

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
**Факультет технічних систем та енергоефективних технологій**  
**Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Оксана ГАПОНОВА  
(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня магістр**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 132 Матеріалознавство  
(код та назва)

\_\_\_\_\_ освітньо-професійної \_\_\_\_\_ програми \_\_\_\_\_ Прикладне матеріалознавство

на тему: \_\_\_\_\_ Дослідження технології отримання, структури та властивостей  
зносостійких хромових покриттів.

Здобувача (ки) групи \_\_\_\_\_ МТ.м-21/1 \_\_\_\_\_ Іщенко Сергія Миколайовича  
(цифра групи) (прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ Сергій ІЩЕНКО  
(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник \_\_\_\_\_ доцент, к.т.н., доцент Андрій ДЕГУЛА \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ доцент, к.т.н., доцент Андрій ДЕГУЛА \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Суми – 2023

Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра «Прикладне матеріалознавство і технології конструкційних матеріалів»  
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О.П. Гапонова

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

**Іщенко Сергія Миколайовича**

1. Тема проекту: «Дослідження технології отримання, структури та властивостей зносостійких хромових покриттів»

затверджена наказом по університету від “09” листопада 2023р. № 1254-VI

2. Термін здачі студентом закінченого проекту(роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_

Вихідними даними для роботи є умови щодо отримання якісних зносо- та корозійностійких хромових покриттів на поверхні деталей, що працюють при підвищених навантаженнях.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

огляд літератури за темою, формулювання мети та завдань дослідження; викладення загальної методики та основних методів дослідження; опис проведених теоретичних та експериментальних досліджень, а також узагальнення їх результатів; економічна частина; охорона праці та безпека життєдіяльності.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень/слайдів) Титульний аркуш; мета роботи та завдання; аналіз існуючих технологій отримання хромових покриттів; результати експериментальних досліджень; економічна частина; охорона праці; висновки

6. Консультанти по проекту (роботі), із значенням розділів проекту, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економічна частина	Берладір Х.В.		
Охорона праці	Говорун Т.П.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Формулювання мети роботи	Листопад 2023	
2	Літературний огляд	Листопад 2023	
3	Огляд існуючих методів дослідження	Листопад 2023	
4	Експериментальна частина	Грудень 2023	
5	Економічна частина	Грудень 2023	
6	Охорона праці	Грудень 2023	
7	Висновки	Грудень 2023	

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник проекту \_\_\_\_\_

(підпис)

## АНОТАЦІЯ

**Іщенко С.М. Дослідження технології отримання, структури та властивостей зносостійких хромових покриттів. – Рукопис.**

Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 – Матеріалознавство. – Сумський державний університет, Суми, 2023.

Робота присвячена аналізу сучасних методів отримання зносостійких хромових покриттів та дослідженню їх властивостей.

За результатами проведених досліджень встановлено вплив технології отримання хромових покриттів на мікроструктуру дослідних зразків; зміни структурно-фазового стану в залежності від складу і концентрацій насичуючих компонентів; вивчено механічні властивості деталей з одержаними покриттями і виявлені закономірності їх утворення.

Підтверджено, що кількість вуглецю, а також легувальних елементів в сталі впливає на товщину та мікротвердість карбідних покриттів. Збільшення кількості вуглецю у сталі призводить до збільшення товщини покриття. Збільшення кількості легувальних елементів (особливо тих, що мають карбідоутворювальні властивості) призводить до зменшення товщини покриття і незначного збільшення його мікротвердості.

**Ключові слова:** СТРУКТУРА, ТВЕРДІСТЬ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ХРОМУВАННЯ, ЗАХИСНЕ ПОКРИТТЯ, МЕЖА МІЦНОСТІ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, КАРБИДИ, ДИФУЗИЯ, ЛЕГУВАННЯ, МЕТАЛІЗАЦІЯ

## ABSTRACT

**Ishchenko S.M. Research of production technology, structure and properties of wear-resistant chrome coatings. - Manuscript.**

Qualification work for master's qualification in specialty 132 - Materials Science. – Sumy State University, Sumy, 2023.

The work is devoted to the analysis of modern methods of obtaining wear-resistant chrome coatings and the study of their properties.

Based on the results of the research, the impact of the chrome coating technology on the microstructure of the test samples was determined; changes in the structural-phase state depending on the composition and concentrations of saturating components; the mechanical properties of parts with the obtained coatings were studied and the regularities of their formation were revealed.

It has been confirmed that the amount of carbon and alloying elements in steel affects the thickness and microhardness of carbide coatings. An increase in the amount of carbon in steel leads to an increase in the thickness of the coating. An increase in the number of alloying elements (especially those with carbide-forming properties) leads to a decrease in the thickness of the coating and a slight increase in its microhardness.

**Keywords: STRUCTURE, HARDNESS, HEAT TREATMENT, CHROME PLATING, PROTECTIVE COATING, STRENGTH LIMIT, WEAR RESISTANCE, CARBIDE, DIFFUSION, ALLOYING, METALIZATION**

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра включає 85 сторінок, у тому числі 3 таблиці, 17 рисунків, бібліографії із 31 літературних джерел.

**Мета роботи** – підбір методів та оптимізація режимів отримання дифузійних зносостійких хромових покриттів способами хіміко-термічної обробки для підвищення експлуатаційних властивостей деталей.

**Задачі досліджень** – провести патентно-літературний аналіз сучасного стану і проблеми створення захисних зносостійких покриттів для деталей машинобудівного комплексу; дослідити мікроструктуру зразків і проаналізувати зміни структурно-фазового стану; виконати дослідження механічних властивостей зразків після дифузійної металізації.

**Об'єкт дослідження** – процес отримання захисних хромових покриттів, зміна структури та механічних властивостей конструкційних вуглецевих та низьколегованих сталей.

**Предмет дослідження** – конструкційні сталі і тверді сплави із захисними хромовими покриттями.

**Методи досліджень** – експериментальні дані отримані з використанням стандартних методів визначення фізико-механічних властивостей захисних покриттів і сучасних мікроскопічних і металографічних методів дослідження.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Підтверджено закономірності формування структури та фазового складу дифузійних хромових покриттів, а також механічних властивостей поверхневих шарів виробів, які працюють в умовах тертя-зношування.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>12</b>
1.1 Методи отримання покриттів .....	12
1.2 Огляд публікацій за темою досліджень .....	34
1.3 Патентний огляд за темою досліджень.....	38
Висновки .....	41
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>42</b>
2.1 Мікроструктурний аналіз .....	42
2.2 Визначення твердості .....	50
2.3 Метод вимірювання мікротвердості .....	53
2.4 Рентгеноструктурний аналіз .....	54
Висновки .....	56
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....</b>	<b>57</b>
3.1 Результати мікроструктурного аналізу .....	57
3.2 Результати вимірювання мікротвердості .....	59
3.3 Результати рентгеноструктурного аналізу.....	60
Висновки .....	62
<b>РОЗДІЛ 4</b>	
<b>ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>63</b>
4.1 Економіка підприємства .....	63
Висновки .....	70

**РОЗДІЛ 5****ОХОРОНА ПРАЦІ, НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА****ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ..... 71**

## 5.1 Класифікація небезпечних і шкідливих факторів ..... 71

5.2 Загальні та індивідуальні заходи щодо усунення впливу  
шкідливих факторів ..... 72

## 5.3 Заходи щодо охорони навколишнього середовища ..... 78

## Висновки ..... 80

**ВИСНОВКИ..... 81****СПИСОК ВИКРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 82****Додаток**



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ДМ – дифузійна металізація

ХТО – хіміко-термічна обробка

ТО – термічна обробка

МО – методи осадження

ЗП – зносостійкі покриття

ХМ – хромові покриття

CVD – хімічне осадження з парової фази

PVD – Фізичне осадження з парової фази

## ВСТУП

### **Актуальність роботи.**

Світові тенденції по виготовленню деталей та машин підвищують вимоги до швидкостей виробництва збільшуючи навантаження на інструмент. У зв'язку з цим вирішення проблеми зношування матеріалів стає все більш актуальним завданням сучасного матеріалознавства, бо зношування деталей машин і інструментів має безпосередній вплив на продуктивність, ефективність, надійність устаткування та якість продукції, що випускається.

Основною задачею сучасного матеріалознавства, що стимулює інтерес до наукових досліджень, було і є вдосконалення властивостей існуючих матеріалів та розробка нових матеріалів, з підвищеною продуктивністю покладених на них функцій та зменшенням часу на їх обслуговування [1].

Дві основні мети інженерії поверхні для трибологічного застосування в механізмах та інструментах полягають у наступному: підвищення зносостійкості і зміні характеру протікання процесу тертя. Найкраща загальна продуктивність може бути отримана, якщо структура поверхні і властивості будуть модифіковані без пошкодження основного матеріалу. У зв'язку з цим доступні процеси обробки поверхні необхідно розглядати як складову частину при виборі конструкції і матеріалу інструменту [1].

Нанесення покриттів різноманітними методами дозволяє виготовляти вироби з широким діапазоном властивостей поверхні. Це дає змогу різко скоротити витрати металів за рахунок підвищення надійності і терміну експлуатації деталей машин, устаткування і споруд, виготовляти їх з рядових марок сталей і сплавів, а необхідні властивості робочих поверхонь забезпечувати сформованими на них шарами. Важливим є використання покриттів для відновлення розмірів зношених деталей [2].

У сучасній промисловості при вирішенні проблеми підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин, штампів та інструменту великого значення набувають розроблення та впровадження нових технологічних процесів з нанесення захисних зносостійких покриттів.

Останнім часом знайшли широке застосування тугоплавкі сполуки, які в якості захисних покриттів суттєво підвищують працездатність деталей машин, термін служби інструменту в умовах тертя ковзання, кавітації, дії високих температур та агресивних середовищ. До таких покриттів можна віднести одно- та багат шарові покриття на основі карбідів, нітридів, боридів перехідних металів IV-VI груп періодичної системи отримані методами хіміко-термічної обробки [3].

Застосування способів поверхневого зміцнення матеріалів дозволяє отримати в поверхневому шарі виробу практично шар будь-якого складу і забезпечити комплекс необхідних фізичних, хімічних, механічних та експлуатаційних властивостей.

**Мета роботи** – підбір методів та оптимізація режимів отримання дифузійних зносостійких хромових покриттів способами хіміко-термічної обробки для підвищення експлуатаційних властивостей деталей.

**Задачі досліджень** – провести патентно-літературний аналіз сучасного стану і проблеми створення захисних зносостійких покриттів для деталей машинобудівного комплексу; дослідити мікроструктуру зразків і проаналізувати зміни структурно-фазового стану; виконати дослідження механічних властивостей зразків після дифузійної металізації.

**Об'єкт дослідження** – процес отримання захисних хромових покриттів, зміна структури та механічних властивостей конструкційних вуглецевих та низьколегованих сталей.

**Предмет дослідження** – конструкційні сталі і тверді сплави із захисними хромовими покриттями.

**Методи досліджень** – експериментальні дані отримані з використанням стандартних методів визначення фізико-механічних властивостей захисних покриттів і сучасних мікроскопічних і металографічних методів дослідження.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Підтверджено закономірності формування структури та фазового складу дифузійних хромових покриттів, а

також механічних властивостей поверхневих шарів виробів, які працюють в умовах тертя-зношування.

**Практичне значення отриманих результатів.** Вивчення механізмів структуроутворення в процесі дифузійного хромування дозволяє керувати структурою і механічними властивостями захисних покриттів.

**Особистий внесок здобувача.** Автору належить аналіз літературних даних, постановки завдання та визначення мети дослідження, виготовлення зразків, проведення металографічних досліджень, визначення твердості, міцності та оформлення роботи.

**Апробація роботи. -**

**Публікації. -**

**Структура й обсяг кваліфікаційної роботи магістра.** Робота складається із вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел і додатку. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 85 сторінок, у тому числі 17 рисунків, 3 таблиці, бібліографії із 31 джерела, одного додатку.

## **РОЗДІЛ 1**

### **ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ**

#### **1.1 Методи отримання покриттів.**

##### **1.1.1 Фізичні методи та засоби отримання покриттів [4].**

###### **Методи утворення покриттів термовакuumним напилюванням.**

Покриття при вакуумному конденсаційному напилюванні формуються з потоку частинок, що знаходяться в атомарному, молекулярному або йонізованому стані. Потік частинок отримують розпиленням матеріалу за допомогою впливу на нього різними енергетичними джерелами.

Розрізняють розпилення матеріалу, який наносять, методом термічного випаровування, вибухового випаровування, йонним розпиленням твердого матеріалу [4].

Процес вакуумного конденсаційного напилювання проводять у герметичних камерах при тиску  $13,3 \dots 133 \cdot 10^{-3}$  Па. Завдяки цьому забезпечується необхідна довжина вільного пробігу розпилюваних частинок і захист процесу від взаємодії з атмосферними газами.

Перенесення частинок у напрямку до поверхні напилювання виникає внаслідок різниці в парціальних тисках парової фази. Найбільш високі тиски пари, що досягають 133 Па і більше, спостерігаються поблизу поверхні розпилення (випаровування).

Це й обумовлює переміщення частинок у напрямку напилюваного виробу, де тиск пари мінімальний. Інші сили переносу можуть бути введені для частинок, що знаходяться в потоці в йонізованому стані.

У цьому відношенні напилювання покриттів з йонізованих парових потоків переважає. Крім того, йонізовані частинки мають більшу енергію. Це полегшує формування покриттів високої якості [4].

Узагальнена схема процесу вакуумного конденсаційного напилювання покриттів показана на рисунку 1.1.

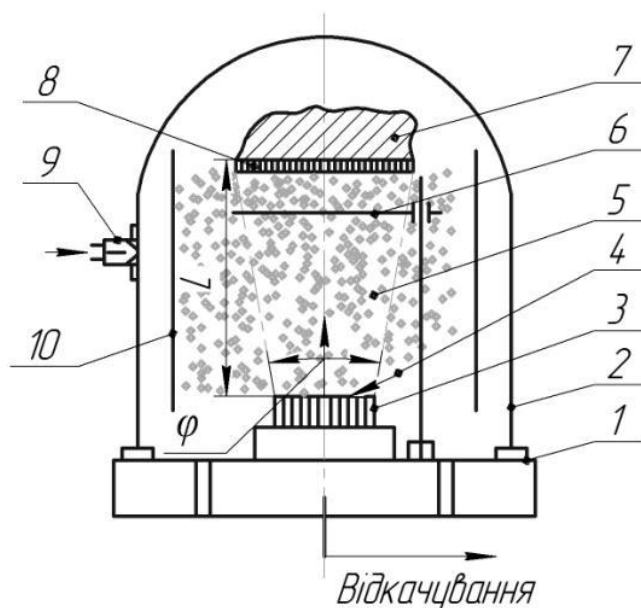


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема процесу вакуумного конденсаційного напилювання покриттів:

- 1 – базова плита; 2 – вакуумна камера; 3 – матеріал, що розпилюється; 4 – розпилювач матеріалу; 5 – потік розпилених частинок; 6 – заслінка; 7 – напилюваний виріб; 8 – покриття; 9 – наповнювач робочого газу; 10 – екран.

Класифікація методів вакуумного конденсаційного напилювання (ВКН) покриттів показана на рисунку 1.2.

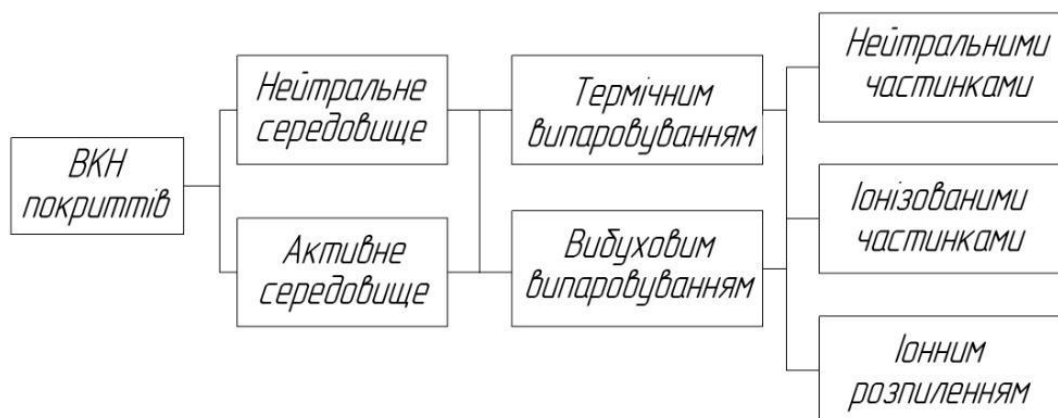


Рисунок 1.2 – Класифікація методів і способів вакуумного конденсаційного напилювання покриттів

Вибір методу напилювання і його різновидів (способів) визначається вимогами, що ставляться до покриттів з урахуванням економічної ефективності, продуктивності, простоти керування, автоматизації тощо.

Найбільш перспективні способи вакуумного конденсаційного напилювання з йонізацією потоку розпилюваних частинок, стимульовані плазмою. Часто їх називають йонно-плазмовими.

Напилювання конденсацією з парової (газової) фази визначає групу методів напилювання тонких плівок у вакуумі, в яких покриття формується шляхом прямої конденсації пари [4].

### **Йонно-плазмові методи отримання тонких плівок.**

Йонно-плазмове розпилення – метод вакуумного напилювання, в якому осаджуваний атомарний потік отримують в результаті бомбардування прискореними йонами поверхні початкового напилюваного матеріалу і подальшої інжекції розпорошених атомів в газову фазу.

Йонно-плазмові методи отримали широке поширення в технології електронних засобів завдяки своїй універсальності та ряду переваг у порівнянні з іншими технологічними методами.

Універсальність визначається тим, що з їх допомогою можна здійснювати різні технологічні операції: формувати тонкі плівки на поверхні підкладки, травити поверхню підкладки з метою створення на ній заданого малюнка інтегральної мікросхеми, здійснювати очищення поверхні.

До переваги йонно-плазмових методів відноситься висока керованість процесом; можливість отримання плівок тугоплавких матеріалів, хімічних сполук і сплавів заданого складу; краща адгезія плівок до поверхні тощо.

Суть методів йонно-плазмового напилювання тонких плівок полягає в обробці поверхні мішені-речовини йонами і вибиванні атомів (молекул) з мішені. Енергія йонів при цьому досягає кількох тисяч електрон-вольт [4].

Утворений атомний потік прямує на підкладку, де відбувається конденсація речовини і формується плівка.

Розрізняють йонно-променеве розпорошення, здійснюване бомбардуванням мішені пучком прискорених йонів, сформованим в автономному йонному джерелі, і власне йонно-плазмове розпилення, при якому мішень є одним з електродів у газорозрядній камері, а її бомбардування здійснюється йонами, що утворюються в результаті газового розряду.

Для розпилення мішені використовуються йони інертних газів (зазвичай аргон високої чистоти). Джерелом йонів служить або самостійний тліючий розряд, або плазма несамостійного розряду (дугового або високочастотного).

У виробництві застосовують різні процеси йонно-плазмового напилювання, що відрізняються:

- характером живлячої напруги (постійна, змінна, високочастотна);
- способом збудження і підтримки розряду (автоелектронна емісія, термоемісія, магнітне поле, електричне високочастотне поле);
- кількістю електродів у газорозрядній камері (двохелектродні, трьохелектродні та багатоелектродні системи).

Характер взаємодії бомбардуючих йонів з поверхнею твердого тіла визначається їх енергією. При енергіях менших 5 еВ, взаємодія обмежується фізично і хімічно адсорбованими шарами, викликаючи їх десорбцію і обумовлюючи протікання різних хімічних реакцій [4].

При кінетичних енергіях, що перевищують енергію зв'язку атомів в кристалічній решітці, бомбардування викликає руйнування приповерхневого шару і викид атомів в газову фазу (розпилення).

Мінімальна енергія йонів, що призводить до вибивання атомів з поверхні, називається пороговою енергією розпилення. Її величина знаходиться в інтервалі енергій від 15 до 30 еВ.

Характеристикою процесу йонного розпилення служить коефіцієнт розпилення, який визначається кількістю атомів, вибитих з поверхні, що бомбардується, падаючим йоном.

При зростанні енергії бомбардуючих йонів понад 100 еВ коефіцієнт розпилення різко збільшується і в області 5...10 кеВ виходить на насичення.



Подальше підвищення кінетичної енергії понад 100 кеВ призводить до зниження розпилення викликаного радіаційними ефектами і впровадженнями йонів в кристалічну решітку.

Розпилення викликається передачею імпульсу енергії від бомбардуючої частки атомам кристалічної решітки в результаті серії послідовних зіткнень.

Передача імпульсу від йонів відбувається в перших атомних шарах кристалічних ґраток.

Наприклад, при бомбардуванні поверхні полікристалічної міді йонами аргону з енергією 1 кеВ глибина проникнення становить три атомні шари.

Найбільш поширеним у виробництві джерелом йонів є інертний газ аргон, що має масу, достатню для розпилення і характеризується відносно малою вартістю [4].

В установках потік атомів створюється в результаті бомбардування йонами плазмового розряду поверхні початкового напилюваного матеріалу, що знаходиться під негативним потенціалом або тліючого розряду (йонно-плазмове розпилення, різновидами якого є катодне, магнетронне розпилення), що є катодом, або за рахунок бомбардування прискореними йонами, емітованими автономним джерелом (йонно-променеве розпилення).

### **Йонно-променеві методи отримання тонких плівок.**

Тонкі плівки різних матеріалів можна наносити на підкладинку, розпорошуючи матеріал мішені пучком йонів інертних газів. Основні переваги цього методу нанесення плівок у порівнянні з методом йонно-плазмового розпилення полягають у наступному:

- можливість нанесення плівок матеріалів складного складу із збереженням компонентного складу мішені;
- малий робочий тиск у технологічній камері, обмежений лише швидкістю відкачування вакуумної системи, а не умовами підтримки розряду;

- відсутність електричних полів в області підкладки, що особливо важливо при нанесенні діелектричних плівок на підкладки з провідних матеріалів;
- можливість керування зарядами в осаджуваній діелектричній плівці за допомогою електронів, що емітуються катодом нейтралізації.

Йонно-променевий метод найбільш ефективний для нанесення плівок багатокомпонентних матеріалів, різних діелектриків, магнітних матеріалів.

Установка йонно-променевого розпилення показана на рисунку 1.3.

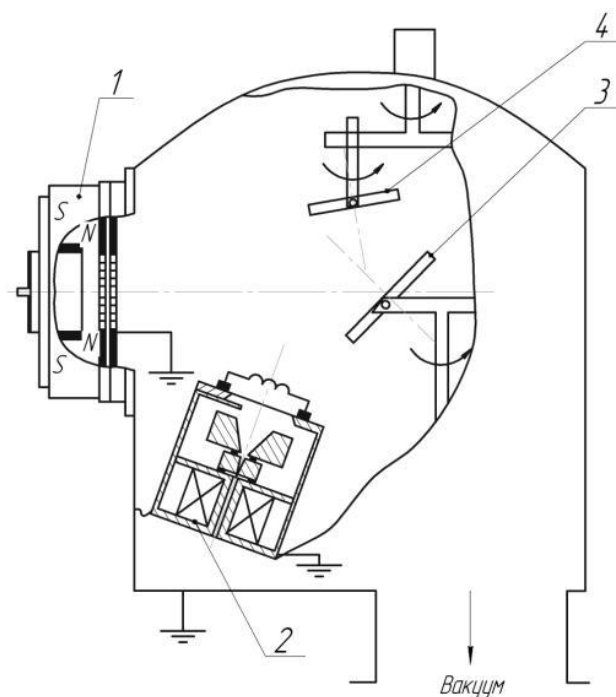


Рисунок 1.3 – Схема установки йонно-променевого розпилення

Установка містить джерело йонів на основі двокаскадного самостійного розряду з холодним порожнистим катодом 1 і модифікований варіант джерела йонів Кауфмана з відкритим торцем 2. Джерело йонів 1 служить для розпилення пучком йонів аргону з енергією 0,8 кеВ і щільністю струму 0,3 мА/см<sup>2</sup> мішені 3 чистотою не нижче 99,8%. По напрямку потоку розпилюваного матеріалу встановлено підкладки, закріплені на чотирьох позиціях обертового елемента 4.

Потік йонів аргону з середньою енергією 80 еВ і щільністю струму 0,45 мА/см<sup>2</sup> з джерела йонів 2 служить для очищення та активації поверхні робочої підкладки протягом 2 хвилини перед нанесенням плівки [4].

Джерело йонів 2 під час нанесення плівки відключається, подача аргону через нього припиняється, а термокатод використовується для нагріву поверхні робочої підкладки. У цьому методі для розпилення використовується пучок частинок високої енергії.

Для створення таких потоків частинок з контрольованою енергією розроблені системи йонних гармат.

Технологія йонно-променевого розпилення полягає у бомбардуванні мішені заданого складу пучком йонів з енергією до 5 кеВ з подальшим осадженням розпорошеного матеріалу на підкладку. При цьому стехіометрія формованого покриття ідентична мішені.

Ця сучасна технологія призначена для нанесення прецизійних наносарових покриттів з високою щільністю і низькою шорсткістю.

Додатковими перевагами технології йонно-променевого розпилення є можливість проведення реактивних і неактивних процесів в одній камері без переналагодження (наприклад, з мішені Si можна отримувати покриття Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), можливість нанесення покриттів на термочутливі підкладки (оскільки процес нанесення характеризується низькими температурами до 900 °C). Крім того можливе перенесення нанокompatитних матеріалів мішені на підкладку без зміни їх властивостей [4].

У більшості випадків йонно-променевого розпилення проводиться при енергії йонів 0,1...1 кеВ, що забезпечує підтримку низької температури підкладки і обмежує її радіаційне ушкодження. При енергії понад 1 МеВ йони проникають так глибоко, що лише невелика кількість поверхневих атомів розпилюється, коефіцієнт розпилення зменшується.

Розпилення, таким чином, є процесом, в якому збільшення енергії йонів неефективне. Коефіцієнт розпилення матеріалу залежить від типу бомбардуючих його йонів.

Атомна маса йона є одним з чинників, що визначають величину імпульсу, яка може бути передана атомам підкладки. При йонно-променевому

розпиленні, найширше використовується інертний газ аргон, тому, що забезпечує високий коефіцієнт розпилення, є дешевим і легко доступний.

Коефіцієнт розпилення залежить не лише від природи бомбардуючих йонів, але й від природи матеріалу мішені, причому визначається положенням розпиляного елемента в періодичній системі і обернено пропорційний до теплоти сублімації.

Часто використовувани в мікроелектроніці матеріали: паладій, платина, золото – мають порівняно високий коефіцієнт розпилення, тоді як вуглець, титан і тантал – низький.

Є установки йонно-променевого розпилення, що містять два йонні джерела: джерело йонів з холодним порожнистим катодом на основі самостійного двохкаскадного розряду низького тиску для розпилення мішеней і джерело йонів Кауфмана холловського типу з відкритим торцем для створення асистуючого потоку низькоенергетичних йонів [4].

Йонно-променеве розпилення є методом анізотропного розпилення з дуже високим розділенням, який забезпечує високу якість покриттів, відтворюваність і вносить мінімальне забруднення.

### **Молекулярно-променева епітаксія.**

Молекулярно-променева епітаксія – епітаксіальний ріст в умовах надвисокого вакууму. Цей метод дозволяє вирощувати гетероструктури заданої товщини з моноатомно гладкими гетеромежами та із заданим профілем легування.

Існують два основних технологічних методи епітаксії, що дозволяють формувати багат шарові структури з надтонкими шарами. Це молекулярно-променева і газофазна епітаксії, в тому числі з використанням металоорганічних сполук і гідридів [4].

Молекулярно-променева епітаксії проводиться у вакуумі і оснований на взаємодії декількох молекулярних пучків з нагрітою монокристалічною підкладкою.

Основними перевагами методу є: низька температура процесу і висока точність управління рівнем легування.

Зниження температури процесу зменшує дифузію домішки з підкладки і автолегування. Це дозволяє отримувати якісні тонкі шари. Легування при використанні даного методу є безінерційним (на відміну від епітаксії з газової фази), що дозволяє отримувати складні профілі легування.

Молекулярно-променева епітаксія полягає в осадженні випарів елементарних компонентів на підігріту монокристалічну підкладку.

Цей процес показано на рисунку 1.4, на якому наведені основні елементи для одержання сполуки (GaAs).

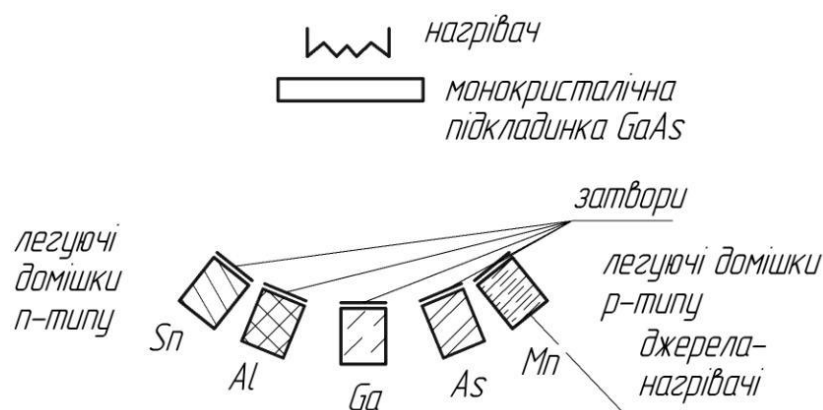


Рисунок 1.4 – Схема установки молекулярно-променевої епітаксії

Кожен нагрівач містить тигель, що є джерелом одного із складових елементів півки. Температура нагрівачів підбирається таким чином, щоб тиск пари випаровуваних матеріалів був достатнім для формування відповідних молекулярних пучків.

Випаровувана речовина з відносно високою швидкістю переноситься на підкладку в умовах вакууму. Нагрівачі розташовуються так, щоб максимуми розподілів інтенсивності пучків перетиналися на підкладці [4].

Підбором температури нагрівачів і підкладки отримують півки зі складним хімічним складом.

Додаткове управління процесом нарощування здійснюється за допомогою заслінок, розташованих між нагрівачем і підкладкою. Використання цих заслінок дозволяє різко переривати або відновлювати попадання будь-якого з молекулярних пучків на підкладку.

Для процесу епітаксії потрібні спеціальні добре очищені підкладки з атомарногладкою поверхнею.

У основі методу лежить осадження випаровуваної в молекулярному джерелі речовини на кристалічну підкладку.

Джерело, в якому формуються молекулярні і атомні пучки, є камерою, сполученою з високовакуумним об'ємом за допомогою отвору в тонкій стінці або вузького капіляра в товстій стінці.

Молекули або атоми вводяться в камеру джерела у вигляді газу або пари при тиску порядку сотих Паскаля.

Для збільшення інтенсивності пучків застосовують джерела з декількома отворами або капілярами, відстань між якими має бути дещо більше їх діаметра.

Зіткнення з частками залишкового газу руйнують молекулярні і атомні пучки, тим швидше, чим гірше вакуум [4].

Довжина молекулярних і атомних пучків в ідеальному вакуумі була б надзвичайно велика, оскільки можливі були б тільки зіткнення "наздоганяння".

Незважаючи на досить просту ідею, реалізація цієї технології вимагає надзвичайно складних технічних рішень.

Основні вимоги до установки епітаксії наступні:

- у робочій камері установки необхідно підтримувати надвисокий вакуум (близько  $10^{-8}$  Па);
- чистота випаровуваних матеріалів повинна досягати 99,999999 %;
- наявність молекулярного джерела, здатного випаровувати тугоплавкі речовини (такі як метали) з можливістю регулювання щільності потоку речовини.

Особливістю епітаксії є невисока швидкість зростання плівки (зазвичай менше 1 мкм за хвилину).

### **1.1.2 Хімічні методи та засоби отримання покриттів [4].**

Широкого поширення в приладобудуванні набули хімічні методи отримання покриття різноманітних за природою матеріалів: як металевих, так і неметалевих та їх сполук, а також органічних сполук тощо.

Процес хімічного нанесення покриттів поділяється на каталітичний або автокаталітичний, де каталізатором виступає або поверхня виробу, або спеціальне середовище (рідке, газоподібне).

Розчин з якого відбувається хімічне осадження містить відновник і сполуку з матеріалу, що наноситься. Оскільки каталізатором, як правило, є поверхня виробу, то осадження покриття відбувається на поверхні, а не в об'ємі розчину. Як відновники при хімічному нанесенні покриттів використовують гіпофосфіт і боргідрид натрію, формальдегід, гідразин [4].

Широкого поширення також набули методи електрохімічного осадження покриттів (електрохімічні або гальванічні методи).

Проте, окрім явних переваг, до яких, в першу чергу, відносяться швидкість та адгезійна міцність нанесення покриття, метод електрохімічного осадження має ряд істотних недоліків, які обмежують його застосування, а саме: нерівномірність розподілу покриття на деталях складного профілю, труднощі при нанесенні покриття на вузли, елементи яких виготовлені з різних металів і неметалів.

Хімічні методи нанесення покриттів позбавлені вищевказаних недоліків і є найбільш поширеними методами формування покриттів.

#### **Хімічні вакуумні методи.**

Метод хімічного осадження тонких плівок у вакуумі здійснюється шляхом натікання в робочу камеру суміші газів, що містить компоненти одержуваної плівки [4].

Головними перевагами методу хімічного осадження є широкий діапазон швидкостей осадження і можливість отримання заданої кристалічної структури плівки (аж до монокристалів).

До основних недоліків методу відноситься використання токсичних, екологічно небезпечних газових сумішей.

Розглянемо основні способи реалізації цього методу.

### ***Реактивне катодне розпилення.***

На відміну від фізичного розпилення реактивне катодне розпилення відбувається в тліючому розряді суміші інертного і активного газів.

Частинки розпорошеного катоду хімічно взаємодіють з активним газом або утворюють з ним тверді сполуки, і нова речовина потрапляє в основу.

Щоб процес утворення речовини плівки, яка наноситься, не проходив на катоді (що дуже ускладнює утворення розряду) застосовують суміші аргону з вмістом активних газів не більше 10%.

Для отримання плівок оксидів розпилення проводять в плазмі аргон-кисень, нітридів – в плазмі аргон-азот, карбідів в плазмі аргон-чадний газ або аргон-метан [4].

При введенні в камеру різних активних газів, отримують плівки різних сполук, які практично неможливо отримати термовакuumним напилюванням.

Реактивне катодне розпилення дозволяє не тільки отримати різні за складом плівки, а й керувати їх властивостями, наприклад, питомим опором резистивних плівок. Реактивне розпорошення широко використовується для формування високоомних резисторів.

Головними технічними труднощами при реактивному катодному розпиленні є точне дозування активного газу, який подається у вакуумну камеру.

### ***Газофазна МОС-гідридна епітаксія з використанням металоорганічних сполук.***

Хімічне осадження з газової фази з використанням металоорганічних сполук або МОС-гідридна епітаксія (Metalorganic chemical vapour deposition МОСVD) – метод отримання матеріалів, в тому числі епітаксіального росту напівпровідників, шляхом термічного розкладання (піролізу) металоорганічних сполук, які містять необхідні хімічні елементи.



В основі МОС-технологій лежать реакції піролізу летких металоорганічних сполук, наприклад, триметілгалію (ТМГ) та триметіларсену (ТМА) або триетілгалію (ТЕГ) і триетілфосфіну (ТЕФ), з наступною хімічною реакцією між компонентами, що утворюються на нагрітій основі.

Цей метод не вимагає вартісного устаткування, має високу продуктивність. Перевагами методу є також незворотність хімічних реакцій, що лежать в його основі, і відсутність у парогазовій суміші хімічно активних зі зростаючим шаром компонент [4].

Це дозволяє проводити процес епітаксії при порівняно низьких температурах росту і здійснювати прецизійну подачу вихідних речовин, що дозволяє забезпечити контрольоване легування шарів і отримання структур в широкому діапазоні складів твердих розчинів з різкими концентраційними переходами.

До недоліків МОС-гідридного методу можна віднести високу токсичність використовуваних вихідних сполук, в першу чергу арсин, а також складність хімічних процесів, що призводять до утворення шару GaAs, який ускладнює моделювання умов утворення епітаксійних шарів з необхідними властивостями.

Особливість методу полягає в тому, що в епітаксціальних реакторі створюється високотемпературна зона, в яку надходить газова суміш, що містить сполуки, що розкладаються.

У цій зоні протікає реакція і відбувається виділення і осадження речовини на підкладинці, а газоподібні продукти реакції видаляються потоком газу-носія.

Для отримання сполук  $A_{III}B_V$  як носії елементів III групи використовують металоорганічні сполуки (наприклад, триметилгалій (ТМГ) для синтезу GaAs і триметиліндій (ТМІ) для InP або InGaP), а як джерело елементів V групи служать газу арсин і фосфін [4].

### *Рідкофазна епітаксія.*

Рідкофазна епітаксія полягає в нарощуванні монокристалічного шару з розплаву металу, насиченого напівпровідниковим матеріалом, який рекристалізується на поверхні підкладки.

Розчинником може слугувати легкоплавкий компонент сполуки, що нарощується. Це знижує температуру кристалізації, підвищує чистоту нарощуваного шару та зменшує концентрацію вакансій [4].

Для отримання епітаксійних шарів сполук  $A_{III}B_V$  використовують тільки монокристалічні підкладки.

Суть методу рідкофазної епітаксії полягає в кристалізації розчину з розплаву та розрізняється залежно від способу видалення розчину з поверхні плівки: зливом розчину з поверхні плівки (а) та примусовим видаленням розчину (б) (рисунок 1.5).

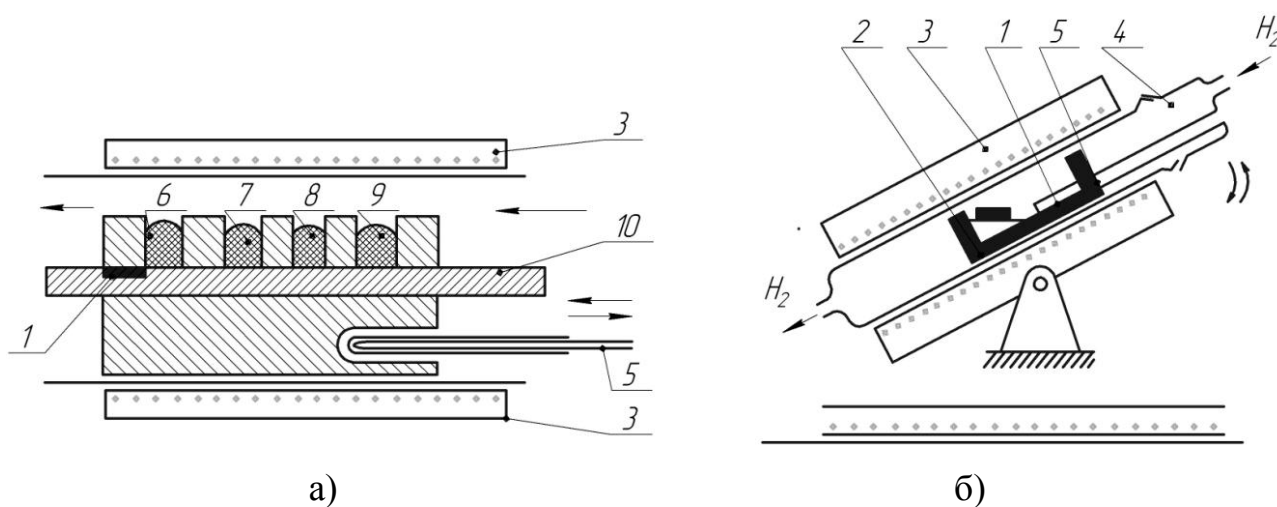


Рисунок 1.5 – Схема пристроїв для рідкофазної епітаксії зі зливом розчину з поверхні плівки (а) та примусовим видаленням розчину (б):

1 – підкладка; 2 – контейнер; 3 – піч опору; 4 – кварцова ампула; 5 – термопара; 6-9 розчини; 10 – повзунок касети.

Рідкофазну епітаксію можна проводити при відносно невисоких температурах (400...500°C). За допомогою маски  $SiO_2$  вона дає змогу отримати багат шарові епітаксійні структури і плівки певної конфігурації.

## **Хімічні безвакуумні методи.**

### ***Електрохімічне осадження покриттів.***

Метод електрохімічного одержання плівок відрізняється від попередніх тим, що робочою середовищем є рідина. Проте характер процесів подібний до йонно-плазмового напилюванням, оскільки і плазма, і електроліт представляють собою квазінейтральну суміш йонів і неіонізованих молекул або атомів. А головне, осадження відбувається поступово (пошарово) як і напилювання, тобто забезпечує можливість отримання тонких плівок.

В основі електрохімічного осадження лежить явище електролізу розчину, що містить йони необхідних домішок [4].

Наприклад, якщо потрібно осадити мідь, використовується розчин мідного купоросу, а якщо золото або нікель – розчини відповідних солей.

Йони металів утворюють у розчині позитивний заряд. Тому, щоб осадити металеву плівку, підкладинку слід використовувати як катод.

Якщо підкладинка є діелектриком або має низьку провідність, на неї попередньо наносять тонкий металевий підшар, що й служить катодом. Підшар можна нанести методом термічного або йонно-плазмового напилювання.

Перевага електрохімічного осадження перед напилюванням полягає в набагато більшій швидкості процесу, яка легко регулюється зміною струму.

Тому основна сфера застосування електролізу в мікроелектроніці – це отримання порівняно товстих плівок (10...20 мкм і більше).

Якість (структура) таких плівок гірша, ніж при напилюванні, але для ряду застосувань ці плівки є цілком прийнятними [4].

Один зі способів хімічного йонно-плазмового напилювання називають анодуванням. Цей процес полягає в окисленні поверхні металевої плівки (що знаходиться під позитивним потенціалом) негативними йонами кисню, що надходять із плазми газового розряду. Для цього до інертного газу (як і при чисто хімічному напилюванні) слід додати кисень.

Хімічне нанесення і анодування відбуваються разом, тому що в газорозрядній плазмі (якщо вона містить кисень) співіснують нейтральні атоми і йони кисню.

Для того щоб анодування превалювало над суто хімічним напилюванням, підкладинку розташовують металеву плівкою у бік, протилежний катоду, з тим, щоб на неї не потрапляли нейтральні атоми. При наростанні окисного шару струм в анодному ланцюзі падає, тому що оксид є діелектриком. Для підтримки струму потрібно підвищувати напругу живлення [4].

Оскільки частина цієї напруги падає на плівці, процес анодування протікає в умовах великої напруженості поля в окисній плівці. У результаті вона має підвищену електричну міцність.

До числа інших переваг анодування відносяться велика швидкість окислення і можливість керування процесом шляхом зміни струму в ланцюзі розряду. Якість оксидних плівок, одержуваних даним методом, вища, ніж при використанні інших методів.

Електрохімічні металеві покриття за механізмом захисту підрозділяються на катодні і анодні.

### ***Хімічна рідинна металізація.***

Хімічна металізація оснований на хімічній «реакції срібного дзеркала» і полягає в нанесенні на поверхні пластмас, пластику, алюмінію, кераміки дзеркальних металевих покриттів, які мають високу відзеркалюючу здатність.

Дзеркальні металізовані поверхні, що утворюються в результаті хімічної металізації, відрізняються цілим рядом істотних переваг [4].

По-перше, хімічна металізація практична з економічної точки зору, не є технічно складною і оптимально вписується в технологічні процеси.

По-друге, хімічна металізація універсальна.

По-третє, металізовані поверхні, одержувані за методом хімічної металізації відрізняються механічними властивостями, зокрема високою зносостійкістю і твердістю.

По-четверте, хімічна металізація зручна тим, що розміри деталей практично не обмежені.

По-п'яте, хімічна металізація нешкідлива в екологічному відношенні, вона практично не впливає на здоров'я людей та на навколишнє середовище.

При використанні методу хімічної металізації технологічний процес здійснюється в три основних етапи.

Спочатку на поверхню деталі наноситься шар спеціального ґрунту, активного по відношенню до подальшого металевого шару.

Потім за допомогою установки, призначеної для хімічної металізації пластмас, на вкриту ґрунтом поверхню напилують спеціально підготовлені хімреагенти, які в результаті хімічної реакції утворюють на поверхні деталі дзеркальне металеве покриття.

Нарешті, на отримане дзеркальне покриття наноситься шар захисного лаку, що оберігає металізовану поверхню від тьмяніння і механічного зносу. Після затвердіння і висихання захисного лаку металізоване покриття виглядає точно так, як покриття нанесене методом електролітичного осадження [4].

Додаючи в захисний лак фарбувальні пігментні тонери, можна надати покриттю зовнішній вигляд хрому, алюмінію, золота, міді, бронзи, інших металів і сплавів.

Процес хімічної металізації є каталітичним або автокаталітичним, а каталізатором є поверхня виробу. Використаний розчин містить сполуку відновника і металу, що наноситься.

Оскільки каталізатором є поверхня виробу, виділення металу відбувається на поверхні, а не в об'ємі розчину.

Існують методи хімічного покриття металевих виробів нікелем, кобальтом, залізом, паладієм, платиною, міддю, золотом, сріблом, родієм, рутенієм і деякими сплавами на основі цих металів.

Як відновники використовують гіпофосфіт і боргідрид натрію, формальдегід, гідразин.

Металеві покриття ділять на дві групи: корозійностійкі; протекторні.

До першої групи входять покриття для сплавів на основі заліза: нікель, срібло, мідь, свинець, хром.

Вони більш електропозитивні по відношенню до заліза, тобто в електрохімічному ряді напруг металів стоять правіше заліза.

У другу групу входять цинк, кадмій, алюміній. Вони більш електронегативні по відношенню до заліза.

Металеві покриття захищають залізо від корозії при збереженні суцільності. При порушенні суцільності покриття виробу корозія протікає навіть більш інтенсивно, ніж без покриття [4].

Це пояснюється роботою гальванічного елемента залізо-метал. Тріщини і подряпини заповнюються вологою, в результаті чого утворюються розчини, йонні процеси в яких полегшують перебіг електрохімічного процесу (корозії).

Електрохімічний спосіб має ряд істотних недоліків, які обмежують його застосування. До них відносяться нерівномірність розподілу покриття на деталях складного профілю, труднощі при нанесенні покриття на вузли, елементи яких виготовлені з різних металів і неметалів.

### ***Хімічне осадження з газової фази.***

Завдяки високій рухливості та інтенсивності процесів масоперенесення, властивих газоподібним середовищам, метод CVD покриттів має виняткову здатність.

Можливість забезпечувати високі масові потоки металомістких з'єднань в газоподібному стані до поверхні, що покривається, дозволяє реалізувати високу продуктивність процесів нанесення покриття, в яких швидкість зростання може досягати від декількох сотень мікрон в годину до декількох міліметрів в годину [4].

Висока поверхнева рухливість адсорбованих металевих з'єднань дозволяє в CVD процесах отримувати покриття з щільністю, близькою до теоретичної, при температурах  $\sim 0,15 \dots 0,3$  від температури плавлення матеріалу, що неможливе

для інших методів нанесення покриттів, а також формувати досконалі епітаксiальні покриття.

Потужним інструментом є метод CVD з плазмовою підтримкою (PECVD).

Схеми методів CVD і PECVD показані на рисунку 1.6.

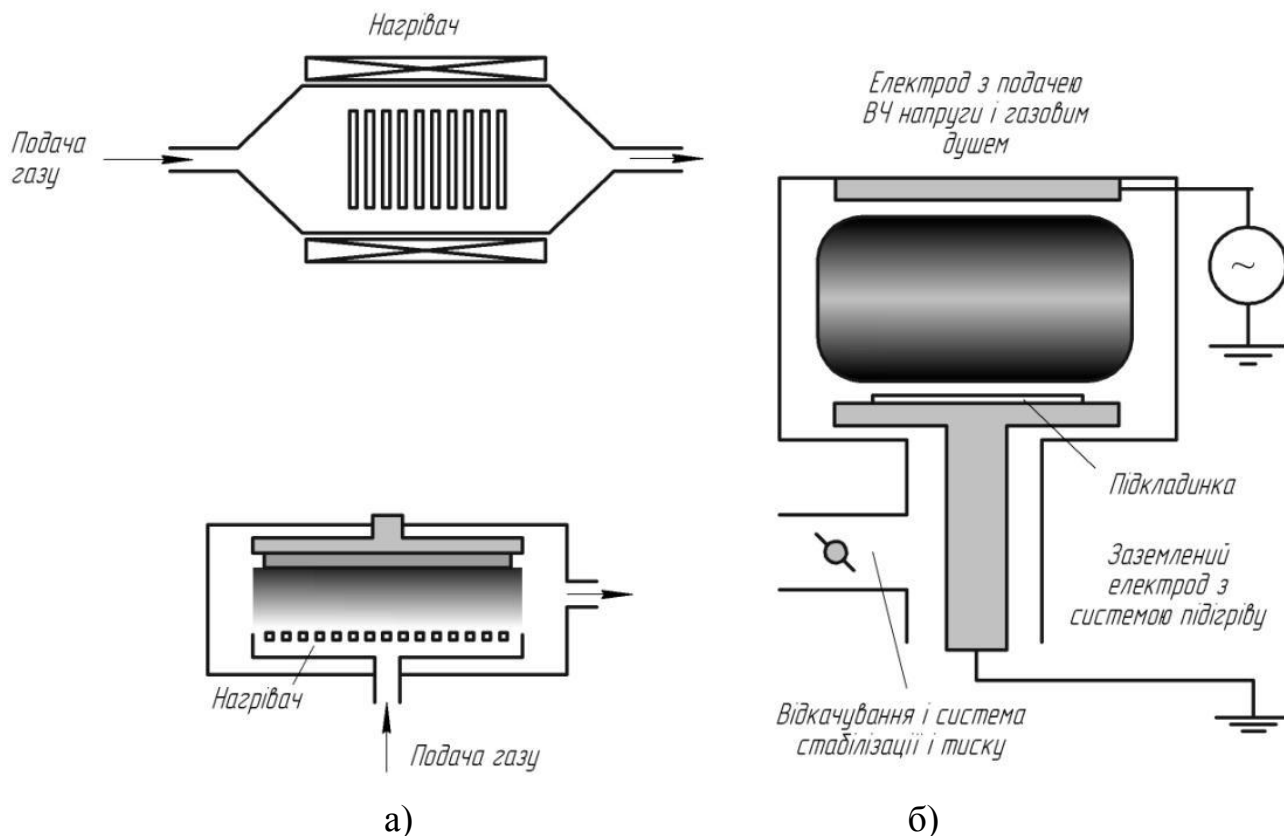


Рисунок 1.6 – Схеми методів CVD:

а – термічний CVD з підігрівом стінок (вгорі) та підсилений плазмою (внизу) і PECVD (б).

Застосування різних прийомів збудження плазми в реакційному об'ємі і управління її параметрами дозволяє інтенсифікувати процеси росту покриттів, зрушувати їх в ділянку нижчих температур, робить більш керованими процеси формування заданого мікрорельєфу і структури покриття, домішкового складу та інших характеристик покриття.

Таким чином, серед відомих методів нанесення покриттів високої якості методи CVD і PECVD знаходяться поза конкуренцією у більшості випадків, коли необхідно:

- наносити рівномірні по товщині, високощільні покриття на вироби складної форми з розвиненою поверхнею, у тому числі, на внутрішні поверхні, протяжні і глухі порожнини, отвори;
- отримувати покриття з тугоплавких, важкооброблюваних металів, сплавів і з'єднань зі щільністю близької до теоретичної та високої чистоти, формувати з них вироби різної геометрії;
- наносити покриття на порошки та інші сипкі матеріали, просочувати (ущільнювати) пористі структури.

### **1.1.3 Дифузійні методи отримання покриттів [5].**

Поверхнєве насичення сталі алюмінієм, титаном, хромом, цинком і іншими елементами називають дифузійним насиченням металами. Виріб, поверхня якого збагачена цими елементами, набуває цінних властивостей, до яких належать висока жаростійкість, корозійна стійкість, підвищена зносостійкість і твердість [5].

Залежно від методу перенесення дифузійного елемента на поверхню, що насичується, розрізняють наступні основні способи дифузійного насичення металами:

- 1) занурення в розплавлений метал, якщо дифундуєчий елемент має низьку температуру плавлення (наприклад алюміній, цинк);
- 2) насичення з розплавлених солей, що містять дифундуєчий елемент (з електролізом і без електролізу);
- 3) насичення з сублімованої фази шляхом випаровування дифундуєчого елемента;
- 4) насичення з газової фази (контактним і неконтактним методом), що складається з галогенних з'єднань дифундуєчого елемента.

Дифузійні покриття при ХТО наносять зазвичай в ізотермічних умовах в штучно створених активних середовищах. Оптимальні температурно-часові



умови насичення вибираються таким чином щоб забезпечити максимальну ефективність дифузії легуючих елементів чи атомів впровадження і отримати покриття значної товщини за відносно короткий проміжок часу. Мінімальна температура, що забезпечує можливість протікання дифузійного процесу зазвичай встановлюється експериментально [5].

Значна частина методів дифузійного насичення має ряд недоліків таких як, висока енергоємність та тривалість процесу, погіршення чистоти поверхні виробу або вибухонебезпечність та загрязнення атмосфери продуктами реакцій.

Циркуляційний метод насичення дозволяє усунути ряд недоліків, в його основі лежить явище переносу дифундуючого елемента в замкнутому реакційному просторі при систематичному відновленні газу-переносчику в результаті зворотніх хімічних реакцій. Даний метод добре описаний в роботі де застосовувався авторами для отримання корозійностійких титановмісних покриттів на вуглецевих конструкційних сталях.

В працях розглянуто метод осадження карбідів з газової фази, який супроводжується протіканням складних фізико-хімічних процесів. Нанесення карбідів цим методом ґрунтується на контактному осадженні дифундуючих елементів або хімічних з'єднань з газової фази в результаті протікання гетерогенних хімічних реакцій на поверхні оброблююмого матеріалу.

Останнім часом насичення металами (наприклад хромом) проводять шляхом випаровування дифундуючого елемента у вакуумі [5].

**Хромування** — насичення поверхні виробів хромом. Цей процес забезпечує підвищену стійкість сталі до газової корозії (жаростійкість) при температурі до 800°C, високу корозійну стійкість в таких середовищах, як вода, морська вода і азотна кислота.

Окрім широко розповсюдженого процесу гальванічного хромування, що надає деталям антикорозійні властивості і естетичний вид, в промисловості для підвищення механічних властивостей використовують дифузійне хромування.

Дифузійне хромування сталей, що містять понад 0,3—0,4 % С, окрім корозійної стійкості значно підвищує твердість і зносостійкість насиченого шару.

Дифузійний шар, що виникає при хромуванні технічного заліза, складається з твердого розчину хрому в  $\alpha$ -залізі. На поверхні високо вуглецевих сталей та твердих сплавів формуються покриття на основі карбідів хрому [5].

Окрім вуглецю на параметри хромованого шару впливають легуючі елементи сталі. Всі карбідоутворюючі елементи — вольфрам, молібден, титан, ванадій і так далі — збільшують глибину хромованого шару. Елементи, що розширюють аустенітну область, — нікель, кобальт — зменшують глибину хромування. Це пов'язано з особливостями дифузії хрому в  $\alpha$ -Fe і  $\gamma$ -Fe. З одного боку, швидкість дифузії атомів хрому в  $\alpha$ -залізі значно вище ніж в  $\gamma$ -залізі, з іншого — при легуванні вольфрамом, молібденом і іншими карбідоутворюючими елементами вміст хрому в сталі в початковому стані (до хіміко-термічної обробки) перевершує його концентрацію в сталях вуглецевих або легованих (наприклад тільки нікелем).

Процес хромування окрім поширеного гальванічного методу та методу насичення в порошок також реалізується шляхом насичення при температурі 1000 - 1100°C в закритому реакційному просторі за умов зниженого тиску протягом 2 – 4 годин. При цьому на високо вуглецевих сталях та твердих сплавах формуються карбідні шари. Безпосередньо до основи примикає шар карбіду хрому  $Cr_7C_3$  над яким розташований  $Cr_{23}C_6$ . Товщина покриття коливається від 3-5 мкм на твердих сплавах і до 10-14 мкм на вуглецевих сталях [5].

Через те, що більшість карбідів мають розчинність один в одному у твердому стані, доцільно в дифузійному шарі на поверхні сталі одержувати складні карбідні фази, що представляють собою розчини карбідів двох і більше перехідних металів.

## **1.2 Огляд публікацій за темою досліджень.**

### **Дифузійне хромування безвольфрамового твердого сплаву KХН15 [6].**

Якість та надійність сучасного ріжучого інструменту залишається актуальною проблемою на виробництві. В останні роки, для вирішення цих задач все більше починають використовувати ріжучий інструмент з покриттями. Як показує світовий досвід використання ріжучого інструменту з захисними покриттями суттєво збільшує працездатність та надійність операцій які пов'язані з різанням металу. На даний момент, постійно зменшується відсоток чорнових операцій. Це пов'язано із застосуванням нових методів отримання заготовок, зменшенням припусків на механічну обробку, тощо.

Відповідно збільшується доля навіпчистових, чистових та фінішних операцій. Саме на цих операціях ріжучий інструмент з покриттям показує свою максимальну ефективність. Це пояснюється тим, що при чорнових операціях інструмент частіше за все руйнується ніж втрачає свої ріжучі властивості за рахунок зношування.

Одночасно з тенденцією використання ріжучого інструменту з покриттями, все більше починають застосовувати матеріали з меншою собівартістю. Наприклад у групі твердосплавних інструментів використовують сплави які не містять в собі значних за ціною карбід вольфраму та кобальт.

Такі сплави називають безвольфрамовими. Вже розроблено багато різних композицій твердосплавних ріжучих інструментальних матеріалів які базуються на карбідах та карбонітридах титану, карбідах хрому та ін...

### **Дифузійне хромування сталей та твердих сплавів [7].**

Одним з перспективних методів підвищення властивостей сталей та твердих сплавів є модифікування їх поверхневих шарів нанесенням зносостійких композиційних покриттів на основі карбідів та нітридів перехідних металів IV-VI груп періодичної системи елементів.

Принцип сполучення високої твердості, зносостійкості, корозійної- та жаростійкості найбільш повно реалізується на сталях та твердих сплавах з покриттями, і відображено в багатьох роботах сучасних вчених.

Хромування - насичення поверхні виробів хромом. Цей процес забезпечує підвищену стійкість сталі до газової корозії (жаростійкість) при температурі до 800°C, високу корозійну стійкість в таких середовищах, як вода, морська вода і азотна кислота.

Окрім широко розповсюдженого процесу гальванічного хромування, що надає деталям антикорозійні властивості і естетичний вид, в промисловості для підвищення механічних властивостей використовують дифузійне хромування.

Дифузійне хромування сталей, що містять понад 0,3—0,4 % С, разом з корозійною стійкістю значно підвищує твердість і зносостійкість насиченого шару.

Дифузійний шар, що виникає при хромуванні технічного заліза, складається з твердого розчину хрому в  $\alpha$ -залізі. На поверхні високо вуглецевих сталей та твердих сплавів формуються покриття на основі карбідів хрому.

Окрім вуглецю на параметри хромованого шару впливають легуючі елементи сталі. Всі карбідоутворюючі елементи - вольфрам, молібден, титан, ванадій та інші - збільшують глибину хромованого шару. Елементи, що розширюють аустенітну область – нікель та кобальт - зменшують глибину хромування.

Процес дифузійного хромування окрім методу насичення в порошок також реалізується шляхом насичення при температурі 1000 - 1100°C в закритому реакційному просторі за умов зниженого тиску протягом 2 – 4 годин. При цьому на високо вуглецевих сталях та твердих сплавах формуються карбідні шари. Безпосередньо до основи примикає шар карбиду хрому  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  над яким розташований  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Товщина покриття коливається від 3-5 мкм на твердих сплавах і до 10-14 мкм на вуглецевих сталях.

## **Вплив умов гальванічного хромування на якість утвореного покриття [8].**

Електролітичне хромування широко застосовується завдяки наступним властивостям утвореного покриття: висока хімічна, термічна та зносостійкість, твердість, міцність, привабливий зовнішній вигляд. Їх одержують за різних умов гальванічної обробки деталей.

Захисно-декоративні хромові покриття наносять з сульфатних електролітів при густині струму 15-20 А/дм<sup>2</sup> і температурі 50°C, тоді як покриття з підвищеною зносостійкістю утворюються при густині струму 30-50 А/дм<sup>2</sup> та температурі 60°C. Відомо, що в процесі нанесення блискучих хромових покриттів на їх поверхні формуються пори і тріщини, які суттєво знижують захисні властивості. Тому для забезпечення корозійної стійкості сталевих виробів їх попередньо вкривають міддю і нікелем. Основним компонентом класичного електроліту хромування є хромовий ангідрид CrO<sub>3</sub> (150-400 г/л ) та сульфатна кислота. Відомо, що максимальний вихід електроосадження за струмом спостерігається при ваговому співвідношенні CrO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> близькому до 100. В процесі електролізу відбувається збільшення напруги на електролізері через накопичення іонів Cr<sub>3+</sub>, що обумовлює зниження якості блискучого покриття. Для збереження концентрації Cr<sub>3+</sub> у технологічних межах необхідно, щоб швидкості окиснення йонів хрому на аноді та відновлення його до Cr<sub>3+</sub> на катоді були приблизно однаковими. Це можна забезпечити, якщо відношення між площами катодної та анодної поверхонь знаходиться в межах від 2:1 до 3:2.

Високий ступінь дисперсності блискучого хромового покриття полегшує часткове проникнення водню в кристалічну ґратку, що призводить до збільшення її параметрів. Найбільш розвинена сітка пор і каналів утворюється при катодній густині струму 40-60 А/дм<sup>2</sup> і температурі 60°C. Проте наявність таких дефектів на поверхні хромованих виробів дозволяє, зокрема, утримувати мастильні. Отже, різні умови нанесення дають можливість отримати хромові покриття різного призначення.

## **Особливості електролітичного хромування та їх відображення в технологічному процесі [9].**

Розглянуто вісім головних особливостей електролітичного хромування, які кардинально відрізняють його від інших гальванічних процесів.

Досліджено шляхи технологічного вирішення проблем, що виникають у зв'язку з цими особливостями.

Показано, що електролітичне хромування займає особливе місце серед інших процесів електролітичного нанесення металів, бо електроліт хромування агресивно впливає на деталі обладнання; процес має надзвичайно низький вихід за струмом, потребує високих катодних густин струму; електроліт має низьку розсіювальну здатність; в залежності від умов електролізу утворюються хромові покриття з різними властивостями; деталі потребують попередньої підготовки перед осадженням хрому в самій ванні хромування; технологія потребує застосування нерозчинних свинцевих анодів; головний недолік промислового хромування – висока токсичність основного компоненту електроліту – хромового ангідриду  $\text{CrO}_3$ .

Технологія електролітичного нанесення хрому на деталі потребує врахування особливостей електроосадження хрому та застосування певних режимів електролізу і допоміжних речовин та приладдя для продуктивної та безпечної роботи.

## **Визначення взаємозв'язку температури електроліту та вагомих чинників процесу хромування під час відновлення деталей машин [10].**

Досліджено актуальне питання взаємовпливу температури електроліту з показниками продуктивності процесу та експлуатаційними властивостями деталей, відновлених хромуванням. Встановлено, що на продуктивність процесу та експлуатаційні властивості відновлених деталей значною мірою впливають такі чинники, як густина струму, температура електроліту та тривалість процесу електролізу. Для визначення взаємозв'язку температури електроліту з

коефіцієнтом виходу за струмом, мікротвердістю та зносостійкістю осаджень хрому за різної тривалості процесу застосовано системний підхід, домінантною передумовою якого є прагнення з максимальною повнотою врахувати початкові та вихідні характеристики об'єкта дослідження. На підставі використання методу планування експерименту отримано регресійні рівняння, які дають змогу оцінити взаємозв'язок температури електроліту з густиною струму, мікротвердістю та зносостійкістю хромованих деталей. За результатами аналізу цих рівнянь й оцінки числових значень та знаків при коефіцієнтах з'ясовано, що для різної тривалості електролітичного процесу сила й характер впливу чинників є неоднаковими. За отриманими регресійними рівняннями можна визначити температуру електроліту для отримання хромового покриття деталей із заданими експлуатаційними властивостями, що дасть змогу вдосконалювати технологічні процеси відновлення деталей машин.

### **1.3 Патентний огляд за темою досліджень**

#### **Спосіб вакуумного дифузійного хромування сталевих деталей [11].**

Винахід належить до області хіміко-термічної обробки металів. Спосіб включає насичення хромом як з парової, так і твердої фаз при температурі 1120-1140°C в вакуумі з залишковим тиском 0,133...0,013 Па. Застосований хром у вигляді дисперсного особливо чистого порошку попередньо спікається в спеціальній прес-формі по режиму хромування протягом 1 год. для одержання "хромового електроду" з формою поверхні, близькою до поверхні виробу, що хромується, з можливістю багаторазового використання для хромування.

#### **Порошкова суміш для дифузійного хромування [12].**

Корисна модель належить до хіміко-термічної обробки сталей і сплавів і може бути використана в термічних цехах металообробних підприємств для хромування виробів у герметичних контейнерах контактним способом.

В основу корисної моделі поставлена задача вдосконалити порошкову суміш для хромування шляхом зміни її гранулометричного складу для зниження схильності суміші до спікливості при збереженні високої хімічної активності.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що в порошковій суміші для дифузійного хромування, що містить хром (ферохром) і інертну добавку, взяті в співвідношенні 1:1, згідно з корисною моделлю, хром (ферохром) представлений частками двох фракцій: малої з розмірами менш 1 мм і великої з розмірами 3-6 мм. Основну частку хрому (ферохрому) становлять дрібні частки з розміром менше 1 мм. Внаслідок розвинутої поверхні вони є основними постачальниками пари хрому в робочий простір контейнера.

Великі частки хрому (ферохрому) з розміром більше 3 мм вводяться в суміш для запобігання спікливості часток між собою і їх приварювання до поверхні виробу. Зі збільшенням розміру зростає протяжність поля напруг, яке створюється навколо частки за рахунок різниці в коефіцієнтах термічного розширення частки й іншої суміші. Зміна розмірів великої частки внаслідок термічного розширення більше, ніж у маси дрібних часток однакового сумарного обсягу. При охолодженні після витримки, необхідної для дифузії, термічні напруги, що виникають, розпушують спечену суміш і запобігають агломерації часток порошку...

### **Спосіб дифузійного хромування деталей комплексним методом [13].**

Спосіб дифузійного хромування деталей комплексним методом відноситься до області машинобудування, а точніше до способів хіміко-термічної обробки, і призначений для поверхневого зміцнення деталей машин для підвищення їхніх експлуатаційних характеристик, та може бути використаний в машинобудівній, металургійній та приладобудівній промисловості. Спосіб складається із попереднього нанесення хімічного Co-W-P покриття та наступної хіміко-термічної обробки - дифузійного хромування. Після зміцнення формується композитний зміцнений шар товщиною 180 мкм та усередненою мікротвердістю 13 ГПа, що дає можливість підвищити зносостійкість та ресурс роботи.



### **Спосіб дифузійного хромування сталевих виробів комплексним методом [14].**

Спосіб дифузійного хромування сталевих виробів комплексним методом відноситься до області машинобудування, а точніше до способів хіміко-термічної обробки, і призначений для поверхневого зміцнення деталей машин для підвищення їхніх експлуатаційних характеристик, та може бути використаний в машинобудівній, металургійній та приладобудівній промисловості. Спосіб складається із попереднього нанесення хімічного Co-P покриття та наступної хіміко-термічної обробки дифузійного хромування. Після зміцнення формується композитний зміцнений шар товщиною 130 мкм та інтегральною мікротвердістю 12 ГПа, що дає можливість підвищити зносостійкість та ресурс роботи.

### **Спосіб дифузійного хромування сталевих виробів [15].**

Винахід належить до металургії та машинобудування і стосується способів хіміко-термічної обробки деталей для їх поверхневого зміцнення. Спосіб складається із попереднього нанесення хімічного Co-W-P покриття та наступної хіміко-термічної обробки - дифузійного хромування. Після зміцнення формується композитний зміцнений шар товщиною 200 мкм та усередненою мікротвердістю 13 ГПа, що дає значно підвищує зносостійкість та ресурс роботи деталей.

## Висновки

Аналіз літературних даних показує, що нанесення на поверхню деталей, які працюють в умовах тертя-зношування, дифузійних хромових покриттів дозволяє підвищити їх надійність та довговічність.

Для економії дефіцитних матеріалів визнана необхідність розробки нових технологій отримання поверхневих дифузійних шарів.

Виходячи з вище наведеного закономірна тенденція заміни об'ємного зміцнення деталей легуванням і різноманітними способами термообробки – отриманням поверхневих дифузійних шарів. Це дозволяє з меншими матеріальними затратами і при досить незначній ступені легування основного конструкційного матеріалу на практиці реалізувати високоміцний стан.

## РОЗДІЛ 2

### ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Мікроструктурний аналіз.

Властивості матеріалу визначаються не лише його складом, але і структурою (зокрема, – мікроструктурою). Під мікроструктурою розуміють зеренну будову матеріалу (розмір, форму, орієнтацію та взаємне розташування зерен). Найпоширенішим методом визначення параметрів мікроструктури матеріалів є металографічний аналіз, який полягає у дослідженні об'єктів за допомогою оптичного мікроскопа [16].

Зерна металів – це окремі кристали полікристалічного конгломерату з певною орієнтацією кристалічної ґратки, розділені між собою суміжними поверхнями, що називаються границями зерен.

Металографічний аналіз матеріалів застосовується для:

а) встановлення зв'язку між мікроструктурою та властивостями досліджуваного матеріалу через визначення кількості, розмірів зерен, їх форми та взаємного розташування і кількісного співвідношення наявних в матеріалі фаз, виявлення макро- та мікродефектів сплавів тощо (під фазою розуміють однорідну частину матеріалу, що має свої границі поділу, при переході через які відбувається стрибкоподібна зміна властивостей);

б) підтвердження отримання заданої мікроструктури, яка повинна забезпечувати необхідний рівень властивостей матеріалу (наприклад, через приблизне визначення вмісту вуглецю в сталі, встановлення наявності неметалевих включень, їх форми, розмірів, характеру розташування, визначення глибини шару, що виник на поверхні внаслідок хіміко-термічної обробки тощо);

в) встановлення передісторії матеріалу для визначення причин, що викликали формування тієї чи іншої мікроструктури (визначення характеру, типу та якості попередньої обробки: особливостей процесу лиття, термічної обробки, обробки тиском, хіміко-термічної обробки, зварювання тощо).

Металографічний аналіз виконується на спеціально підготовлених зразках – шліфах [16].

Оскільки мікроструктуру металу вивчають у відбитому світлі поверхня шліфа повинна задовольняти ряду вимог:

- 1) мати мінімальний деформований шар;
- 2) бути плоскою (без «завалів»), що забезпечує можливість досліджень при великих збільшеннях;
- 3) мати максимальну відбивну здатність, не містити подряпин і ямок;
- 4) різні ділянки поверхні повинні по-різному відбивати світло, що забезпечує можливість розрізнення елементів мікроструктури (досягається або завдяки неоднаковому відбиттю світла (поляризованого або неполяризованого, моно- або поліхроматичного) від плоскої поверхні, або внаслідок утворення рельєфу на поверхні шляхом протравлювання, або шляхом створення на поверхні плівок, товщина і, отже, забарвлення яких залежать від природи або орієнтації кристалітів, на яких вони виникли).

Шліф повинен мати мікроструктуру, характерну для всього досліджуваного виробу або його частини. Тому має значення, по-перше, вибір ділянки виробу, з якої вирізають зразок, і, по-друге, вибір розташування досліджуваної поверхні на зразку [16].

Загальні рекомендації при цьому наступні:

- мікроструктуру матеріалів після пластичної деформації досліджують у напрямку деформування. Оскільки ступінь деформації може бути відмінним на різних ділянках зразка, то для виготовлення шліфів вирізають декілька зразків вздовж та поперек напрямку деформування;

- мікроструктуру литих матеріалів також виявляють шляхом дослідження декількох шліфів, отриманих з різних ділянок (периферійних та серединних) поперечного перерізу зливка. Якщо литий виріб має різні розміри в різних місцях відливки (фасонне литво), то окремо досліджується мікроструктура у всіх відмінних перетинах – від найбільших до мінімальних;

- структуру сплавів, що піддаються термічній обробці, перевіряють в поверхневих, а також в глибинних шарах деталі;

- для виявлення мікроструктури матеріалів, отриманих методом порошкової металургії, слід використовувати декілька зразків з центральної та периферійної частини пресованого матеріалу;

- мікроаналіз широко застосовують для встановлення причин руйнування деталей при експлуатації. Зазвичай зразки вирізають поблизу місця руйнування і на віддалі від нього, для того, щоб мати можливість визначити наявність відхилень в будові матеріалу [16].

Площа поверхні шліфа зазвичай складає близько  $1 \text{ см}^2$ , висота зразка для зручності роботи з ним повинна бути не менше 10 мм. Для виготовлення шліфів на зразках менших розмірів (стрічка, дріт тощо) їх після вирізання розміщують в циліндричній обоймі, або заливають пластмасою (рисунок 2.1, а).

В деяких випадках для закріплення дрібних зразків застосовують металеві гвинтові затискачі – струбцини (рисунок 2.1, б).



Рисунок 2.1 – Засоби фіксації зразків малих розмірів при пробопідготовці до металографічних досліджень:

а – пластмасова форма, б – струбцини різних форм

Поверхня підготовленого шліфа повинна бути дзеркально гладкою, плоскою за всією його площею, не мати подряпин, ямок і забруднень.

Підготовка плоскої поверхні шліфа включає:

1) вирізання і вирівнювання поверхні;

- 2) шліфування;
- 3) полірування.

Вибір проби шліфа.

Процес підготовки мікрошліфа починається з вирізання з деталі, зливка зразка металу невеликих розмірів. Дуже важливим є місце вирізання зразка з деталі. Для цього потрібно чітко уявляти, що саме необхідно визначити за допомогою мікроаналізу. Найзручніші розміри 15×15×15 мм, або циліндрики діаметром 10-20 мм. З м'яких металів та сплавів зразки можна вирізати пилюкою, фрезою, різцем та ін. Якщо твердість металу значна, то зразок вирізається карборундовим або алмазним кругом. З крихких металів та сплавів (білий чавун) проба відбирається ударом молотка [17].

Попередня обробка.

Після вирізання зразка потрібну для дослідження поверхню необхідно вирівняти, зробити плоскою за допомогою наждачного круга та терпуга. Для грубого шліфування застосовують карборундові або електро-карборундові круги, які мають абразивні зерна різних розмірів та твердості (№ 46, 60, 80). Грубе шліфування являє собою механічний процес, при якому знімається стружка. При шліфуванні в поверхню зразка врізається велика кількість зладно розташованих гострих країв абразивних зерен, що супроводжується виділенням великої кількості тепла. Тому грубе шліфування повинне виконуватися при безперервному охолодженні [17].

Шліфування

Одержану плоску поверхню зразка шліфують наждачним папером різної зернистості. Аркуш наждачного паперу накладається на плоску тверду поверхню, якою може бути товсте скло, мармурова або металева плита. Шліфування зразка проводиться в одному напрямі, перпендикулярному до рисок від наждачного круга. Шліфування проводиться на наждачному папері з найбільшим абразивним зерном. Після того, як зникають (зітруться) риси від наждачного круга, переходять на шліфування на наждачному папері з дрібнішим зерном. При

переході на новий номер паперу зразок повертається на  $90^\circ$ , щоб шліфування відбувалося перпендикулярно до попереднього номеру паперу.

Для деяких металів та сплавів шліфувальний папір змочують водою, гасом або натирають парафіном. Щоб уникнути наклепу, поверхні зразків деяких сплавів, шліфування проводять на шкіряному обертальному крузі, на який нанесено абразивний порошок відповідних розмірів. Зразки при шліфуванні можуть утримуватися вручну або за допомогою спеціальних притискачів (струбцин).

Закінчивши шліфування на найдрібнішому папері, можна продовжити його із застосуванням алмазної пасті. Для цього на аркуш креслярського паперу слід нанести пасту з алмазним порошком різної зернистості і вести шліфування так само, як і на наждачному папері, але через те що розміри алмазних зерен менші, шліфування виходить більш тонке. Після шліфування на алмазній пасті поверхня зразка стає практично дзеркальною, риси на ній побачити неозброєним оком неможливо. Після шліфування на поверхні зразка залишаються абразивні частки, які необхідно стерти спиртом [17].

### Полірування

Після закінчення шліфування на шкурці з найдрібнішою зернистістю мікрошліф промити проточною водою (із крана) і полірувати на спеціальному полірувальному верстаті з кругом діаметром 200...250 мм, обтягнутим сукном або фетром. У процесі полірування круг періодично поливають суспензією оксидів алюмінію ( $Al_2O_3$ ) або хрому ( $Cr_2O_3$ ) у воді. Полірують до повного знищення рисок і отримання дзеркальної поверхні, тобто приблизно 3...5 хв. 4. Після полірування мікрошліф промити проточною водою і поліровану поверхню протерти ватою, змоченою спиртом, і просушити, прикладаючи фільтрувальний папір.

Крім механічного використовують електролітичне полірування, при якому у ванну з електролітом занурюють підготовлену поверхню мікрошліфа, який є анодом, а катод виготовлений із нержавіючої сталі [17].

### Травлення

Для виявлення структури поверхню мікрошліфа травлять в розчинах кислот, лугів, солей в залежності від хімічного складу сплаву. Так, наприклад, для сталей і чавунів застосовують травлення 2...5% розчином азотної кислоти в етиловому спирті протягом 2...5 секунд.

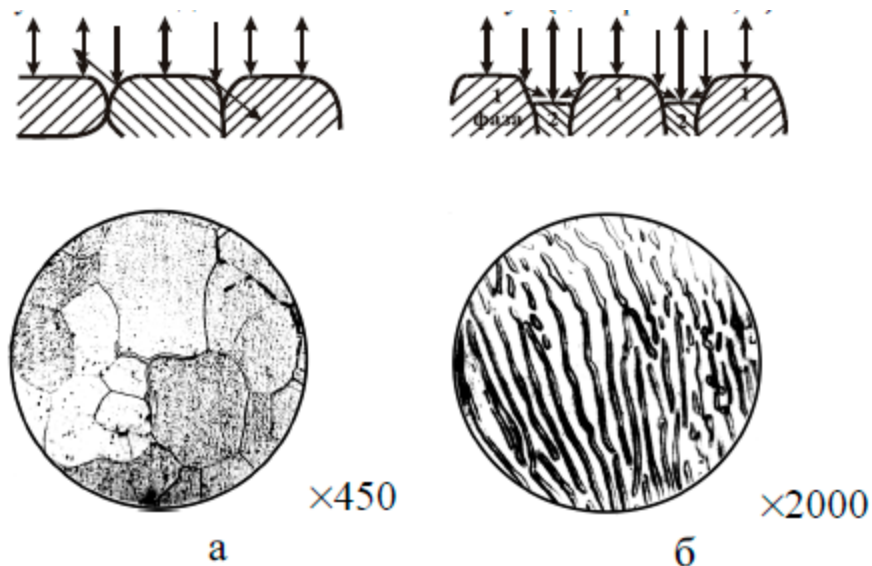


Рисунок 2.2 – Схема утворення контрасту при мікроскопічних дослідженнях та структура фериту (а) та фазової суміші - перліту (б)

Ступінь травлення меж зерен та структурних складових різна, тому на поверхні утворюється мікрорельєф у вигляді западин та виступів. Западини на межах зерен значно сильніше розсіюють промені, тому межі виглядають як темні лінії.

У структурі перліту, що складається з двох фаз (фериту і цементиту), ферит розчиняється швидше цементиту. Цементит виступає та відбиває більше променів і в полі зору буде світлою складовою; друга фаза (ферит), навпаки, через більше розсіювання променів буде виглядати темною. В результаті структура перліту має вигляд темних та світлих смуг [17].

Дослідження мікрошліфів проводять за допомогою металографічного мікроскопа.

Металографічні мікроскопи МИМ-6 та МИМ-7 дозволяють роздивлятись при збільшенні непрозорі тіла у відбитому від поверхні металевого зразка світлі



на відміну від біологічних мікроскопів, в яких вивчають прозорі тіла в прохідному світлі. Загальний вигляд мікроскопа наведено на рисунку 2.3 [18].

Металографічний мікроскоп складається з трьох частин: 1) оптична; 2) освітлювальна; 3) механічна.

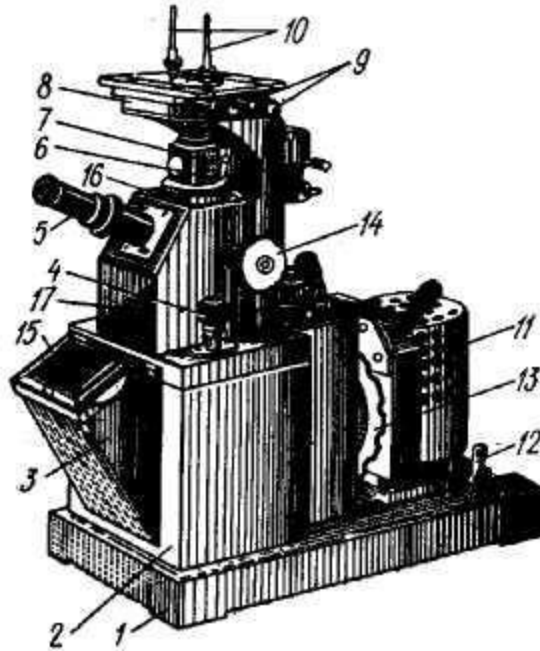


Рисунок 2.3 – Загальний вид мікроскопа МІМ-7:

1- основа мікроскопа; 2- корпус; 3- фотокамера; 4- мікрометричний гвинт; 5- візуальний тубус з окуляром; 6- держачи ілюмінатора; 7- ілюмінатор; 8- предметний столик; 9- держачи переміщення столику; 10- клеми; 11- освітлювач; 12- стопорний пристрій освітлювача; 13- держак світофільтрів; 14- макрометричний гвинт; 15- рамка з матовим склом; 16- аналізатор; 17- корпус центральної частини.

Оптична схема мікроскопу містить в собі об'єктив, окуляр і ряд допоміжних оптичних елементів. Об'єктив дає дійсне, збільшене, зворотне зображення поверхні шліфа і являє собою систему лінз, об'єднану в одній оправі. Об'єктиви бувають дуже складні і складаються з десяти і більше лінз, але основною лінзою є фронтальна лінза об'єктива [18].

Збільшення фронтальної лінзи залежить від її кривизни. Чим більше кривизна фронтальної лінзи, тим більше збільшення об'єктива. Збільшення

об'єктива може бути від 1 до 180 разів. Відповідно із збільшенням об'єктиву змінюється робоча відстань від 100 до 0.5мм. Відстань між фронтальною лінзою об'єктиву і предметом, що розглядається або вивчається називається робочою відстанню.

Максимальна роздільна здатність об'єктива – це здатність відрізнити найменші деталі предмету, що вивчається [18].

Освітлювальна частина мікроскопа складається з джерела світла, серії лінз, світлофільтрів та діафрагм.

Джерелом світла в металографічних мікроскопах найчастіше є низьковольтні лампочки розжарювання. Коли пучок паралельних променів пропускати крізь випуклу лінзу, то вони пересічуться у точці, фокуса лінзи. Конденсатор виконує зворотнє завдання. Проміння світла, яке розходитьсся з джерела, розміщеного в точці фокуса конденсатора, при проходженні крізь конденсатор стає паралельними.

Сучасні світові металографічні мікроскопи дають змогу досліджувати зразки в темному та світлому полі, при вертикальному освітленні, а також в поляризованому світлі [18].

Механічна частина мікроскопу складається із штатива, на якому закріпленні всі вузли мікроскопу (тубус візуального спостереження, ілюмінаторний та центральний тубуси), предметного столика та гвинтів для наведення на різкість.

Для наведення на різкість мікроскоп має макро- та мікро гвинти. Обертаючи макрогвинт, переміщують предметний столик із зразком відносно об'єктива у вертикальній площини. Точніше наведення здійснюється за допомогою мікрогвинта [18].

## 2.2 Визначення твердості.

При вимірюванні твердості за *Бринеллем* сталева кулька діаметром  $D$  (1; 2; 2.5; 5 і 10 мм) вдавлюється у випробуваний зразок під дією навантаження  $P$  (625–30000 Н) упродовж (10 с), після зняття навантаження вимірюють діаметр  $d$  відбитка. У поверхневому шарі під індентором відбуваються інтенсивна пластична деформація і витіснення матеріалу з-під індентора, що може спотворювати форму відбитка. Діаметр відбитка виходить тим менший, чим більший опір матеріалу зразка деформації, виробленої індентором. Число твердості за Бринеллем (НВ, Н/мм<sup>2</sup>) є відношенням навантаження  $P$ , що діє на індентор діаметром  $D$ , до площі  $F$  поверхні відбитка [19].

Кульковий індентор найчастіше виготовляють зі сталі з твердістю не менше 8500 МПа для випробування матеріалів з твердістю від 8 до 450 НВ. При більшій твердості зразка сталева кулька – індентор остаточно деформується на величину, що перевищує стандартизований допуск. Тому для вимірювання твердості за Бринеллем матеріалів з  $>450$  НВ використовують кульки з твердого сплаву із твердістю  $\sim 15000$  МПа. Число твердості, яке визначається із використанням таких інденторів, позначають НВW [19].

Діаметр відбитка, що отриманий від впливу індентора, вимірюють спеціальною лупою МПБ-2, на якій є шкала з ціною поділки 0,1 мм.



Рисунок 2.4 – Твердомір Бринелля

При вимірюванні твердості за *Роквеллом*, інденторами є алмазний або твердосплавний конус з кутом при вершині  $120^\circ$  або сталева кулька діаметром 1,588 мм [19].

Вдавлювання індентора у зразок робиться під дією двох навантажень, що послідовно додаються:

попереднім  $P_0$ ;

загальним  $P = P_0 + P_1$ , де  $P_1$  – основне навантаження.

Число твердості за Роквеллом вимірюється в умовних одиницях і є мірою глибини вдавлювання індентора під певним навантаженням. Спочатку індентор вдавлюється в поверхню зразка під попереднім навантаженням  $P_0 = 100$  Н (10 кгс), яке не знімається до кінця випробування. Це виключає вплив вібрації і будови тонкого поверхневого шару на точність випробування. Потім на зразок подається основне навантаження  $P_1$  і збільшується глибина вдавлювання. Залишкова глибина вдавлювання ( $h$ ) після зняття основного навантаження  $P_1$  і визначає число твердості за Роквеллом (HR) [19].

Чим більша глибина вдавлювання  $h$ , тим менше число твердості.



Рисунок 2.5 – Твердомір Роквелла

При стандартному вимірюванні твердості за **Віккерсом** в поверхню зразка вдавлюють алмазний індентор у формі чотиригранної піраміди з кутом при вершині  $\alpha 136^\circ$ . Після зняття навантаження  $P = 10 - 1000 \text{ Н}$ , що діяло певний час (10 – 15 с), вимірюють діагональ відбитка  $d$ , що залишився на поверхні зразка. Число твердості записується без одиниці вимірювання, наприклад, HV 250 [19].

Відносно невеликі навантаження і мала глибина вдавлювання індентора (менше від 1 мм) обумовлюють необхідність більш ретельної підготовки поверхні. Як правило, поверхня повинна бути відполірована і вільна від наклепу. Для отримання достовірних значень HV на кожному зразку роблять не менше п'яти вимірювань.

Важливе значення методу Віккерса – це геометрична подібність відбитків за будь-яких навантажень і можливість визначення твердості на зразках малих перетинів і з тонкими шарами структур різної твердості. Навантаження при випробуванні вибирають залежно від товщини виробу і його твердості, при цьому співвідношення товщини зразка або шару до діагоналі відбитка повинно бути не менше 1,5 [19].



Рисунок 2.6 – Твердомір Віккерса

### 2.3 Метод вимірювання мікротвердості.

Метод мікротвердості призначений для оцінки твердості дуже малих об'ємів матеріалу: вимірювання твердості дрібних деталей, тонкого дроту або стрічки, тонких поверхневих шарів, окремих фаз або структурних складових. Як індентор використовують алмазну піраміду (аналогічно методу Віккерса). Індентор плавно вдавлюється у зразок при навантаженнях 0,05–5 Н (5 – 500 г) і витримується упродовж 3 – 5 секунд [20].

Числа твердості визначаються за формулою або за таблицями залежно від діагоналі відбитка та прикладеного навантаження.

Оскільки глибина вдавлювання індентора становить декілька мікрометрів, дуже важливо виключити вплив процесу підготовки поверхні зразка на значення величини мікротвердості. Тобто зразок перед випробуванням повинен бути відшліфованим та відполірованим. Число твердості позначають  $H_{\mu}$  і записують без одиниці вимірювання, де  $\mu$  – це вага вантажів у грамах. Наприклад,  $H_{50}1200$ . Загальна схема мікротвердоміра ПМТ-3 наведена на рисунку 2.7 [20].

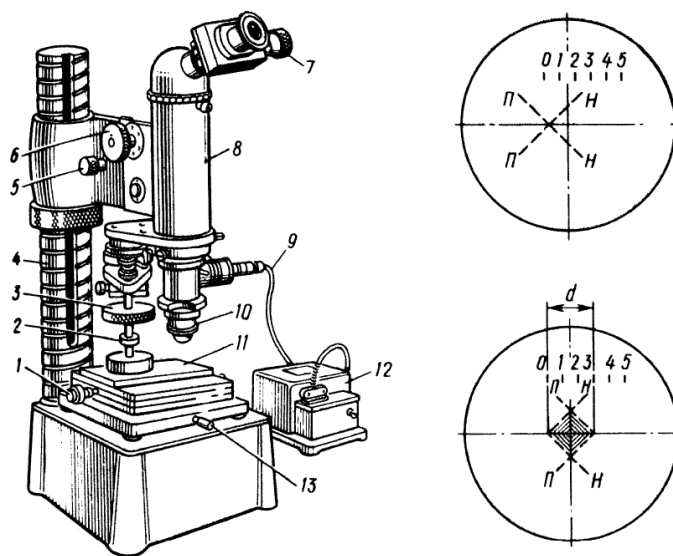


Рисунок 2.7 – Мікротвердомір ПМТ-3:

1 – мікрогвинт; 2 – індентор; 3 – механізм навантаження; 4 – стійка; 5 – механізм мікроподачі; 6 – механізм мікроподачі; 7 – окулярний мікрометр; 8 – тубус; 9 – система освітлення; 10 – об'єктив; 11 – предметний столик; 12 – трансформатор; 13 – рукоятка повороту

## 2.4 Рентгеноструктурний аналіз.

В основу рентгеноструктурного аналізу покладено явище дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці, відкрите в 1912 році М. Лауе і його колегами В. Фрідріхом та П. Кніппінгом [21].

У рентгеноструктурному аналізі використовують довжини хвиль  $\lambda$  порядку 0,02 – 0,2 нм. Генерація рентгенівського випромінювання потрібної довжини хвилі здійснюється електронними вакуумними рентгенівськими трубками. Принцип їх роботи аналогічний до роботи телевізійного кінескопа. Джерелом електронів служить розжарений катод у вигляді вольфрамової спіралі, покритий шаром матеріалу, який зменшує роботу виходу електронів. Електрони прискорюються під дією електричного поля (прискорююча напруга  $U$  до 60 кВ) та направляються на металічний анод. Енергія електронів при їх різкому гальмуванні перетворюється в фотони рентгенівського випромінювання з різними довжинами хвиль [21].

Якщо енергії електрона достатньо для вибивання електронів із внутрішніх електронних оболонок атомів аноду, то на фоні неперервного спектра з'являються лінії характеристичного рентгенівського випромінювання. Їх поява обумовлена випромінюванням фотонів при переході електронів із зовнішніх оболонок на утворені вакантні позиції. Лінії цього спектра поділяються на серії К, L, M, ... залежно від того, з якої оболонки був вибитий електрон [21].

У багатьох технічно важливих чи природних випадках речовина знаходиться у стані полікристала – великої кількості хаотично орієнтованих у просторі дрібних кристалітів у вигляді порошку або твердого матеріалу щільно зчеплених між собою частинок. Крім того, полікристал може складатися із кристаликів різних фаз і важливо дослідити його структуру та властивості в такому стані. У таких випадках у рентгенографії використовують метод порошоків, який також називають методом Дебая – Шерера, а рентгенограму від полікристала іноді називають дебаєграмою. Зйомка в цьому методі ведеться з використанням паралельного або розбіжного монохроматичного пучка ( $\lambda = \text{const}$ ). Монохроматизацію рентгенівського випромінювання в методі порошоків бажано

проводити монохроматором, встановленим між зразком і детектором. Це дозволяє підвищити чутливість експерименту, усунувши флуоресцентну складову в спектрі дифрагованого пучка [21].

Найвірогідніші дані про інтенсивності піків та значення міжплощинних відстаней одержують за допомогою рентгенівських дифрактометрів для полікристалів.



Рисунок 2.8 – Дифрактометр EMPYREAN [22]

При дифрактометричній зйомці за схемою відбивання від площини зразка найчастіше використовують симетричну фокусуєчу схему за Брегом-Брентано. Ця схема дозволяє повертати зразок у власній площині з метою зменшення впливу на інтенсивність максимумів як текстури, так і великокристалічності в досліджуваному матеріалі. Характерною особливістю фокусування по Брегом-Брентано є необхідність видержувати значення кутів повороту зразка і детектора у співвідношенні 1:2. При цьому проекція фокуса рентгенівської трубки та аналітична щілина детектора розміщуються на колі гоніометра радіуса  $R$ , через центр якого проходить поверхня плоского зразка. Для точного фокусування зразок необхідно згинати за радіусом  $r$  кола фокусування залежно від кута  $\theta$  [21].



## **Висновки**

Для отримання повної картини про властивості матеріалу та хромових покриттів необхідно раціонально обрати методи дослідження. При цьому також потрібно враховувати економічну доцільність проведення тих чи інших випробувань.

Застосування сучасного обладнання дає змогу отримати найбільш достовірні результати та інтенсифікувати процес досліджень. Комплексне застосування різноманітних методів досліджень дозволяє більш повно встановити взаємозв'язок механічними (експлуатаційними) властивостями та змінами у технологічному процесі.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

#### 3.1 Результати мікроструктурного аналізу.

Після дифузійного хромування на поверхні зразків утворюється тонкий шару світлого кольору. Візуально, на шарі присутні мікронерівності дендритної орієнтації, що характерно для шарів карбіду хрому.

Результати мікроструктурного аналізу представлені на рисунках 3.1-3.3.

При хромуванні вуглецевих сталей, формується покриття на основі карбідів хрому. На сталі У8А товщина покриття становить 16-18 мкм та складається з двох зон (Рисунок 3.1).

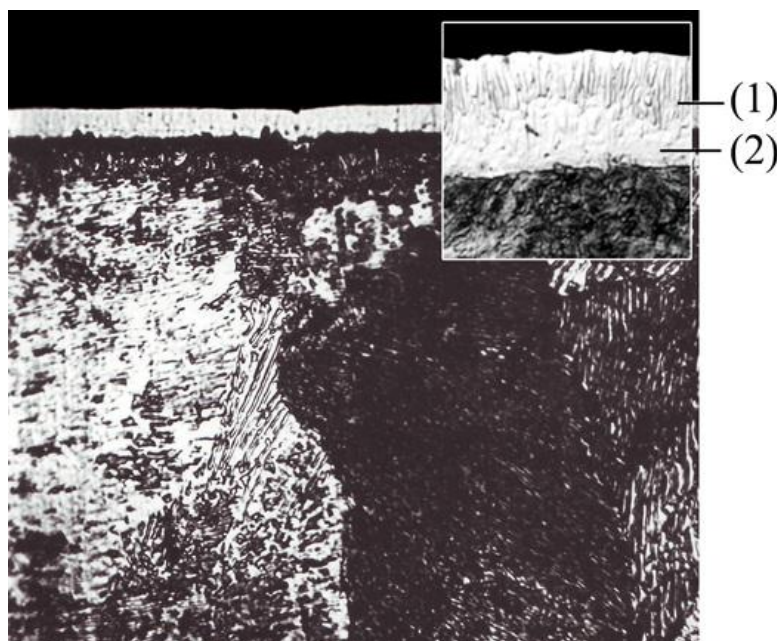


Рисунок 3.1 – Мікроструктура сталі У8А після хромування;

$T=1050^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=2\text{год.}$ ;  $\times 250$ :

- 1- карбід хрому  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ;
- 2- карбід хрому  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ .

Безпосередньо до основи примикає карбід  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , а над ним розташовується карбід  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Як вже зазначалося вище, така структура формується внаслідок недостатньої швидкості дифузії вуглецю з серцевини до поверхні через шар карбіду  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ .

При нанесенні дифузійного хромового покриття на армко-залізо з незначним вмістом вуглецю утворення карбідного шару не відбувається (рисунок 3.2). При цьому для отримання карбідних шарів на технічному залізі до реакційної камери необхідно вносити деревне вугілля, яке через газову фазу буде постачати вуглець необхідний для утворення карбиду. Товщина таких шарів на основі  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  становить 2-4 мкм.

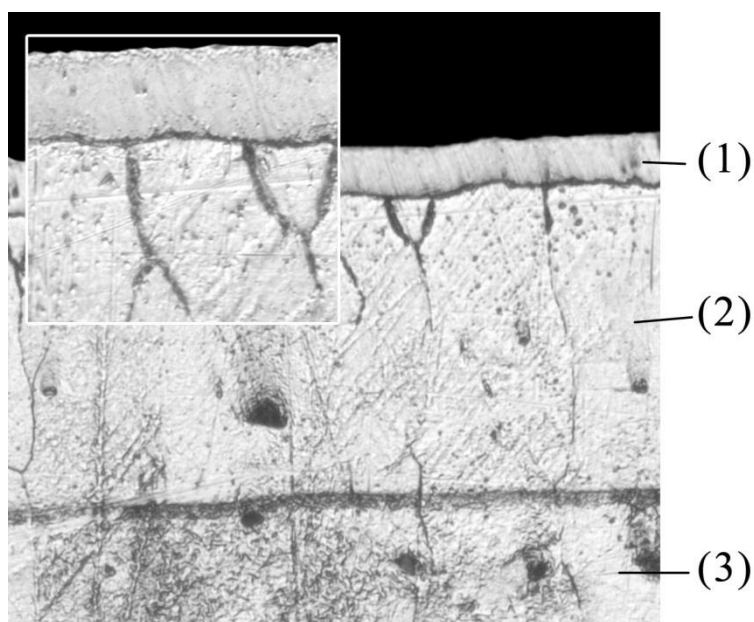


Рисунок 3.2 – Мікроструктура армко-заліза після хромування;

$T=1050^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=2\text{год.}$ ;  $\times 250$ :

- 1-  $\sigma$ -фаза;
- 2- зона збагачена хромом  $\text{Fe}\alpha(\text{Cr})$ ;
- 3- основа  $\text{Fe}\alpha$ .

На твердих сплавах групи ВК і ТК формується шар  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , товщина якого при насиченні протягом 2 годин і  $T=1323\text{K}$  складає 5-8 мкм (рисунок 3.3).

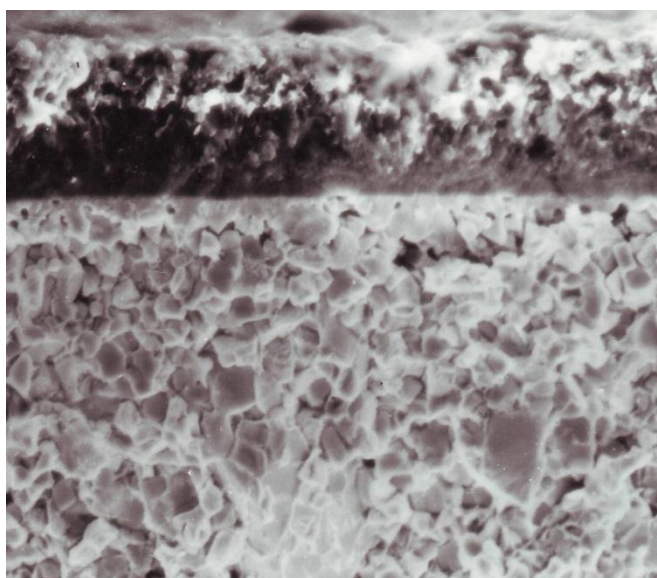


Рисунок 3.3 – Мікроструктура зламу твердого сплаву Т15К6 після хромування;  
 $T=1050^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=2\text{год.}$ ;  $\times 4000$ .

### 3.2 Результати вимірювання мікротвердості.

Таблиця 3.1

Мікротвердість карбідних хромових покриттів на сталі 40 -  $H_{50}$ , МПа

Номер зразка	Результати вимірювання	Середнє значення
1	1480	1510
	1550	
	1500	
2	1520	1540
	1540	
	1560	
3	1600	1553
	1530	
	1530	
4	1550	1516
	1500	
	1500	
5	1520	1520
	1540	
	1500	

Таблиця 3.2

Мікротвердість карбідних хромових покриттів на сталі У8А -  $H_{50}$ , МПа

Номер зразка	Результати вимірювання	Середнє значення
1	1680	1656
	1640	
	1650	
2	1650	1643
	1680	
	1600	
3	1640	1626
	1620	
	1620	
4	1650	1660
	1700	
	1630	
5	1630	1653
	1650	
	1680	

### 3.3 Результати рентгеноструктурного аналізу.

За результатами рентгеноструктурного аналізу покриттів отриманих при різних температурно часових умовах насичення, основними фазами поверхні хромованих сталей є карбіди хрому  $Cr_7C_3$  та  $Cr_{23}C_6$ .

При насиченні вуглецевих сталей хромом утворюється двошарове покриття з карбідів  $Cr_{23}C_6$  та  $Cr_7C_3$ , період ґраток яких відповідно становить  $a=1,0667$  нм та  $a=0,6983$  нм,  $b=1,2184$  нм,  $c=0,4517$  нм. Причому безпосередньо до основи примикає шар  $Cr_7C_3$ . Відповідно літературним даним у  $Cr_{23}C_6$  складна г.ц.к. ґратка, фаза  $Cr_7C_3$  має гексагональну структуру. На твердих сплавах ВК8 і Т15К6 формується покриття  $Cr_{23}C_6$ , параметри ґраток якого відрізняються в незначній мірі і становлять  $a=1,0639$  нм і  $a=1,0642$  нм відповідно.

За діаграмою стану хром-вуглець (рисунок 3.4) можливе також існування карбіду  $Cr_3C_2$ . Але при насиченні вуглецевих та низьколегованих сталей і твердих сплавів групи ВК та ТК дана фаза в покриттях не утворюється.

Очевидно це відбувається із за недостатньої кількості вуглецю, що бере участь у формуванні покриття.

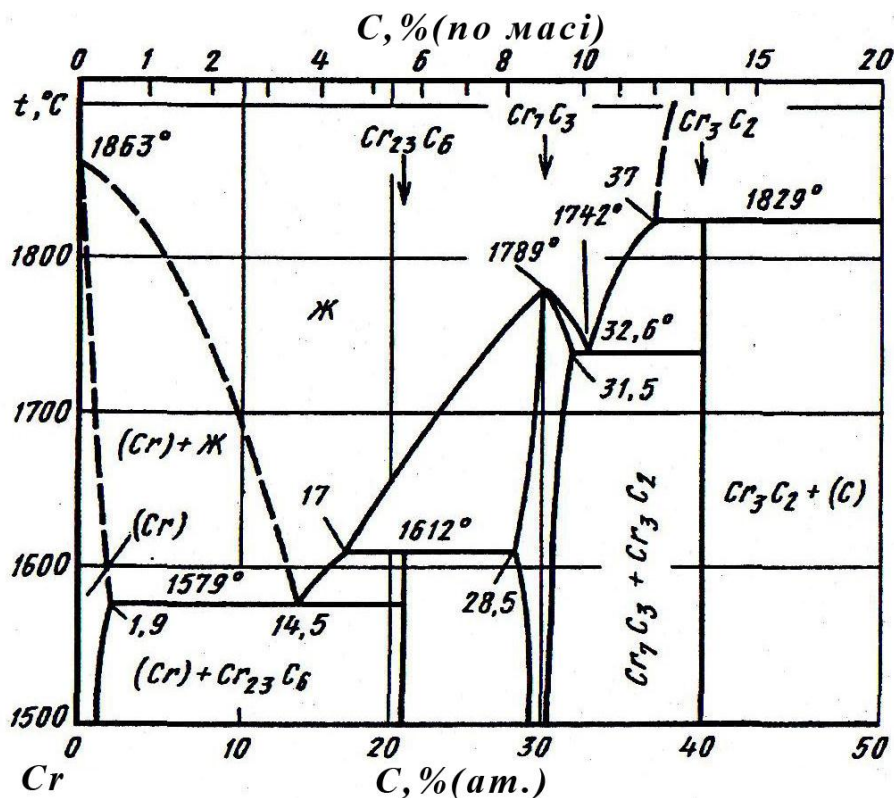


Рисунок 3.4 – Діаграма стану хром-вуглець.

Таблиця 3.3

Фазовий склад покриттів на основі карбиду хрому\*

Матеріал	Фазовий склад	Період кристалічної гратки, нм
Сталь 45	$\text{Cr}_{23}\text{C}_6$	$a=1,0665$
	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	$a=0,6983; b=1,2181$ $c=0,4517$
У8А	$\text{Cr}_{23}\text{C}_6$	$a=1,0667$
	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	$a=0,6983; b=1,2184$ $c=0,4517$
Х12М	$\text{Cr}_{23}\text{C}_6$	$a=1,0668$
	$\text{Cr}_7\text{C}_3$	$a=0,6983; b=1,2185$ $c=0,4517$
ВК8	$\text{Cr}_{23}\text{C}_6$	$a=1,0639$
Т15К6	$\text{Cr}_{23}\text{C}_6$	$a=1,0642$

\*- час насичення 2 години, температура 1050°C

## Висновки

Сучасні технології нанесення зносостійких хромових покриттів дають змогу отримати якісні покриття.

Візуально всі покриття виявляються у вигляді світлої тонкої смуги, що прилягає безпосередньо до матеріалу основи.

Товщина покриття залежить від часу насичення і від кількості вуглецю в матеріалі. Для сталей з більшим вмістом вуглецю товщина покриття збільшується на 5-10%.

Час насичення 2-3 години є оптимальним для отримання якісних покриттів товщиною 8-12 мкм. Подальше збільшення часу насичення не дає суттєвого приросту товщини, але приводить до не раціональних енергозатрат.

Результати вимірювання мікротвердості показують стабільність отриманих параметрів для конкретного матеріалу і у проведених експериментах варіюються від  $H_{50}$  1500-1650 МПа.

Відповідно можна зробити висновок, що чим більше в сталі вуглецю, тим товстіші покриття ми можемо отримати.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

#### 4.1 Економіка підприємства.

Економіка підприємства вже давно вийшла за межі її сприйняття виключно у контексті виявлення конкретних форм прояву законів і закономірностей функціонування та розвитку національного виробництва у господарській діяльності підприємства. Не лише пошук шляхів отримання надприбутків цікавить сучасного підприємця. Першочерговим завданням постає створення новації, яка відкриє нові ринки, нові можливості, нові перспективи для підприємства. Та, разом з тим, для її поширення визначальними є розвиток компетентності персоналу, доступ до джерел інвестування, вміння створювати та примножувати активи, співставляти ресурсні можливості з поставленими цілями, формувати економічно безпечне середовище для функціонування підприємства [23].

Процес виробництва матеріальних благ, а також надання послуг, виконання робіт має бути певним чином організованим у просторі і часі. Така організація відбувається шляхом створення підприємств. Задовольняти ринкові потреби у продукції (роботах, послугах) можуть також суб'єкти підприємницької діяльності - фізичні особи [24].

Сутність підприємства як організаційної форми господарювання визначена Господарським Кодексом України: підприємство - це самостійний суб'єкт господарювання, створений компетентним органом державної влади або органом місцевого самоврядування, або іншими суб'єктами для задоволення суспільних та особистих потреб шляхом систематичного здійснення виробничої, науково-дослідної, торговельної, іншої господарської діяльності в порядку, передбаченому цим Кодексом та іншими законами [24].

Сучасне підприємство – це складна відкрита виробничо-господарська і соціальна система, яка:

- складається із взаємозалежних частин (виробництв, цехів, дільниць, служб тощо), діяльність яких впливає на кінцевий результат виробництва;



- взаємодіє із зовнішнім середовищем, з якого в систему надходять необхідні для виробничої діяльності ресурси виробництва та в якому реалізуються і використовуються результати виробництва – продукція, роботи, послуги;
- здійснює діяльність, спрямовану на задоволення потреб суспільства;
- має властивості, притаманні складним відкритим цілеспрямованим системам: здійснює певні процеси протягом життєвого циклу продукції; реагує на зміну зовнішнього середовища і самостійно забезпечує свій розвиток (володіє можливістю самоорганізації) [25].

Для підприємства характерним є:

- виробничо-технічна єдність (спільність продукції, що виготовляється, процесів її виробництва, певний склад виробничих фондів, єдина технічна політика, спільність допоміжного й обслуговуючого господарств);
- організаційно-соціальна єдність (наявність єдиного трудового колективу, керівника та адміністрації підприємства, наділення підприємства правами й реквізитами юридичної особи);
- фінансово-економічна самостійність (можливість самостійно визначити напрями економічного розвитку, склад, обсяги продукції, що випускається, напрями розподілу прибутку підприємства, форми і розміри матеріального стимулювання, спільність системи планування та обліку) [25].

Будь-яке підприємство визначає напрями своєї діяльності відповідно до встановлених цілей:

- забезпечення споживачів продукцією підприємства згідно з укладеними господарськими договорами;
- матеріальне стимулювання персоналу підприємства, створення належних умов праці й можливостей фахового зростання працівників;
- створення нових робочих місць;
- охорона довкілля;
- ритмічна робота підприємства та виробництво продукції високої якості;
- отримання доходу і прибутку [25].

Досліджувати економіку підприємства – означає вивчати науку про ефективність виробничої діяльності, шляхи та методи досягнення підприємством найкращих результатів за умови найменших витрат [25].

Бізнес-модель підприємства — це спрощене уявлення дійсності у вигляді будь-якого відображення досліджуваного об'єкта — підприємства у вигляді наукового опису, теорій, формул, схем, макетів тощо [23].

Класифікація бізнес-моделей підприємства є досить розгалуженою. За рівнем складності внутрішніх зв'язків бізнес-моделі можуть бути локальними (без взаємного зв'язку функцій та/або процесів конкретного підприємства, що моделюється) або інтегральними (з взаємним зв'язком функцій і процесів цього підприємства).

За параметрами моделювання моделі розподіляються на функціональні (моделі функцій), процесні (моделі процесів), спеціалізовані (моделі формування цінностей) і комбіновані (процесно-функціональні) [23].

За часовою ознакою моделі можна розділити на моделі поточного управління (оперативно-тактичні), моделі прогнозування змін у недалекому майбутньому (коротко- і середньострокові прогностичні) та моделі далекосяжних стратегічних змін (довгострокові стратегічні).

Виробнича модель направлена на виробництво максимальної кількості продукції. Вона використовує інформаційну базу виробничих відділів, дані про стан фінансів, персонал та маркетингову діяльність підприємства. Така модель застосовується, як правило, підприємствами-монополістами та підприємствами, що реалізують державні замовлення, для яких головним критерієм успіху є продуктивність виробництва [23].

Ознаки підприємницької діяльності [24]:

- 1) економічна самостійність: суб'єкти підприємництва, керуючись власною волею, вільно обирають види підприємницької діяльності, а також час, місце та способи її здійснення;

- 2) ініціативність: означає, що підприємець має бути активним у своїй діяльності, особисто займатись підприємництвом, а не «делегувати» його третім особам;
- 3) систематичність: означає, що підприємницька діяльність здійснюється багаторазово, тривалий час;
- 4) діяльність на власний ризик: підприємницький ризик - це певна подія з ознаками ймовірності і випадковості настання, яка може призвести до негативних наслідків для підприємця; одержання прибутку як мета підприємницької діяльності не завжди може бути досягнута, інколи підприємець зазнає збитків, за які він сам несе відповідальність, тобто має місце підприємницький ризик;
- 5) діяльність з метою одержання прибутку, тобто суми коштів, на яку одержані підприємцем доходи перевищують здійснені ним витрати;
- 6) правомірність: означає, що підприємницька діяльність зареєстрована у встановленому законодавством порядку та здійснюється у відповідності з ним.

Функції підприємства [25]:

- економічна – задоволення потреб споживачів у товарах або послугах;
- комерційна – продаж своєї продукції, встановлення ціни, знаходження клієнтів, приймання замовлень тощо;
- виробнича – необхідність виготовлення продукції після отримання замовлень на неї;
- фінансова – залучення коштів, необхідних для придбання засобів виробництва і праці, виготовлення й реалізації продукції;
- адміністративна – забезпечення раціонального використання усіх засобів виробництва, координації дій персоналу, належне управління працівниками та контроль за результатами їх праці.

Структура підприємства — це його внутрішня будова, яка характеризує склад, розміри його внутрішніх підрозділів, їх підпорядкованість та систему взаємозв'язків між ними. При розробленні положень про структуру підрозділів

підприємства необхідно попередньо вивчити зміст та визначити обсяг виконуваних ними функцій, з'ясувати особливості даного підприємства, а також вивчити досвід організації роботи аналогічних підрозділів споріднених підприємств. З метою створення раціональної структури підприємства використовують різноманітні показники [23].

Розглянемо ці показники.

1. Пропорційність структурних ланок підприємств. Аналіз пропорційності дає змогу виявити ділянки з низькою і надлишковою потужністю.

2. Розмір виробничих ланок: обсяг випуску продукції, кількість працівників, вартість основних виробничих засобів, потужність.

3. Рівень спеціалізації окремих виробничих ланок. Він виражається такими показниками:

а) питомою вагою предметно, подетально та технологічно спеціалізованих підрозділів;

б) рівнем спеціалізації робочих місць;

в) кількістю детале-операцій на одному робочому місці.

4. Співвідношення між основним, допоміжним і обслуговуючим виробництвом. Це співвідношення характеризується питомою вагою основних, допоміжних і обслуговуючих виробництв за кількістю працівників, обладнання, вартістю основних засобів.

5. Ступінь централізації окремих виробництв, або показник централізації виробничого процесу, який визначається як відношення обсягу робіт, виконаних у спеціалізованих підрозділах до загального обсягу робіт даного виду.

6. Характер взаємозв'язку між підрозділами. Його характеризують такі показники: кількість технологічних циклів, через які проходить предмет праці до трансформації його в кінцевий продукт; довжина транспортних маршрутів руху напівфабрикатів; вантажооборот.

Аналіз цієї системи показників дає змогу визначити шляхи створення раціональної структури підприємства, яка повинна забезпечити:

- безперервність і прямоточність виробничого процесу;
- оптимальність спеціалізації цехів і дільниць, пропорційність їх структуризації;
- можливість розширення і перепрофілювання виробництва;
- відсутність дублювання.

Розглянемо особливості виробничої та організаційної структур підприємства [23].

Виробничий процес — це сукупність взаємопов'язаних основних, допоміжних та обслуговуючих процесів, у результаті яких вихідні матеріали й напівфабрикати перетворюються на готову продукцію.

Виробничі процеси на підприємстві здійснюються у відповідних підрозділах, склад яких характеризує виробничу структуру підприємства. Виробнича структура підприємства, її видозміна зазнає постійної трансформації, але є типовою за галузевою приналежністю та масштабами діяльності. У залежності від складу внутрішніх підрозділів підприємства можна виділити такі види його виробничої структури:

- 1) цехова — головним виробничим підрозділом є цех;
- 2) безцехова — основою побудови виробничої структури є виробнича дільниця;
- 3) корпусна — основним виробничим структурним підрозділом є корпус як об'єднання однотипних цехів;
- 4) комбінатська — поєднуються стадії послідовного процесу переробки сировини, а підрозділи виготовляють завершену частку готового виробу.

Провідне місце у виробничій структурі належить цеху. Цех є основною виробничою одиницею, відокремленою ланкою, в якій реалізуються виробничі процеси. Тип цеху визначається характером виробництва [23].

Є чотири типи цехів: основні, допоміжні, побічні, підсобні. Основними називаються цехи, де виробляється спеціалізована продукція для даного підприємства. Основні цехи поділяються на заготівельні, обробні, складальні. До

заготівельних цехів відносять ливарні (сірого, ковкого чавуну, кольорового, сталюого, фасонного, точного литва), ковальсько-пресувальні та ін. До обробних цехів належать, зокрема, механообробні, деревообробні, термічні, гальванічні, лакофарбові, до складальних — цехи складання виробів, їх фарбування, комплектації запчастинами тощо. Допоміжні цехи забезпечують виробництво всім необхідним для нормального функціонування підприємства. Є такі види допоміжних цехів: інструментальні, енергетичні, тепло- та паросилові, модельні, ремонтні, транспортні, санітарно-технічні. Побічні цехи забезпечують перероблення відходів основного виробництва. Підсобні цехи виробляють тару для пакування продукції, друкують інструкції щодо її використання тощо. Чільне місце у структурі підприємств займають склади, очисні споруди, комунікації: електромережі, газопроводи, опалення, вентиляційне обладнання, дорожня інфраструктура [23].

У виробничій структурі підприємства важливу роль виконують конструкторські й технологічні підрозділи. Тут розробляються нові вироби, новітні технології для одержання цієї продукції, проводяться експериментальні та дослідно-конструкторські роботи. До складу цехів входять основні й допоміжні виробничі дільниці. Дільниця — це найменша адміністративно-виробнича ланка, в якій колектив працівників виконує однотипні технологічні роботи з виробництва однотипного продукту. Кожна виробнича дільниця складається з сукупних робочих місць. Сукупне робоче місце складається з індивідуальних робочих місць. Робоче місце оснащується необхідними засобами праці відповідно до характеру його спеціалізації. Оснащення та розташування робочого місця на виробничій площі повинні забезпечувати високу продуктивність праці, гарантувати безпеку роботи, відповідати фізіологічним, естетичним та санітарно-гігієнічним нормам [23].

## Висновки

У ринкових умовах господарювання підприємство, як відкрита система, функціонує у складному зовнішньому середовищі, що характеризується нестабільністю та постійною динамікою. Таке середовище змушує керівництво швидко адаптуватися до нових умов, потребує знання законів розвитку та пошуку шляхів виживання в ринковій економіці, врахування чинників невизначеності та нестійкості економічного середовища [25].

Економічна безпека підприємства характеризує рівень захищеності усіх систем підприємства при здійсненні господарської діяльності в певній ситуації, а саме:

- стан усіх ресурсів підприємства (капіталу, трудових ресурсів, інформації, технологій, техніки, прав) та підприємницьких здібностей, при якому можливе найефективніше їх використання для стабільного функціонування і динамічного науково-технічного та соціального розвитку, здатність запобігати або швидко нівелювати внутрішні та зовнішні загрози;

- сукупність організаційно-правових, режимно-охоронних, технічних, технологічних, економічних, фінансових, інформаційно-аналітичних та інших заходів, спрямованих на усунення потенційних загроз та створення умов для забезпечення ефективного функціонування суб'єктів підприємницької діяльності відповідно до їх цілей та завдань [25].

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ПРАЦІ, НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

#### 5.1 Класифікація небезпечних і шкідливих факторів

Виробничі фактори за характером впливу на людину можна розділити на шкідливі і небезпечні [26].

**Небезпечний виробничий фактор** – фактор, дія якого може привести до травми або іншого різкого раптового погіршення здоров'я.

**Шкідливий виробничий фактор** – фактор, дія якого може привести до зниження працездатності, захворювання або професійного захворювання.

Розглянемо класифікацію небезпечних і шкідливих виробничих факторів (НіШВФ) [26].

Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори [26]:

- машини і механізми, що рухаються;
- рухливі частини виробничого обладнання;
- вироби, заготовки та матеріали, що пересуваються,;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- підвищена або знижена температура поверхонь обладнання, матеріалів;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищений рівень інфразвукових коливань;
- підвищений рівень ультразвуку;
- підвищений або знижений барометричний тиск в робочій зоні і його різка зміна;
- підвищена або знижена вологість повітря;
- підвищена або знижена рухливість повітря;
- підвищена або знижена іонізація повітря;
- підвищений рівень іонізуючих випромінювань в робочій зоні;



- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання
- якого може статися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- підвищена напруженість електричного поля;
- підвищена напруженість магнітного поля;
- відсутність або нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла;
- знижена контрастність;
- пряма і відбита блискучість;
- підвищена пульсація світлового потоку;
- підвищений рівень ультрафіолетової радіації;
- підвищений рівень інфрачервоної радіації;
- гострі краї, задирки і шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів і обладнання;
- розташування робочого місця на значній висоті відносно поверхні землі(пола).

Один і той же небезпечний і шкідливий виробничий фактор за природою своєї дії може відноситися одночасно до різних перелічених вище груп. Крім того, характер впливу фактора на людину залежить від кількісної оцінки цього фактора (наприклад, концентрація шкідливої речовини або рівень шуму). Тому практично кожен фактор може бути шкідливим або небезпечним [26].

## **5.2 Загальні та індивідуальні заходи щодо усунення впливу шкідливих факторів**

### ***Загальні вимоги.***

Виробничі будинки термічних цехів, що стоять окремо, а також термічних цехів і ділянок у загальному комплексі з іншими цехами слід розміщати відносно житлової забудови з підвітряної сторони для вітрів переважного напрямку і

будувати з вогнестійкого матеріалу на відстані від житлової забудови, визначеній розрахунком розсіювання шкідливих речовин, але не менше 50 м [27].

Термічні цехи, як правило, повинні розташовуватися в одноповерхових будинках із зашкльованими вікнами і світлоаераційними ліхтарями і відповідати вимогам [28].

Виробничі приміщення для термічної обробки деталей можуть займати весь будинок або розміщуватися в будинку з іншими цехами (ділянками), при цьому вони повинні розташовуватися біля зовнішньої стіни з віконними прольотами і відокремлюватися від інших цехів (ділянок) капітальною стіною.

У цехах і на ділянках термічної обробки слід передбачати проходи і проїзди для руху людей і транспортних засобів [27].

Ширина проїздів повинна забезпечувати безпеку руху транспортних засобів і встановлюється в залежності від максимальних габаритів транспортних засобів з вантажем і при однобічному русі підлогового колісного безрейкового транспорту повинна бути 2,5 - 3 м, при двосторонньому русі підлогового колісного безрейкового транспорту і вантажних машин вантажопідйомністю до 3 т ширина проїзду повинна бути 4 м.

Границі проходів і проїздів повинні бути відзначені контрастними світлими смугами шириною не менше 50 мм або іншими технічними засобами.

Захаращення проходів і проїздів або використання їх для складування вантажів не допускається [28].

У цеху обов'язкова наявність мінімум двох евакуаційних виходів. Двері повинні мати ширину не менше 0,8 м і висоту - не менше 2,0 м.

Ворота, двері та інші прорізи в капітальних стінах, зроблені для різних потреб, повинні бути утеплені та обладнані тамбурами або тепловими повітряними завісами. Двері повинні мати пристосування для примусового закривання. Відкриття і закриття важких і великих воріт повинні бути механізовані, для унеможливлення їх мимовільного відкриття або закриття повинні бути фіксатори [27].

Підлога в проїздах, проходах, на ділянках складування вантажів повинна мати міцне і тверде покриття. На ділянках промивання деталей покриття підлоги повинно бути водонепроникним. На ділянках травління, ціанування, рідинного азотування та інших, де можливе застосування лугів, кислот, солей, нафтопродуктів та ін., покриття підлоги повинно бути стійким до впливу хімічно активних речовин і не допускати їх усмоктування. Підлога на цих ділянках повинна мати ухил не менше 1:200 у бік трапів для відводу стічних вод.

### ***Вимоги до освітлення.***

Природне і штучне освітлення в приміщеннях термічних цехів повинно відповідати вимогам ДБН В.2.5-28:2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення, затвердженим наказом Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 15.05.2006 № 168 (далі - ДБН В.2.5-28-2006) [28].

Не дозволяється захаращувати світлові прорізи технологічним устаткуванням, деталями, інструментами, матеріалами, тарою та іншими предметами. Для вікон, звернених на сонячну сторону, рекомендується передбачати сонцезахисні пристрої (жалюзі, екрани, козирки, штори та ін.).

У термічних цехах для робочого освітлення, як правило, використовується система загального освітлення. Комбіноване освітлення потрібно лише на робочих місцях, де для якісного і безпечного виконання виробничих операцій необхідно додаткове освітлення [27].

Для освітлення робочих приміщень слід використовувати світильники з люмінесцентними лампами, а також з газорозрядними лампами інших типів. Лампи розжарювання можуть застосовуватися для освітлення проходів, для місцевого освітлення робочих місць, а також для аварійного або евакуаційного освітлення.

Мостові крани слід обладнати підкрановим освітленням, виконаним лампами розжарювання, які забезпечують рівень освітленості в зонах, що затінюються кранами, не менше 150 лк. Світильники на кранах повинні встановлюватися на амортизаційних пристроях. У кабінах мостових кранів

повинні бути встановлені екрани, що захищають крановика від сліпучої дії світильників загального освітлення, установлених вище крана [27].

### ***Вимоги до санітарно - побутового обслуговування працівників.***

Улаштування і устаткування приміщень санітарно-побутового призначення повинні відповідати діючим санітарно-гігієнічним вимогам [27].

На виробничих ділянках термічних цехів слід обладнати санітарні пости, оснащені аптечками з медикаментами та іншими засобами для надання працівникам першої (долікарської) допомоги при нещасних випадках.

На внутрішній стороні дверцят аптечки повинні бути зазначені застосування медикаментів за призначенням.

Побутові приміщення слід розташовувати в прибудові до виробничого будинку або в будинку, що стоїть окремо і з'єднується з виробничим будинком теплим переходом.

Допускається розміщати побутові приміщення і в основному корпусі, але при цьому вони повинні бути ізольовані від виробничих приміщень тамбуром або коридором з виходом назовні [28].

У складі побутових приміщень термічних цехів слід передбачати: гардеробні, їдальні (кімнати прийому їжі), кімнати відпочинку, душові, умивальні, туалети, приміщення для знешкодження спецодягу і, у залежності від кількості працівників, пункт здоров'я та кімнату гігієни жінок. Прийом їжі на робочих місцях не дозволяється.

### ***Вимоги до організації робочих місць.***

Біля кожного робочого місця повинні бути передбачені площадки для складування деталей до і після термообробки. Складування повинно виконуватися так, щоб деталі не захарачували робоче місце. Не допускається укладання деталей у проходах. На площадках, де остигають деталі, необхідно виключити дотик до металу, тому що він, охолоджений до 400-500 0С, по зовнішньому вигляду не відрізняється від холодного металу. Для захисту від контакту з нагрітими (остигаючими) деталями слід встановлювати огороження з

теплоізолювальними екранами, температура на поверхні яких не повинна перевищувати 43 °С (згідно з ДСТУ EN 563-2001) [31].

Для розміщення на робочому місці пристосувань, оснащення, інструмента повинні бути передбачені шафи, стелажі, етажерки та ін. Великогабаритні і періодично використовувані оснащення і пристосування рекомендується зберігати на механізованому складі і там само слід комплектувати садки деталей [27].

Для захисту працівників від променистої енергії біля джерел теплового випромінювання повинні бути передбачені спеціальні пристрої і пристосування згідно з [28].

### ***Вимоги до технологічних процесів.***

При розробці і проведенні технологічних процесів термообробки металів слід керуватися цими Правилами, СНіП та іншими чинними нормативними актами. При процесах з термообробки повинні бути передбачені заходи захисту працівників від впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Концентрація пилу та інших шкідливих речовин у повітрі робочої зони, рівні небезпечних і шкідливих факторів не повинні перевищувати значень, установлених в [27].

Технологічні процеси термічної і хіміко-термічної обробки металів повинні передбачати [28]:

- усунення безпосереднього контакту працівників з хімічними речовинами, матеріалами, деталями і відходами виробництва, які здійснюють на них шкідливий вплив;
- заміну операцій, при яких виникають небезпечні і шкідливі виробничі фактори, на операції, де зазначені фактори відсутні або мають меншу інтенсивність;
- використання автоматизованих методів визначення концентрації речовин 1 класу небезпеки в повітрі робочої зони;
- оптимальні режими роботи устаткування, що забезпечують безперервність технологічного процесу;

- раціональний ритм роботи людей, які виконують окремі технологічні операції;
- унеможливлення створення аварійних ситуацій;
- застосування комплексної механізації та автоматизації, дистанційного керування-контролю і регулювання параметрів технологічних процесів (температури, інфрачервоного випромінювання, тиску в робочому просторі печі, вмісту компонентів у газовому середовищі та ін.);
- використання блокувальних пристроїв (з метою унеможливлення виникнення аварійних ситуацій) і засобів світлової і звукової сигналізації про порушення технологічного процесу;
- герметизацію устаткування, з якого можливе виділення шкідливих речовин;
- своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, які є джерелами небезпечних і шкідливих виробничих факторів;
- захист від надмірного опромінення робочих місць;
- дотримання встановленої періодичності чищення гартівних баків, ємностей і нагрівальних печей;
- механізацію ручної праці.

#### ***Заходи безпеки при дифузійній металізації.***

При роботі з порошкоподібними металами необхідно стежити за концентрацією металевого пилу в робочій зоні, яка не повинна перевищувати значень граничнодопустимих концентрацій, передбачених [28].

Відкривання металеві тари з порошками (алюмінієм, цинком та ін.) слід здійснювати за допомогою спеціального інструмента і пристосувань, які не викликають іскроутворення. Роботу рекомендується здійснювати в спеціальному приміщенні [28].

### 5.3 Заходи щодо охорони навколишнього середовища

Велика кількість енергії, споживаної нагрівальними термічними установками і пристроями, перетворюється в теплоту і розсіюється в біосфері у вигляді втрат або при охолодженні нагрітих виробів. Для зменшення даремного розсіювання теплоти необхідно поліпшити теплоізоляцію і скоротити всі види втрат, використати для технологічних цілей або побутових потреб теплоту газів, що відходять, і охолоджуючої води [29].

Найпоширенішими і небезпечними забруднювачами навколишнього середовища є: оксид вуглецю( $\text{CO}$ ), або чадний газ, не має кольору і запаху, виходить в результаті неповного згорання кам'яного вугілля, природного газу, деревини, нафти, бензину. Якщо в повітрі знаходиться до 1%  $\text{CO}$ , то це вже негативно впливає на біоту, а до 4%  $\text{CO}$ , для багатьох видів є летальною дозою.

Оксиди азоту( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), що в 10 разів більш небезпечні для людини, ніж  $\text{CO}$ , викидаються в повітря переважно підприємствами, які виробляють азотну кислоту і нітриди, анілінові фарбники, целулоїд, віскозний шовк і паливними агрегатами ТЕС і ТЕЦ, металургійними заводами і сприяють утворенню кислотних дощів [29].

Аміак ( $\text{NH}_3$ ), що застосовується для виробництва, зокрема азотної кислоти, подразнює дихальні шляхи людей і тварин.

Діоксид сіри ( $\text{SO}_2$ ), або сірчистий газ, виділяється під час згорання палива з домішками сірки (вугілля, нафта), переробки сірчаних руд, виплавці металів.

Тріоксид сіри ( $\text{SO}_3$ ), виходить унаслідок окислення  $\text{SO}_2$  в атмосфері під час фотохімічних і каталітичних реакціях і є аерозолем або розчином сірчаної кислоти в дощовій воді, яка окисляє ґрунти, підсилює корозію металів, руйнування гуми, мармуру і сприяє загостренню захворювань легень і дихальних шляхів [29].

Для зменшення забрудненості атмосфери шкідливими речовинами встановлюють системи газоуловлювача і газового очищення, використовують гази, що містять  $\text{CO}$  і вуглеводні, для технологічних цілей, регулюють склад атмосфери (електропечі опору з контрольованою атмосферою і ін.), замінюють

процеси з великим газовиділенням. Очищення газів проходить адсорбційними і каталітичними методами адсорбції [30].

Разом з газами, паливом і при супутніх термообробці процесах в атмосферу несеться значна кількість пилу. Для зменшення забруднення атмосферного повітря (особливо при викиді промислових газів, що відходять), для технологічної підготовки газів і витягання з газів корисних матеріалів проводиться пиловловлювання за допомогою пиловловлювачів, вбудованих в основне устаткування або виносних.

Електротермічне устаткування є крупним споживачем води, що витрачається для охолодження елементів печей і пристроїв. До води пред'являються високі вимоги [29].

Особливу увагу треба звертати на очищення стічних вод, в яких можуть знаходитися ціаністи з'єднання або інші отруйні речовини. Для знешкодження ціановмісних стічних вод рекомендується використовувати луг (вапняне молоко) і хлорвмісні компоненти (рідкий хлор, гіпохлорит натрію, гіпохлорит кальцію, хлорне вапно і ін.). Кількість лугу повинна забезпечувати підтримку рН (водневий показник) стічних вод в межах 10,5 – 11,0. Дозу активного хлора приймають рівним 3,5 частинам по масі на 1 частину ціану. Потім ціановмісні води перед відстійниками підкислюють до нейтрального середовища. Для очищення від ціанидів можливе також застосування марганцевокислого калія і перекису водню. При значних концентраціях ціанид-іонів (наприклад, стічні води ділянок ціанування) доцільне застосування електрохімічного очищення [30].



## Висновки

У промислово розвинутих країнах науково-технічна революція привела до інтенсивного зростання обсягів виробництва з одночасним ускладненням технологічних процесів і засобів праці. Таке положення логічно викликало зміну умов праці. Поряд з удосконаленням технологій, автоматизацією процесів, використанням робототехнічних комплексів і застосуванням інших напрямків, що полегшують працю, практично на кожному робочому місці існують негативні фактори, що створюють загрозу для здоров'я, а в деяких випадках і для життя працюючої людини. Причому, розробка сучасних і удосконалювання відомих технологій, створення нових чи удосконалення існуючих антропогенних об'єктів часто викликає виникнення нових або підвищення інтенсивності існуючих негативних виробничих факторів.

У зв'язку з цим сучасний підхід до вирішення завдань охорони праці повинен полягати не в апостеріорній констатації фактів негативного впливу умов праці на здоров'я персоналу і ліквідації таких наслідків, а базуватися на розробці відповідних організаційних і технічних рішень з нормалізації умов праці на етапі проектування підприємств, технологічних процесів і конкретних робочих місць.

## ВИСНОВКИ

Для підвищення зносостійкості, жаростійкості та корозійної стійкості деталей машин та інструменту досить широко застосовують різноманітні технологічні процеси нанесення захисних покриттів.

Тому проведення досліджень з напрямку дифузійного хромування поверхні деталей та інструменту є актуальною задачею сьогодення.

Літературний аналіз за напрямком досліджень показує, що найбільш перспективним методом для отримання якісних хромових покриттів на деталях машин та інструменті є дифузійна металізація. Даний метод дозволяє підвищити експлуатаційні властивості матеріалів за рахунок отримання на поверхні відносно товстих (5-20 мкм) дифузійних хромових покриттів.

Аналіз отриманих покриттів підтверджує висновки про те, що збільшення вмісту вуглецю в основі призводить до збільшення товщини карбідного покриття, а наявність легувальних елементів, в більшості випадків призводить до підвищення мікротвердості.

З точки зору економічної ефективності, застосування захисних покриттів призводить до підвищення вартості технологічного процесу, але в той же час термін служби деталей та інструменту з хромовими дифузійними покриттями зростає у 2-3 рази.

При проведенні наукових досліджень, як і при реалізації виробничих процесів не слід забувати про охорону праці, яка є важливою складовою будь-якого виробництва.

Узагальнюючи результати досліджень, дифузійне хромування можна рекомендувати для підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин та металообробного інструменту.

### СПИСОК ВИКРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Говорун Т.П. Методика отримання та властивості зносостійких покриттів на основі Ti і N та Ti, Al і N [Текст] / Т.П. Говорун, О.В. Пилипенко, М.В. Говорун, К.О. Дядюра // Журнал нано- та електронної фізики. - СумДУ. - 2017. - Том 9 № 2. - С.02026-1 - 02026-7
2. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина I: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 51 с.
3. Дегула А.І. Підвищення властивостей сталей і твердих сплавів нанесенням багат шарових карбідних та карбооксидних дифузійних покриттів на основі титану, ванадію і хрому: автореферат дисертації на здобуття вч. ст. канд. техн. наук: 05.16.01 - Київ 2010, - 22 с
4. Покриття у приладобудуванні : монографія / В. С. Антонюк. Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко та ін. - Київ : НТУУ «КПІ». Вид-во «Політехніка». 2016. - 360 с.
5. Дегула А.І. Підвищення властивостей сталей і твердих сплавів нанесенням багат шарових карбідних та карбооксидних дифузійних покриттів на основі титану, ванадію і хрому: дисертація на здобуття вч. ст. канд. техн. наук: 05.16.01 - Київ 2010, - 163 с
6. Долгіх В. Ю. Дифузійне хромування безвольфрамового твердого сплаву КХН15 [Текст] / В. Ю. Долгіх // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. — Суми : СумДУ, 2004. — С. 70-71.
7. Лазаренко Н. М. Дифузійне хромування сталей та твердих сплавів [Текст] / Н. М. Лазаренко, Н. І. Васянович, А. І. Дегула // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, Суми, 18-22 квітня 2011 року / Ред. кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. — Суми : СумДУ, 2011. — Ч.2. — С. 111.
8. Іжик В. М. Вплив умов гальванічного хромування на якість утвореного покриття [Електронний ресурс] / В. М. Іжик, О. В. Кислова // Сучасні

- технології у промисловому виробництві : матеріали та програма X Всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Суми, 18–21 квітня 2023 р. / ред.кол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. — Суми : СумДУ, 2023. — С. 114.
9. Петрик Е. А. Особливості електролітичного хромування та їх відображення в технологічному процесі [Електронний ресурс] / Е. А. Петрик, Ю. В. Борисенко // Технології та дизайн. - 2020. - № 1 (34). - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/td\\_2020\\_1\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2020_1_17)
  10. Gudz G. S. Визначення взаємозв'язку температури електроліту та вагомих чинників процесу хромування під час відновлення деталей машин / Gudz G. S., Herys M. I., Zakhara I. Y., Ostashuk M. M. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2018. – 28(5), 93-96. <https://doi.org/10.15421/40280520>
  11. Деклараційний патент на винахід №30333 А від 15.11.2000, бюл.№6/2000. Спосіб вакуумного дифузійного хромування сталевих деталей / Коваленко І.В.
  12. Патент на корисну модель №82656 від 12.08.2013, бюл.№15/2013. Порошкова суміш для дифузійного хромування / Кримов В.М.
  13. Патент України №112605 від 26.09.2016, бюл.№18/2016. Спосіб дифузійного хромування деталей комплексним методом / Стецько А.Є.
  14. Патент України №117077 від 11.06.2018, бюл.№11/2018. Спосіб дифузійного хромування сталевих виробів комплексним методом / Стецько А.Є.
  15. Патент України №119296 від 27.05.2019, бюл.№10/2019. Спосіб дифузійного хромування сталевих виробів / Стецько А.Є.
  16. Холявко В. В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів [текст]: навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності 132 – Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / В. В. Холявко, І. А. Владимирський, О. О. Жабинська. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 156 с.
  17. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Матеріалознавство» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої

- освіти зі спеціальності 132 Матеріалознавство / Укл.: Лисенко О.Б, Калініа Т.В. Кам'янське, ДДТУ, 2019-36 с.
18. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Металографічний аналіз металів та сплавів» з дисципліни «Матеріалознавство» для студентів напряму підготовки 6.050402 «Ливарне виробництво» / Укл.: доцент Калініна Т.В., професор Буря О.І., Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2015. - 16 с.
19. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи із дисципліни «Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів», Визначення твердості матеріалів: укладачі: А. І. Дегула, Т. П. Говорун, Н.А. Харченко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 23 с.
20. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів» : у 2 частинах. Ч. 1. Випробування металів / укладачі: В.О. Пчелінцев, А. І. Дегула, Т. П. Говорун. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 53 с.
21. Методичні вказівки до лабораторної роботи на тему «Застосування програмного забезпечення для рентгеноструктурного аналізу» з курсу «Основи комп'ютерного матеріалознавства» укладачі: М. В. Карпець, А. І. Дегула, О. М. Мисливченко. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – 30 с.
22. Рентгенівські дифрактометри. Електронний ресурс. Режим доступу – [https://www.macrolab.com.ua/catalog/rentgenovskye\\_difraktometry/](https://www.macrolab.com.ua/catalog/rentgenovskye_difraktometry/)
23. Економіка підприємства : підручник / під заг. ред. д.е.н., проф. Ковальської Л.Л. та проф. Кривов'язюка І.В. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2020. 700 с.
24. Бойчик І.М Економіка підприємства: підручник. / І.М.Бойчик. – К.: Кондор - Видавництво, 2016. – 378 с.
25. Лойко В.В., Макаровська Т.П. Економіка підприємства: [навч. посібн.] / В.В. Лойко, Т.П. Макаровська – К.: КНУТД, 2015. – 267 с.

26. Охорона праці : рекомендації до виконання розділу в дипломному проекті бакалавра для студентів технічних спеціальностей / уклад. : Л. В. Дементій, Г. Л. Юсіна. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – 164 с.
27. Про затвердження правил охорони праці при термічній обробці металів. Наказ від 18.12.2007 № 315. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 28 січня 2008 р. за № 66/14757
28. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів.
29. Кравченко О.Л. Дослідження впливу режимів технологічного процесу дифузійного насичення на властивості вал-шестерні: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістр; спец.: 132 – матеріалознавство / О.Л. Кравченко; наук. керівник А.І. Дегула. – Суми: СумДУ, 2018. – 75 с.
30. Серіков Я. О. Основи охорони праці: Навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти. – Харків, ХНАМГ, 2007. - 227с.
31. ДСТУ EN 563-2001 Безпечність машин. Температури поверхонь, доступних для дотику. Ергономічні дані для встановлення граничних значень температури гарячих поверхонь (EN 563:1994, IDT).

## ДОДАТОК