєструє інтенсивність променів, що дифрагували під різними кутами (рис. 2.10).

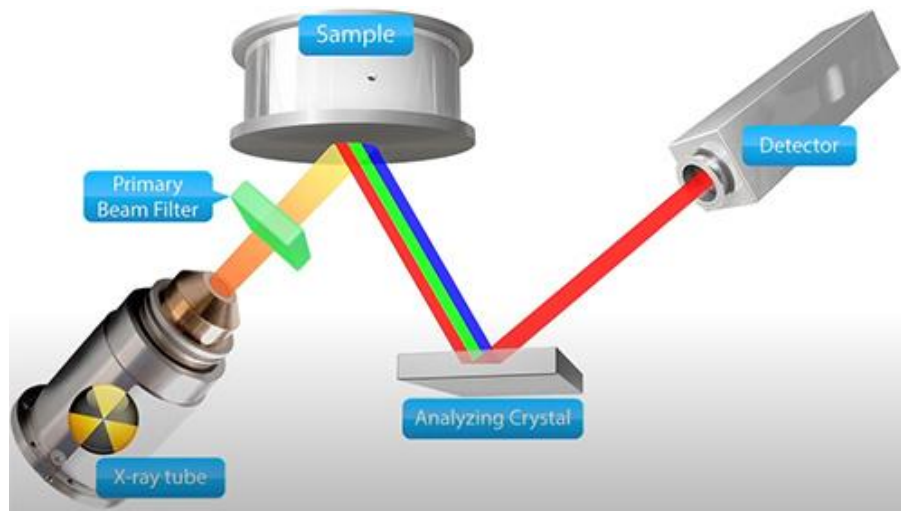


Рисунок 2.10 – Принцип зйомки методом РФА [40]

Результатом вимірювання є дифрактограма – що показує, як змінюється інтенсивність відбитого рентгенівського випромінювання залежно від кута, під яким воно розсіюється, вона є основою для подальшого якісного й кількісного аналізу кристалічної структури.

Дослідження проводилося на дифрактометрі марки EQUINOX 2000 (рис. 2.11). Дана модель дифрактометру використовує рентгенівську трубку з мідним анодом (довжина хвилі 1,54 Å) та вольфрамовою спіраллю у якості катоду. Детектор та зразок є нерухомим по відношенню до джерела рентгенівського випромінювання. Використовується вигнутий позиційно чутливий детектор який здатен реєструвати дифракційні сигнали до 110°. Кристалом монохроматором слугує монокристал германію.

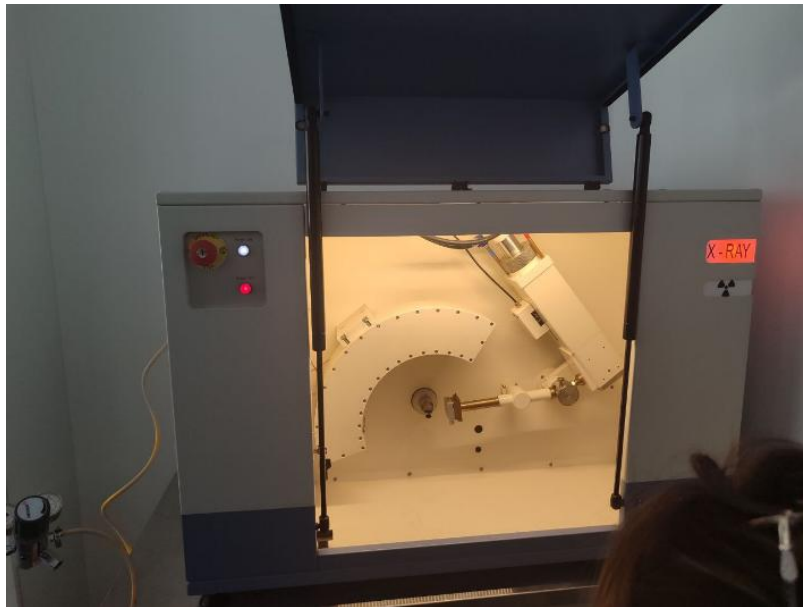


Рисунок 2.11 – Дифрактометр EQUINOX 2000

## 2.7 Аналіз мікротвердості за Віккерсом

Визначення мікротвердсть за Віккерсом – це метод вимірювання твердості шляхом прикладення навантаження алмазним індентором у вигляді правильної чотиригранної піраміди, з кутом між протилежними гранями –  $136^\circ$ , на поверхні зразка з подальшим вимірюванням діагоналей відбитка (рис. 2.12).

Мікротвердсть за Віккерсом розраховується за формулою 2.3 [41]:

$$HV = \frac{0,1854 \cdot F}{d^2}, \quad (2.3)$$

де  $HV$  – розраховане значення мікротвердості за Віккерсом, кгс/мм<sup>2</sup>,

$d$  – середня довжина діагоналей, мм,

$F$  – прикладене навантаження, Н.

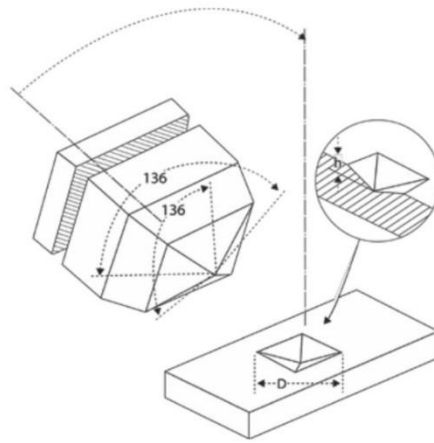


Рисунок 2.12 – Схематичне зображення індентора Віккерса та форми відбитка [42]

Для визначення мікротвердості зразків використовувався мікротвердомір марки ПМТ-3 (рис. 2.13). Вимірювання проводили при робочому навантаженні 200 г з часом витримки 10 секунд. Перед проведенням вимірювань поверхню зразків ретельно шліфували та полірували до дзеркального блиску, що забезпечувало високу точність вимірювання та відтворюваність результатів.



Рисунок 2.13 – Мікротвердомір ПМТ-3

## 2.8 Енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналіз

Енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналіз (ЕДРФА) метод за допомогою якого визначають кількісний та якісний хімічний склад.

ЕДРФА заснований на явищі збудження атомів матеріалу за допомогою зовнішнього джерела рентгенівського випромінювання. Джерелом

випромінювання, як правило, є рентгенівська трубка. Рентгенівське випромінювання виникає при гальмуванні електронів, що емітують з катоду рентгенівської трубки. Під дією високоенергетичного рентгенівського випромінювання відбувається іонізація атомів зразка, зокрема електрони вибиваються з внутрішніх електронних оболонок, за тим же механізмом як і ЕДРС, електрони з вищих рівнів займають «дірки» на нижчих електронних рівнях, в результаті чого виділяється надлишкова енергія у вигляді вторинного рентгенівського (флуоресцентного) випромінювання. Детектор фіксує інтенсивність вторинного рентгенівського випромінювання та на основі цих даних будується рентгенівський спектр, що несе в собі інформацію про наявність та кількість хімічних елементів у досліджуваному матеріалі [43].

Основними перевагами ЕДРФА є його неруйнівна природа, універсальність та висока чутливість до широкого спектра елементів. Принцип хімічного аналізу методом ЕДРФА зображено на рисунку 2.14.

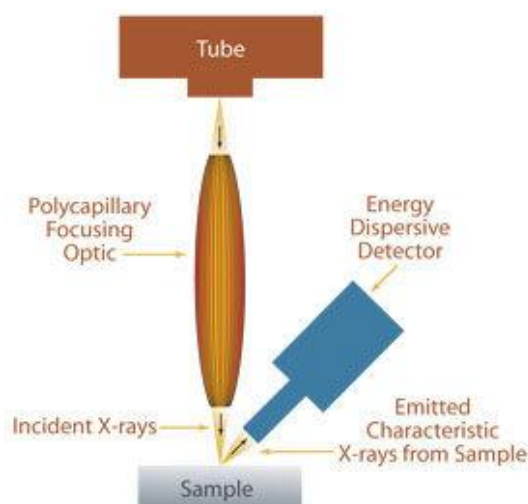


Рисунок 2.14 – Схематичне зображення вимірювання хімічного складу методом ЕДРФА [44]

Використовувався енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналізатор EXPERT CUBE (рис. 2.15). За його допомогою були отримані дані про хімічну чистоту вихідного порошку WC та Co.



Рисунок 2.15 – Енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналізатор  
EXPERT CUBE

В аналізаторі використовується рентгенівська трубка с титановим анодом, як катод використовується вольфрамова спіраль. Аналіз порошку відбувався за напруги 46 кВ.

Перед початком аналізу порошок насипається в кюветку так, щоб повністю покрити її дно. Дно кюветки являє собою проленову прозору плівку товщиною 4 мкм. Кюветка з порошком розміщується на кремнієвому детекторі. Аналіз відбувається протягом 2 хвилин.

## 2.9 Висновок до розділу 2

1. Для проведення дослідження було обрано твердий сплав WC- 15Co, який вирізняється високою твердістю, зносостійкістю та активно застосовується для виробництва інструментів. Найбільш ефективним методом синтезу зразків з твердого сплаву WC- 15Co є метод порошкової металургії, який забезпечує отримання матеріалу з необхідною щільністю та однорідністю мікроструктури.

2. З метою отримання високих показників ударної в'язкості на поверхні деталі використовувалася електронно-променева обробка за різних режимів, які

відрізнялися силою струму (17 мА та 20 мА) та тривалістю обробки (5 хв та 10 хв).

3. Для комплексного аналізу структури та властивостей зразків були обрані сучасні фізико-аналітичні методи. Для визначення морфологічної будови та зеренної структури був обраний метод скануючої електронної мікроскопії; для визначення локального хімічного складу був обраний метод енергодисперсійного аналізу. Для аналізу хімічного складу вихідного порошку був обраний метод рентгенофлуоресцентного аналізу, а для визначення фазового складу був обраний метод рентгеноструктурного аналізу. Для оцінки змін у механічних властивостях був обраний метод визначення мікротвердості за Віккерсом.

## РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 3.1 Хімічний, фазовий склад та морфологія поверхні вихідного порошку WC та Co

Результати хімічного аналізу за допомогою ЕДРФА вихідного порошку WC наведені в таблиці 3.1 й підтверджують запланований елементний склад, де вміст вольфраму (W) – 93,933 мас.%, а вуглець (C) – 6 мас.%. Фіксується незначна кількість заліза (Fe) – 0,067 мас.%. Ймовірно, наявність Fe пов'язана з особливостями технології синтезу порошку, зокрема з відновленням вольфраму з металобрухту. Однак, враховуючи його вкрай малий вміст, залізо не повинно чинити суттєвого впливу на фізико-механічні властивості кінцевого матеріалу.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад вихідного порошку WC

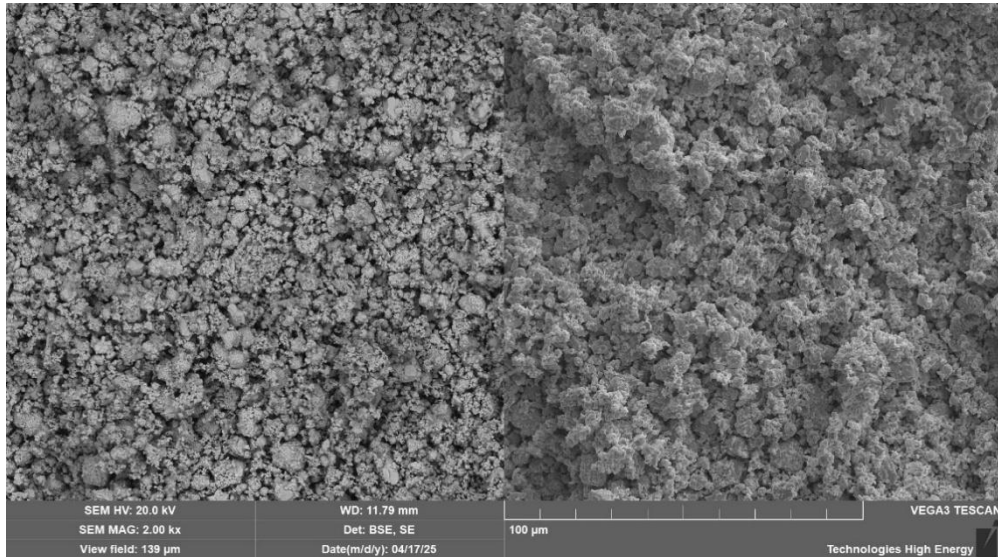
Елемент	Частка, мас.%	Похибка, мас.%
C	6	0,057
W	93,933	0,007
Fe	0,067	0,004

Аналіз порошку Co показав (таблиця 3.2), що він має високу чистоту – 99,906 мас.%. Серед незначних домішок (< 0,1 мас.%) були виявлені такі елементи, як W, Nb, Ti та S. Їхній низький вміст свідчить про високу якість вихідного порошку Co, що забезпечує стабільні властивості зв'язуючої фази в сплаві композиту WC-15Co.

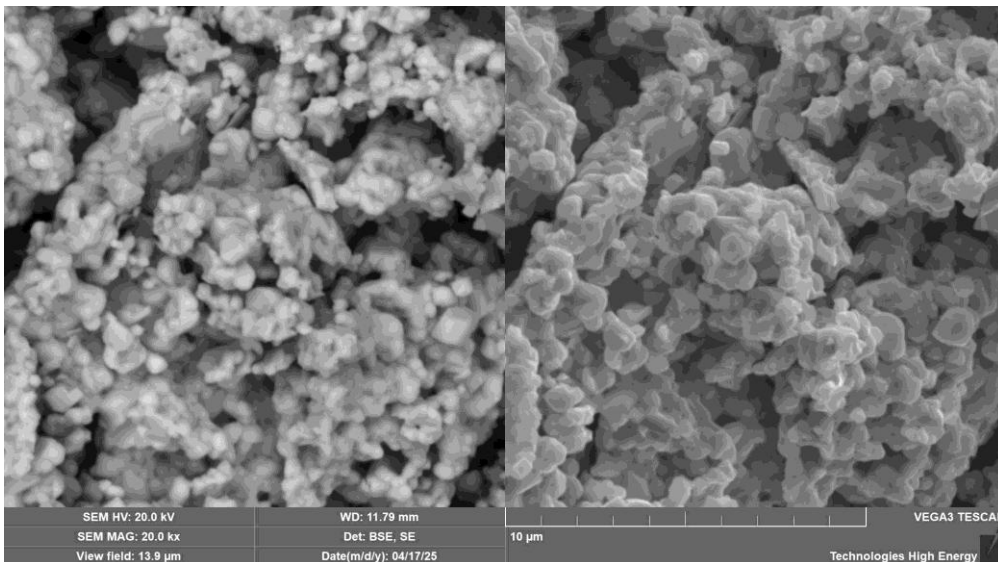
Таблиця 3.2 – Хімічний склад вихідного порошку Co

Елемент	Частка, мас.%	Похибка, мас.%
Co	99,906	0,006
W, Nb, Ti, S	< 0,1 %	0,005

Морфологія вихідного порошку WC та Co була досліджена за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM). Як видно з рисунку 3.1, порошок WC характеризується неправильною формою частинок, з розмірами в межах від 0,39 мкм до 1,49 мкм. Середній розмір частинок становить приблизно 0,8 мкм. Частинки мають тенденцію до агломерації, утворюючи щільні глобулі, що може впливати на рівномірність розподілу компонентів у композиті під час спікання.



а

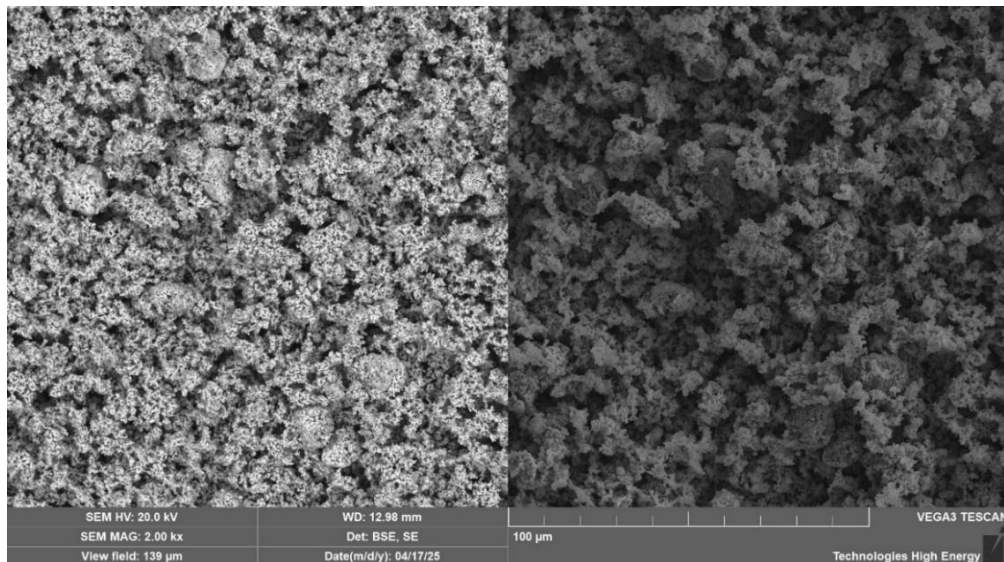


б

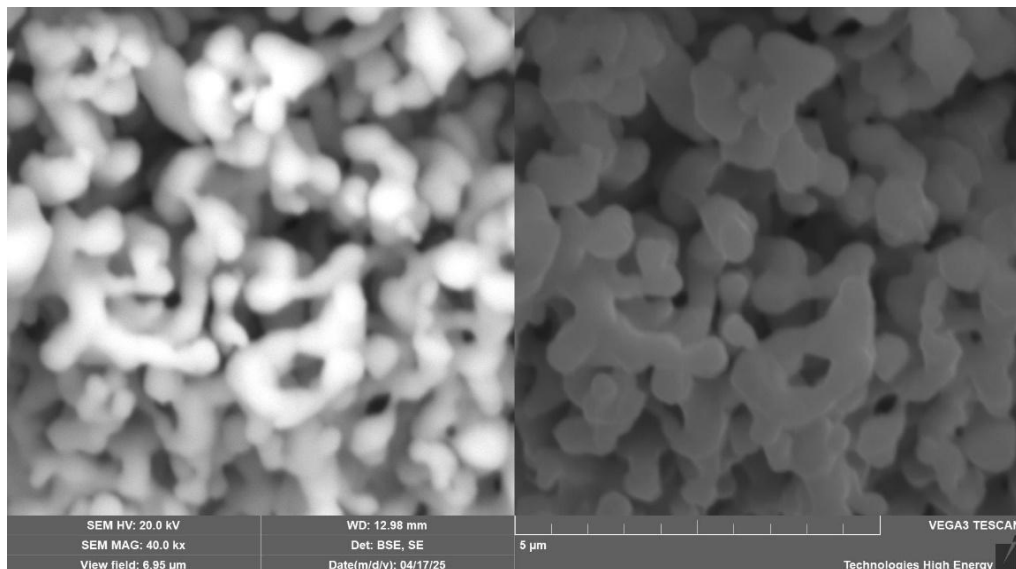
а – збільшення 2000х, б – збільшення 40000х

Рисунок 3.1 – Морфологія вихідного порошку WC отримані з використанням BSE та SE детектори SEM

Аналогічну морфологію продемонстрував і вихідний порошок Co (рис. 3.2). Частинки Co також мають неправильну форму, з розміром, який коливається від 0,32 мкм до 0,94 мкм, середнє значення становить близько 0,71 мкм. Як і у випадку з WC, частинки Co демонструють виражену схильність до агломерації, що може впливати на щільність і однорідність матеріалу на етапі формування та обробки.



а



б

а – збільшення 2000х, б – збільшення 40000х

Рисунок 3.2 – Морфологія вихідного порошку Co отримані з використанням BSE та SE детектори SEM

Аналіз результатів рентгенофазового аналізу порошку WC (рис 3.3) свідчить про високу фазову чистоту матеріалу. На отриманій дифрактограмі були зафіксовані лише фундаментальні дифракційні рефлекси, характерні для гексагональної фази WC, без присутності додаткових сигналів, які могли б свідчити про утворення вторинних карбідних або металічних фаз.

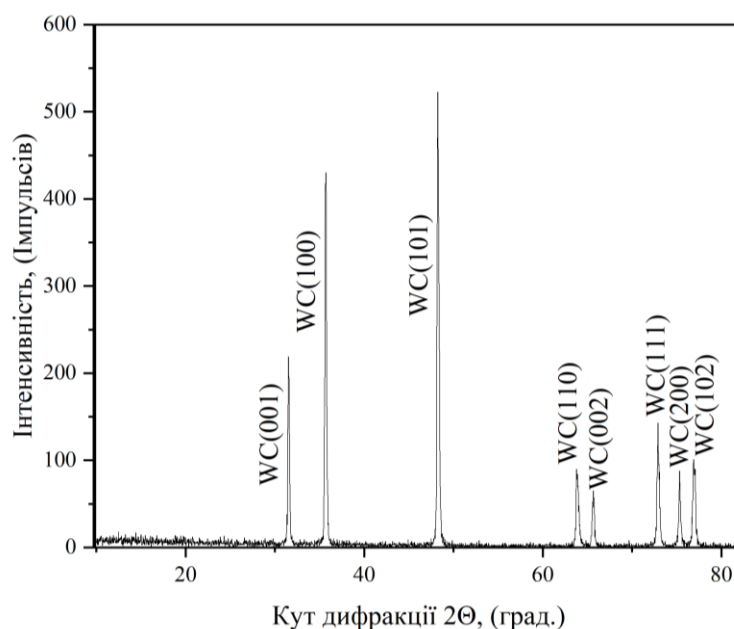


Рисунок 3.3 – Дифрактограма порошку WC

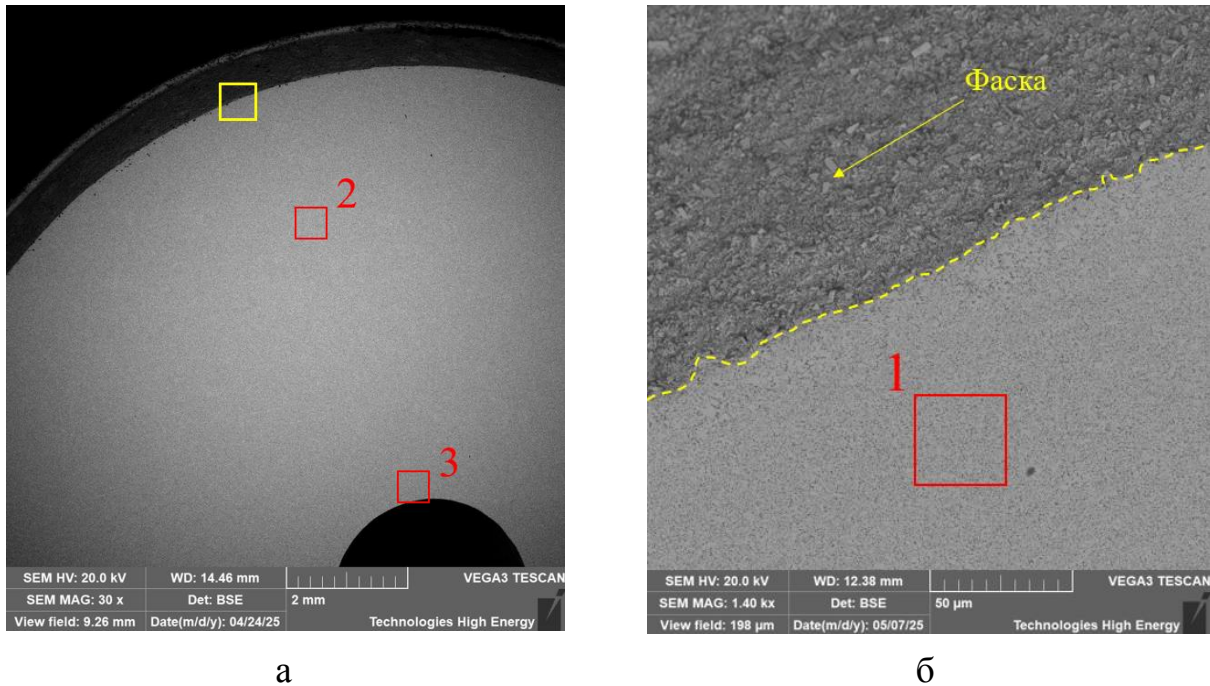
Зокрема, у дослідженому зразку відсутні характерні піки, притаманні фазі  $W_2C$ , що зазвичай спостерігаються в інтервалах  $2\theta \approx 39^\circ - 41^\circ$  [45]. Це вказує на те, що в умовах отримання порошку було забезпечено достатній контроль над термодинамічними умовами синтезу та атмосферою, що дозволило уникнути часткової декарбуризації або окиснення WC.

У підсумку проведеного дослідження хімічного складу, морфології та фазового складу порошку WC можна зробити висновок про високу якість вихідної сировини, що була використана для синтезу композиційного сплаву WC-15Co. Результати хімічного аналізу засвідчили стабільний вміст основних елементів – вольфраму та вуглецю – без домішок сторонніх фазоутворюючих елементів, що підтверджує відповідність порошку стандартам якості. Аналіз морфології, виконаний за допомогою скануючої електронної мікроскопії,

показав однорідну структуру частинок із чітко окресленими межами зі скупченням, що забезпечує якісне пресування. Результати рентгенофазового аналізу підтвердили наявність виключно гексагональної фази WC без домішок вторинних карбідів, таких як  $W_2C$ .

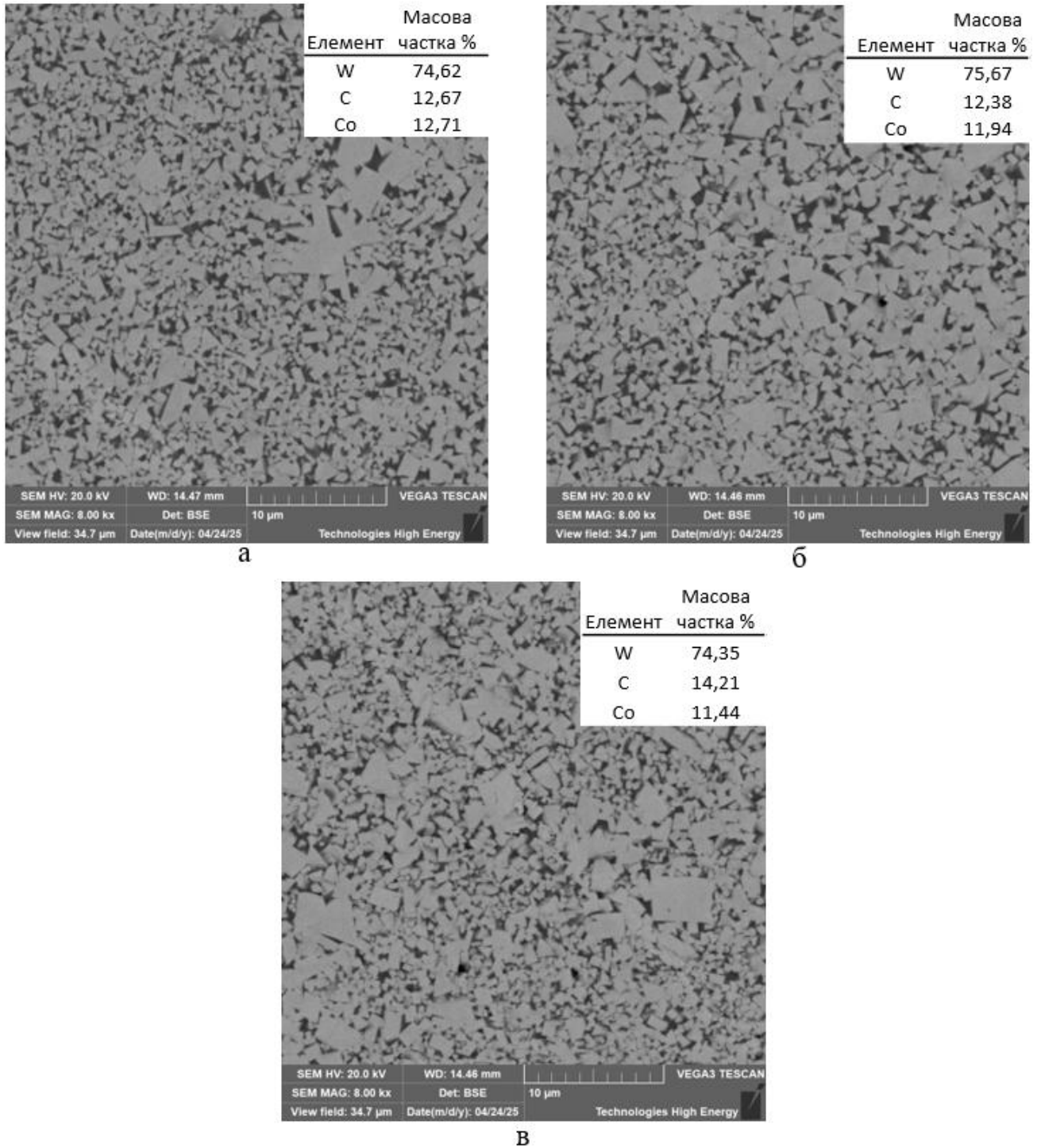
### 3.2 Еволюція мікроструктури твердого сплаву WC-15Co під дією електронно-променевого опромінення

На рисунку 3.4 представлено електронно мікроскопічний знімок поперечного перерізу філь'єри. Для аналізу змін мікроструктури за глибиною обрано три зони, що відповідають приповерхневій області, об'єму та області біля внутрішнього отвору. На рисунку 3.4(б) показана зона приближена до краю поперечного перерізу, де відмічена фаска та перше місце зйомки (приповерхневого шару). Місця зйомки при збільшенні  $\times 8000$  розглянуті на рисунку 3.5



а – загальний вигляд філь'єри та місця в яких відбувалася зйомка, б – край поперечного перерізу

Рисунок 3.4 – SEM зображення поперечного перерізу філь'єри з сплаву WC-15Co до обробки



а – приповерхнева область, б – в об'ємі, в – біля отвору

Рисунок 3.5 – Структура сплаву WC-15Co у вихідному стані при збільшенні x8000

Мікроструктура після електронно-променевого спікання твердого сплаву WC-15Co характеризується типовою двофазною композитною структурою, що складається з твердої фази WC та пластичної металевої фази зв'язки Co. Фаза

WC має вигляд неправильних полігональних зерен із гострими краями та кутами. Розподіл розмірів зерен нерівномірний: поруч із дрібнозернистими областями спостерігаються й окремі грубозернисті структури, що свідчить про негомогенний ріст зерен під час спікання. Фаза Co зв'язки переважно розташовується вздовж меж зерен, утворюючи безперервну сітку, яка ущільнює матеріал.

Результати хімічного аналізу, проведеного методом енергетично-дисперсійної спектроскопії (ЕДРС), засвідчили незначне збільшення масової частки Co на поверхні зразка у порівнянні з його внутрішніми шарами. Зокрема, масова частка Co на поверхні становила 12,71 мас.%, тоді як поблизу внутрішнього отвору – 11,44 мас.%. Така різниця у вмісті Co свідчить про напрямлену дифузію зв'язувальної фази до поверхні зразка в процесі термічної обробки або спікання.

Ймовірним механізмом цього явища є термодифузія, за якої при підвищених температурах компоненти сплаву прагнуть до енергетично більш вигідного розподілу. У випадку WC-15Co, Co як пластична фаза з меншою температурою плавлення має вищу мобільність і схильність до переміщення у зони зниженої концентрації, зокрема до поверхні. Крім того, капілярні сили та різниця в енергії поверхні між зернами WC і зв'язкою Co також можуть стимулювати переміщення Co в напрямку до зовнішніх шарів матеріалу. Така локальна зміна хімічного складу є типовою для спечених твердих сплавів.

На основі аналізу змін мікроструктури WC-15Co після електронно-променевого спікання було встановлено, що зміна розміру зерен WC у різних зонах зразка є незначною, що свідчить про відносну стабільність структури під час термічної дії високої щільності. Середній розмір зерен в приповерхневій області зразка становив 1,4 мкм, у внутрішньому об'ємі – 1,54 мкм, а поблизу центрального отвору – 1,37 мкм (рис. 3.6).

Значення середнього розміру зерна в різних зонах за поперечним перерізом фільтри вказує на однорідність теплового впливу по всьому об'єму та відсутність надмірного зростання зерен у ході спікання.

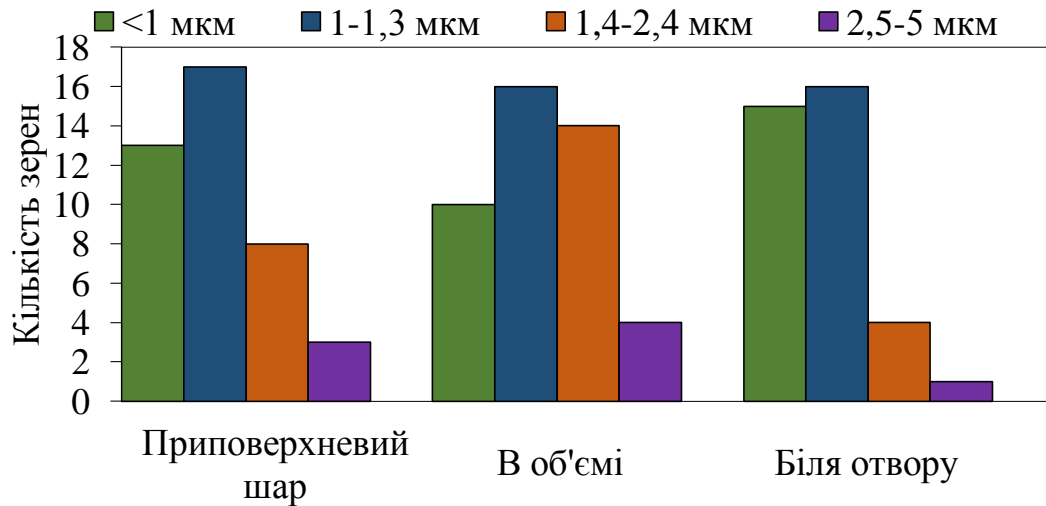


Рисунок 3.6 – Розподіл розміру зерен WC за глибиною обробки

Поперечний переріз зразка твердого сплаву WC-15Co після поверхневої обробки безперервним електронним променем з силою струму  $I_w = 20$  мА та часом опромінення  $\tau = 5$  хв демонструє виразні мікроструктурні зміни, зосереджені переважно в приповерхневій зоні (рис. 3.7).

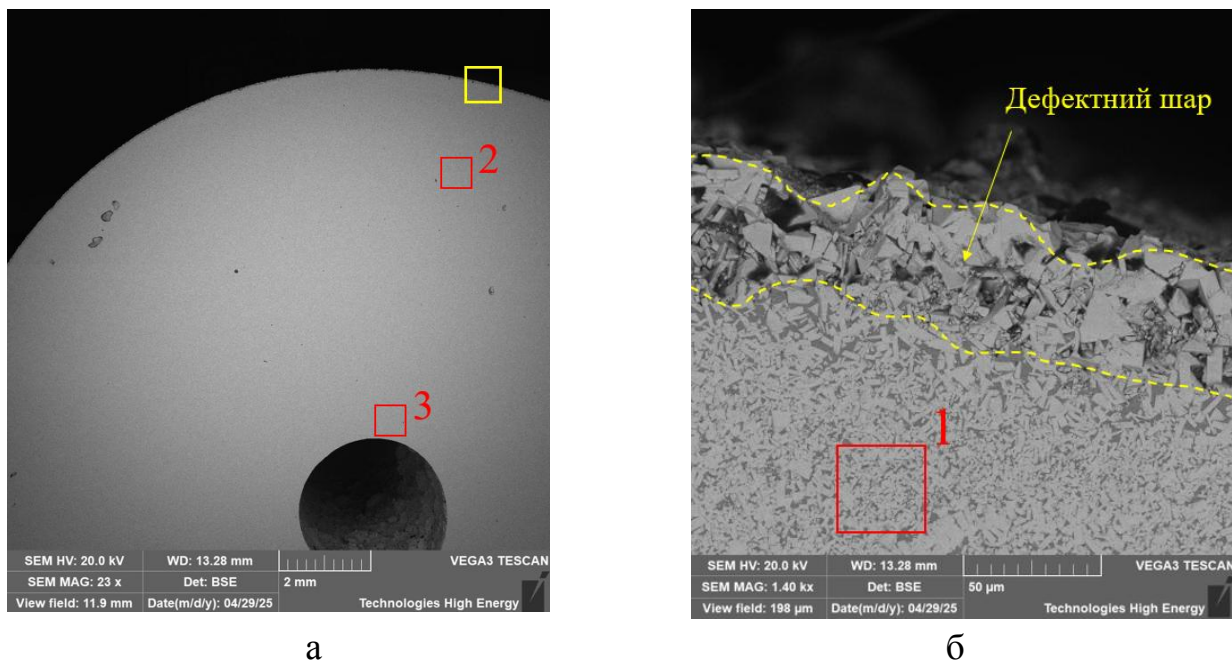


Рисунок 3.7 – SEM зображення поперечного перерізу фільтри з сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки  $I_w = 20$  мА,  $\tau = 5$  хв

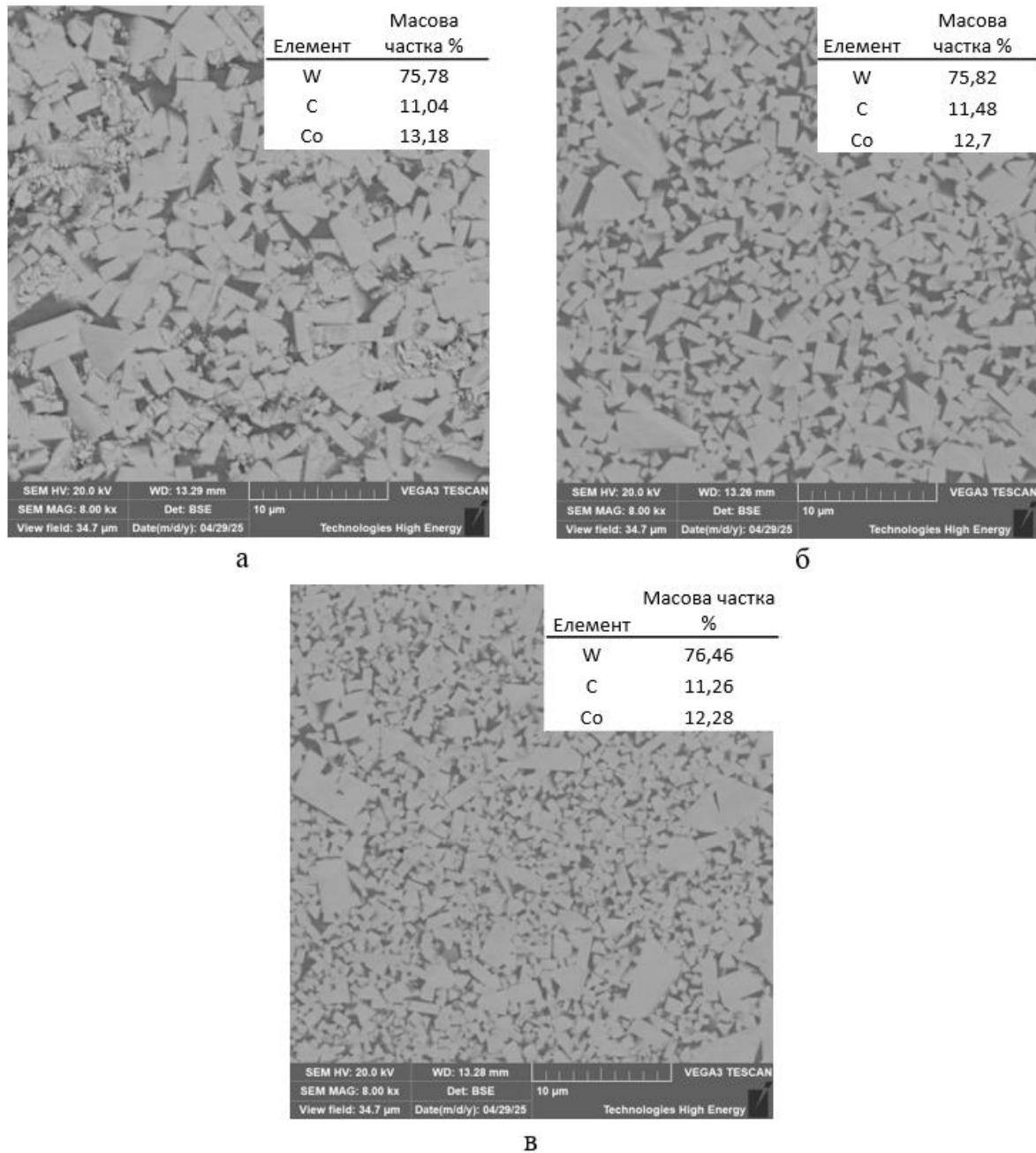
Основною ознакою зміни морфології є інтенсивний ріст зерен WC в напрямку до поверхні, що супроводжується формуванням грубозернистої структури.

У верхньому шарі зразка сформувався дефектний прошарок товщиною до 50 мкм, який характеризується зниженим ступенем ущільнення, наявністю мікропор та міжзеренних пустот, а також нерівномірним розподілом зв'язуючої фази. Імовірно, це результат надмірного локального перегріву та переплавлення, викликаного тривалою тепловою дією електронного променя при стабільно високій щільності струму. Формування дефектного шару може негативно впливати на механічні характеристики модифікованого матеріалу, зокрема знижувати його твердість та міцність на стиск через ослаблення міжфазового зв'язку та появу концентраторів напружень у вигляді пор.

У товщі матеріалу, поза межами дефектного шару, структура зберігає більш типовий для сплаву WC-15Co вигляд: розмір зерна WC не перевищує 5 мкм, а кобальтова зв'язка рівномірно розподілена по межах зерен (рис. 3.8). Проте тепловий вплив від поверхні поширюється вглиб, що спричиняє градієнт змін у структурі – від грубозернистого шару на поверхні до майже незміненого стану в глибині.

Хімічний аналіз зразка WC-15Co після поверхневої обробки безперервним електронним променем показав, що розподіл елементів у структурі сплаву зберігає характерні риси, подібні до мікроструктури WC-15Co після спікання. Зокрема, розподіл зв'язуючої фази зберігає тенденцію до збагачення поверхневих шарів Co. Частка Co становила 13,2 мас.% у приповерхневій зоні, 12,7 мас.% у центральному об'ємі, та 12,3 мас.% поблизу внутрішнього отвору. Такий профіль розподілу працює за тим же механізмом термодифузії під дією електронного променя, який стимулює міграцію Co до поверхні за рахунок різниці температурного градієнта. Це узгоджується з типовою поведінкою кобальтової зв'язки під час спікання, коли фазова мобільність Co також зумовлює його локальне накопичення в енергетично вигідних зонах.

Незначна варіація у вмісті Co в різних зонах зразка свідчить про контрольовану інтенсивність дифузійних процесів, яка не призводить до різко вираженого фазового розшарування. Водночас локальне збагачення поверхні кобальтом може відігравати подвійну роль – сприяти підвищенню пластичності поверхневого шару, однак водночас потенційно знижувати твердість через надлишок зв'язуючої фази.



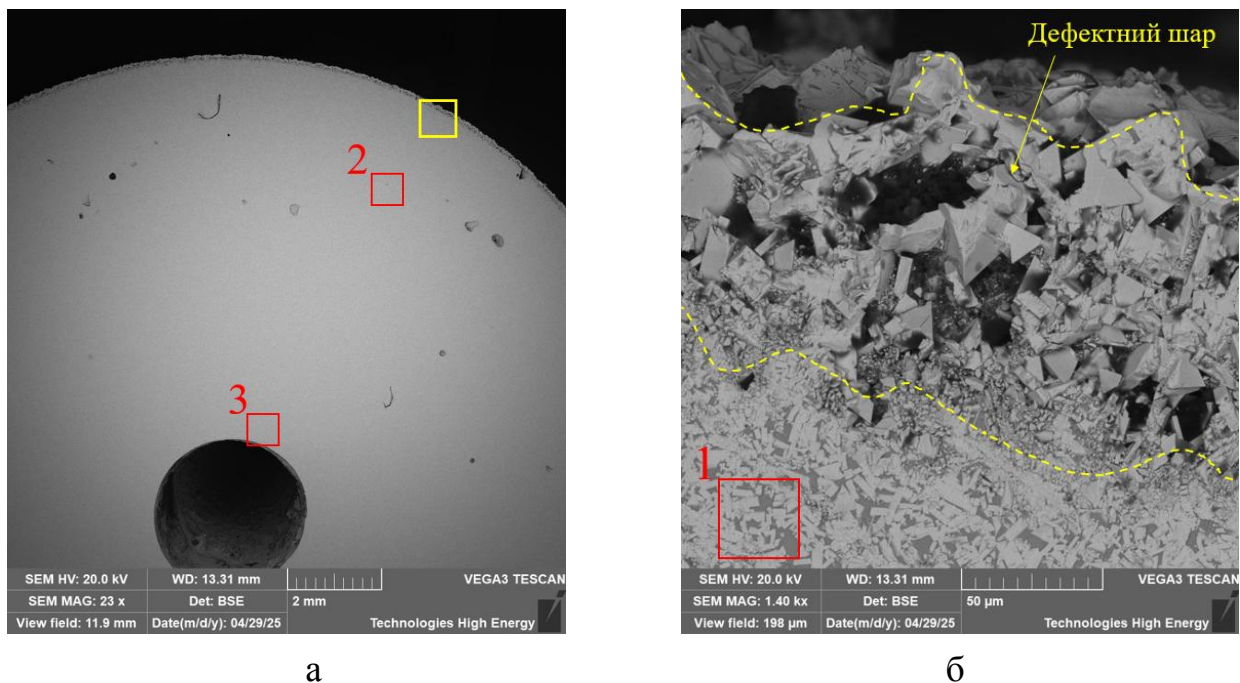
а – приповерхнева зона, б – зона в об'ємі, в – зона біля отвору

Рисунок 3.8 – Структура сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки

$$I_w = 20 \text{ мА}, \tau = 5 \text{ хв при збільшенні } \times 8000$$

Загалом, результати підтверджують, що електронно-променева обробка не порушила хімічної однорідності зразка, зберігаючи характерний розподіл фаз, типових для умов спікання WC-15Co, і водночас забезпечила можливість локального регулювання структури поверхневого шару без істотного хімічного розбалансування.

Після електронно-променевої обробки зразка WC-15Co за параметрів сила струму ( $I_w$ ) 20 мА та тривалість опромінення ( $\tau$ ) 10 хв було виявлено істотні зміни мікроструктури (рис. 3.9), які значно відрізняються від результатів при 5-хвилинному опроміненні. Найбільш вираженою відмінністю стало збільшення товщини дефектного шару, яка досягла приблизно 100 мкм, що вдвічі перевищує значення, отримане при 5-хвилинному впливі.



а – загальний вигляд та місця в яких відбувалася зйомка, б – край поперечного перерізу

Рисунок 3.9 – SEM зображення поперечного перерізу фільтри з сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки  $I_w = 20$  мА,  $\tau = 10$  хв

У приповерхневій зоні продовжилося значне зростання зерен WC, як і набули грубозернистої морфології, що істотно відрізняється від вихідного

спеченого стану. Таке зростання є прямим наслідком підвищеного теплового навантаження та тривалішої кристалізації в умовах перегріву. Крім того, було зафіксовано появу нових пор не лише в межах дефектного шару, а й у внутрішньому об'ємі (рис. 3.10) зразка, що свідчить про поширення процесів термічного розрідження глибше в матеріал.

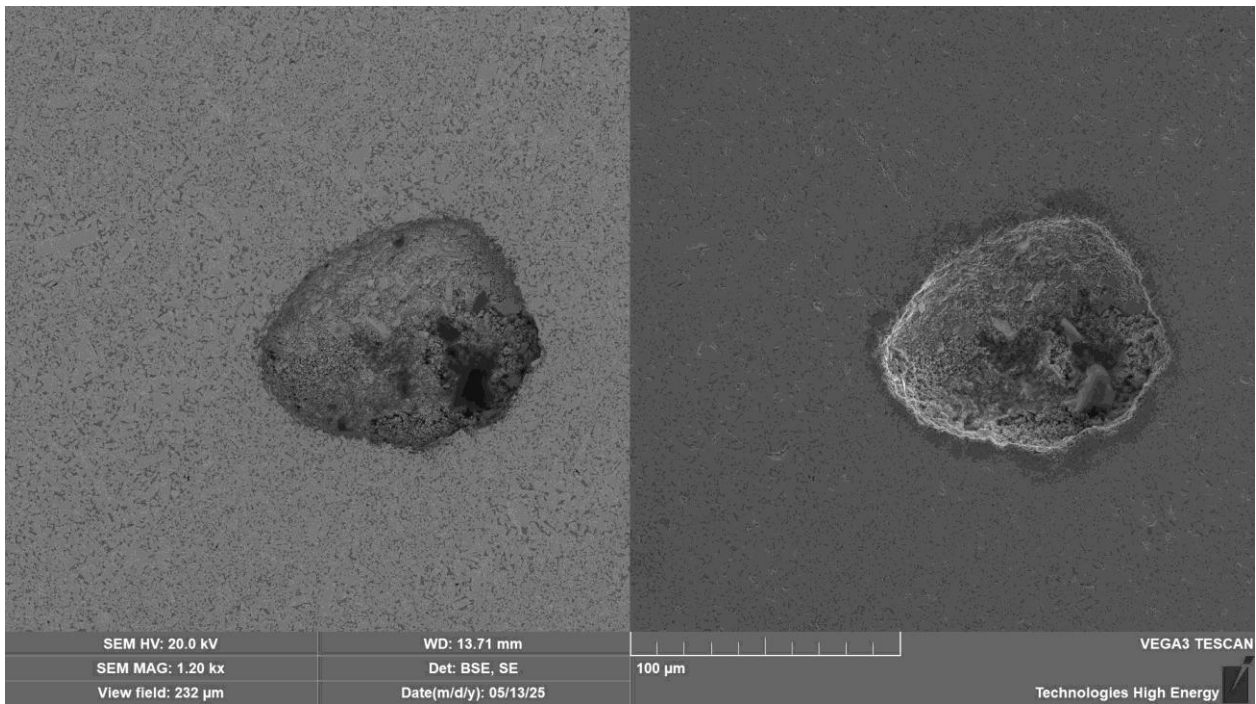
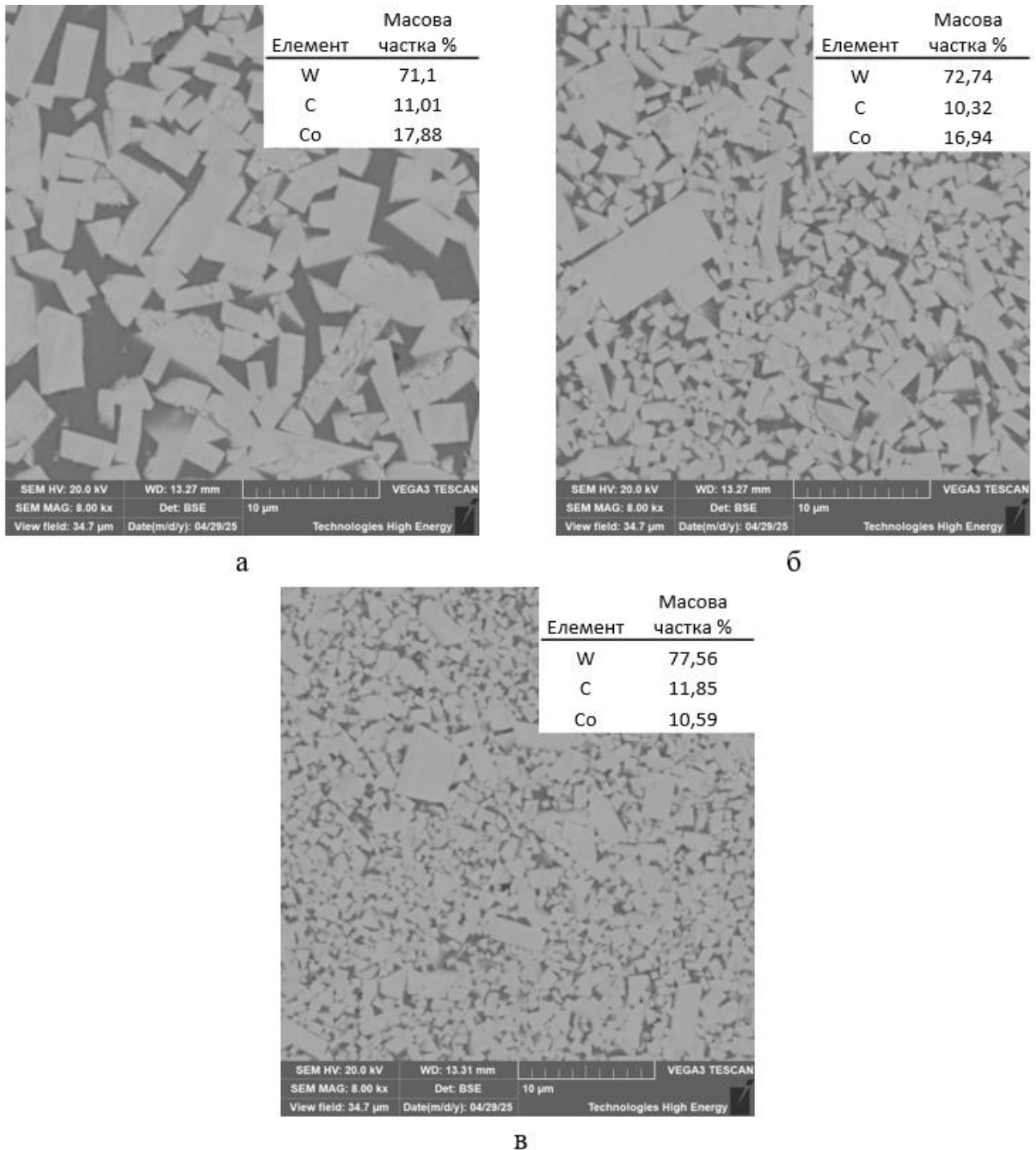


Рисунок 3.10 – Поверхнев дефекти виявлені після обробки

Формування пор у глибині зразка може бути пов'язане з порушенням рівноваги між фазами WC і Co, а також з локальним випаровуванням або переміщенням зв'язуючої фази під дією температурного градієнту. Така мікроструктурна дефектність знижує компактність і однорідність сплаву, потенційно впливаючи на його механічні властивості. У порівнянні з обробкою тривалістю 5 хв, при 10-хвилинному опроміненні спостерігається більш глибоке проникнення тепла, що сприяє утворенню грубозернистої структури, не лише на поверхні, а й у приповерхневих шарах (рис. 3.11). Отже, надлишковий час опромінення за сили струму 20 мА призводить до перегріву поверхневих шарів, втрати мікроструктурної стабільності та появи внутрішніх дефектів, що вказує

на необхідність зменшити силу струму електронного променя з метою уникнення пор у глибині зразка.



а – приповерхнева зона, б – зона в об'ємі, в – зона біля отвору

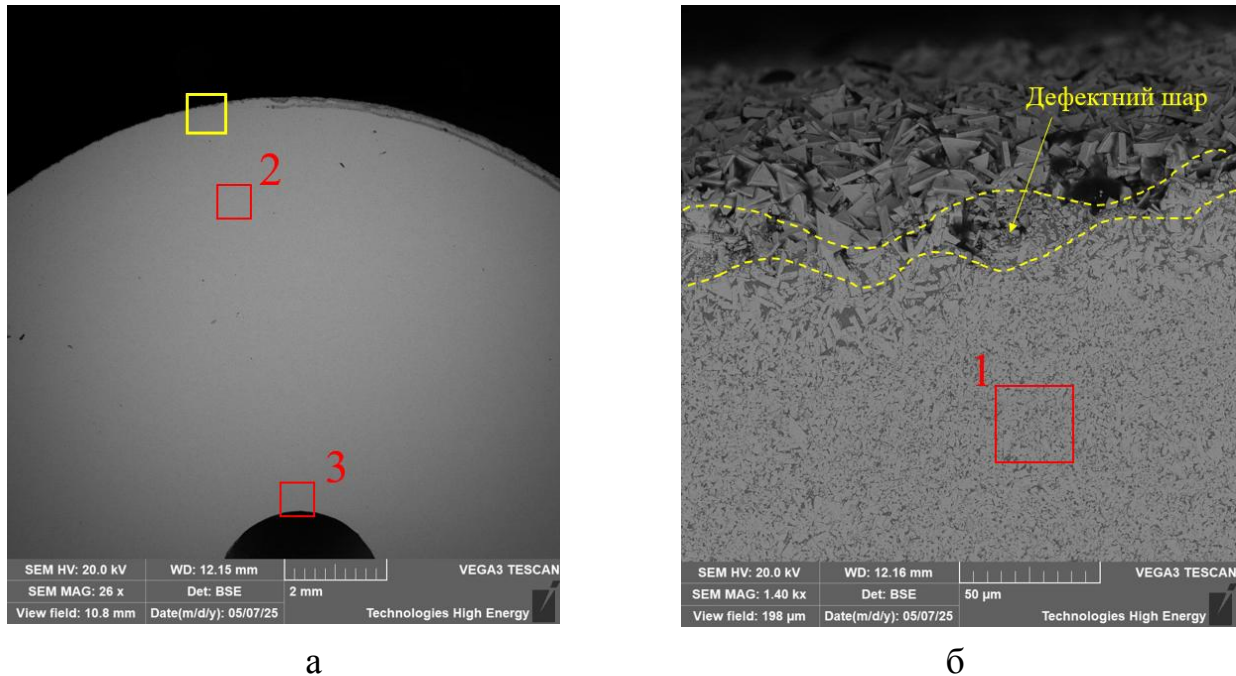
Рисунок 3.11 – Структура сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки  $I_w = 20$  мА,  $\tau = 10$  хв при збільшенні x8000

Результати хімічного аналізу зразка WC-15Co після 10-хвилинної електронно-променевої обробки з силою струму 20 мА виявили суттєве перерозподілення зв'язуючої фази Co у товщі матеріалу, що істотно відрізняється від характеру змін, зафіксованих після 5-хвилинного опромінення.

Зокрема, вміст Co в приповерхневому шарі значно збільшився – з 13,18 мас.% до 17,88 мас.%, що свідчить про активну міграцію Co до поверхні внаслідок розширеного температурного поля і підсилених дифузійних процесів. Аналогічна тенденція спостерігалась і в центральній частині зразка, де вміст Co зріс з 12,7 мас.% до 16,94 мас.%. Водночас, у зоні поблизу внутрішнього отвору, яка зазнала менш інтенсивного теплового навантаження, відзначено зменшення вмісту Co з 12,28 мас.% до 10,59 мас.%, що може бути пов'язано з переміщенням Co до зовнішніх шарів під дією температурного та хімічного градієнтів.

Таким чином, обробка зразка за параметрів 20 мА та 10 хв призвела до надмірного накопичення кобальту в поверхневих і внутрішньому шарах, що супроводжувалося фізико-хімічною нестабільністю мікроструктури та утворенням пор. На відміну від цього, аналогічна обробка при тій самій силі струму, але тривалістю лише 5 хв, не спричинила суттєвих порушень у розподілі компонентів та зберегла структурну однорідність, але невелика кількість пор все ж була присутня. Це підкреслює критичну необхідність ретельного підбору параметрів електронно-променевого впливу з метою мінімізації дифузійних дисбалансів і запобігання дефектам, що можуть погіршити експлуатаційні характеристики WC-Co сплавів.

Після електронно-променевої обробки сплаву WC-15Co протягом 5 хвилин зі зниженим струмом до 17 мА, у мікроструктурі зразка зафіксовано менш інтенсивні зміни порівняно з обробкою при 20 мА (рис. 3.12). Зокрема, товщина дефектного шару зменшилася приблизно на 20 мкм, що свідчить про зниження глибини теплового проникнення та обмеження об'ємної дії електронного пучка. Поверхневий шар залишився більш стабільним за структурою, з менш вираженим ростом зерна і зниженим рівнем термічних дефектів.

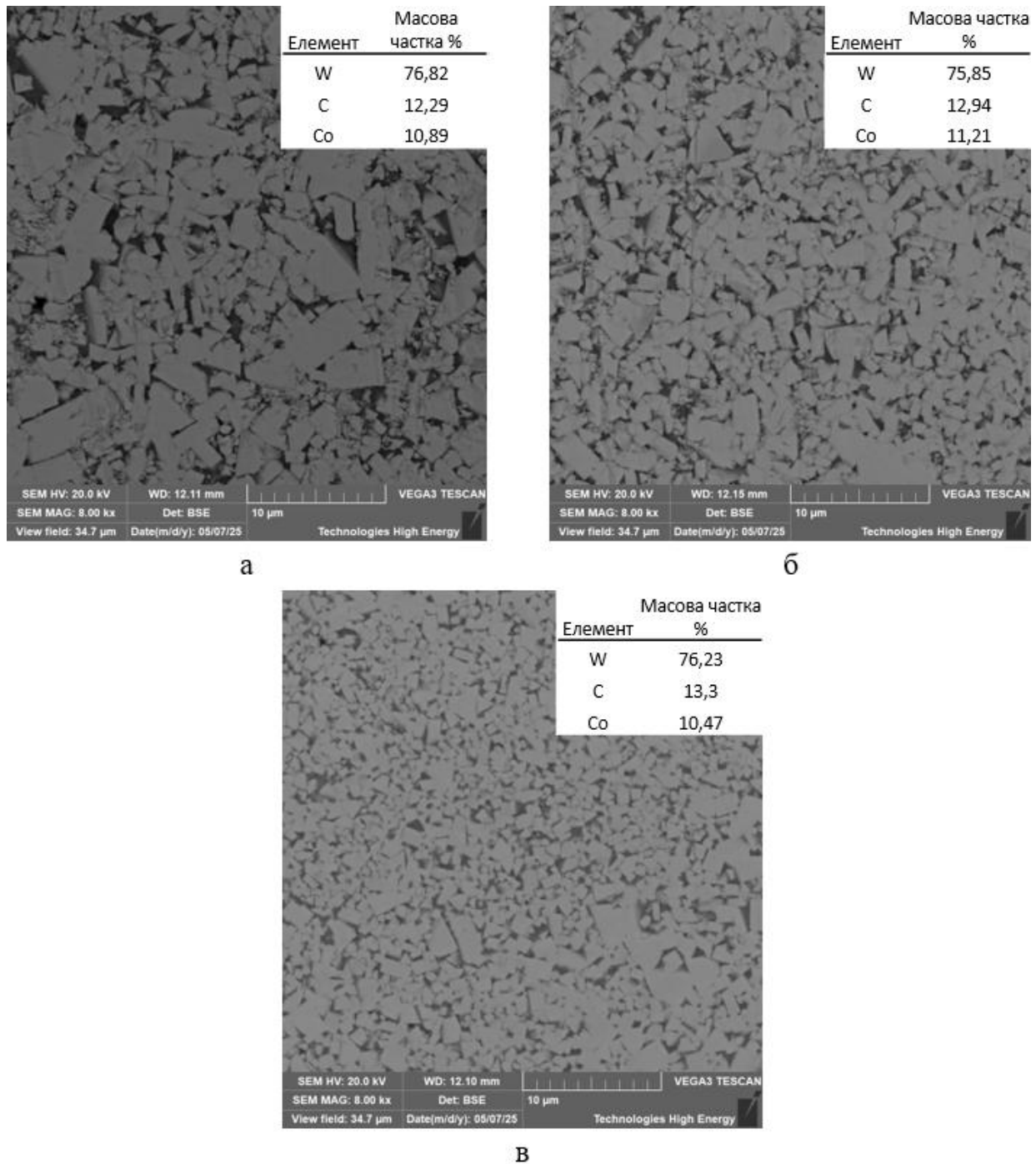


а – загальний вигляд та місця в яких відбувалася зйомка, б – край поперечного перерізу

Рисунок 3.12 – СЕМ зображення поперечного перерізу фільтри з сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки  $I_w = 17$  мА,  $\tau = 5$  хв

Зерна WC у приповерхневому шарі збільшилися порівняно з вихідним станом, тоді як в об'ємі та біля отвору їхній розмір залишився практично незмінним (рис. 3.13). Результати хімічного аналізу сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки з параметрами 17 мА, 5 хв виявили певні відхилення у розподілі масової частки Co. Зокрема, вміст Co становив 10,89 мас.% у приповерхневому шарі, 11,21 мас.% в об'ємі зразка, та 10,47 мас.% поблизу внутрішнього отвору (масова частка у вихідному стані була близько 12 мас.% у всіх зонах). Таке відносно рівномірне, але дещо знижене значення вмісту Co на всіх глибинах виглядає незвичним, оскільки зазвичай після термофізичного впливу електронного променя спостерігається накопичення Co в приповерхневій зоні внаслідок спрямованої дифузії. Подібна картина може свідчити про нетипову поведінку Co фази при обробці менш інтенсивним

електронним променем, зокрема – можливу втрату Co внаслідок випаровування або його дифузійний відтік до зони, не охопленої безпосередньо аналізом.

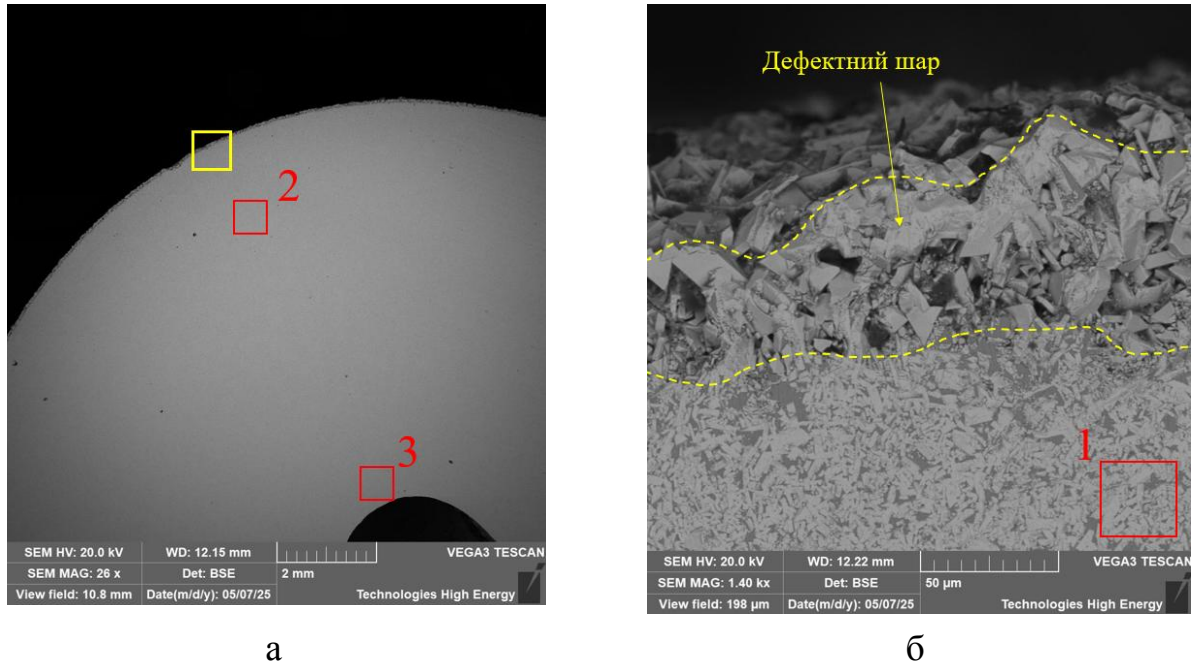


а – приповерхнева зона, б – зона в об'ємі, в – зона біля отвору

Рисунок 3.13 – Структура сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки  $I_w = 17$  мА,  $\tau = 5$  хв при збільшенні  $\times 8000$

Мікроструктурний аналіз сплаву WC-15Co після 10-хвилинної електронно-променевої обробки з силою струму 17 мА показав зростання дефектного до

50 мкм (при 5 хвилинній обробці 30 мкм) (рис. 3.14). Порівняно з обробкою при 20 мА, інтенсивність структурних змін менша, і в об'ємі зразка пори не виявлені, що вказує на більш стабільний термічний режим впливу при нижчій енергії променя (рис. 3.15).

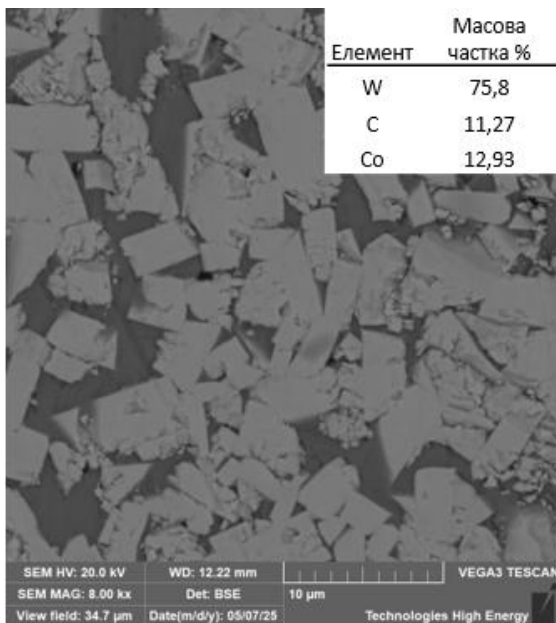


а – загальний вигляд та місця в яких відбувалася зйомка, б – край поперечного перерізу

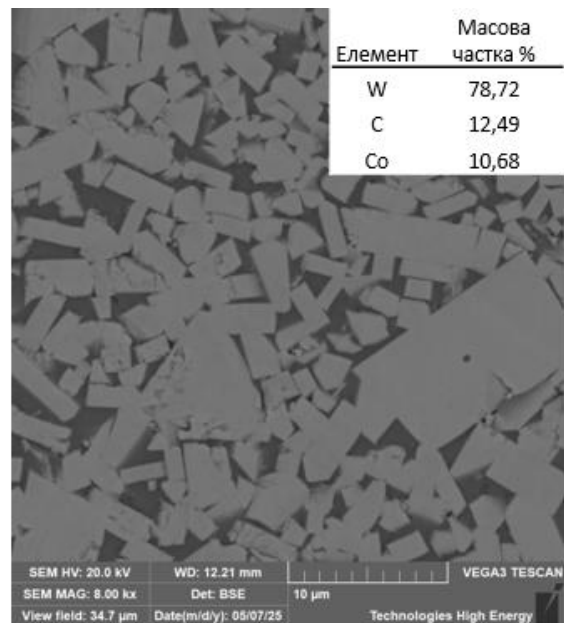
Рисунок 3.14 – SEM зображення поперечного перерізу фільтри з сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки  $I_w = 17$  мА,  $\tau = 10$  хв

Результати хімічного аналізу сплаву WC-15Co після 10-хвилинної електронно-променевої обробки при силі струму 17 мА свідчать про помірне збагачення приповерхневої зони Co: його масова частка склала 12,9 мас.%. Вміст вуглецю в цій зоні становив 11,3 мас.%, а решту складу формував вольфрам. У внутрішньому об'ємі зразка Co було дещо менше – 10,7 мас.%, а вуглецю – 12,5 мас.%, що близько до початкових значень. Біля внутрішнього отвору поперечного перерізу зафіксовано 10,5 мас.% Co та 13,4 мас.% C, що вказує на зворотний градієнт концентрацій, імовірно спричинений міграцією елементів унаслідок температурних градієнтів.

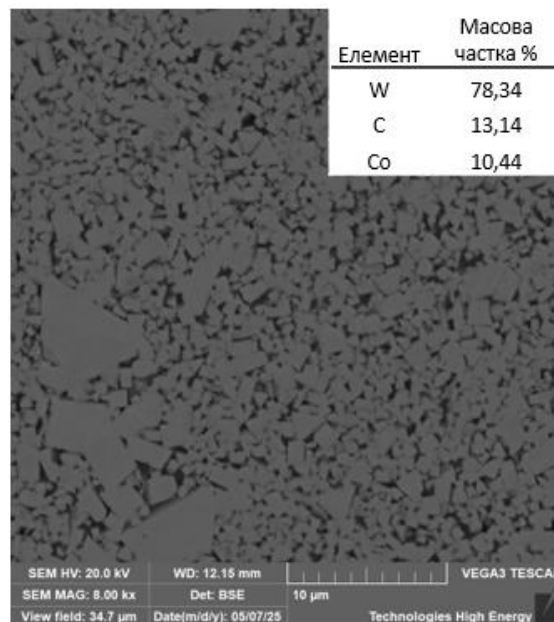
Порівняно з результатами для зразка, обробленого при  $I_w = 20$  мА за тих самих умов часу, спостерігається суттєво вище збагачення Co у приповерхневій зоні – 17,9 мас.%, що на 5 мас.% більше, ніж при 17 мА. У центральній частині концентрація Co при  $I_w = 20$  мА склала 16,7 мас.%, що також значно перевищує аналогічний показник при меншому струмі. Водночас, біля внутрішнього отвору вміст Co становив 10,6 мас.%, тобто майже ідентичний значенню при 17 мА, що свідчить про обмежену глибину ефекту, навіть при вищій енергії.



а



б



в

а – приповерхнева зона, б – зона в об'ємі, в – зона біля отвору

Рисунок 3.15 – Структура сплаву WC-15Co після електронно-променевої обробки  $I_w = 17$  мА,  $\tau = 10$  хв при збільшенні  $\times 8000$

Таким чином, зростання сили струму під час електронно-променевого опромінення суттєво підсилює міграцію Co до поверхні, спричиняючи утворення насиченої Co приповерхневої зони, тоді як в області отвору вміст Co зменшується. Вміст вуглецю в усіх точках зразка при обох режимах залишається наближеним до початкових значень, що свідчить про відносну стабільність цього елемента під час обробки.

Нижче наведено зведений опис змін мікроструктури сплаву WC- 15Co в приповерхневій, об'ємній та зоні біля отвору після електронно- променевої обробки в різних режимах (рис. 3.16). Порівняно з вихідним, спеченим станом (1,4 мкм – поверхня, 1,5 мкм – об'єм, 1,4 мкм – біля отвору), у всіх досліджених режимах спостерігається помітний ріст зерен у приповерхневій області:

При обробці з силою струму 20 мА та часом 5 хв середній розмір зерен зріс із 1,4 мкм до 1,9 мкм у приповерхневому шарі, тоді як в об'ємі та біля отвору залишився 1,4 мкм.

Збільшивши час до 10 хв за тієї ж сили струму можна побачити як подальше накопичення теплової енергії призвело до ще більш інтенсивного росту: 2,7 мкм у приповерхневій зоні (проти 1,9 мкм при 5 хв), 1,7 мкм в об'ємі та 1,2 мкм біля отвору.

Менша сила струму (17 мА) за часу 5 хв забезпечила помірний ріст зерен: 1,6 мкм у приповерхневій зоні, 1,4 мкм в об'ємі та 1,1 мкм біля отвору. При цьому в об'ємі не виявлено пор, що спостерігалися при 20 мА. Це вказує на контрольований тепловий вплив без надмірної рекристалізації.

Зі зростанням часу обробки до 10 хв, розмір зерен в приповерхневій зоні досяг 2,7 мкм, в об'ємі – 1,6 мкм, поблизу отвору – 1,3 мкм. Порівняно з обробкою 20 мА, ріст зерен по глибині був дещо меншим, що знову підтверджує більш м'який тепловий вплив за нижчого струму.

Електронно-променева обробка спричиняє помітний ріст зерен WC у приповерхневому шарі зразка, при чому підвищення сили струму й тривалості

опромінення посилює як інтенсивність росту зерна, так і глибину теплового проникнення в матеріал. Найбільш вдалою комбінацією для досягнення оптимального балансу між рівномірним збільшенням розміру зерен та мінімізацією внутрішніх дефектів виявився режим 17 мА/10 хв, тоді як обробка при 20 мА/10 хв забезпечує максимальний ріст зерна, але супроводжується утворенням пор в об'ємі та підвищеним ризиком структурної деградації.

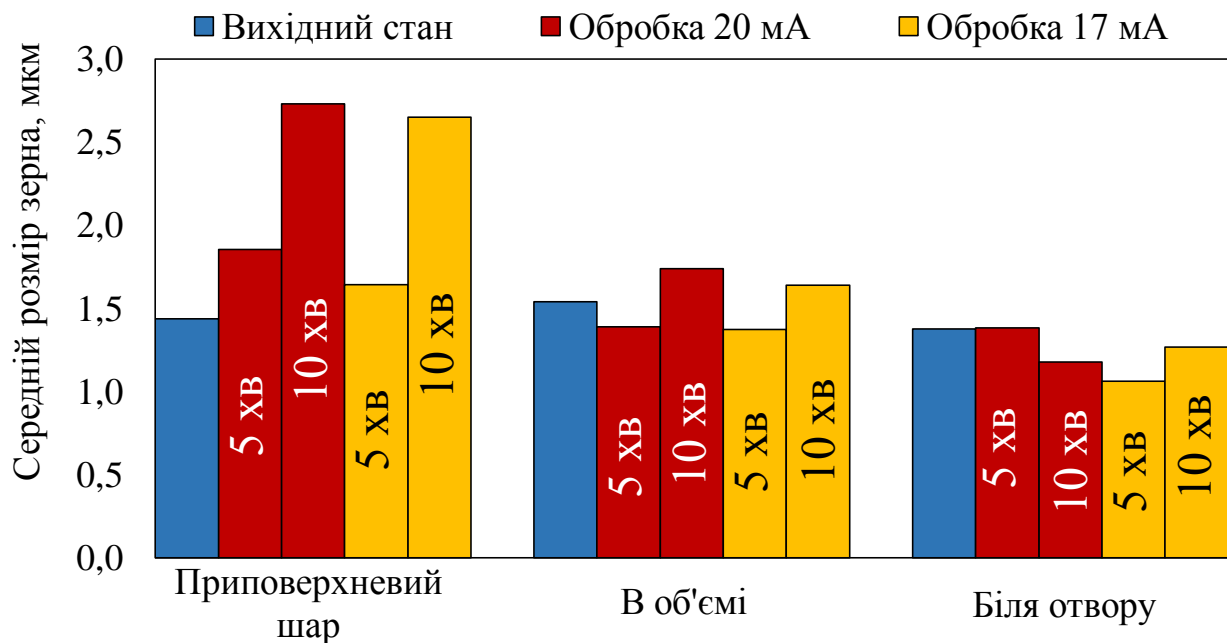


Рисунок 3.16 – Залежність зміни розміру зерна від параметрів обробки

Еволюція мікроструктури сплаву WC-15Co під дією безперервної електронно-променевої обробки суттєво залежить від параметрів опромінення, зокрема сили струму та тривалості впливу. При збільшенні струму та часу обробки спостерігається виразне зростання товщини дефектного шару (рис. 3.17), інтенсивне укрупнення зерен (особливо в приповерхневій зоні), а також формування пор не лише в зоні плавлення, але й в об'ємі зразка. Збільшення сили струму до 20 мА приводить до помітного перерозподілу елементів, зокрема до значного підвищення концентрації Co на поверхні за рахунок термодифузії, з одночасним виснаженням глибших шарів.

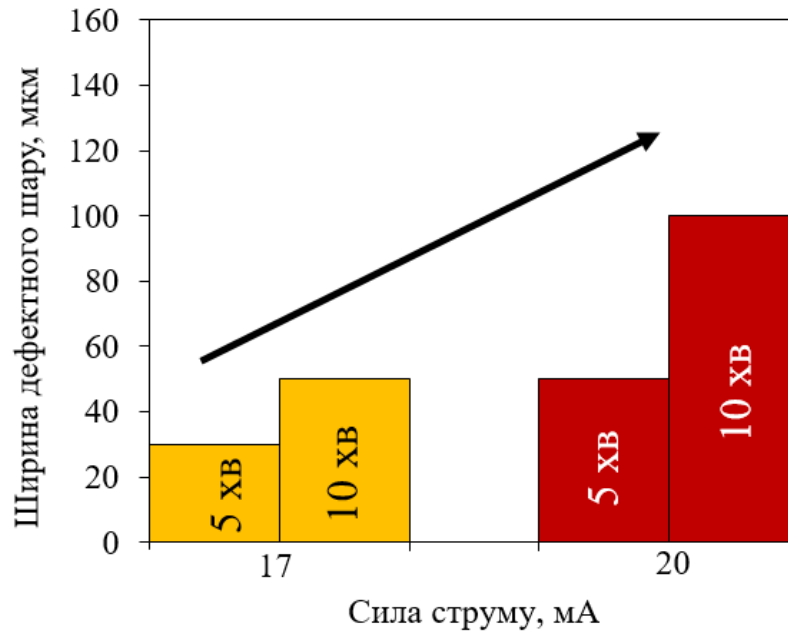


Рисунок 3.17 – Залежність розміру дефектного шару від режиму обробки

### 3.3 Зміна мікротвердості поверхневого шару твердого сплаву на основі WC-Co в результаті електронно-променевого опромінення

На рисунку 3.18 представлено зміну мікротвердості сплаву WC-15Co у трьох характерних зонах (приповерхневій, об'ємній, біля отвору) після електронно-променевої обробки при різних параметрах (сила струму 17 мА і 20 мА, час 5 хв та 10 хв). Аналіз показує, що при зростанні сили струму спостерігається зниження твердості, однак водночас очікується зростання в'язкості сплаву, що пов'язано зі збільшенням розміру зерен – основною структурною причиною таких змін.

У вихідному стані максимальна мікротвердість спостерігається в зоні біля отвору (15,2 ГПа), тоді як у поверхневому шарі вона становила 14,4 ГПа, а в об'ємі – 15 ГПа.

Після обробки струмом 20 мА протягом 5 хвилин твердість у всіх зонах зменшується: до 11 ГПа на поверхні, 14,1 ГПа в об'ємі і 14,2 ГПа у внутрішньому шарі. При обробці тривалістю 10 хв при тій самій силі струму твердість на поверхні знижується ще більше – до 10,2 ГПа, що свідчить про надмірне теплове навантаження. При цьому зерна в зоні обробки значно виростають, що зменшує кількість міжзеренних границь – джерел зміцнення – і,

як наслідок, знижує твердість, але підвищує тріщиностійкість і загальну в'язкість матеріалу.

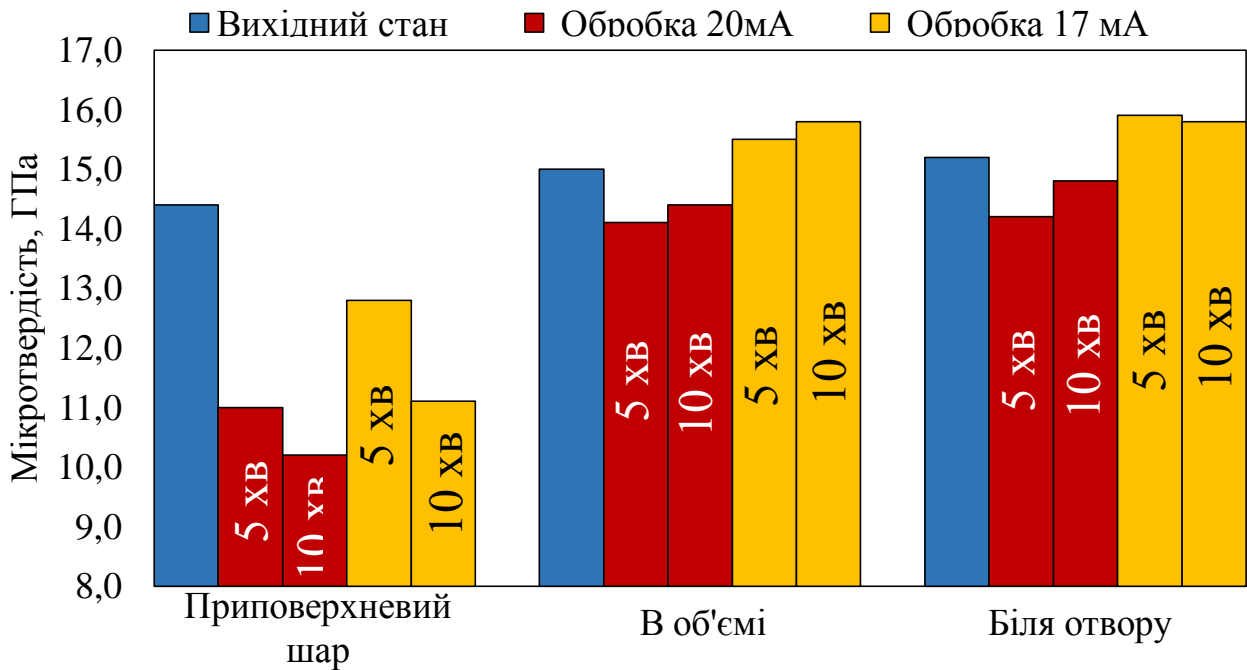


Рисунок 3.18 – Значення мікротвердості у різних областях вимірювання

Обробка при меншій силі струму 17 мА показала стабільніші результати: після 5 хв твердість трохи зменшилася порівнюючи з вихідним станом в поверхневій зоні (12,8 ГПа), а в об'ємі та біля отвору навіть зросла до 15,5 ГПа та 15,9 ГПа відповідно. Це свідчить про покращення мікроструктури без надмірного зростання зерен.

При тривалості обробки 10 хвилин і силі струму 17 мА теж було досягнуто високих значень мікротвердості в об'ємі (15,8 ГПа) та приповерхневому внутрішньому шарі, що пояснюється оптимальним співвідношенням між дифузійним ущільненням та контрольованим ростом зерен. Відбулося також значне зниження твердості в поверхневому шарі (11,08 ГПа), що може бути результатом тривалого перегріву.

При підвищеній силі струму (20 мА) зниження твердості пояснюється очікуваним зростанням зерна, тоді як обробка при 17 мА забезпечує кращий

баланс між зміцненням і структурною стабільністю, що робить її більш придатною для цільового модифікування WC-15Co.

Аналізуючи дані мікротвердості та середнього розміру зерна у всіх зонах за різних режимів електронно-променевої обробки (рис. 3.19) можна зробити висновок, що зі збільшенням сили струму та тривалості обробки збільшується середній розмір зерен, що призводить до зменшення мікротвердості твердого сплаву WC-15Co. Максимальна мікротвердість спостерігається для вихідного стану з середнім розміром зерна 1,4 мкм, а після обробки в зоні з середнім розміром зерна 2,7 мкм мікротвердість становить 10,2 ГПа.

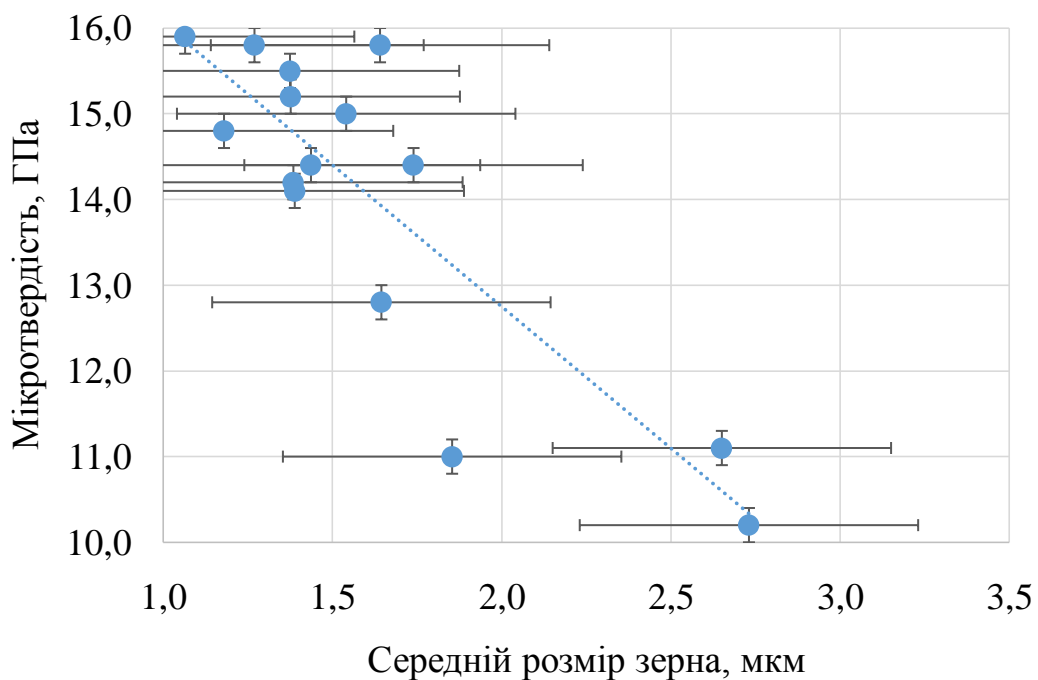


Рисунок 3.19 – Залежність мікротвердості від середнього розміру зерна у всіх зонах за різних режимів електронно-променевої обробки

### 3.4 Висновок до розділу 3

1. Аналіз вихідного порошку показав незначний вміст ( $< 0,1$  мас.%) домішок та відсутність небажаних фаз, частинки порошку характеризуються неправильною формою та агломерують в щільні глобулі.

2. ЕПО поверхні зразків WC-15Co при силі струму 17 мА та 20 мА і тривалості 5 хв та 10 хв призводять до збільшення середнього розміру зерен WC у приповерхневій області. Найбільший середній розмір зерен WC досягається за режиму обробки 20 мА/10 хв і дорівнює близько 2,7 мкм, у вихідному стані 1,4 мкм. При цьому в приповерхневій області спостерігається збільшення масової частки Co з 12 мас.% до 18 мас.% у порівнянні з вихідним станом.

3. Зі збільшенням середнього розміру зерна WC спостерігається зменшення мікротвердості твердого сплаву WC-15Co. Так для вихідного стану з середнім розміром зерна 1,4 мкм мікротвердість складає 14,5 ГПа, а для оброблених зразків в зоні з середнім розміром зерна 2,7 мкм відповідно 10,2 ГПа.

4. ЕПО поверхні зразків WC-15Co з силою струму 20 мА тривалістю 5 хв та 10 хв призводить до утворення дефектів (пор) в об'ємі. За режимів 17 мА тривалістю 5 хв та 10 хв утворення дефектів в об'ємі не спостерігається. Також зі збільшенням сили струму та тривалості обробки спостерігається збільшення товщини поверхневого дефектного шару, максимальна товщина 100 мкм формується за режиму 20 мА/10 хв, мінімальна – 25 мкм за режиму 17 мА/5 хв.

5. Серед застосованих режимів оптимальним був визначений режим 17 мА/10 хв, що забезпечує баланс між розміром зерен та відсутністю внутрішніх дефектів.

## РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Науково-технічна актуальність

У сучасному виробництві твёрдосплавні матеріали на основі WC-Co залишаються незамінними в галузях, що вимагають поєднання високої твердості, зносостійкості та термостабільності – зокрема, в обробці металів, добувній промисловості та точному інструментальному виробництві. Зважаючи на зростаючі вимоги до ресурсу та надійності інструментів, актуальним завданням є підвищення їх експлуатаційних характеристик шляхом цілеспрямованої модифікації структури, зокрема, у приповерхневих шарах.

Сплав WC-15Co є одним із найбільш поширених композицій у твердих сплавах, і його мікроструктурна стабільність безпосередньо визначає механічні властивості та довговічність інструменту. Дослідження впливу режимів ЕПО (сила струму, час обробки) на структуру, хімічний склад і мікротвердість цього сплаву має не лише практичну цінність, а й фундаментальне значення для розуміння механізмів фазових перетворень у карбідних матеріалах під дією висококонцентрованих енергетичних потоків.

Таким чином, робота є актуальною як з точки зору прикладного використання – для розробки зносостійких елементів та інструментів з керованими властивостями, – так і в контексті наукового пошуку ефективних методів поверхневої інженерії твёрдосплавних матеріалів.

### 4.2 Розрахунок собівартості роботи

Сума, необхідна для здійснення досліджень зі зміни мікроструктури та властивостей твёрдосплавного матеріалу WC-15Co під дією електронно-променевої обробки, визначається наступними складовими витратами: витрати на оплату праці науково-технічного персоналу, обов'язкові відрахування на соціальні заходи, матеріальні витрати на підготовку зразків, проведення електронно-променевої обробки, мікроструктурний та хімічний аналіз, витрати

на амортизацію та обслуговування обладнання, а також інші загальні та адміністративні витрати, пов'язані з організацією дослідницького процесу.

#### 4.2.1 Витрати на оплату праці

Розмір заробітної плати кожного працівника визначається на основі попередніх розрахунків, що враховують трудомісткість виконуваних робіт. Оцінка проводиться за системою "людина-день", де середньоденна заробітна плата обчислюється як частка місячного окладу, поділена на середню кількість робочих днів у місяці (22 дні при п'ятиденному робочому тижні). Фонд заробітної плати формується шляхом множення розрахованої середньоденної оплати праці для відповідної категорії персоналу на обсяг трудовитрат. Детальні розрахунки трудомісткості та фонду оплати праці наведено в таблицях 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість виконання дипломної роботи

Етапи	Трудомісткість за виконавцями, люд.-дні	
	Доцент	Інженер-дослідник
1	2	3
1. Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	3	2
2. Аналіз науково-технічних публікацій по темі дослідження	10	30

Продовження таблиці 4.1

1	2	3
3. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	2	2
4. Розробка методики проведення дослідження	2	2
5. Проведення дослідження	10	16
6. Обговорення результатів дослідження	7	7
Усього	34	59

Таблиця 4.2 – Фонд заробітної плати для виконавців дипломної роботи

Посада	Трудомісткість, люд.-дні	Місячний оклад, грн	Денна заробітна плата, грн	Сумарна заробітна плата, грн
Доцент	34	8500	404,7	13759,8
Інженер-дослідник	59	12869	584,95	34512,05
Усього	102	21369	989,65	48271,85

Враховуючи трюдомісткість кожного з учасників та його заробітну плату, отримано фонд заробітної плати для наявних досліджень. Фонд заробітної плати (ФЗП) даної науково-дослідної роботи складає 48271,85 грн.

#### **4.2.2 Відрахування до єдиного соціального внеску**

Згідно чинного законодавства України, єдиний соціальний внесок (ЄСВ) становить 22 % від фонду заробітної плати:

$$\text{ЄСВ} = \text{ФЗП} \cdot 0,22 = 48271,85 \cdot 0,22 = 10619,81 \text{ грн}$$

#### **4.2.3 Витрати на матеріали та дослідження**

Для дослідження було виготовлено 5 фільтр з сплаву WC-15Co. Повна сума витрачених коштів на матеріали та транспортно-заготівельні витрати складає 2000 грн.

#### **4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання та приладдя**

Виконання даної дипломної роботи не передбачає потреби спеціальне обладнання та прилади, тому за даною статтею витрати відсутні.

#### **4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання та приладдя**

Виконання даної дипломної роботи не передбачає використання послуг сторонніх організацій, тому за даною статтею витрати відсутні.

#### **4.2.6 Витрати на послуги сторонніх організацій**

Під час виконання дипломної роботи службові відрядження не передбачаються, тому за даною статтею витрати відсутні.

#### **4.2.7 Енергоносії для проведення дослідження**

Витрати на енергоносії розраховуються лише в тому випадку, якщо дослідження на цю тему пов'язані з плавленням, покриттям зразків або виробів, та потребують значних витрат енергії, особливо електроенергії. В інших випадках витрати на енергоносії опосередковано й автоматично включаються до програмного бюджету суб'єкта через статтю «Накладні витрати».

#### 4.2.8 Інші прямі невраховані витрати

У даній статті об'єднані всі витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідних робіт (НДР), які не враховані в попередніх статтях. Для оцінки інших безпосередніх витрат при проведенні робіт використовується рівень 10 % від загальної суми витрат на виконання НДР.

$$I_v = (48271,85 + 10619,81 + 2000) \times 0,1 = 6089,17 \text{ грн}$$

#### 4.2.9 Накладні витрати

У цьому розділі враховуються загальновиробничі витрати, пов'язані з організаційним і технічним забезпеченням виконання проєкту. До складу таких витрат входять: витрати на управління та раціоналізацію виробничих процесів, амортизація основних засобів, забезпечення доступу до науково-технічної інформації, дотримання вимог охорони праці, оплата банківських послуг, а також податкові зобов'язання, збори та інші обов'язкові платежі. Для оцінки загальних накладних витрат використовується нормативний підхід, за яким вони встановлюються у розмірі 20 % від суми прямих витрат виконання робіт.

$$N_v = (48271,85 + 10619,81 + 2000 + 6089,17) \times 0,2 = 13396,17 \text{ грн}$$

#### 4.2.10 Визначення планової коштовної вартості теми

Для формування планової калькуляції вартості досліджень за даною темою використовуються розрахунки та нормативні дані (табл. 4.3)

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1. Витрати на оплату праці	48271,85	Відповідно до розрахунків
2. Єдиний соціальний внесок	10619,81	22 % від загальних витрат на оплату праці

## Продовження таблиці 4.3

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
3. Матеріали для проведення досліджень	2000	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	6089,17	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9. Накладні витрати	13396,17	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10. Усього витрат по темі	80377	Сума попередніх статей

**4.3 Науково-технічна ефективність НДР**

Для оцінки доцільності проведення даної науково-дослідної роботи доцільно здійснити розрахунок очікуваного економічного ефекту від її впровадження. Слід зауважити, що подібна оцінка є релевантною переважно для НДР, які мають прикладну спрямованість – зокрема, орієнтовані на створення нових матеріалів, вдосконалення конструкцій або підвищення якості та конкурентоспроможності продукції.

Для визначення річного економічного ефекту використовується бальна система оцінювання економічної ефективності з використанням таких показників:

1. Важливість розробки (К1);

2. Можливість використання результатів розробки (К2);
3. Теоретичне значення та рівень новизни (К3);
4. Складність дослідження (К4).

Коефіцієнт К1 може приймати наступні 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 К2 може приймати такі значення:

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

Коефіцієнт К3 може приймати такі значення:

- а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати 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, тощо – 6 балів;  
 д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт К4 може приймати 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 становить 3 бали;  
 в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень становить 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:

$$Б = К1 \times К2 \times К3 \times К4. \quad (4.1)$$

В даному випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 4.4 становить:

$$Б = 3 \times 8 \times 3 \times 5 = 360.$$

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умове позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1	2	3	4
1. Важливість розробки	К1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3

Продовження таблиці 4.4

1	2	3	4
2. Можливість використання результатів розробки	К2	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	8
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	К3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4. Складність дослідження	К4	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \times B - E_{\text{н}} \times V_{\text{НДР}} \quad (4.2)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

$E_{\text{н}}$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності;

$V_{\text{НДР}}$  – сумарні витрати на виконання НДР.

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \times 360 - 0,2 \times 80377 = 163924,6 \text{ грн.}$$

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

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}, \quad (4.3)$$

$E_e$  буде становити:

$$E_e = \frac{163924,6}{80377} = 2,04.$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 2,04 (більше одиниці), що свідчить про високу доцільність її виконання.

#### **4.4 Висновок до розділу 4**

1. В даному розділі була визначена планова кошторисна вартість дипломної роботи, яка складає 80377 грн.
2. Економічний аналіз проведеного дослідження в ході виконання дипломної роботи показує, що це дослідження є економічно доцільним.

## РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Метою цього розділу є забезпечення належних умов праці. Для цього ми розглянемо шкідливі та небезпечні фактори, які можуть призвести до ураження організму під час виготовлення та електронно-променевої обробки твердого сплаву WC-15Co. Це включає умови, за яких можливе виникнення захворювань або травмування працівників, а також розробку заходів, спрямованих на усунення або мінімізацію цих факторів і забезпечення безпеки у разі надзвичайних ситуацій.

Для проведеного дослідження, важливими пунктами з охорони праці були: мікроклімат; склад повітря робочої зони; шум; вібрації; електрична та пожежна безпека.

### **5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при виконанні дослідження**

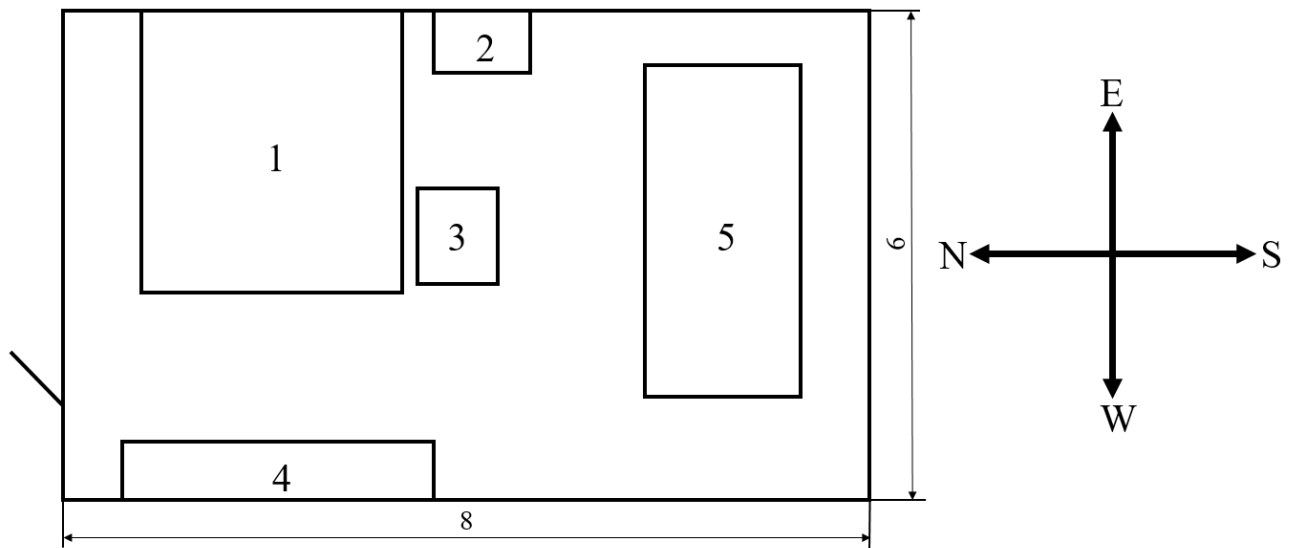
Науково-дослідна робота була виконана на базі лабораторій компанії “Плазматек” які розміщені на території Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського. На рис. 5.1 представлено схематичне зображення лабораторії з електронно-променевою установкою з позначенням розміщення основних елементів обладнання та зон функціонального призначення.

Дослідження здійснювалися у спеціалізованому приміщенні, основні характеристики якого становлять:

- розміри лабораторії: ширина – 6 м, довжина – 8 м, висота – 4 м;
- розміри вікон: ширина – 1 м, висота – 1,5 м.

У лабораторії, де одночасно працюють три особи, площа приміщення становить 48 м<sup>2</sup>, а об’єм – 192 м<sup>3</sup>. Відповідно, на одну особу припадає 16 м<sup>2</sup> площі та 64 м<sup>3</sup> об’єму. Вказані значення повністю відповідають вимогам ДСанПіН 3.3.2-007-98 [46], згідно з якими на одного працівника має припадати не менше 6 м<sup>2</sup> площі та 20 м<sup>3</sup> об’єму. Таким чином, умови організації робочого

простору в лабораторії забезпечують належний рівень комфорту та відповідають чинним санітарно-гігієнічним нормам.



1 – електронно-променева установка; 2 – стенд; 3 – стіл з інструментами; 4 – шафа; 5 – стіл.

Рисунок 5.1 – План приміщення в якому проводився дослід

### 5.1.1 Дослідження мікроклімату в робочій зоні приміщення

Раціональні параметри мікроклімату є однією з основних умов забезпечення комфортної та безпечної праці, особливо в умовах тривалої розумової або лабораторної діяльності. Відповідно до вимог «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» (ДСН 3.3.6.042- 99) [47], для нормального функціонування організму та підтримання працездатності важливо дотримуватись оптимальних значень температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні.

Дослідження, проведене в лабораторних умовах, стосується категорії робіт Іб, що охоплює легку фізичну активність (до 150 ккал/год), характерну для навчальних та інженерно-лабораторних процесів. Актуальність роботи полягає в тому, що результати досліджень дозволяють не лише оцінити відповідність

мікроклімату нормативним вимогам, а й виявити потенційні відхилення в параметрах повітряного середовища в різні пори року.

Так, виміряні показники в холодний період року при водяному опаленні (20 °С; 0,1 м/с; 70 %) та в теплий період при природній вентиляції (21 °С; 0,2 м/с; 55 %) відповідають гігієнічним нормам, що підтверджує ефективність існуючих систем мікрокліматичного регулювання. Незначне перевищення вологості влітку не виходить за межі допустимих значень і не створює дискомфорту чи ризику для здоров'я. Таким чином, можна зробити висновок, що мікроклімат у лабораторії відповідає санітарним вимогам.

У таблиці 5.1 наведено параметри мікроклімату приміщення лабораторії, де проводилася дана науково-дослідна робота.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату приміщення лабораторії термічної обробки [48,49]

Категорія робіт середньої важкості, Па			
Період року	Температура, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	18 – 20	40 – 60	0,2
Виміряне значення	20	60	0,2
Теплий	21 – 23	40 – 60	0,3
Виміряне значення	21	50	0,2
Висновок щодо відповідності вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам	Відповідає вимогам

Проведення науково-дослідної роботи в умовах лабораторії термічної обробки відповідає вимогам, встановленим для категорії робіт Па згідно з чинною класифікацією фізичних навантажень. До цієї категорії належать види діяльності, що включають переміщення невеликих предметів масою до 1 кг, виконання операцій у положенні сидячи або стоячи, а також інші дії, що

супроводжуються помірним фізичним навантаженням. Орієнтовні енерговитрати за таких умов становлять від 160 до 210 ккал/год [48, 49].

Згідно з результатами оцінки мікроклімату, проведеної у лабораторному приміщенні, де здійснювались основні етапи дослідження, встановлено відповідність параметрів мікроклімату нормативним значенням, визначеним у ДСН 3.3.6.042-99 [47]. Температурний режим, вологість повітря та швидкість його руху перебували в допустимих межах як у холодний, так і в теплий періоди року, що забезпечує належні умови для безперервного виконання експериментальних робіт у комфортному та безпечному середовищі.

### **5.1.2 Небезпечні чинники при роботі з електронно-променевою установкою**

Електронно-променева установка (ЕПУ) належить до високотехнологічного наукового обладнання, що застосовується для прецизійної термофізичної та мікроструктурної обробки матеріалів, зокрема у дослідженнях поверхневої модифікації сплавів типу WC-Co. Робота з такою установкою передбачає наявність потенційно небезпечних фізичних та електротехнічних чинників, тому дотримання правил техніки безпеки є критично важливим.

Установка живиться від трифазної мережі напругою 380 В, а її окремі вузли працюють під високими напругами, що створює загрозу ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції чи некоректного підключення. З метою запобігання нещасним випадкам, ЕПУ обладнана заземленням, системами аварійного відключення живлення, а підключення до електромережі здійснюється виключно через автоматичні вимикачі із попередньою перевіркою справності всіх елементів.

У процесі роботи електронний пучок фокусується на поверхню зразка, що призводить до його локального нагрівання до високих температур — у приповерхневій зоні виникають температури, достатні для плавлення або рекристалізації матеріалу. Недотримання правил експлуатації може призвести до

опіків, пошкодження зору внаслідок випромінювання або неконтрольованого перегріву.

Під час роботи з ЕПУ необхідно виконувати наступну послідовність дій:

- провести зовнішній огляд на предмет пошкоджень вакуумної камери, електронної гармати та елементів керування;
- переконатися в наявності заземлення та коректності підключення до електромережі;
- активувати системи охолодження та вентиляції для запобігання перегріву обладнання;
- ввімкнути установку через панель керування згідно з технологічною картою досліду.

Після завершення циклу обробки:

- дочекатися охолодження зразка;
- поступово відключити живлення та від'єднати установку від мережі.

Для зменшення ризиків, пов'язаних із впливом високих температур і потенційно шкідливих речовин, ЕПУ обладнана ефективною системою вакуумування, екранування та аварійного завершення роботи. Робота повинна виконуватись виключно у присутності відповідального фахівця при дотриманні інструкцій з охорони праці.

Під час електронно-променевої обробки зразків, особливо за умов високих температур і часткового розпаду поверхневих або зв'язаних речовин, у повітря робочої зони можуть виділятися шкідливі речовини. До складу повітря в зоні опромінення можуть входити такі компоненти [50]:

1. Металеві пари – під дією інтенсивного електронного пучка може відбуватись локальне випаровування або сублімація компонентів сплаву (в основному кобальту). Пари металів є токсичними та потребують ефективного видалення через вентиляцію.

2. Оксиди металів – внаслідок взаємодії парів металів із залишковими слідами кисню у вакуумній камері або при витоку повітря можуть утворюватися

дрібнодисперсні оксиди, які подразнюють слизові оболонки й легені при вдиханні.

3. Оксиди вуглецю (CO, CO<sub>2</sub>) – можуть утворюватися під час термічного розкладу вуглецевих сполук або органічних забруднень на поверхні зразків. CO є особливо небезпечним через свою токсичність.

4. Леткі органічні сполуки – можуть виділятися внаслідок залишків мастил, знежирювальних речовин або органічних домішок на поверхні зразків. Деякі з них мають канцерогенну дію.

Таким чином, безпечна експлуатація електронно-променевої установки потребує високої кваліфікації персоналу, суворого дотримання послідовності ввімкнення/вимкнення та контролю параметрів робочого середовища для запобігання аварійним ситуаціям і збереження здоров'я користувачів.

### **5.1.3 Аналіз шуму та вібрацій**

Під час виконання науково-дослідної роботи на електронно-променевій установці було зафіксовано незначний шумовий вплив, пов'язаний з роботою системи охолодження, вакуумного обладнання та допоміжних механізмів. Хоча рівень шуму не перевищував гранично допустимих норм, з метою зниження його впливу на персонал були застосовані комплексні профілактичні заходи.

Зокрема, здійснено екранування шумогенерувальних елементів, обладнання розміщено з урахуванням звукопоглинальних властивостей приміщення, а також використано засоби індивідуального захисту (вушні вкладиші) для операторів, що перебували поруч із джерелом шуму під час роботи установки. Крім того, керування обладнанням частково переведено на дистанційний режим, що дозволило зменшити перебування персоналу в зоні акустичного впливу.

Поряд із шумом, під час роботи ЕПУ спостерігались місцеві вібраційні впливи, які виникали в результаті дії насосних агрегатів вакуумної системи та елементів охолодження. Для зниження вібраційного навантаження установка змонтована на віброізолюваному фундаменті, а всі вузли, що зазнають

динамічних навантажень, обладнані гумовими демпферами та пружинними віброізоляторами. Це дозволило мінімізувати передавання вібрацій на конструктивні елементи приміщення та знизити ризик впливу на оператора.

Всі зазначені заходи відповідають вимогам нормативних документів, зокрема ДСН 3.3.6.037-99 [51], і спрямовані на створення безпечних умов праці при роботі з високотехнологічним обладнанням.

#### **5.1.4 Аналіз освітленості приміщення**

У приміщенні лабораторії, де розміщена електронно-променева установка, реалізована система комбінованого освітлення. У світлу пору доби основне освітлення забезпечується за рахунок природного світла, що надходить через вікна. При недостатньому рівні природної освітленості, зумовленому погодними умовами або вимогами до точності візуальних операцій, передбачено застосування штучного стельового освітлення, що відповідає нормам ДБН В.2.5-28:2006 [52].

Загальне освітлення забезпечується стельовими люмінесцентними світильниками типу ЛБ-40 (у кількості 24 одиниці), рівномірно розташованими по всій площі приміщення. Для локального підсвічування зони обслуговування установки, зокрема під час налаштування або зчитування показників, використовуються додаткові джерела – лампи розжарювання.

Недостатній або надлишковий рівень освітленості, а також її нерівномірність у робочій зоні можуть викликати перенапруження зору, зниження концентрації уваги та продуктивності, що є особливо небезпечним під час роботи з високовольтним та вакуумним обладнанням. Надмірна яскравість джерел або поява відблисків на елементах панелі управління може спричинити тимчасове засліплення, головний біль і підвищений ризик помилкових дій оператора [51, 53]. Тому дотримання нормативів щодо освітлення є критично важливим для забезпечення безпеки й ефективності проведення науково-дослідних робіт.

### 5.1.5 Електробезпека

Відповідно до вимог правил побудови електричних пристроїв (ПУЕ – 2017), лабораторне приміщення, в якому проводились науково-дослідні роботи з використанням електронно-променевої установки, класифікується як таке, що не належить до категорії з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом [52, 53]. Це приміщення з нормованим температурно-вологісним режимом, сухим повітрям, струмонепровідною підлогою та відсутністю агресивного середовища.

Обладнання, що використовувалося під час досліджень, живиться як від мережі 220 В (вакуумна система, блок живлення), так і 380 В (високовольтний блок електронно-променевої установки). Це вимагає особливої уваги до забезпечення електробезпеки при проведенні налаштувань та під час експлуатації.

Серед основних потенційних джерел небезпеки:

- пошкодження ізоляції кабелів або з'єднань внаслідок теплового впливу, і, як наслідок, виникнення доступу до струмоведучих частин;
- помилкове вмикання обладнання або поява напруги на відключених елементах;
- порушення правил експлуатації або неуважність персоналу при роботі з високовольтними системами.

Дія електричного струму може призвести до важких наслідків: термічних опіків, електролітичних ушкоджень тканин та біологічних порушень у функціонуванні організму. Навіть за нормальних умов експлуатації, струм, що проходить через тіло людини, не повинен перевищувати 0,3 мА, а напруга доторкання – 2,0 В (для частоти 50 Гц).

У лабораторії реалізовано систему захисного заземлення всіх електроустановок, включно з вакуумною камерою, блоком живлення та системами керування. Проведення регулярного огляду обладнання дозволяє своєчасно виявити ознаки пробію на корпус або пошкодження ізоляції кабелів,

що значно знижує ризики виникнення аварійних ситуацій. Робота з установкою здійснюється лише після попереднього інструктажу та з дотриманням усіх вимог техніки електробезпеки.

### **5.1.6 Інженерні рішення та засоби індивідуального захисту**

Для забезпечення належного рівня безпеки при роботі з електронно-променевою установкою (ЕПУ) застосовується комплекс засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), що враховує специфіку фізичних і хімічних факторів, притаманних цьому типу обладнання:

#### **1. Захист органів зору**

Під час роботи з променем та спостереження за зоною обробки застосовуються:

– спеціальні захисна перегородка або прозорі щитки з фільтрацією ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, спостереження за зразком відбувається за допомогою камери.

#### **2. Захист органів дихання**

У випадках ймовірного вивільнення парів металів, летких продуктів або залишків технологічних газів, використовуються:

– локальні системи подачі очищеного повітря в зону дихання.

#### **3. Захист шкіри та тіла**

Для запобігання контакту з дрібнодисперсними частинками або хімічними речовинами застосовуються:

– лабораторні халати, комбінезони.

#### **4. Захист від шуму та вібрацій**

При роботі вакуумних насосів, систем охолодження та інших механізмів використовуються:

– індивідуальні засоби захисту слуху: навушники або вушні вкладиші.

#### **5. Додаткові інженерно-технічні заходи**

– робоче місце обладнане витяжною вентиляцією для видалення шкідливих домішок;

– застосовуються автоматизовані датчики контролю концентрації газів та температури в зоні обробки.

Використання вищевказаних ЗІЗ та систем безпеки є обов'язковою умовою під час експлуатації електронно-променевого обладнання та входить до переліку базових заходів охорони праці при роботі з високотехнологічними установками.

### **5.1.7 Пожежна безпека**

Відповідно до вимог НАПБ Б.07.005-86 [54, 55], лабораторне приміщення, у якому проводились науково-дослідні роботи, відноситься до категорії В за пожежною небезпекою, оскільки містить тверді горючі матеріали та не підпадає під визначення категорій А або Б.

У разі виникнення пожежонебезпечної ситуації потенційно можуть загорітися:

- елементи електрообладнання та проводка;
- меблі, паперові документи та їх носії, розміщені в шафах.

Основними ймовірними причинами займання в лабораторії можуть бути:

- порушення регламентованих режимів експлуатації обладнання;
- технічна несправність електроустановок;
- недотримання правил пожежної безпеки під час виконання робіт;
- обслуговування або ремонт приладів у ввімкненому стані;
- порушення інструкцій щодо користування технологічним обладнанням.

Для ліквідації можливого загоряння в лабораторії передбачено комплекс протипожежних заходів, серед яких:

- наявність вуглекислотного вогнегасника ОУБ-3 безпосередньо в приміщенні;
- стаціонарний водопровід з доступом до пожежних кранів на поверхах;
- ящики з піском, розміщені на сходових клітках;
- вогнегасники ОХП-10, ОП-1Б у загальнодоступних зонах;
- автоматична пожежна сигналізація комбінованого типу з оповіщувачем КИ-1;

– на кожному поверсі розміщено плани евакуації.

Зазначені засоби та системи забезпечують відповідний рівень пожежної безпеки та дозволяють своєчасно реагувати на надзвичайні ситуації, зберігаючи здоров'я і життя персоналу, а також цілісність лабораторного обладнання.

## **5.2 Висновок до розділу 5**

Було проведено всебічну оцінку умов робочого середовища в лабораторному приміщенні, включаючи аналіз параметрів мікроклімату, газового складу повітря робочої зони, рівня шуму та вібрації, а також стану електричної та пожежної безпеки. За результатами вимірювань встановлено, що всі показники перебувають у межах допустимих значень, передбачених чинними нормативними документами.

Таким чином, за умови дотримання визначених санітарно-гігієнічних і технічних вимог, проведення дослідницьких робіт у технологічному приміщенні не суперечить правилам охорони праці та не створює загрози для безпеки персоналу.

## ВИСНОВКИ

1. Електронно-променева обробка (ЕПО) поверхні металевих деталей широко використовується у виробництві завдяки унікальним перевагам та широким можливостям, а саме: досягати високих температур за короткі проміжки часу; забезпечувати максимальну чистоту оброблюваної поверхні; варіювати глибину термічного впливу в широкому діапазоні, починаючи з декількох нанометрів і т.і.

2. ЕПО поверхні зразків WC-15Co при силі струму 17 мА та 20 мА і тривалості 5 хв та 10 хв призводять до збільшення середнього розміру зерен WC у приповерхневій області. Найбільший середній розмір зерен WC досягається за режиму обробки 20 мА/10 хв і дорівнює близько 2,7 мкм, у вихідному стані 1,4 мкм. При цьому в приповерхневій області спостерігається збільшення масової частки Co з 12 мас.% до 18 мас.% у порівнянні з вихідним станом.

3. ЕПО поверхні зразків WC-15Co з силою струму 20 мА тривалістю 5 хв та 10 хв призводить до утворення дефектів (пор) в об'ємі. За режимів 17 мА тривалістю 5 хв та 10 хв утворення дефектів в об'ємі не спостерігається. Також зі збільшенням сили струму та тривалості обробки спостерігається збільшення товщини поверхневого дефектного шару, максимальна товщина 100 мкм за режиму 20 мА/10 хв, мінімальна – 25 мкм за режиму 17 мА/5 хв.

4. Зі збільшенням середнього розміру зерна WC спостерігається зменшення мікротвердості твердого сплаву WC-15Co. Так для вихідного стану з середнім розміром зерна 1,4 мкм мікротвердість складає 14,5 ГПа, а для оброблених зразків в зоні з середнім розміром зерна 2,7 мкм відповідно 10,2 ГПа.

5. Серед застосованих режимів оптимальним був визначений режим 17 мА/10 хв, що забезпечує баланс між розміром зерен та відсутністю внутрішніх дефектів.

6. Була визначена планова кошторисна вартість дипломної роботи, яка складає 80377 грн. Економічний аналіз проведеного дослідження в ході

виконання дипломної роботи показує, що це дослідження є економічно доцільним.

7. Було проведено оцінку умов робочого середовища в лабораторному приміщенні, включаючи аналіз параметрів мікроклімату, газового складу повітря робочої зони, рівня шуму та вібрації, а також стану електричної та пожежної безпеки. За результатами вимірювань встановлено, що всі показники перебувають у межах допустимих значень, передбачених чинними нормативними документами. Таким чином, за умови дотримання визначених санітарно-гігієнічних і технічних вимог, проведення дослідницьких робіт у технологічному приміщенні не суперечить правилам охорони праці та не створює загрози для безпеки персоналу.

## CONCLUSIONS

1. Electron beam treatment of the surface of metallic components is widely used in manufacturing due to its unique advantages and broad capabilities, such as achieving extremely high temperatures in short time intervals, ensuring maximum surface cleanliness, and allowing for wide control of thermal influence depth — ranging from several nanometers and beyond.

2. Electron beam treatment of WC-15Co samples at current intensities of 17 mA and 20 mA for durations of 5 minutes and 10 minutes leads to an increase in the average WC grain size in the near-surface region. The largest average WC grain size is observed under the 20 mA/10 min mode, reaching approximately 2.7  $\mu\text{m}$ , compared to 1.4  $\mu\text{m}$  in the initial (as-sintered) state. In addition, the mass fraction of Co in the surface region increases from 12 wt.% to 18 wt.% relative to the initial condition.

3. Electron beam treatment at 20 mA for both 5 minutes and 10 minutes results in the formation of defects (pores) in the bulk of the sample. In contrast, no bulk defects are observed under 17 mA for both 5 minutes and 10 minutes. Furthermore, increasing the current and treatment duration leads to an increase in the thickness of the surface defect layer, with a maximum thickness of 100  $\mu\text{m}$  at 20 mA/10 min and a minimum of 25  $\mu\text{m}$  at 17 mA/5 min.

4. An inverse relationship is observed between WC grain size and microhardness of the WC-15Co cemented carbide. In the initial state, with an average grain size of 1.4  $\mu\text{m}$ , the microhardness is 14.5 GPa, while in treated samples with an average grain size of 2.7  $\mu\text{m}$ , the microhardness drops to 10.2 GPa.

5. Among the tested regimes, the 17 mA/10 min mode was identified as the optimal one, providing a balance between grain growth and the absence of internal defects.

6. The estimated budget for the diploma project was determined to be 80,377 UAH. The economic analysis conducted during the course of the diploma project demonstrates that the research is economically feasible.

7. An assessment of the working environment conditions in the laboratory was carried out, including an analysis of the microclimate parameters, the gas composition of the workplace air, noise and vibration levels, as well as the state of electrical and fire safety. Based on the measurement results, it was established that all indicators are within the permissible limits set by current regulatory documents. Therefore, provided that the established sanitary, hygienic, and technical requirements are observed, conducting research in the technological facility does not violate occupational safety regulations and does not pose a threat to personnel safety.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Effects of Holding Time on the Sintering of Cemented Tungsten Carbide Powder and Bonding with High-Strength Steel Wire / Hasan, Md Mahadi & Zhao, Jingwei & Huang, Zhenyi & Wu, Hui & Jia, Fanghui // *Journal of Materials Engineering and Performance* – 2019 – Vol.3 – P.28.
2. Шеремет В. І. Вплив холодного ізостатичного формування на властивості твердого сплаву ВК8 / В. І. Шеремет // Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського. 2021 – с.11–23.
3. Ndlovu S. The wear properties of tungsten carbide-cobalt hardmetals from the nanoscale up to the macroscopic scale / Ndlovu Siphilisiwe. // *Der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg – Erlangen, 2009 – P.1–133*
4. Markström A. A Revised Thermodynamic Description of the Co-W-C System / Markström Andreas, Frisk Karin, Sundman Bo. // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion* – 2005 – Vol.26 – P.152-160.
5. Liu C. Alternative binder phases for WC cemented carbides: thesis / Liu Chunxin. // *School of Industrial Engineering and Management* – 2014. – P.1–121
6. García J. Process development and scale up of cemented carbide production. / García José & Strelesky Wolfgang. // *Scale-up in Metallurgy* / ed. by Maximilian Lackner – Chapter: 7 – Berlin, 2010 – P.235–267.
7. Toward Greener Synthesis of WC Powders for Cemented Tungsten Carbides Manufacturing / Riccardo Polini [et al.] // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2021. – Vol. 9, № 25. – P. 8458–8466.
8. Cemented carbide microstructures: a review / José García [et al.] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2019. – Vol. 80. – P. 40–68.
9. Mechanical evaluation of WC-Co materials with varying microstructures / John J. Pittari [et al.] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2022. – Vol. 104. – P. 105809.

10. The mechanical behaviour of cemented carbides at high temperatures / H. G. Schmid [et al.] // *Materials Science and Engineering: A.* – 1988. – Vol. 105–106. – P. 343–351.

11. Fracture behaviour of WC-Co hardmetals with WC partially substituted by titanium carbide / M. Szutkowska [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2018. – Vol. 329. – P. 012015.

12. Basic knowledge of carbide tool materials [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://www.huaxincarbide.com/news/basic-knowledge-of-carbide-tool-materials/>, вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

13. Discussion on importance of tungsten carbide - Cobalt (Wc-Co) cemented carbide and its critical characterization for wear mechanisms based on mining applications. / Nahak Sakuntala, Dewangan Saurabh, Chattopadhyaya Somnath, Krolczyk Grzegorz, Hloch Sergej. // *Archives of Mining Sciences.* – 2018 – Vol.63 – P.229–246.

14. Material extrusion-based three-dimensional printing of WC–Co alloy with a paste prepared by powder coating / Hakhyun Kim [et al.] // *Additive Manufacturing.* – 2022. – Vol. 52. – P. 102679.

15. Cast WC-Co alloy-based tool manufacturing using a polymeric mold prepared via digital light processing 3D printing / Hakhyun Kim [et al.] // *Materials Letters.* – 2022. – Vol. 306. – P. 130979.

16. WM4997 Tungsten Carbide Cobalt Powder (WC-15Co) [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://www.samaterials.com/tungsten-carbide-cobalt-powder-wc-15co.html#:~:text=Q2%3A%20What%20are%20the%20key,bits%20and%20coal%20mining%20machinery.>, вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

17. Durable Cold Drawn Tungsten Carbide Pr/Ca/RO/Rt/Fo Roller Wire Mesh [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://starcarbide.en.made-in-china.com/product/LNsGOvdViwcR/China-Durable->

Cold-Drawn-Tungsten-Carbide-Pr-Ca-RO-Rt-Fo-Roller-Wire-Mesh.html, вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

18. YG15 Durable Tungsten Carbide shredder blades used for Plastic and metal Knives cutting [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://www.ostoncarbide.com/products/yg12-gb20-durable-tungsten-carbide-shredder-blades-used-for-plastic-and-metal-knives-cutting>, вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

19. Naboychenko S. S. Production of Refractory Metal Powders / S. S. Naboychenko, I. B. Murashova, O. D. Neikov // Handbook of Non-Ferrous Metal Powders. – 2009. – № 21. – P. 436–484

20. The preparation of tungsten carbides and tungsten powders by reaction of tungsten trioxide with methanol / Yijie Wu [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2018. – Vol. 76. – P. 99–107.

21. Valsecchi G. Sintering of cemented carbide: a user-friendly overview– Pt.1 [Електронний ресурс] / Giorgio Valsecchi // The Vacuum Furnaces Blog. – Режим доступу: <https://www.tav-vacuumfurnaces.com/blog/74/en/sintering-of-cemented-carbide-a-user-friendly-overview-pt-1> (дата звернення: 15.05.2025). – Назва з екрана.

22. Valsecchi G. Sintering of cemented carbide: a user-friendly overview – Pt.2 [Електронний ресурс] / Giorgio Valsecchi // The Vacuum Furnaces Blog. – Режим доступу: <https://www.tav-vacuumfurnaces.com/blog/75/en/sintering-of-cemented-carbide-a-user-friendly-overview-pt-2> (дата звернення: 15.05.2025). – Назва з екрана.

23. Schwanekamp T. Impact of laser irradiation on microstructure and phase development of tungsten carbide - cobalt [Електронний ресурс] / Tobias Schwanekamp, Joachim Gussone, Martin Reuber // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 94. – P. 239–242. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.045> (дата звернення: 15.05.2025). – Назва з екрана.

24. Zhang F. Microstructure and properties of WC-Co cemented carbide irradiated by high-intensity pulsed ion beam [Електронний ресурс] / F. Zhang, X.

Zhu, M. Lei // *Tongfang Zhiwang Technology*. – 2016. – Vol. 41. – P. 118–124. –

Режим

доступу: [https://www.researchgate.net/publication/301656267\\_Microstructure\\_and\\_properties\\_of\\_WC-Co\\_cemented\\_carbide\\_irradiated\\_by\\_high-](https://www.researchgate.net/publication/301656267_Microstructure_and_properties_of_WC-Co_cemented_carbide_irradiated_by_high-intensity_pulsed_ion_beam)

[intensity\\_pulsed\\_ion\\_beam](https://www.researchgate.net/publication/301656267_Microstructure_and_properties_of_WC-Co_cemented_carbide_irradiated_by_high-intensity_pulsed_ion_beam) (дата звернення: 15.05.2025). – Назва з екрана.

25. Effect of nitrogen ion implantation on the life time of WC-Co tools used in particleboard milling [Електронний ресурс] / Jacek Wilkowski [et al.] // *Wood Material Science & Engineering*. – 2021. – P. 1–12. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1900391> (дата звернення: 15.05.2025). – Назва з екрана.

26. Yu L. D. Friction modification of WC-Co by ion implantation [Електронний ресурс] / L. D. Yu, G. W. Shuy, T. Vilaithong // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol. 128-129. – P. 404–409.

27. Influences of Cr contents on oxidation behavior of WC-Co-Ni-Cr cemented carbides at 900 °C / Jianzhan Long [et al.] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2024. – Vol. 118. – P. 106466.

28. Enhanced Coarse-Grained WC-Co(Ce) Cemented Carbide Prepared through Co-Precipitation / Fanlu Min [et al.] // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, № 16. – P. 5506.

29. Additive manufacturing of WC-13%Co by selective electron beam melting: Achievements and challenges / I. Konyashin [et al.] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2019. – Vol. 84. – P. 105028.

30. Bocharov A. N. Calculating the geometric parameters of the distribution of electron beam energy density on its section in EBW [Електронний ресурс] / A. N. Bocharov, A. V. Murygin, V. D. Laptенок // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 450. – P. 032010.

31. Impact of cobalt content and grain growth inhibitors in laser-based powder bed fusion of WC-Co / Tobias Schwanekamp [et al.] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2022. – Vol. 105. – P. 105814.

32. Steel Number: European Steel and Alloy Grades [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://steelnumber.com>, вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

33. Continuous Electron Beam Post-Treatment of EBF3-Fabricated Ti–6Al–4V Parts / Alexey Panin [et al.] // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, № 6. – P. 699.

34. Effect of High-Current Pulsed Electron Beam on Microstructure and Surface Properties of Ag-10La0.7Sr0.3CoO3 Composites [Електронний ресурс] / Huanfeng Zhang [et al.] // *Surfaces*. – 2024. – Vol. 7, № 3. – P. 739–751.

35. Structure of an SEM [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: [https://myscope.training/SEM\\_Structure\\_of\\_an\\_SEM](https://myscope.training/SEM_Structure_of_an_SEM), вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

36. McMullan D. Scanning electron microscopy 1928-1965 / D. McMullan // *Scanning*. – 2006. – Vol. 17, № 3. – P. 175–185.

37. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis / Ronald R. Cowden [et al.] // *Transactions of the American Microscopical Society*. – 1983. – Vol. 102, № 1. – P. 59.

38. What is EDS/EDX? [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://nano.oxinst.com/campaigns/what-is-eds/edx>, вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

39. Lawrence B. W. The development of x-ray analysis / Bragg William Lawrence. – New York : Dover Publications, 1992. – P.270.

40. WD-XRF Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: [http://www.polymer.co.kr/kor/02\\_service/element\\_4\\_3.jsp](http://www.polymer.co.kr/kor/02_service/element_4_3.jsp), вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

41. Smith R. L. An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to Those of a High Degree of Hardness / R. L. Smith, G. E. Sandly // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. – 1922. – Vol. 102, № 1. – P. 623–641.

42. Determination of Vickers Hardness in D2 Steel and TiNbN Coating Using Convolutional Neural Networks / Juan C. Buitrago Diaz [et al.] // *Metals*. – 2023. – Vol. 13, № 8. – P. 1391.

43. Determination of gold leaf thickness using X-ray fluorescence spectrometry: Accuracy comparison using analytical methodology and Monte Carlo simulations / Sofia Pessanha [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2019. – Vol. 152. – P. 6–10.

44. Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) [Електронний ресурс] – Електронні текстові дані. – Режим доступу: <https://www.xos.com/EDXRF>, вільний. – (дата звернення: 08.05.2025). – Назва з екрана.

45. Schwanekamp T. Additive Manufacturing of application optimized tungsten carbide precision tools. / Tobias Schwanekamp, Martin Reuber // 6th International Conference on Additive Technologies ICAT 2016 – Nürnberg, 2016. – P. 100–114.

46. Документація. Будівельні норми і правила : ДСан ПіН 3.32 .007 – 98 – [Чинний від 01.04.2019]. – Київ : «Український зональний науково-дослідний і проектний інститут по цивільному будівництву», 2019. – 99 с.

47. Документація. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. – [Чинний від 01.12.1999]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 10 с.

48. Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації / Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний // За ред. Є.П. Желібо. – Київ: «Каравела»; 2001. – 320 с.

49. Охорона праці та цивільний захист / О.Г. Левченко, О.І. Полукаров, В.В. Зацарний та ін. // За ред. О.Г. Левченка. – К.: Основа,

50. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони [Електронний ресурс] : Наказ МОЗ України від 09.07.2024 № 1192 : станом на 06.03.2025 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#Text> (дата звернення: 02.06.2025). – Назва з екрана.

51. Документація. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99. – [Чинний від 01.12.1999]. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 1999. – 17 с.

52. Документація . Природне та штучне освітлення : ДБН В.2.5.28-2006 – [Чинний від 01.10.2006]. – Київ : «Мінбуд Ураїни», 2006. – 78 с.

53. Левченко О.Г. Охорона праці та цивільний захист навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О.Г. Левченко // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 337 с.

54. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний та ін. – К.: Основа, 2006. – 448 с.

55. Документація. Системи протипожежного захисту : ДБН В.2.5-56:2014. – [Чинний від 01.11.2019]. – Київ : ПП «НТЦ УСВППП», 2018. – 27 с.