

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра
Бакалавра (Магістра)

***Розроблення та вдосконалення технології формування
зносостійких титанових покриттів із дослідженням їх
структури та властивостей***

Назва теми

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 132 Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва

Шифр КРМ МТВА 25.24345.000 ПЗ

Виконав студент(ка) 2-го курсу
група МТВАм 24-1
Шифр


Підпис

Олег КУДІН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник д-р техн. наук, професор
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

Павло КАПЛУН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ
Посада


Підпис

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва


Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 05 грудня 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»
Освітньо-професійна програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

13 жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кудіну Олега Віталійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Розроблення та вдосконалення технології формування зносостійких титанових покриттів із дослідженням їх структури та властивостей».

керівник роботи Каплун Павло Віталійович, д-р.техн.наук, професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2025 р. № 65 (Д28)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 1 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали практики; зразки із сформованими титановими покриттями на сталях 45, У8А та сплавах ВК8 та Т15К6; твердоміри ТШ2, ТК2, ПМТ-3, мікроскоп МИМ-2, машини тертя; реактиви; полірувальні машини для виготовлення шліфів; професійне обладнання для вивчення мікроструктур; технологічне обладнання для нанесення покриттів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз літературних джерел та стану проблеми за темою магістерської роботи.

2. Вибір теоретичного обґрунтування та методів досліджень.

3. Методичний підхід до експерименту та характеристика здобутих результатів.

4. Технологічний розділ.

5. Техніко-економічна оцінка та охорона праці і безпека.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Графічну частину проекту представити у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _----

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2025</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.10.2025</i>	
3	<i>Конструкторський розділ</i>	<i>10.11.2025</i>	
4	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11.2025</i>	
5	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>22.11.2025</i>	
6	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	<i>01.12.2025</i>	
7	<i>Нормоконтроль проекту</i>	<i>05.12.2025</i>	
8	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>05.12.2025</i>	

Студент


Підпис

Керівник роботи


Підпис

Олег КУДІН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Павло КАПЛУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 83 сторінки, кількість рисунків – 31, таблиць – 10, додатків – 1, кількість джерел згідно із переліком посилань – 32.

Об'єкт дослідження: вплив процесів ХТО титанування та титанування з подальшим плазмовим азотуванням на структуроутворення, і як наслідок, механічні та експлуатаційні властивості сталей та сплавів.

Мета роботи: дослідження способів формування дифузійних титанових шарів на сталях і твердих сплавах, оцінювання будови та характеристик змінених поверхонь для встановлення параметрів обробки, що гарантують зростання стійкості до спрацювання матеріалу.

Результати та їх новизна: встановлено особливості формування структури та фазового стану дифузійних шарів, а також параметрів міцності модифікованої зони деталей, що функціонують під дією тертя та зношування. Коригування температури, тривалості насичення й складу реагентів суттєво змінює як товщину покриття, так і експлуатаційні механічні характеристики.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: результати цих досліджень механізмів структуроутворення під час дифузійного насичення дає змогу цілеспрямовано регулювати будову й механічні характеристики захисних шарів, забезпечуючи формування покриттів із прогнозованими експлуатаційними параметрами.

Перелік ключових слів: СТРУКТУРА, ТЕРТЯ, ХІМІКОТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ДИФУЗІЙНІ ПОКРИТТЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

Перелік умовних позначень

SEM (Scanning Electron Microscopy) – сканувальна електронна мікроскопія, ефективний інструмент для отримання детальних зображень поверхні, що формується під час зондування матеріалу сфокусованим електронним променем.





XRD (X-Ray Diffraction) – метод структурного аналізу, призначений для дослідження кристалічної організації речовини. Принцип ґрунтується на дифракційному відхиленні рентгенівського випромінювання при його взаємодії з атомними площинами решітки, що утворює характерну інтерференційну картину.

XRF (X-Ray Fluorescence) – техніка ідентифікації елементного складу, де матеріал під дією рентгенівського пучка генерує флуоресцентне випромінювання. Отримані спектральні лінії мають енергетичні параметри, властиві кожному елементу, що дає змогу встановити їх наявність та орієнтовну концентрацію.

EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) – енергетично-дисперсійна спектроскопія, призначена для якісно-кількісного визначення елементів. Під час опромінення електронним потоком зразок випромінює характеристичні рентгенівські сигнали, які аналізують для встановлення складу досліджуваної ділянки.

PVD (Physical Vapor Deposition) – фізичне осадження з парової фази, технологія формування тонких покриттів, у якій вихідний матеріал переходить у пароподібний стан, після чого конденсується на підкладці та утворює рівномірний шар.

	Зміст	С.
	Вступ	7
1	АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ	10
1.1	Технології формування титанових покриттів	11
1.2	Технології формування дифузійних титанових покриттів	12
1.3	Титанові покриття на сталях та сплавах	15
1.4	Покриття на основі титанових сполук	16
1.5	Основні властивості титанових зносостійких покриттів	17
1.6	Обґрунтування вибору титанування для підвищення зносостійкості сталей	18
1.7	Підвищення зносостійкості сталей і твердих сплавів методом азототитанування	20
1.8	Патентний огляд за темою	22
2	МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	27
2.1	Вибір матеріалів	27
2.2	Мікроструктурний аналіз	30
2.3	Визначення твердості	35
2.4	Рентгеноструктурний аналіз	47
2.5	Рентгеноспектральний аналіз	48
3	МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗДОБУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	51
3.1	Фазовий склад покриттів	51
3.2	Хімічний склад покриттів	57
3.3	Мікроструктура покриттів	60

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Кудін			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Каплун				5	83
Реценз.					<i>ХНУ, МТВАм-24-1</i>		
Н. Контр.		Бабак					
Затверд.		Диха					
					Розроблення та вдосконалення технології формування зносостійких титанових покриттів із дослідженням їх структури та властивостей		

4	ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	65
4.1	Технологія титанування	60
4.2	Технологічне обладнання для процесу титанування	66
4.3	Розвиток і принцип дії плазмового азотування	68
4.4	Технологічне обладнання для плазмового азотування	70
4.5	Аналіз технологій титанування та тандемного процесу «титанування → плазмове азотування»	73
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА	76
5.1	Техніко-економічна оцінка ефективності процесів титанування та тандемної обробки	76
5.2	Охорона праці та безпека під час дифузійної та плазмової обробки	77
	Висновки	79
	Список використаних джерел	80
	Додатки	83

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасному машинобудуванні та матеріалознавстві однією з ключових задач є забезпечення високої зносостійкості та надійності деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, дії високих температур, корозійно-активних середовищ та змінних навантажень. Одним із найбільш ефективних шляхів підвищення ресурсу таких елементів є застосування титанових покриттів, сформованих за сучасними технологіями осадження та модифікації поверхневих шарів. Ці покриття демонструють стабільні експлуатаційні характеристики, високі трибологічні властивості та значну корозійну стійкість, що визначає їх конкурентоспроможність у промисловому застосуванні.

Структура, фазовий склад і функціональні властивості титанових покриттів істотно залежать від методу формування, температурно-часових параметрів процесу, енергії іонного потоку, складу реагентів та режимів наступних термообробок. Відомо, що титанові сполуки – TiC, TiN, TiCN, TiB₂ – характеризуються мікротвердістю на рівні 20–40 ГПа та здатністю утворювати багат шарові структури з підвищеною стійкістю до тертя й окиснення. Оптимальне поєднання шарів титанових фаз дозволяє досягти максимального ефекту зміцнення та мінімального коефіцієнта тертя.

Нині промисловість застосовує широкий спектр методів нанесення титанових покриттів: PVD- та CVD-технології, плазмове напилення, іонно-плазмове осадження, дифузійне титанування та комбіновані способи. Кожен із них забезпечує формування покриттів різної щільності, адгезії, ступеня дефектності та фазового складу. Особливо перспективними є методи, що забезпечують **багат шарову структуру з кількома фазами проникнення**, оскільки такі покриття характеризуються підвищеною твердістю, тріщиностійкістю та стабільністю властивостей у складних експлуатаційних умовах.

Таким чином, **розроблення та вдосконалення технологій формування високозносостійких титанових покриттів**, а також дослідження

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

закономірностей структурування та еволюції властивостей поверхневих шарів є актуальним науковим завданням, важливим для підвищення довговічності деталей машин у сучасних умовах експлуатації.

Метою роботи була розробка та вдосконалення технології формування зносостійких титанових покриттів, дослідження їх структури, фазового складу та механічних властивостей задля визначення параметрів процесу, що забезпечать підвищення зносостійкості та стабільності експлуатаційних характеристик.

Задачі дослідження:

- провести патентно-інформаційний аналіз сучасних методів формування титанових покриттів і проблем їх застосування;
- дослідити мікроструктуру та структурно-фазовий стан отриманих покриттів;
- визначити механічні властивості поверхневих шарів (мікротвердість, адгезію, тріщиностійкість);
- оцінити зносостійкість модифікованих зразків у моделях тертя;
- встановити вплив технологічних параметрів на товщину, фазовий склад і властивості покриття;
- обґрунтувати оптимальні режими процесу, що забезпечують максимальне підвищення довговічності деталей.

Об'єктом дослідження були технологічні параметри формування титанових покриттів та їх вплив на структуроутворення і механічні властивості поверхневих шарів сталей і сплавів.

Предметом дослідження стали структура, фазовий склад, мікротвердість, трибологічні та експлуатаційні властивості одно- та багатошарових титанових покриттів, сформованих різними технологічними методами.

У процесі роботи застосовувались такі **методи дослідження**, як: мікроструктурний аналіз (оптична та растрова електронна мікроскопія), рентгеноструктурний і рентгеноспектральний аналіз, вимірювання

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікротвердості, дослідження зносостійкості в умовах тертя, профілометрія, енергодисперсійний аналіз.

Встановлено закономірності структуроутворення титанових покриттів залежно від режимів їх формування; визначено взаємозв'язок між параметрами осадження, фазовим складом і механічними властивостями поверхневих шарів. Показано, що варіація температурно-часових режимів та енергетичних параметрів процесу дозволяє керувати товщиною, щільністю і структурною однорідністю покриття, забезпечуючи суттєве підвищення його зносостійкості.

Отримані результати дозволяють оптимізувати технологію нанесення титанових покриттів для деталей машин, підвищити їх довговічність та надійність в умовах тертя й корозії. Поглиблене розуміння механізмів структуроутворення відкриває можливості для цілеспрямованого керування властивостями покриттів залежно від умов експлуатації та вимог до виробів.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

Для збільшення довговічності вузлів і робочих елементів, що мають інтенсивний контакт із середовищем тертя, застосовують спеціалізовані титанові шари. Необхідність забезпечення стабільної роботи механізмів у складних умовах експлуатації зумовлює потребу у зміцненні поверхні, оскільки саме зовнішній мікрорівень визначає надійність конструкції. Використання зносостійких титанових покриттів є дієвим способом підвищення ресурсу деталей та інструментів.

Функціональні характеристики металевої основи значною мірою залежать від наявності міцних фаз – нітридів, карбідів, боридів, що формуються під час модифікації. Такі структури покращують твердість, опір руйнуванню та стабільність у агресивних середовищах.

У промислових процесах титанові шари застосовують для усунення кількох поширених проблем:

Абразивне зношування. У виробничих циклах, де поверхня піддається стиранню, титанові покриття мінімізують втрати матеріалу, забезпечують стабільну геометрію та подовжують ресурс роботи.

Корозійні впливи. У середовищах із високою хімічною активністю титанові модифіковані поверхні забезпечують стійкість до руйнування, що важливо для обладнання хімічних, харчових і морських систем.

Температурні навантаження. В установках з високим тепловим навантаженням титанові покриття зберігають цілісність, мікротвердість та структурну стабільність, що робить їх придатними для енергетичних, металургійних і термічних агрегатів.

Механічні впливи. У важких машинобудівних комплексах захисні титанові шари знижують ризик деформацій, мікроруйнувань та втрати функціональних властивостей під час дії значних навантажень.

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1.1 Технології формування титанових покриттів

Створення захисних титанових шарів ґрунтується на керованому перенесенні активних елементів у поверхневий мікрорівень з подальшим утворенням стабільних фаз. У процесах, що відбуваються за підвищених температур, відбувається дифузійне проникнення металу або його сполук у поверхневу зону деталі, що забезпечує формування зміцнених структур. Подібні методи застосовують як для підвищення функціональної стійкості, так і для отримання декоративних або спеціальних технологічних властивостей виробів.

Отримання титанових покриттів, які демонструють високу зносостійкість, корозійну інертність і стабільність у складних умовах роботи, є актуальним напрямом матеріалознавства. Ефективність таких шарів визначається не лише кількістю титану у фазах, а й умовами формування, структурною однорідністю, рівнем адгезії до основи та можливістю утворення багатофазних комбінацій.

У промисловості використовують кілька груп технологій, що дають змогу формувати титанові покриття з різними структурними характеристиками, товщиною та властивостями. Серед найбільш поширених – фізичне осадження з парової фази (PVD), хімічне осадження з парової фази (CVD), іонно-плазмові методи, термодифузійні процеси, плазмове напилення та комбіновані технології.

Фізичне осадження з парової фази (PVD)

До цієї групи належать вакуумне напилення, катодно-дугові процеси та магнетронне осадження. У таких умовах титан переходить у парову фазу, осідає на поверхні деталі й утворює щільний шар з контрольованою товщиною. PVD-покриття характеризуються високою твердістю, низькою шорсткістю та добрими трибологічними параметрами. Їх використовують для інструментів, штампів та деталей, що працюють у режимі тертя з мінімальним змащуванням.

Хімічне осадження з парової фази (CVD)

Метод ґрунтується на реакційній взаємодії газових компонентів, що містять титан, з нагрітою поверхнею. Під час цього утворюються хімічно

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

стабільні фази: TiC, TiN, TiB₂ та інші сполуки. Перевагою є глибоке проникнення активних атомів, утворення шарів зі значною товщиною та високою щільністю.

Іонно-плазмові процеси

Ці технології забезпечують передачу енергії в іонізованому середовищі, що сприяє утворенню тонких і надтвердих структур. Підвищена енергія іонного потоку покращує адгезію та формує дрібнозернисті шари з високими експлуатаційними властивостями. Іонно-плазмові покриття широко застосовуються для зміцнення деталей двигунів, штампового оснащення й різального інструменту.

Термічне та дифузійне титанування

У цих процесах титан надходить у поверхню деталі через тверді, газоподібні або рідкі середовища. Формуються фазові структури з чітким градієнтом концентрацій, що підвищує стійкість до втоми, корозії та термічних циклів. Дифузійні шари відомі високою міцністю та стабільністю навіть за сильних навантажень.

Плазмове напилення та комбіновані методи

Плазмове напилення передбачає нагрівання титанових часток до високих температур із наступним осадженням на поверхні виробу. Комбіновані процеси об'єднують властивості кількох методів, що дозволяє отримувати шари з унікальними характеристиками – наприклад, твердість PVD при товщині CVD або адгезію, характерну для дифузійних процесів.

1.2. Технології формування дифузійних титанових покриттів

Метою модифікації поверхні титановими сполуками є покращення експлуатаційних характеристик деталей через контроль структури та хімічного складу поверхневого шару [1,2]. Під час формування титанових покриттів у штучно створених активних середовищах реалізуються три основні процеси:

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- активація середовища, що містить титанові компоненти, здатні створювати легувальні елементи поверхневого шару;
- хемосорбція активних атомів і поглинання їх частиною поверхні оброблюваного матеріалу;
- формування хімічних зв'язків між титаном і атомами основи завдяки його дифузійному проникненню.

Перший процес визначається тим, який склад має активне середовище, яким є стан реагентів та характер їх взаємодії з поверхнею деталі. Це впливає на швидкість перенесення атомів титану [2]. Другий процес обумовлений різницею хімічних потенціалів компонентів, прагненням системи мінімізувати поверхневу енергію та тим, які реакції відбуваються на межі розділу фаз. Хемосорбційний механізм включає змочування, утворення активних комплексів і адсорбцію газових та парових компонентів. Ефективність третього процесу залежить від природи титану, температури та дифузійних властивостей середовища [2].

Адсорбція атомів титану здійснюється під час прямої взаємодії активних частинок із поверхнею виробу. Важливо забезпечити відновлення оксидної плівки, яка неминуче утворюється на зовнішньому шарі, оскільки вона перешкоджає проникненню атомів. Для видалення таких плівок застосовують відновлювальні та травильні склади. При використанні порошкових сумішей необхідно забезпечити відновлення оксидів на частинках титанових компонентів [2].

За фізико-хімічними характеристиками середовищ існує чотири основні методи формування титанових покриттів [3]:

- насичення з твердої фази;
- насичення з парової фази;
- насичення з рідкої фази;
- насичення з газової фази.

Насичення з твердої фази. Метод реалізується, коли пружність парів титану є нижчою за тиск його парів у суміші [3]. Суть полягає у безпосередньому контакті порошку, що містить титан, з поверхнею деталі. Перенесення речовини відбувається у місцях контакту частинок із металевою основою. Процес проходить при температурах 1273–1673 К. Якість покриття визначається площею контакту частинок і стабільністю активної фази. Перевагою методу є технологічна простота; недоліком – поява частинок порошку, приварених до поверхні, що знижує чистоту шару [2].

Насичення з парової фази. Покриття формуються за рахунок випаровування титану, перенесення в паровий стан та конденсації його на поверхні деталі [1,2]. Пари адсорбуються і вступають у реакцію з нагрітою основою. Контактний спосіб передбачає випаровування титану безпосередньо біля поверхні; безконтактний – на певній відстані. Метод ефективний для титанових сполук із високою або низькою пружністю парів. Процес проводять при 1273–1723 К. Переваги: висока якість і відсутність крихких фаз. Недоліки: складність апаратури, високі температури, значні втрати титану [3].

Насичення з рідкої фази. Деталі занурюють у розплав, що містить титан у вільному або зв'язаному стані [1,2]. При взаємодії поверхні з активними компонентами формуються тверді титанвмісні сполуки. Якщо титан зв'язаний, його атомарний стан утворюється внаслідок реакцій обміну. Температура процесу становить 1173–1373 К при витримці 1–7 годин [10]. Метод має значні переваги: короткий час, висока якість шарів, можливість поєднання із загартуванням. Недоліки: нестабільність розплавів, велика витрата компонентів, корозія ванн.

Насичення з газової фази. Дифузний титан утворюється в реакціях газових сполук із нагрітою поверхнею деталі [10]. Галогеніди титану забезпечують його транспорт у газовій фазі. Осадження супроводжується термічним розкладом, дисоціацією, відновленням та реакціями обміну. Метод

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

здійснюється при 1173–1773 К. Контактний спосіб використовує порошкові суміші з активаторами (хлористий амоній тощо) [8,12,13]. Його переваги: простота, економічність, якісні покриття. Недоліки: енергоємність, погіршення чистоти поверхні, складність контролю.

Безконтактний газовий спосіб усуває більшість проблем, оскільки поверхня не контактує з порошком і знаходиться лише в активній газовій фазі. Проте він має суттєві недоліки: вибухонебезпечність середовища з воднем, великі витрати реагентів, екологічні обмеження.

1.3. Титанові покриття на сталях та сплавах

Титанові шари на поверхні сталей забезпечують поєднання фізичних, механічних та хімічних властивостей, що значно підвищує функціональну надійність оброблених виробів [10]. Такі покриття можуть формуватися у вигляді одношарових структур або багатшарових систем, де кожен рівень виконує окрему зміцнювальну чи захисну функцію. Підвищення температури обробки активізує дифузійні процеси в зоні контакту та збільшує реакційну здатність газової фази через пришвидшення утворення хлоридів титану, покращення транспортування активних частинок і зростання тиску парів у реакційному просторі. За однакових умов товщина титанових покриттів збільшується зі зростанням температури, що пов'язано з інтенсифікацією дифузії та підвищенням швидкості хімічних взаємодій.

Інтенсивне формування титанових фаз, зокрема TiC і TiN, спостерігається при температурах, що перевищують поріг активізації хлоридних комплексів титану. Для сталей із низьким вмістом вуглецю можливість утворення карбідних фаз обмежена нестачею атомів вуглецю в матриці, що знижує ефективність росту шарів, сформованих за рахунок дифузійного перенесення [8]. Це потребує використання спеціальних активаторів або введення додаткових джерел вуглецю в процесі модифікації.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

На початковому етапі формування покриттів спостерігається значна швидкість зростання товщини титанових шарів, після чого темп поступово зменшується зі збільшенням часу витримки [2, 6]. Найбільш помітно це під час нанесення покриттів на основі TiC та TiN на поверхню технічного заліза, коли відхилення від параболічної залежності «товщина – тривалість» є значними, а у перші години процес наближається до лінійної форми. Подібна поведінка спостерігається й у разі формування покриттів на основі TiV₂ або змішаних титанових фаз, коли початкове насичення проходить з високою швидкістю, після чого темп росту стабілізується та переходить у дифузійно-обмежений режим [8].

Швидкість структурного формування також залежить від типу сталі, мікроструктури матриці та наявності легувальних елементів, здатних впливати на дифузійні параметри. У випадку легованих сталей титанові шари демонструють більш рівномірний ріст, оскільки наявність хрому, молібдену або ванадію сприяє формуванню стабільних інтерметалідних фаз, що виконують роль дифузійних бар'єрів та знижують градієнт концентрацій.

Загалом механізм росту титанових покриттів визначається взаємодією хімічних реакцій, кінетики дифузії та параметрів середовища. Розуміння закономірностей формування цих шарів є ключовим для створення покриттів із високою зносостійкістю, стабільною мікроструктурою та прогнозованими експлуатаційними властивостями.

1.4. Покриття на основі титанових сполук

Під час тривалої термообробки титанових фаз у кисневому середовищі спостерігаються виражені зміни у поверхневому шарі та у зоні продуктів окиснення [2, 3, 12]. При температурі близько 800 °C тонка оксидна плівка набуває темного забарвлення, а край зразка залишається рівномірним. У напрямку від центру зразка формуються ділянки з підвищеним вмістом вуглецю, причому на межі фаз «оксид – титанова фаза» концентрація досягає максимуму.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

При нагріванні до 900 °С характер утвореної плівки змінюється: вона стає двошаровою, з білим зовнішнім рівнем і внутрішнім темнішим пористим прошарком. На межі фаз з'являється тонкий прошарок металевого титану. Як і при нижчій температурі, у напрямку до межі фаз інтенсивно виділяється вуглець, що сприяє зміні структури приповерхневої зони.

Подальше підвищення температури до 1000–1100 °С викликає нові структурні перетворення. Оксидна плівка зберігає двошарову будову, однак зовнішній світлий рівень стає значно товщим, а внутрішній пористий шар виражений більш чітко. Металевий прошарок на межі «оксид – титанова фаза» збільшується у товщину. У приповерхневій області, що межує з окалиною, спостерігається значне виділення вуглецю. В оксидному шарі фіксують два металеві рівні, відокремлені один від одного зонами з оксидними фазами. Утворюються металеві кільця, що є наслідком механізму взаємодії титанових фаз із киснем, процесу, який супроводжується виділенням вуглецю та формуванням титанового металевого шару.

У високотемпературному діапазоні (понад 900 °С) рутійлові структури (TiO₂), що виникають у процесі окиснення титану та його карбідів, утворюються за механізмом двосторонньої дифузії. Металевий титан зберігається у шарі плівки завдяки переважному його переміщенню до зовнішньої межі фаз, унаслідок чого кисень практично не бере участі у зворотній дифузії. Щільний зовнішній оксидний рівень і внутрішній темний пористий шар виникають у результаті взаємодії оксидних та карбідних фаз, часткового розчинення кисню у титані та появи оксикарбідних структур, що забезпечують характерний вигляд окалини.

1.5. Основні властивості титанових зносостійких покриттів

Підвищена твердість. Титанові шари характеризуються значною мікротвердістю, що забезпечує опір механічним впливам та мінімізує утворення дефектів у зоні тертя.

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Стабільна адгезія. Покриття на основі титану формують міцний зв'язок із металевою основою, що сприяє тривалій роботі та запобігає відшаровуванню в умовах навантажень.

Опір абразивному зношуванню. Титанові фази демонструють високу стійкість до дії твердих частинок, що робить їх ефективними у середовищах з інтенсивним стиранням.

Корозійна інертність. Ряд титанових сполук має здатність зберігати структурну цілісність у агресивних чи вологих умовах, що забезпечує захист основи від руйнування.

Універсальність застосування. Поєднання високої твердості, міцності та хімічної стабільності дає змогу використовувати такі покриття в авіаційних, транспортних, медичних та промислових системах, де потрібна надійна робота поверхневих шарів.

1.6. Обґрунтування вибору титанування для підвищення зносостійкості сталей

Титан – перехідний елемент із атомним номером 22, відомий у промисловості завдяки поєднанню малої густини, високої міцності, стійкості до корозійних впливів та стабільності в агресивних середовищах [6]. Його інколи називають «металом нового покоління», що зумовлено поєднанням механічних, фізичних та хімічних властивостей. У природі він трапляється переважно у вигляді рутилу, ільменіту та інших мінералів, які широко поширені в земній корі, водних системах та ґрунтах [8]. Для промислового вилучення застосовують процеси Кролла та Хантера, що забезпечують отримання металу з високою чистотою. Найпоширенішою його сполукою є TiO_2 , що використовується як каталізатор та пігмент, тоді як $TiCl_4$ і $TiCl_3$ – важливі реагенти у хімічних технологіях [7, 9].

Титан легко утворює сплави із залізом, алюмінієм, ванадієм, молібденом та іншими елементами, що дозволяє створювати матеріали з високим

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

відношенням міцності до маси. Такі сплави широко застосовують у авіакосмічній техніці, енергетичному обладнанні, хімічних виробництвах, автомобільній галузі, медичних імплантатах, інструментах та спеціалізованому устаткуванні [7]. Металевий титан вирізняється антикорозійними властивостями та найвищим серед конструкційних матеріалів співвідношенням «міцність – маса» [6]. У чистому вигляді він може бути настільки ж міцним, як деякі сталі, але при цьому значно легший. Титан має дві алотропні модифікації та п'ять природних ізотопів, серед яких домінує ^{48}Ti [11].

Фізичні характеристики титану роблять його ефективним матеріалом для модифікації поверхні сталей. Метал має високу температуру плавлення (понад $1650\text{ }^\circ\text{C}$), низьку електро- і теплопровідність, здатність зберігати пластичність у безкисневих умовах та парамагнітні властивості [10]. Комерційні марки титану з чистотою 99,2 % демонструють міцність на розрив до 430 МПа при значно меншій масі, ніж у сталевих сплавів. Деякі титанові матеріали здатні досягати міцності понад 1400 МПа, що робить їх придатними для роботи в умовах високих навантажень [13]. При нагріванні вище $430\text{ }^\circ\text{C}$ спостерігається часткова втрата міцності, що вимагає дотримання температурних режимів при технологічній обробці [16].

Титан є твердим, немагнітним матеріалом із низькою теплопровідністю, що вимагає особливих умов механічної обробки: гострих інструментів, охолодження та контролю деформаційних процесів. Механічні властивості титанового металу та його сплавів дозволяють досягти значної втомної міцності, що важливо для деталей, які працюють у циклічних навантаженнях. Твердості титану зазвичай достатньо для більшості конструкцій, однак підвищена жорсткість досягається саме завдяки сполукам титану у вигляді нітридів, карбідів і боридів, які формуються на поверхні під час титанування [10].

Титанова фаза характеризується високою термічною стабільністю. Температура плавлення $1675\text{ }^\circ\text{C}$, температура кипіння понад $3200\text{ }^\circ\text{C}$, густина

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

близько $4,5 \text{ г/см}^3$, що відрізняє його від багатьох конструкційних матеріалів [16].
Перехід між алотропними формами супроводжується зміною теплоємності, а в окремих умовах може формуватися омега-фаза, характерна для високих тисків, яка впливає на пружні властивості та акустичну поведінку кристалічної решітки [17].

Усі ці властивості обґрунтовують доцільність використання титанування для сталей, оскільки утворені титанові фази здатні формувати тверді, хімічно інертні, дифузійно стабільні структури з високою адгезією, що забезпечує суттєве підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та експлуатаційної надійності оброблених деталей.

1.7. Підвищення зносостійкості сталей і твердих сплавів методом азототитанування

Дифузійне азототитанування є одним із ефективних способів формування зміцнених поверхневих шарів на сталях та твердих сплавах [2]. У процесі дослідження проаналізовано будову азототитанових покриттів та встановлено їхній вплив на властивості приповерхневої зони. Визначено фазовий склад отриманих структур і виміряно мікротвердість окремих компонентів, що дозволило оцінити їх внесок у загальну стійкість модифікованих шарів.

У роботі виконано мікроструктурний і рентгеноструктурний аналіз зразків після титанування та комбінованої обробки азотуванням і титануванням. Показано, що застосування послідовної модифікації створює умови для формування багатофазних шарів типу TiC–TiN. Такі покриття утворюються завдяки взаємодії титану з азотом і вуглецем у поверхневій зоні, що забезпечує появу карбідних та нітридних структур.

Встановлено, що покриття TiN–TiC демонструють підвищену зносостійкість порівняно з однофазними карбідними шарами. Згідно з експериментальними даними, їхній опір тертю перевищує властивості TiC

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

приблизно у 1,2–1,4 раза, що підтверджує доцільність використання комбінованих процесів для зміцнення сталей і твердих сплавів.

Титаноалітування твердого сплаву ВК8 у замкненому реакційному об'ємі.

У ході дослідження проаналізовано фазовий стан, хімічний склад та особливості структури поверхневих шарів титанованого і титаноалітованого твердого сплаву ВК8 [3]. Визначено мікротвердість модифікованих зон та встановлено залежність будови покриттів від параметрів технологічного процесу. Отримані дані підтверджують, що зміцнення пластин із твердого сплаву за рахунок титаноалітування забезпечує істотне підвищення їх експлуатаційних властивостей – у 2,6–3,5 раза порівняно з початковим станом.

Під час обробки встановлено формування багатошарових структур, у складі яких присутні інтерметаліди типу Co_2Ti , AlCoTi_2 , фази карбиду TiC та оксидні компоненти Me_2O_3 . Здійснюється перерозподіл вольфраму і кобальту у дифузійній зоні, а також спостерігається глибоке проникнення насичуючих елементів, насамперед алюмінію, у металеву основу. Такі перетворення сприяють формуванню градієнтної структури з високими міцнісними та трибологічними параметрами.

Підвищення стійкості різальних багатогранних пластин із ВК8, отриманих за допомогою титаноалітування, у процесі обробки сталі У8А приблизно у 3,1 раза порівняно з серійними зразками дає підстави рекомендувати даний процес для промислового застосування. Технологія забезпечує стабільну роботоздатність твердосплавних елементів і може бути використана для підвищення надійності інструменту, що працює у складних умовах навантаження.

Дослідження фазового та хімічного складу комплексних титановмісних покриттів.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

За результатами рентгеноструктурних досліджень визначено, що під час комбінованого хромотитанування сталей 45 та У8А на поверхні формується багатофазний шар, у складі якого присутні карбіди Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ та TiC [18]. Для дифузійних структур, отриманих методом хромованадіювання, характерна наявність карбіду $Cr_{23}C_6$ та карбіду ванадію VC . Рентгеноспектральний аналіз показує, що при послідовному хромотитануванні зазначених сталей у карбіді хрому вміст заліза вищий, ніж у титановому карбіді, що свідчить про інтенсивніше включення атомів основи у хімічну решітку хромових фаз. Також відзначено легування перехідної зони хромом, що впливає на формування стабільних структур у дифузійному шарі.

Комплексне дослідження фазового та хімічного складу дає можливість визначити раціональні параметри процесу, необхідні для одержання покриттів із прогнозованими характеристиками. Для вуглецевих та низьколегованих сталей, таких як сталь 20 або У8А, оптимальним є проведення хромотитанування при температурі 1000–1050 °С з витримкою 2 год. для насичення і 1 год. для титанування; у результаті формується шар товщиною 15–18 мкм. Процес хромованадіювання для інструментальних та конструкційних сталей (наприклад, 45 або Х12М) доцільно виконувати при тих самих температурних умовах з витримкою 2 год. для насичення і 2 год. для ванадіювання, що забезпечує формування шару 14–16 мкм.

Запропоновані режими дозволяють отримувати покриття з визначеним фазовим складом та передбачуваними експлуатаційними властивостями, що є важливим для практичного застосування комбінованих дифузійних процесів.

1.8. Патентний огляд за темою.

Патентний аналіз показує, що у сучасній інженерній практиці створення зносостійких титанових, титаново-нітридних та титаново-карбідних покриттів залишається одним із найактуальніших напрямів у галузі підвищення експлуатаційної надійності сталей і твердих сплавів. Ряд патентів, присвячених

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

методам дифузійного насичення, електродугового та плазмового формування титанових сполук, демонструє стійку тенденцію до використання комбінованих процесів титанування, нітрування й карбонітрування для одержання багатофункціональних шарів з високою твердістю, адгезією та корозійною інертністю. Виявлені технічні рішення спрямовані на підвищення ресурсу деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, та підтверджують доцільність застосування комплексних титанових покриттів, здатних забезпечити стабільні трибологічні властивості у широкому діапазоні навантажень і температур.

Спосіб нанесення зносостійкого титаново-карбідного та титаново-нітридного покриття на металеві та керамічні основи [US4411960A].

Спосіб одержання зносостійкого шару на деталях із металу або кераміки, що включає нанесення на підкладку сплаву на основі титану (Ti–Ni–Cu) з подальшим нагріванням до температур, за яких титан у поверхневій зоні перетворюється у карбід титану, нітрид титану, карбонітрид титану або борид титану. Відрізняється тим, що забезпечується дифузійне перетворення зовнішньої частини титанового сплаву у тверді фази TiC / TiN / Ti(C,N) / TiB₂, що формують щільне й зносостійке покриття на робочій поверхні виробу [15].

Спосіб одержання зносостійкого титаново-нітридного покриття електродуговим напиленням [EP0522438A1 / CN1019642B].

Спосіб нанесення покриття, що включає електродугове напилення принаймні одного дроту з титану (за необхідності попередньо нітридованого) у струмені азоту, який виконує роль плазмоутворювального та транспортного газу. Відрізняється тим, що під час розпилення розплавлені частинки титану безпосередньо реагують з азотом у польоті, утворюючи на поверхні підкладки рівномірний шар TiN із високою зносостійкістю та корозійною стійкістю, придатний для захисту елементів, що працюють в умовах тертя та агресивних середовищ [16].

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Спосіб дифузійного насичення титану та нітриду в матеріал з попереднім покриттям [US7438769B2].

Спосіб термохімічної обробки, що включає занурення попередньо покритого матеріалу в неелектролізовану сольову ванну, яка містить активований електролізований титан, із наступним нагріванням до температур дифузійного насичення. Відрізняється тим, що забезпечується одночасне перенесення титану та нітридних компонентів у покритий шар, формування дифузійної зони з підвищеною твердістю та зносостійкістю, а також можливість комбінувати цей процес із іншими покриттями (наприклад, карбідними або оксидними) для одержання багатофункціональних захисних систем [17].

Спосіб отримання локальних титанових дифузійних покриттів на сталях і чавунах [SU804715A1].

Спосіб локального титанування, що включає розміщення на вибраних ділянках сталевих або чавунних деталей легованих титанових форм у замкненому реакційному об'ємі з наступним нагріванням до температур дифузійного насичення. Відрізняється тим, що дозволяє формувати локальні титанові дифузійні шари саме в зонах найбільшого зношування, при цьому титанова форма може використовуватися багаторазово, що робить процес придатним для захисту габаритних деталей і дрібносерійного виробництва [18].

Склад для боротитанування вуглецевих сталей та спосіб дифузійного насичення [SU926067A1].

Розроблено порошковий склад для хіміко-термічної обробки, який містить компоненти боридо- та титанотворення (сполуки бору, алюмінію, фторидні добавки тощо), що забезпечує одночасне формування боридних і титановмісних фаз у дифузійному шарі. Спосіб передбачає нагрівання виробів із вуглецевої сталі (наприклад, У8) до температур близько 950 °С у середовищі зазначеної суміші з витримкою, за якої утворюється багатокомпонентний шар значної товщини. Відрізняється тим, що отримане боротитанове покриття має підвищену

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

твердість та зносостійкість порівняно з традиційними однофазними шарами, що дозволяє суттєво збільшити ресурс деталей у вузлах тертя [19].

Висновки за розділом.

У результаті проведеного аналізу літературних джерел, експериментальних даних та патентних розробок встановлено, що формування титанових та комплексних титановмісних покриттів є одним із найефективніших напрямів підвищення зносостійкості, твердості, корозійної стійкості та надійності сталей і твердих сплавів. Розглянуті методи – титанування, азототитанування, титаноалітування, хромотитанування та хромованадіювання – забезпечують можливість створення багатофазних дифузійних шарів зі складною структурою, які характеризуються високими експлуатаційними показниками та здатністю працювати в умовах інтенсивного тертя, температурних градієнтів і механічних навантажень.

Дослідження механізмів росту титанових карбідних, нітридних і оксикарбідних фаз, їх взаємодії з основою та впливу на властивості поверхневого шару дозволили встановити закономірності формування багатошарових систем та визначити оптимальні температурно-часові режими для різних марок сталей і сплавів. Показано, що комплексні покриття типу TiC–TiN та титано-алюмініві інтерметаліди істотно перевищують за зносостійкістю монофазні шари, забезпечуючи приріст працездатності в 1,2–3,5 рази.

Патентний огляд підтверджує значний інтерес до комбінованих методів модифікації поверхні та тенденцію до впровадження технологій, що поєднують дифузійні процеси із фізичними та хіміко-термічними методами осадження. Зростає популярність технологій, які дозволяють формувати функціонально-градієнтні структури та керувати властивостями покриттів за рахунок регульованої взаємодії титану з азотом, вуглецем, бором і хромом.

Таким чином, на основі отриманих результатів можна зробити висновок, що застосування титанових і комплексних титановмісних покриттів є

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

перспективним та технологічно виправданим способом значного підвищення ресурсу та надійності сучасних деталей і інструментів. Використання цих методів дозволяє досягти високої ефективності зміцнення при знижених витратах легувальних елементів і забезпечує широкий спектр можливостей для подальшого розвитку технологій поверхневої інженерії.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		26

2. МЕТОДИКА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір матеріалів

Для реалізації поставлених досліджень було підібрано такі матеріали:

Сталь 45 – конструкційна вуглецева сталь із вмістом вуглецю близько 0,45 %. Використовується під виготовлення елементів, що потребують середнього рівня міцності та твердості, зокрема зубчастих коліс, валів, осей та інших відповідальних машинних деталей.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 45 відповідно до ДСТУ 7809:2015

Хімічний елемент	%
Вуглець(C)	0,42 - 0,5
Кремній (Si)	0,17-0,37
Мідь (Cu), не більше	0,30
Марганець (Mn)	0,5 - 0,8
Нікель (Ni) , не більше	0,3
Фосфор (P), не більше	0,035
Хром (Cr)	1,25-1,62
Сірка (S), не більше	0,04

Таблиця 2.2 Температура критичних точок сталі 45, ДСТУ 7809:2015

Критична точка	° C
Ac1	730
Ac3	755
Ar3	690
Ar1	780
Mn	350

Таблиця 2.3 Механічні властивості за $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ДСТУ 7809:2015

Сортамент	Розмір, мм	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	d_5 , %	ϵ , %	Термообробка
Труби, ДСТУ 7809		588	323	14		
Пруток калібрований, ДСТУ 7809		590			40	відпал
Прокат, ДСТУ 7809	до 80	600	355	16	40	нормалізація
Прокат нагартований, ДСТУ 7809		640		6	30	
Прокат відпалений, ДСТУ 7809		540		13	40	
Стрічка нагартована, ДСТУ 7809		690- 1130		14		
Стрічка відпалена, ДСТУ 7809		440- 690				
Стрічка, ДСТУ 7809		600	355	16	40	

Сталь У8А – інструментальна високовуглецева сталь із вмістом приблизно 0,8 % вуглецю. Застосовується для виготовлення ріжучого інструменту – свердел, фрез, ножів та інших елементів, що потребують підвищеної твердості й зносостійкості.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад сталі У8А відповідно до ДСТУ 3833-98

Хімічний елемент	%
Вуглець(C)	0,75 - 0,84
Кремній (Si)	0,17-0,33
Мідь (Cu), не більше	0,25
Марганець (Mn)	0,17 - 0,28
Нікель (Ni) , не більше	0,25
Фосфор (P), не більше	0,025
Хром (Cr)	0,2
Сірка (S), не більше	0,018

Таблиця 2.5 Температура критичних точок сталі У8А, ДСТУ 3833-98

Критична точка	° C
Ac1	720
Ar1	700
Mn	245

Таблиця 2.6 Механічні властивості сталі У8А за T = 20 °C, ДСТУ 3833-98

Сортамент	σ_T , МПа	ϵ , %
Стрічка нагартована, 3833-98	740-1180	
Стрічка відпалена, ДСТУ 3833-98	640-740	10-15

Твердий сплав Т15К6 являє собою матеріал, що містить приблизно 6 % кобальту, близько 15 % титану та орієнтовно 79 % вольфраму. Його застосовують для виготовлення ріжучого інструменту, який повинен мати підвищену твердість і значну зносостійкість.

Таблиця 2.7 – Хімічний склад сплаву Т15К6, за нормативними документами

Хімічний елемент	%
Кобальт (Сo), не більше	6
Ванадій (W)	79
Титан (Ti)	15

2.2 Мікроструктурний аналіз

Мікроскопічний аналіз являє собою метод дослідження внутрішньої будови металів і сплавів із застосуванням металографічного мікроскопа та спеціально підготовлених зразків. Сукупність елементів, які формують будову матеріалу на малих масштабах, називають мікроструктурою. Цей метод дає змогу оцінювати зміну структури після впливу різних технологічних операцій – пластичної деформації, термічної обробки чи інших процесів, а також визначати форму, розміри та взаємне розташування структурних складових, до яких належать зерна, неметалеві включення та інші елементи. Зразок, підготовлений для аналізу, називають мікрошліфом. Процес виготовлення мікрошліфа включає вирізання зразка, обробляння абразивами та полірування досліджуваної поверхні до дзеркального стану. Для виявлення мікроструктури поверхню піддають травленню реактивами; для сталей найпоширенішим є 4-% розчин азотної кислоти в спирті або воді.

Для виконання мікроаналізу застосовують металографічні мікроскопи типу ММУ-3, МИМ-6 або МИМ-8, які працюють за принципом відбиття світлового потоку від непрозорої поверхні. Оптична схема передбачає проходження світла від джерела L через конденсор С, напівпрозорий освітлювач І та об'єктив О на поверхню зразка S. Конденсор та освітлювач формують паралельний пучок, а відбите випромінювання проходить крізь освітлювач і спрямовується в окуляр Е, де спостерігач отримує зображення. Якщо поверхня

шліфа не протравлена та має ідеально дзеркальний вигляд, відображення світла однорідне, тому структура матеріалу не проявляється.

Після травлення реактив нерівномірно взаємодіє з різними ділянками поверхні: частина зон розчиняється значно швидше, інші – помітно повільніше, або взагалі не піддаються дії травника. Унаслідок цього виникає мікрорельєф, який відтворює фактичну будову матеріалу. Зони з високими внутрішніми напруженнями, зокрема межі зерен, найінтенсивніше реагують із травником, тому після оброблення формують заглибини. Коли світло потрапляє в такі мікровпадини, воно розсіюється, утворюючи темні контрастні ділянки. Сукупність нерівномірно освітлених фрагментів створює мікроструктурний рисунок, який дає досліднику повну інформацію про будову поверхневого шару.

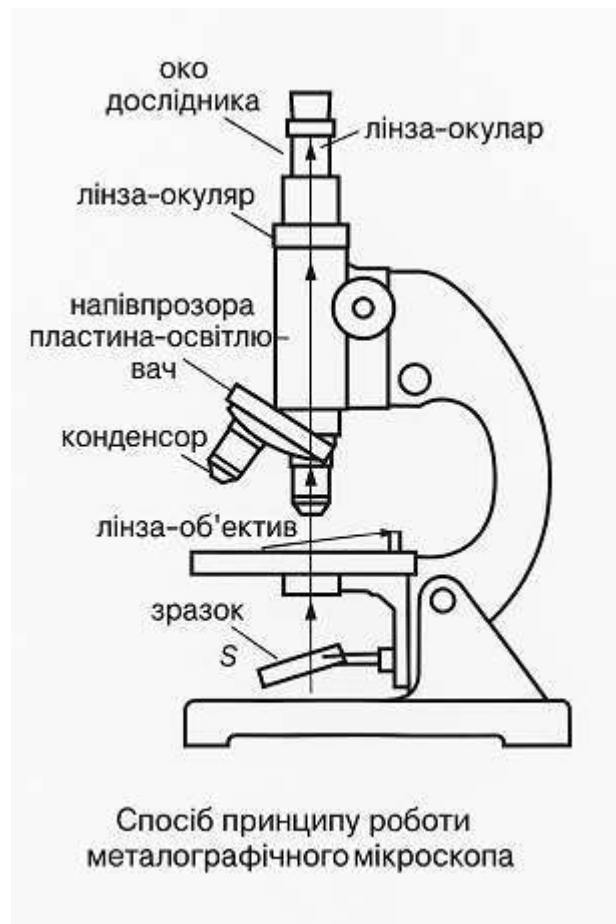


Рисунок 2.1 – Спосіб принципу роботи металографічного мікроскопа



Рисунок 2.2 – Металографічний мікроскоп.



Рисунок 2.3 – Схема що пояснює зображення поверхні мікрошліфа, яке спостерігається під мікроскопом «до травлення» та «після травлення».

На рисунку 2.3 виділені: тонкий шар текучого металу, що буде видалений при поліруванні, показані зерна металу, присутня контрастна ділянка травлення.

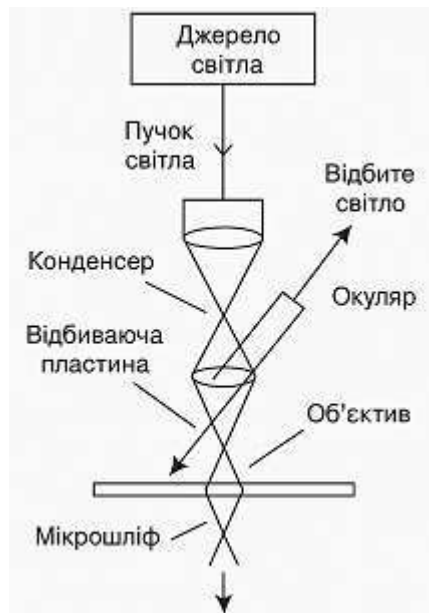


Рисунок 2.4 – Схема «Прохід світлового пучка в металографічному мікроскопі».

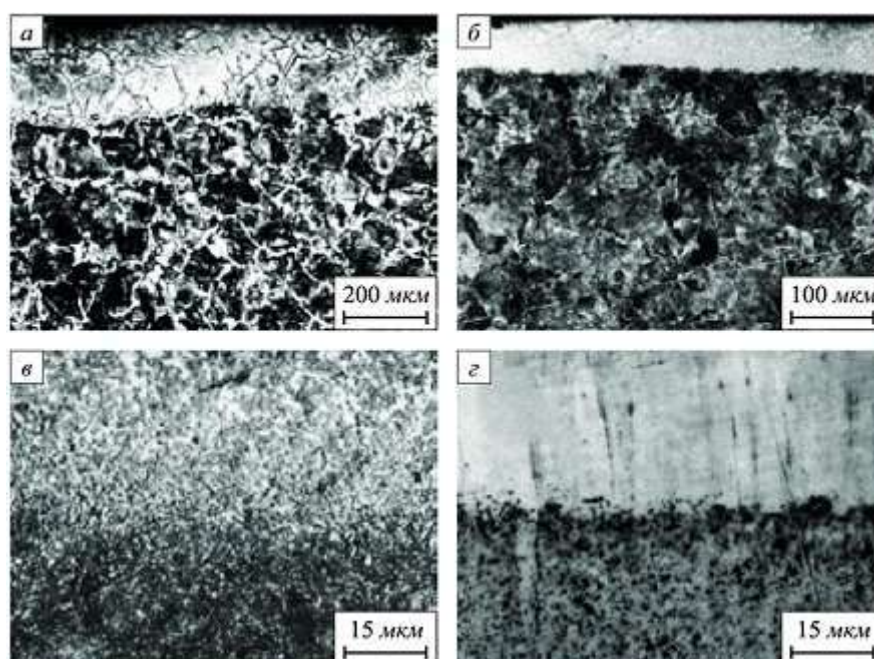


Рисунок 2.5 – Мікроструктура шліфа після травлення сталей 45 та У8, що зміцнені електроерозійною обробкою: *а* – сталь 45; *б* – нормалізована сталь У8; *в* та *г* – загартована сталь У8.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРММТВА25.24345.000 ПЗ

Арк.

33

Цифрові мікроскопи займають важливе місце серед сучасних оптичних систем, оскільки об'єднують класичну оптику з електронними засобами перетворення сигналу. У таких приладах використовують світлочутливі матриці, що трансформують відбитий або пропущений світловий потік у цифровий формат, придатний для оброблення та аналізу на персональних комп'ютерах. Завдяки цьому забезпечується можливість оперативної фіксації даних за допомогою фотокамер чи відеомодулів, а також їх подальшої візуалізації на моніторах або друку на зовнішніх пристроях.

Залежно від способу передачі інформації виділяють USB-мікроскопи, що підключаються безпосередньо до комп'ютера, та моделі, орієнтовані на виведення зображення через телевізійні інтерфейси. Сучасні конструкції цифрових мікроскопів демонструють високу функціональність, стабільність параметрів та широкий спектр доступних режимів спостереження, що робить їх ефективним інструментом для аналізу мікроструктур різних матеріалів.

Типові представники сучасних цифрових мікроскопів наведені на рис. 2.6–2.7, де продемонстровано їх будову.



Рисунок 2.6 – Металографічний мікроскоп модель Olympus BX60



Рисунок 2.7 – Металографічний мікроскоп модель Fein Optic M46 для відбитого/пропущеного світла та матеріалознавчих досліджень

2.3 Визначення твердості

Твердість визначають шляхом оцінювання опору поверхні матеріалу локальному пластичному деформуванню індентора. У сучасній практиці застосовують декілька стандартизованих методів, що ґрунтуються на різних підходах до навантаження та геометрії індентора.

Метод Брінелля (НВ)

Метод Брінелля базується на вдавлюванні у матеріал сталеві або твердосплавної кульки діаметром 2,5–10 мм під дією нормованого навантаження. Після зняття сили визначають діаметр лунки і на основі площі відбитка обчислюють твердість [17].

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

У методі Брінелля тверда кулька певного діаметра D занурюється в поверхню зразка під дією прикладеного навантаження P . Після зняття сили вимірюють діаметр отриманої лунки d , за яким обчислюють твердість матеріалу (рис. 2.8).

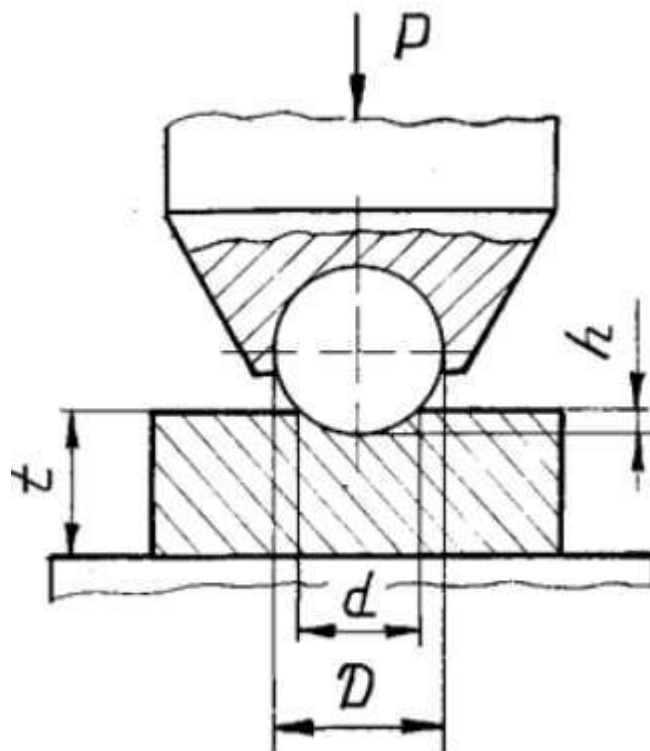


Рисунок 2.8 – Схема втілення індентора за методом Брінелля

Показники твердості позначають літерою Н – від англ. *hardness*. Значення НВ визначають як відношення навантаження до площі сферичної ділянки відбитка, що надає числу твердості розмірність кгс/мм². У практиці вона не переводиться в одиниці СІ, оскільки традиційно подається без зазначення розмірності.

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \quad (2.1)$$

де D - діаметр кульки, мм; d - діаметр відбитку, мм;

P - навантаження на кульку, кгс; НВ – твердість, кгс/мм²

За стандартних умов – навантаження 3000 кгс, кулька діаметром 10 мм, витримування 10–15 с – параметри не вказують разом із результатом. В інших випадках у позначенні зазначають діаметр індентора, прикладену силу та час витримування. Наприклад, запис 185 HB 5/750/10 означає, що твердість становить 185 одиниць при використанні кульки 5 мм, навантаженні 750 кгс і витримуванні 10 с.

Метод застосовують для матеріалів із твердістю до 450 HB, оскільки при більших значеннях можлива деформація сталеві кульки. При випробуванні важливо правильно розміщувати відтиски: навколо зони вдавлювання формується ділянка локального наклепу, що впливає на наступні вимірювання. Тому відстань між центрами двох сусідніх лунок повинна становити не менше $4d$, а для м'яких металів – понад $6d$. Відстань від центра відбитка до краю зразка має бути не меншою за $2,5d$ (для низькотвердих матеріалів – $3d$), що забезпечує точність та стійкість під час випробування.



Рисунок 2.9 – Сучасний твердомір за методом Брінелля

Повірка твердомірів, що працюють за методом Брінелля, виконується для підтвердження точності вимірювань та відповідності приладу нормам ДСТУ EN

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

ISO 6506-2:2019 «Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 2. Перевірення та калібрування випробувальних машин» – діє з 01.11.2019.. Перевірка включає оцінку силового механізму, індентора, оптичної системи та здатності пристрою відтворювати стандартні значення твердості.

1. Перевірка точності навантаження

Твердомір повинен прикладати номінальну силу навантаження F з точністю, визначеною стандартом (як правило, допустиме відхилення становить $\pm 1\%$). Вимірюють реальне значення сили; стабільність навантаження під час витримки; швидкість прикладання навантаження. Для цього використовують еталонні силовимірювальні комірки або контрольні датчики, що калібровані у державній метрологічній системі.

2. Контроль індентора (кульки)

Перевіряють:

2.1. Геометрію кульки – діаметр D повинен відповідати номінальному значенню (2.5; 5; 10 мм), відхилення не перевищують встановлених норм.

2.2. Матеріал та твердість кульки – індентори виготовляють із загартованої сталі або карбіду вольфраму, твердість не повинна знижуватися внаслідок експлуатації.

2.3. Стан поверхні – на поверхні не допускаються сколи, тріщини, деформації, відхилення сферичності.

При наявності будь-яких дефектів індентор підлягає заміні.

3. Перевірка системи вимірювання діаметра лунки

Метод Брінелля передбачає точне вимірювання діаметра відбитка d , тому підлягають контролю:

3.1. Оптичні прилади – збільшення, якість зображення; точність окулярної шкали; коректність калібрування вимірювальних лінійок.

3.2. Калібрування масштабу – використовують еталонні мірні лінійки або калібровані мікрометричні шкали.

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

4. Перевірка точності твердоміра за еталонними мірами твердості є основним етапом. Випробування проводять на зразках-еталонах твердості Брінелля, значення яких точно сертифіковані та занесені в метрологічний реєстр. На еталонному бруску виконують 3–5 вимірювань. Обчислюють середнє значення твердості. Порівнюють отримані дані з паспортною твердістю еталона. Відхилення не повинно перевищувати допусків (зазвичай $\pm 2,5$ % для сталевих кульок і $\pm 1,5$ % для карбідних). Якщо відхилення поза нормою – твердомір підлягає регулюванню або ремонту.

5. Оцінка повторюваності та відтворюваності

Стандарт вимагає встановити: повторюваність – стабільність результатів на одному еталоні; відтворюваність – стабільність при зміні положення зразка, кульки або навантажувального циклу. Ці параметри контролюють статистично за результатами серії вимірювань (не менше 5–7 циклів).

6. Документальне оформлення

Після успішної повірки оформлюється: свідоцтво про повірку; позначення повіреного обладнання; дата наступної перевірки (зазвичай 1 раз на 12 місяців); протокол із зазначенням усіх етапів перевірки.

Узагальнення

Повірка твердомірів Брінелля включає комплекс операцій, що охоплюють контроль навантаження, геометрії індентора, оптики, метричної точності та відповідності еталонним мірникам твердості. Правильне виконання цих процедур гарантує достовірність результатів твердості, особливо важливих при оцінці дифузійних покриттів і зміцнених поверхонь.

Вимірювання діаметра індента.

Розмір відбитка визначають за допомогою відлікового мікроскопа, конструкція якого містить тубус оптичного вузла та вимірювальну шкалу. У корпусі приладу розташовано тубус 3, в якому змонтовано об'єктив 5, окуляр 1 і

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

вимірювальну сітку 2 з градуйованою шкалою. Обертаючи окуляр, оператор змінює його положення відносно шкали та встановлює потрібну різкість її зображення. Додаткове регулювання виконується шляхом обертання кільця 4, яке переміщує тубус у вертикальному напрямку, забезпечуючи чіткий контур відбитка. Після фокусування проводять зчитування діаметра індента за поділками сітки з урахуванням кратності збільшення.

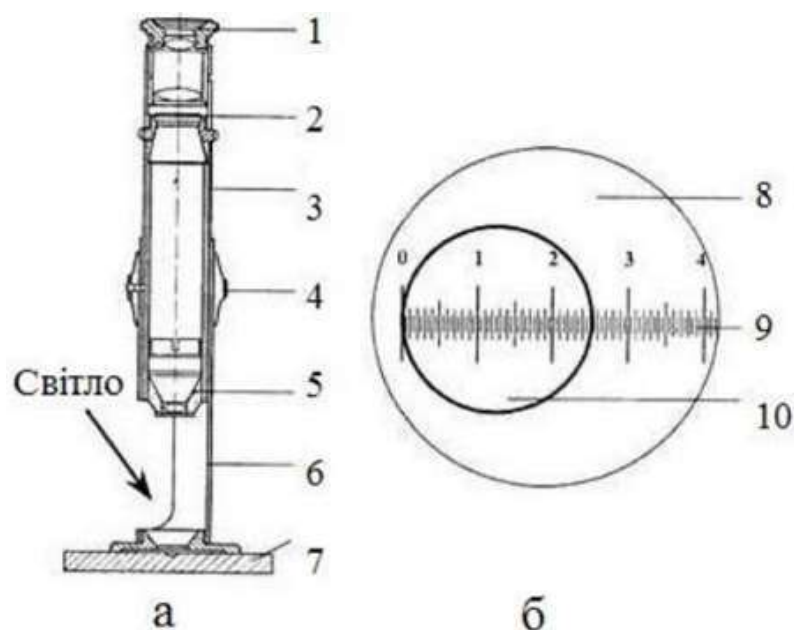


Рисунок 2.10 – Відліковий мікроскоп МПБ-2 (а) та схема вимірювання діаметра відтиску за його шкалою (б): 1 – окуляр; 2 – шкала; 3 – тубус; 4 – кільце регулювання чіткості зображення; 5 – об’єктив; 6 – корпус; 7 – зразок з відтиском; 8 – поле зору мікроскопа; 9 – шкала з ціною поділки 0,05 мм; 10 – відтиск

Метод Роквелла

На відміну від підходу Брінелля, твердість за Роквеллом визначають не за площею відбитка, а за глибиною проникнення індентора під навантаженням. Такий принцип дозволяє оцінювати твердість загартованих і відпущених сталей, твердих сплавів, а також аналізувати зміцнений поверхневий шар [18].

У процесі випробування в матеріал послідовно вдавлюють індентор – алмазний конус із кутом при вершині 120° для твердих сплавів і сталей або

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

загартовану сталю кульку діаметром 1,5 мм для пластичних металів. Випробування виконується у два етапи: спочатку прикладають попереднє зусилля $P_0 = 10$ кгс, а потім – основне навантаження. Значення основної сили залежить від вибраної шкали:

60 кгс – для конуса при визначенні твердіших і тонких матеріалів (шкала А, HRA);

100 кгс – для кульки при випробуванні м'яких металів та відпаленої сталі (шкала В, HRB);

150 кгс – для конуса при тестуванні загартованих сталей, цементованих шарів та інших високотвердих матеріалів (шкала С, HRC).

Одиницею вимірювання прийнято умовний показник, що відповідає переміщенню індентора на 0,002 мм під дією навантаження. У практиці результат визначають за індикатором твердоміра після зняття основної сили, без додаткових перерахунків. За потреби твердість за Роквеллом можна орієнтовно перевести у твердість за Брінеллем за допомогою спеціальних таблиць.

Застосування різних шкал дозволяє охопити широкий діапазон матеріалів:

HRC – оцінка загартованої і відпущеної сталі, а також цементованих деталей (чорна шкала С);

HRA – тверді сплави, тонкі пластини, матеріали з високою твердістю (чорна шкала А);

HRB – м'які метали, латунь, мідь, відпалена сталь (червона шкала В).

У всіх випадках вимірювання фіксується за показанням великої стрілки після зняття основного навантаження, що забезпечує високу повторюваність результатів.

Устрій твердоміра Роквелла (ТК-2).

Конструкція приладу Роквелла загалом відповідає будові твердоміра Брінелля, проте відрізняється типом індентора. У вузлі вдавлювання

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовують алмазний конус з кутом 120° , який забезпечує передавання переміщення наконечника на індикаторний механізм та дозволяє фіксувати глибину проникнення.



Рисунок 2.11 – Стационарний твердомір WILSON Rockwell Series 500

Процедура визначення твердості виконується так. Зразок встановлюють на предметний столик, після чого маховиком плавно піднімають його до індентора доти, доки мала стрілка індикатора не стане навпроти червоної позначки, а велика – у межах нульового положення шкали з допустимою похибкою до п'яти поділок. Потім, обертаючи барабан, пов'язаний тросиковим приводом із рантом індикатора, виставляють нуль шкали точно проти кінця великої стрілки.

Після початкового встановлення оператор натискає клавішу запуску, вмикаючи привід прикладання навантаження. Після завершення циклу навантаження значення твердості знімають безпосередньо зі шкали індикатора.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Щоб відвести зразок, маховик повертають у напрямку, протилежному обертанню під час піднімання, і після цього деталь знімають зі столика. Для підвищення достовірності результатів рекомендується виконувати не менше трьох вимірювань для кожного зразка.

Метод Віккерса

Метод Віккерса ґрунтується на вдавлюванні алмазного індентора у формі правильної чотиригранної піраміди з кутом 136° між протилежними гранями в поверхню матеріалу. Після зняття навантаження вимірюють довжини діагоналей відбитка, за якими обчислюють твердість [19].

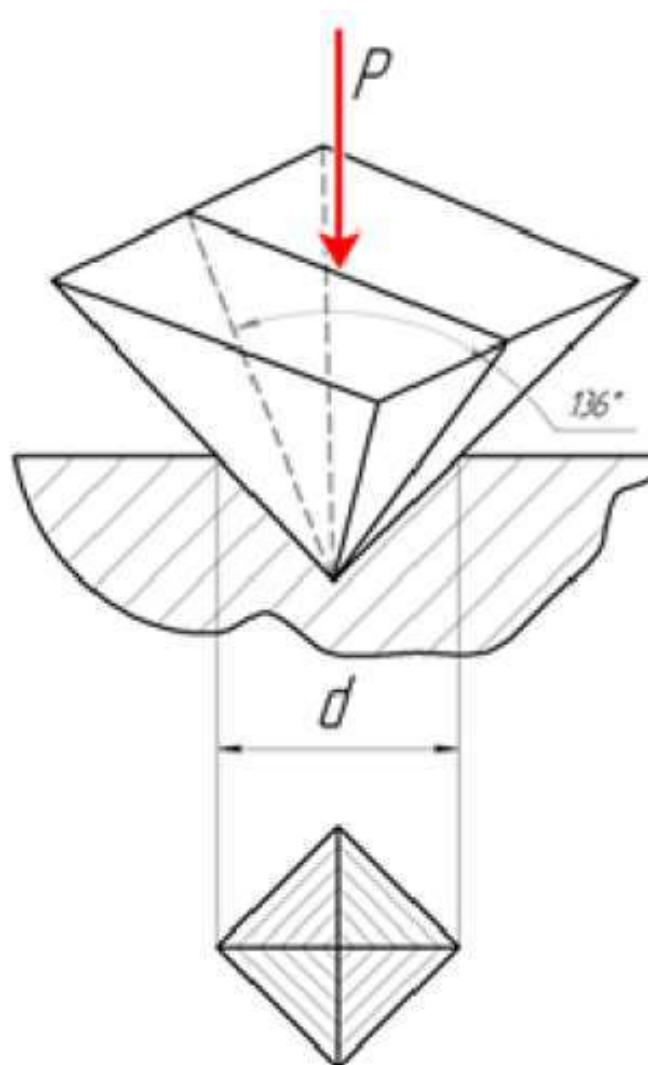


Рисунок 2.12 – Схема втілення індентора за методом Віккерса

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРММТВА25.24345.000 ПЗ

Арк.

43

На поверхню зразка прикладають контрольоване навантаження F (від 0,01 кгс до 100 кгс). Алмазна піраміда втискається в матеріал. Після зняття навантаження залишаються два сліди-діагоналі. Твердість HV розраховують як відношення прикладеної сили до площі поверхні пірамідального відбитка.

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854P/d^2 \quad (2.2)$$

де: P - навантаження на кульку, Н;

d – середнє значення діагоналей відбитку, мм.

До переваг методу Віккерса відносять його універсальність – підходить для надтвердих і дуже м'яких матеріалів; висока точність – результат практично не залежить від навантаження (при правильно підбраному режимі); придатний для покриттів і тонких шарів (мікротвердість: HV0.05, HV0.1 тощо); можливість оцінки градієнтів твердості у дифузійних зонах; малий розмір відбитка, що важливо для дрібних деталей.

Метод використовують для: інструментальних сталей, твердих сплавів, дифузійних покриттів (TiC, TiN, боридних шарів), зварних з'єднань, титанових сплавів, оцінювання зміцнених поверхонь (азотування, цементация, титанування).

Мікротвердість Віккерса при знижених навантаженнях (від 10 г до 1 кгс) метод дозволяє досліджувати: окремі зерна, міжфазні межі, багат шарові покриття, поверхні після локального зміцнення, тонкі дифузійні зони (5–50 мкм).

Позначення: HV0.1, HV0.05, HV1 тощо, де число після HV вказує навантаження в кгс.

До недоліків методу відносять необхідність високої якості підготовки шліфа (полірування до дзеркального блиску); він є складнішим, ніж Роквелл і Брінелль; при використанні для дуже неоднорідних матеріалів потрібно робити багато вимірів.

Визначення твердості за методом Віккерса ґрунтується на вимірюванні середньої довжини діагоналей відбитка, отриманого після прикладання заданого

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження. Показники зчитують за допомогою вимірювального мікроскопа, після чого твердість обчислюють або через довідкові таблиці, або за аналітичною формулою. Через незначну глибину вдавлення індентора та малий розмір відбитка метод потребує якісно підготовленої поверхні: шліфування та полірування до дзеркального стану, усунення зон деформаційного зміцнення та видалення продуктів попередньої обробки.

Для отримання коректних значень твердості проводять серію локальних вимірювань (не менше п'яти), усереднюючи результати. Близькість чисел HV і НВ пояснюється геометричною аналогією між формою відбитків та співвідношенням кутів індентора і кулькового наконечника у разі однакової відносної глибини вдавлення. Важливою перевагою методу є незмінність форми відбитка за різних навантажень, що дає змогу досліджувати тонкі шари та вузькі ділянки конструкційних матеріалів. Під час вибору навантаження враховують товщину й твердість виробу; при цьому відношення товщини зразка або зміцненого шару до діагоналі сліду має бути не меншим ніж 1,5, що забезпечує відсутність впливу основи на результат.



Рисунок 2.13 – Автоматичний твердомір Vickers ASTM E92

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Таблиця 2.8 – Порівняльна таблиця методів вимірювання твердості

Параметр	Брінелль (НВ)	Роквелл (HR)	Віккерс (HV)
Індентор	Загартована кулька (D = 2.5–10 мм)	Діамантовий конус (шкали А, С) або кулька 1.5875 мм (шкала В)	Алмазна піраміда 136°
Показник твердості	Відношення навантаження до площі сферичної поверхні відбитка	Глибина відбитка під навантаженням	Відношення навантаження до площі відбитка піраміди
Навантаження	500–3000 кгс	60–150 кгс	10 г – 100 кг
Розмір відбитка	Великий (до 5 мм)	Малий (до 0.5 мм)	Дуже малий (до 0.05 мм)
Підготовка поверхні	Середня; невисокі вимоги	Мінімальна	Дуже висока (полірування)
Типи матеріалів	М'які та середні сталі, чавуни	Від м'яких до надтвердих матеріалів, включно з поверхневими шарами	Практично всі матеріали, включно з тонкими покриттями
Точність	Середня	Середня	Найвища
Чутливість до неоднорідності	Висока	Середня	Низька (зональне вимірювання)
Можливість вимірювати тонкі шари	Немає (глибокі відбитки)	Обмежено	Є (оптимально)
Автоматизація	Обмежена	Висока	Дуже висока (системи з аналізом зображення)

Титановані, азоттитановані та карбонітридні шари мають: товщину 5–25 мкм, градієнтну структуру, високу твердість (від 1200 до 3200 HV залежно від TiN/TiC), що виключає можливість використання Брінелля або Роквелла. Оптимальний метод для дослідження таких покриттів є метод Віккерса (мікротвердість), адже він має суттєві переваги: малий відбиток, який не руйнує шар і не досягає основного металу; високу точність при вимірюванні тонких дифузійних зон; можливість аналізу профілю твердості по глибині (HV0.05, HV0.1); є придатним для багат шарових систем TiN/TiC/TiCN/Ti₂N; чудова сумісність з металографічним аналізом структури; достовірне вимірювання твердості тонких модифікованих шарів; можливість побудови профілю твердості; мінімальне пошкодження шару; високу відтворюваність результатів.

2.4 Рентгеноструктурний аналіз

Рентгеноструктурний метод належить до найефективніших засобів дослідження будови металів і сплавів, оскільки забезпечує можливість визначення фазового складу, параметрів ґратки, ступеня розупорядкування, залишкових напружень і характерних особливостей кристалічних доменів. Дослідження проводили на дифрактометрі типу ДРОН із використанням монохроматизованого рентгенівського випромінювання міді або іншого анода, залежно від задач експерименту. Конструкція приладу дозволяє реалізовувати різні схеми фокусування та режими зйомки, що забезпечує гнучкість у роботі з полікристалічними та монокристалічними матеріалами.

У роботі застосовано геометрію Бреґга–Брентано, за якої зразок розміщується так, щоб його поверхня формувала бісектрису між падаючим і відбитим пучками. При цьому детектор переміщується з кутовою швидкістю, удвічі більшою за швидкість повороту тримача зразка, що забезпечує сталість умов фокусування та коректність реєстрації дифракційних максимумів. Принцип аналізу ґрунтується на тому, що кожна фаза характеризується унікальним набором міжплощинних відстаней, а отже – власним спектром ліній, що дозволяє ідентифікувати компоненти матеріалу та визначати їхню частку.

Інтенсивність дифракційних відбиттів чутлива до кількості фази, ступеня текстури, розміру кристалітів і мікродеформацій. Положення ліній пов'язане з параметрами кристалічної ґратки згідно з рівнянням Вульфа–Бреґга:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (2.3)$$

де: n – порядок відбиття, λ – довжина хвилі, d – міжплощинна відстань, θ – кут дифракції.

Знімання дифрактограм проводили за струму аноду 12–14 мА та напруги 30–35 кВ у діапазоні $2\theta = 25$ – 85° . Використовували покрокове сканування з кроком $0,05^\circ$ і часом експозиції 5–9 с у кожній точці. Реєстрація інтенсивності виконувалася на шкалах 200–1000 імп-сів/с при швидкості обертання детектора $2^\circ/\text{хв}$ і подачі діаграмної стрічки 1200 мм/год, з нанесенням позначок через 1° .

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Рентгеноспектральний аналіз

Рентгеноспектральний аналіз належить до вискоєфективних фізико-аналітичних методів, що застосовуються для визначення елементного складу твердих матеріалів та тонких поверхневих шарів. Основою методу є реєстрація характеристичного рентгенівського випромінювання, яке виникає при збудженні атомів первинним рентгенівським чи електронним пучком. Оскільки кожен хімічний елемент формує унікальний спектр ліній (К-, L-, М-серій), аналіз спектра дозволяє встановити якісний та кількісний склад досліджуваної ділянки.

Залежно від способу реєстрації спектра використовують два основні різновиди методу: енергодисперсійний (EDS) та хвильодисперсійний (WDS). Енергодисперсійний аналіз забезпечує швидке визначення складу локальних зон та широко поєднується зі сканувальною електронною мікроскопією, дозволяючи виконувати мікроаналіз у межах 1–5 мкм. Хвильодисперсійний різновид характеризується вищою спектральною роздільною здатністю та підвищеною точністю визначення концентрацій, зокрема для низьковмістових компонентів.

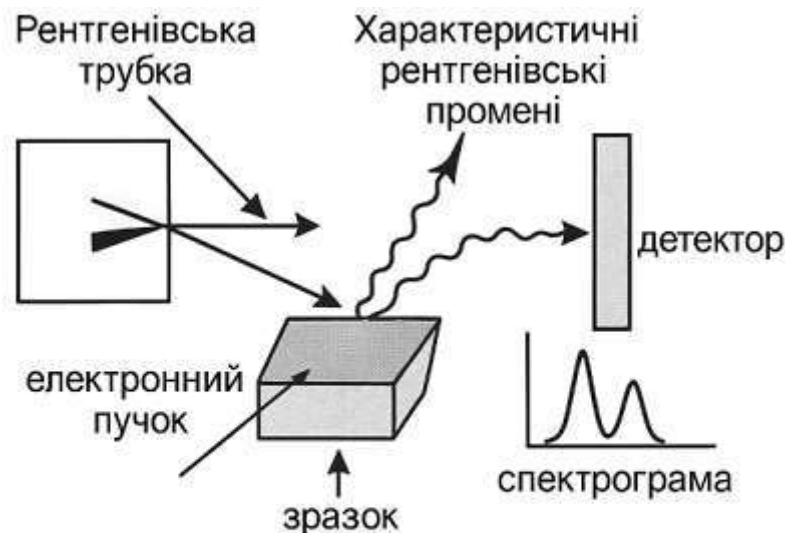


Рисунок 2.8. Принцип роботи рентгеноспектрального аналізу

Рисунок 2.14 – Принцип роботи рентгеноспектрального аналізу

Рентгеноспектральний аналіз дозволяє отримувати інформацію про розподіл елементів у структурних складових, виявляти зони дифузійного перерозподілу, визначати склад інтерметалідів і нітридних/карбідних фаз, а також оцінювати однорідність сформованих покриттів. Метод забезпечує неруйнівність дослідження та високу чутливість до змін хімічного складу, проте його результати значною мірою залежать від якості підготовки поверхні й умов знімання.

У матеріалознавстві та технології захисних покриттів РСА застосовується для аналізу дифузійних шарів після титанування, азотування, борування, хромування та іонно-плазмових процесів. Локальні картограми та лінійні профілі концентрацій дозволяють простежити проникнення насичувальних елементів та оцінити рівень їх розчинності в основі. Завдяки цьому метод є незамінним етапом комплексної оцінки структурно-хімічних змін поверхневих шарів, що формуються у процесі модифікації матеріалів.



Рисунок 2.15 – JEOL JXA-8530F (FEG) «Hyperprobe»

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Висновок по розділу.

Раціональний добір методів контролю визначається необхідністю отримати розгорнуте уявлення про властивості основи та сформованих дифузійних шарів, забезпечуючи водночас прийнятну трудомісткість і економічну доцільність експериментів. Для поверхневих структур, утворених унаслідок дифузійних процесів, найбільш інформативними є методики визначення твердості та мікротвердості, а також аналіз фазового й хімічного складу, що дозволяє комплексно оцінити характер змін у зоні насичення. Використання сучасних приладів підвищує точність вимірювань, скорочує час обробки даних та забезпечує кращу відтворюваність результатів.

Застосування кількох взаємодоповнювальних способів контролю дає можливість простежити вплив технологічних параметрів на формування структурно-фазових компонентів і їхню кореляцію з експлуатаційними характеристиками. На початковому етапі термічної підготовки використовували випробування твердості за Брінеллем та Роквеллом. Через значне співвідношення габаритів зразка та сталеві кульки діаметром 10 мм метод Брінелля виявився непридатним, а відсутність інденторів меншого розміру зумовила застосування вимірювань за шкалою HRB.

Після формування покриттів проведено металографічні дослідження з визначенням мікротвердості, а також хімічний аналіз, який засвідчив високу концентрацію хрому в поверхневій зоні, характерну для карбідних хромових шарів. Завершальна термічна обробка супроводжувалася оцінюванням твердості за шкалою HRC і детальним мікроструктурним контролем, що дало можливість узгодити отримані механічні характеристики зі змінами у структурі покриття.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

3. МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗДОБУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Фазовий склад покриттів

У результаті титанування сталей 45 та У8А формується одношаровий карбідний шар на основі TiC , для якого зафіксовано період кристалічної ґратки 0,4329 нм та 0,4332 нм відповідно. Для маловуглецевих сталей, що містять близько 0,2–0,3 мас.% вуглецю, цей параметр становить орієнтовно 0,4320 нм. Така різниця пов'язана з тим, що частка вуглецю в основі впливає на насичення дифузійного шару, визначаючи ступінь відхилення від стехіометричного складу та, відповідно, параметри ґратки. Як свідчить діаграма стану (рис. 3.1), карбід титану характеризується широкою областю гомогенності, в межах якої може існувати 39–49 ат.% вуглецю. Зміна концентрації в межах цієї області приводить до варіацій періоду ґратки: для $TiC_{0.3}$ він становить близько 0,4293 нм, а для $TiC_{0.8}$ досягає 0,4332 нм. Таким чином, структура одношарового покриття, отриманого на сталях, безпосередньо залежить від вмісту вуглецю в матриці, а також від умов дифузійного насичення.

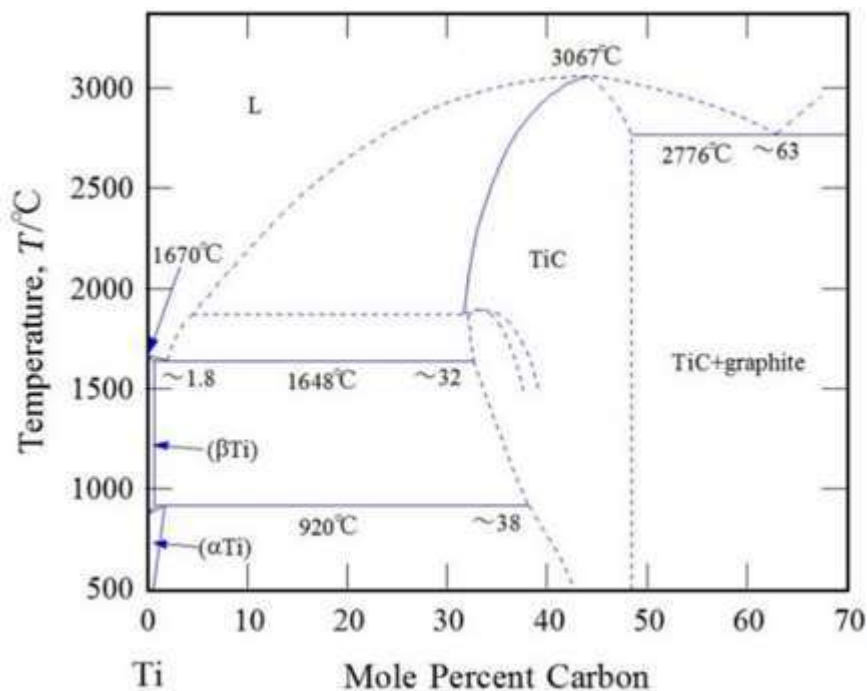


Рисунок 3.1 – Діаграма стану титан-карбон

Дані рентгеноструктурного аналізу твердого сплаву ВК8 після титанування (рис. 3.2) підтверджують формування на поверхні карбідного шару на основі TiC. У випадку твердих сплавів, де присутні карбіди вольфраму та зв'язувальна фаза на основі кобальту, титановмісні фази утворюються внаслідок взаємодії активного титану з WC та Co-зв'язкою, що призводить до зміни фазового складу поверхневої зони. При цьому утворення TiC супроводжується частковою трансформацією вихідних WC-фаз і зміною їхнього вмісту в приповерхневому шарі, що узгоджується з результатами рентгенографічного аналізу та даними літератури.

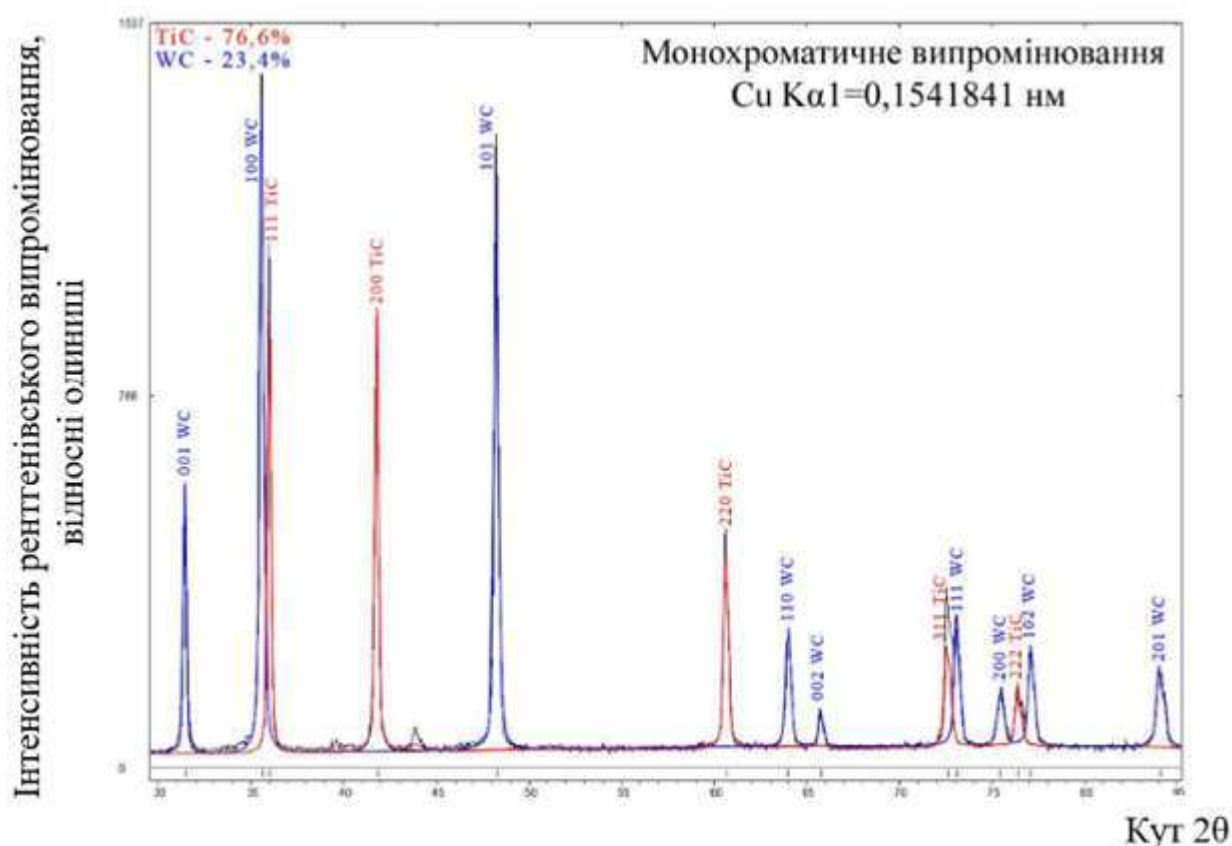


Рисунок 3.2 – Дифрактограма поверхні твердого сплаву ВК8 після титанування; $T = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$; $\tau = 2$ години.

Параметри кристалічної ґратки карбіду титану, сформованого на сплаві ВК8, становлять близько 0,4315 нм, а для покриття на сплаві Т15К6 – 0,4318 нм. За тривалішої дії дифузійного середовища (приблизно 1050 °C і понад 3 год насичення) над основним шаром TiC інколи з'являється прошарок інтерметаліду

CoTi. Така поява пов'язана з дефіцитом вуглецю на завершальній стадії утворення карбїду: зменшення його концентрації у поверхневій зоні сприяє активній дифузії кобальту з матриці крізь покриття до поверхні, де й формується інтерметалїдна фаза. Додатковим підтвердженням вуглецевого дефіциту є наявність зони $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ безпосередньо під шаром TiC, що вказує на локальне перерозподїлення вуглецю у процесі тривалого насичення.

Досліджено покриття на сталї AISI 1045 (середньовуглецева сталь, аналог української сталї 45) після послїдовного титанування (950 °C, 45 хв та 180 хв) та подальшого плазмового азотування (530/550 °C, 5 год). Експеримент охоплював пакетну цементацію титану, мікроструктурний аналіз (SEM/EDS), рентгенофазовий аналіз (XRD з Cu K α , крок 0,05°, час 1 с) та вимірювання мікротвердості [20].

На рисунку 3.3 подано XRD-патерни титановмісних шарів після лише титанування (45 хв та 180 хв). Рефлекси фаз TiCN (або $\text{TiC}_{0.7}\text{N}_{0.3}$) спочатку переважають (Ti45, рис. 3.3a), а при 180 хв – трансформуються в TiC-подїбну структуру (рис. 3.3b). Рисунок 3.4 демонструє XRD-картини після подальшого плазмового азотування (тандемна обробка). За даними авторів, збільшення часу титанування сприяє переходу від TiCN до TiC-структури, а підвищення температури азотування – появі фаз Fe_4N і TiN.

За умови застосування аналогічної технології титанування сталї 45 можна очікувати утворення дифузійного шару товщиною ~8–10 μm з фазами TiCN або TiC. Показано, що при коротшому титануванні (45 хв) формується TiCN-подїбна фаза, тоді як більш тривала обробка (180 хв) приводить до переважання TiC-структури (рис. 3.3a і 3.3b). Подальше азотування зумовлює появу Fe_4N - і TiN-фаз (рис. 3.4), що супроводжується ростом мікротвердості поверхневого шару. Таким чином, на сталї 45 режими титанування й азотування потрібно підбирати з урахуванням бажаного фазового складу: перевага TiC-структури забезпечує вищу твердість та зносостійкість, а наявність TiCN або азотованих фаз – додаткове зміцнення [20].

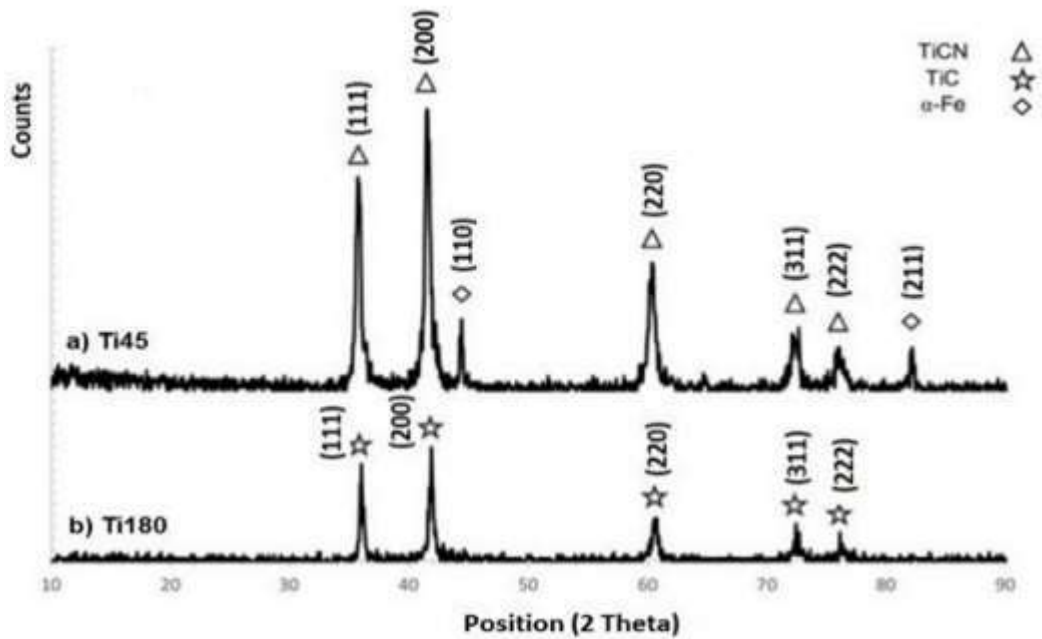


Рисунок 3.3 – Діфрактограма поверхні твердого сталі AISI 1045 (сталі 45) після титанування.

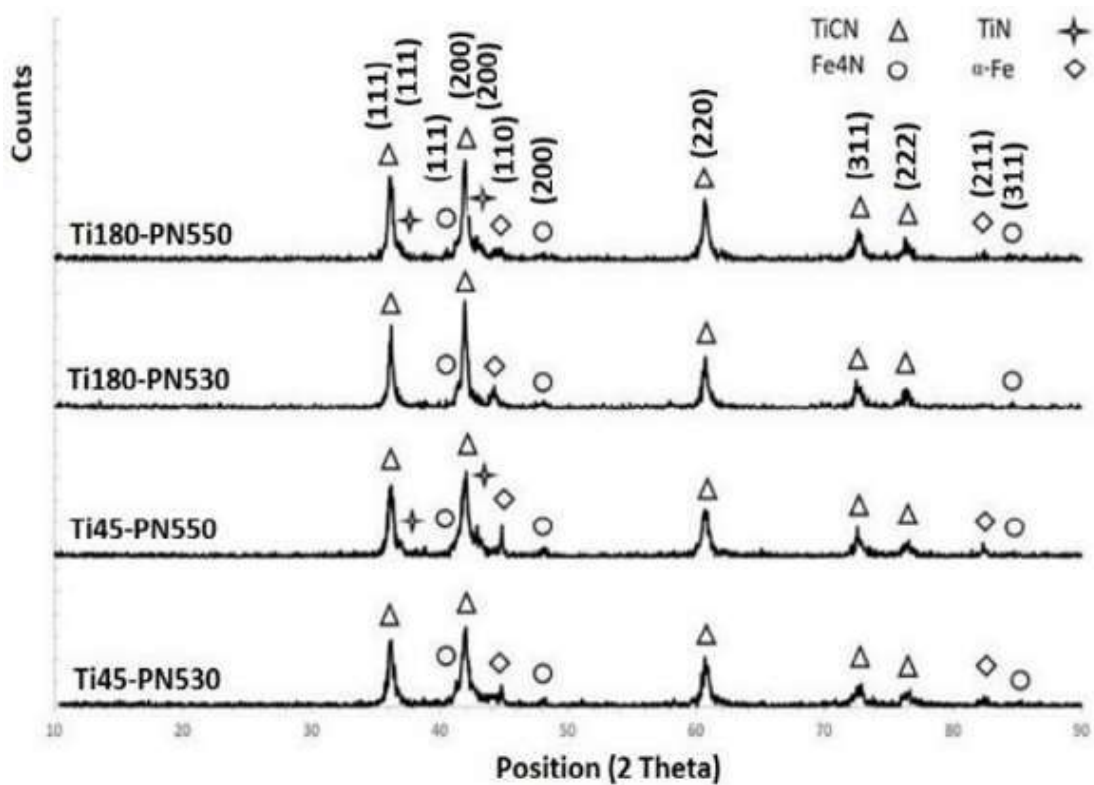


Рисунок 3.4 – Діфрактограма поверхні твердого сталі AISI 1045 (сталі 45) після титанування та подальшого плазмового азотування (тандемна обробка).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРММТВА25.24345.000 ПЗ

Арк.

54

Таблиця 3.1 Фазовий склад покриттів на основі карбіду титану

Матеріал	Фазовий склад	Період кристалічної ґратки
Сталь 20	TiC	a=0,4320
Сталь 45	TiC	a=0,4325
У8А	TiC	a=0,4329
У12А	TiC	a=0,4332
Х12М	TiC	a=0,4332
ВК8	TiC	a=0,4315
Т15К6	TiC	a=0,4318

Проведений аналіз результатів титанування та тандемної обробки сталі 45 дозволяє екстраполювати встановлені закономірності на інструментальну сталь У8А, враховуючи її вищий вміст вуглецю та іншу природу початкової мікроструктури. На відміну від сталей типу 45, де обмежена кількість вуглецю частково стримує насичення титану карбідом, сталь У8А, завдяки вмісту 0,75–0,84 % С, створює більш сприятливі умови для формування вуглецево-багатих фаз і збільшення товщини покриття. Таким чином, порівняльний аналіз дозволяє прогнозувати виразні відмінності у структурі, морфології та твердості отриманих поверхневих шарів.

При застосуванні аналогічних режимів титанування ($T = 900\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$, тривалість 1–3 год) на сталі У8А очікується утворення одношарового або слабкоконтрастного багатошарового покриття на основі TiC. Завдяки підвищеній карбідності основи період ґратки карбіду титану для У8А буде зміщений у бік вуглецево-збагачених значень (приблизно 0,4330–0,4332 нм), що узгоджується з рівноважною областю гомогенності TiC_x. У верхній частині шару можливе часткове формування Ti(C,N) при наявності залишкового азоту у реакційній атмосфері. Підпокриттєва зона характеризуватиметься

перерозподілом цементиту та локальним утворенням дрібнодисперсних карбідних виділень [21].

Поверхневий шар TiC на сталі У8А матиме підвищену мікротвердість, орієнтовно 2200–3000 HV0.05, з огляду на добре насичене вуглецем середовище формування та щільнішу кристалічну структуру. У порівнянні зі сталлю 45, де твердість TiC дещо нижча, поверхневий зміцнений шар У8А створюватиме більш виражений градієнт властивостей, що потребуватиме обережності при оцінці в'язкісних характеристик.

За умови подальшого плазмового азотування ($T = 530\text{--}560\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 3\text{--}5$ год) над карбідним шаром формується тонкий TiN / Ti(C,N), що забезпечує подальше зміцнення поверхні. В окремих випадках у перехідній зоні можуть утворюватися $\epsilon\text{-(Fe}_{2\text{--}3}\text{N)}$ та $\gamma'\text{-(Fe}_4\text{N)}$, проте їх питома кількість, як правило, нижча, ніж у сталі 45, з огляду на конкуренцію між титаном і залізом за азот. Отриманий комплекс фаз створюватиме тверду поверхневу композицію з мікротвердістю до 2500–3200 HV0.05, що є вищим за аналогічні значення для сталі 45.

На відміну від сталі 45, де зафіксовано формування TiC з періодом 0,4329 нм та помірним збагаченням поверхні азотними фазами, сталь У8А демонструватиме: збільшений вміст вуглецю у TiC; дещо більшу товщину карбідного шару; різкіший перепад твердості на межі «покриття – основа»; вищу концентрацію твердих фаз у перехідній зоні.

Ці особливості визначають вищий потенціал до зносостійкості, але водночас потребують коригування режимів, щоб уникнути надмірної крихкості.

Отже, прогнозоване формування багатокомпонентного покриття типу TiN/Ti(C,N)/TiC на сталі У8А свідчить про перспективність застосування комбінованих дифузійних методів для забезпечення високої зносостійкості. Підвищена карбідність інструментальної сталі створює сприятливі умови для синтезу стабільних і надтвердих фаз, проте вимагає раціонального вибору температурних та часових параметрів для досягнення оптимального балансу між твердістю та в'язкістю поверхневого шару.

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Хімічний склад покриттів

Після титанування на поверхні твердого сплаву Т15К6 утворюється шар, збагачений кобальтом і титаном, що свідчить про формування інтерметаліду CoTi (рис. 3.5). Товщина цього шару незначна, а під ним простежується зона карбіду титану, про що однозначно сигналізують інтенсивні дифракційні максимуми, пов'язані з присутністю титану та вуглецю.

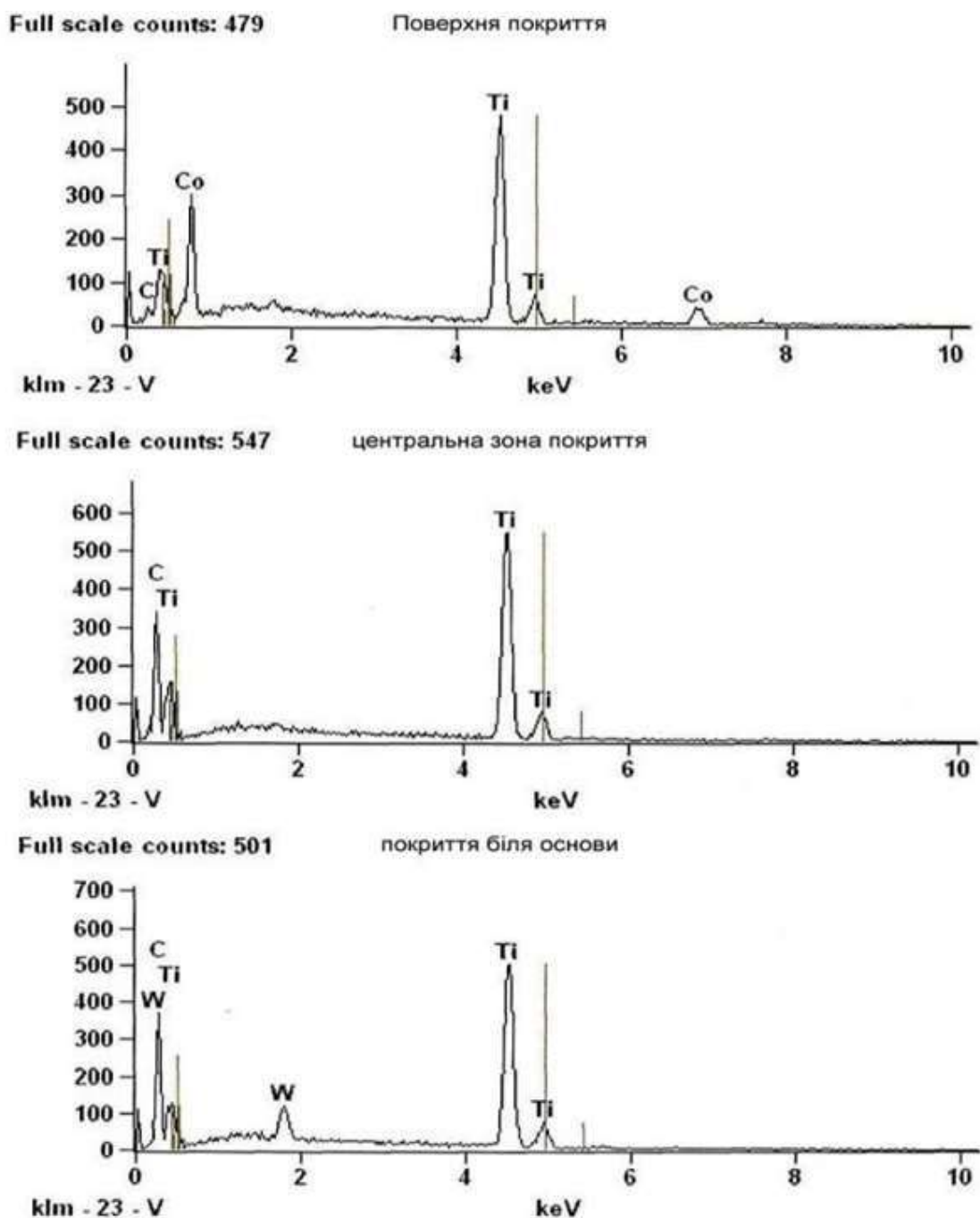


Рисунок 3.5 – Спектральні криві Т15К6 після титанування $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 3\text{ год}$.

За підсумками мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 3.6) встановлено, що на сталі У8А під час титанування формується шар, який повністю відповідає карбїду титану.

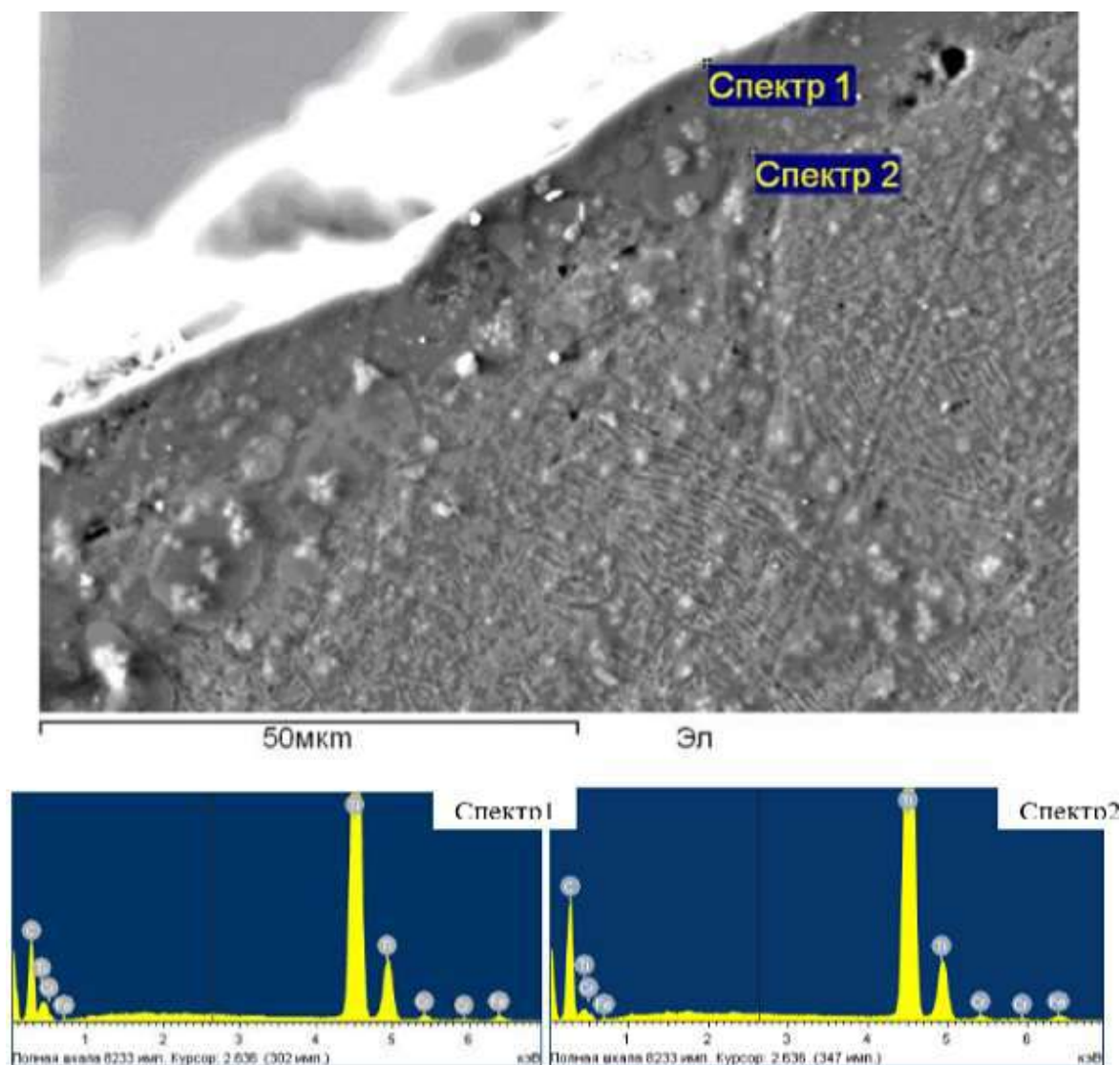


Рисунок 3.6 – Мікроструктура (у відбитих електронах) та спектральні криві поверхневого шару сталі У8А після титанування $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2$ год.

Отримані профілі концентрацій свідчать про проникнення до карбїдної фази незначних кількостей хрому (0,15–0,25 мас.%) та заліза (1,0–1,31 мас.%). Вміст вуглецю змінюється по перерізу шару від 20,3 мас.% біля межі з основою до 18,1 мас.% на поверхні, що підтверджує значний вплив вуглецевого потенціалу сталі на механізм утворення покриття. Для сталі ШХ15 також зафіксовано формування карбїдного шару, в якому домінують титан та вуглець [22].

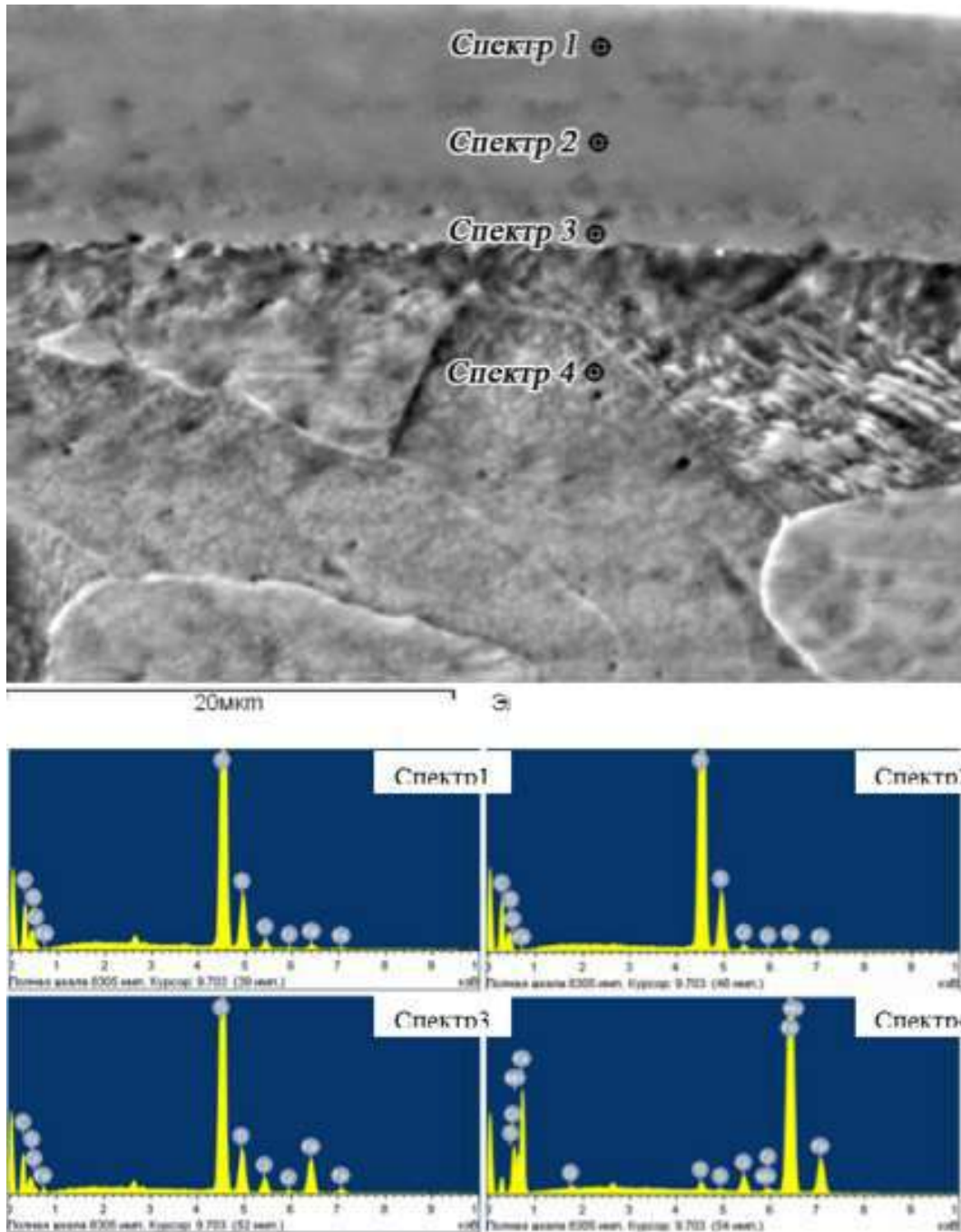


Рисунок 3.7 – Мікроструктура (у відбитих електронах) та спектральні криві поверхневого шару сталі ШХ15 після титанування $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ год}$.

Для сталі 45 очікується, що після титанування буде сформований поверхневий шар на основі карбиду титану TiC (рис. 3.8a). Подальше азотування приводить до перетворення частини TiC у фазу TiN з домішкою $\text{TiCo}_{0.7}\text{No}_{0.3}$ (рис. 3.8f), що свідчить про зміну фазового складу при певному режимі обробки [23].

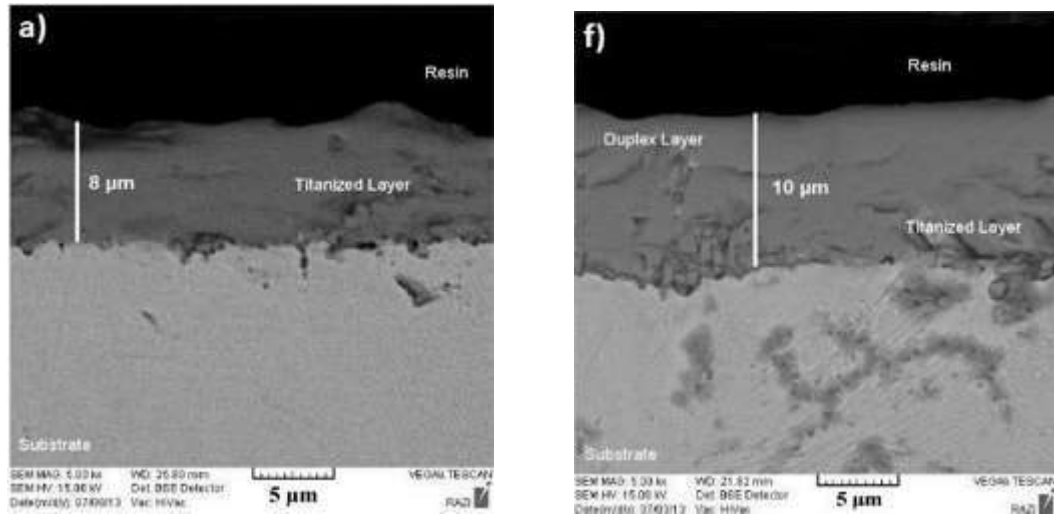


Рисунок 3.8 – SEM-зображення поверхневого шару сталі 45 після: а – титанування $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=45\text{ хв.}$; f – $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=3\text{ год.}$ + азотування $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.3 Мікроструктура покриттів

Після титанування на травлених полірованих шліфах фіксується світлий монофазний шар TiC (рис. 3.9), який має добре окреслену межу з матеріалом основи. Утворена зона відповідає карбиду титану, а її товщина визначається тривалістю насичення, температурними параметрами та концентрацією вуглецю й легуючих складників у сталі.

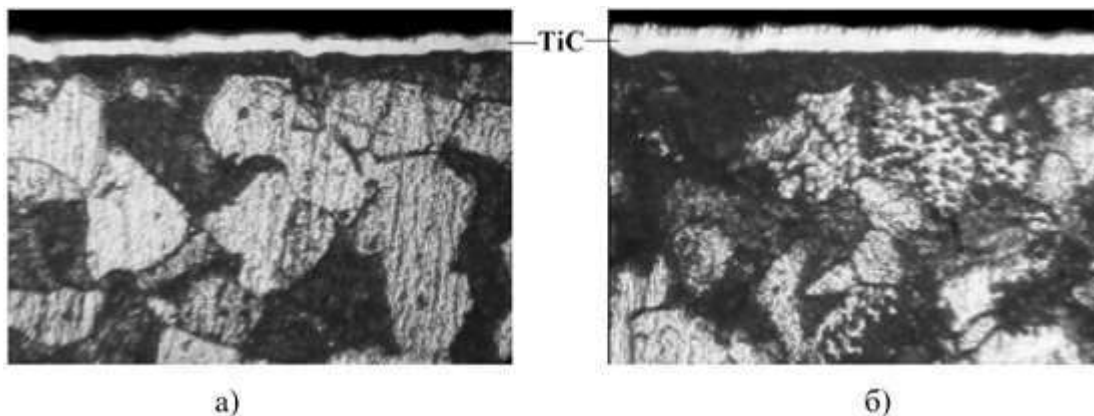


Рисунок 3.9 – Мікроструктура сталі 45 (а) та У8А (б) після титанування: $T=1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau=2\text{ год.}$; $\times 250$

Для сталі 45 при 2-годинному насиченні за температури 1323 К шар формується в інтервалі 8–11 мкм. За аналогічних умов на сталі У8А покриття досягає 14–17 мкм, що пов'язано з вищим вуглецевим потенціалом. У випадку сталі 45 під карбідною зоною виявляється перлітний прошарок, який формується внаслідок міграції вуглецю з матриці до реакційної поверхні [24].

Для твердого сплаву Т15К6 сформований шар має значно меншу товщину – приблизно 3–5 мкм [25]. Подовження тривалості насичення з двох до трьох годин сприяє зростанню сумарної товщини покриття, проте на поверхні починає фіксуватися інтерметалід CoTi , що добре ідентифікується на мікроструктурних зображеннях (рис. 3.10).

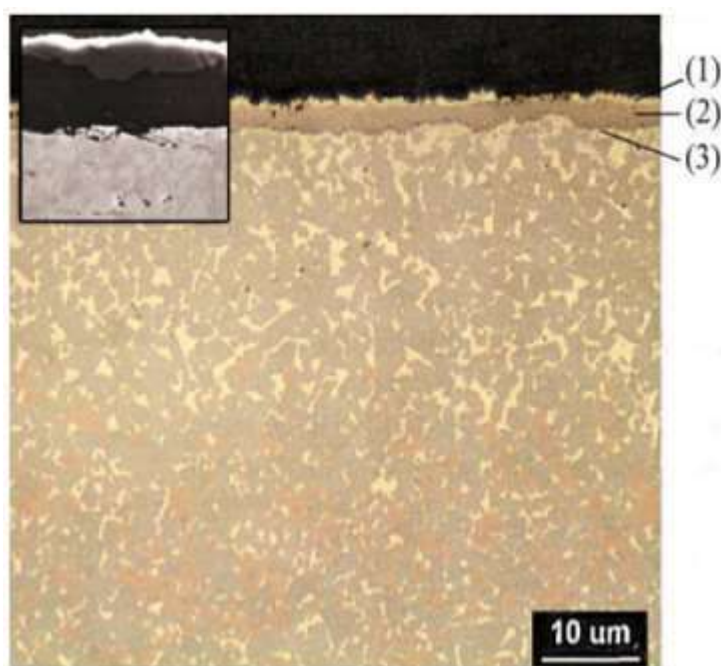


Рисунок 3.10 – Мікроструктура твердого сплаву Т15К6 після титанування: $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 3\text{ год.}$; $\times 250$: 1 – інтерметалід CoTi ; 2 – карбід титану TiC ; 3 – карбід $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$.

З рисунка 3.8 видно, що після титанування тривалістю 2 години у структурі не фіксується ані інтерметалідна фаза, ані підшарова зона зі зниженим вмістом

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вуглецю. Відсутність цих утворень сприяє формуванню більш стабільного покриття та позитивно позначається на його експлуатаційних характеристиках.

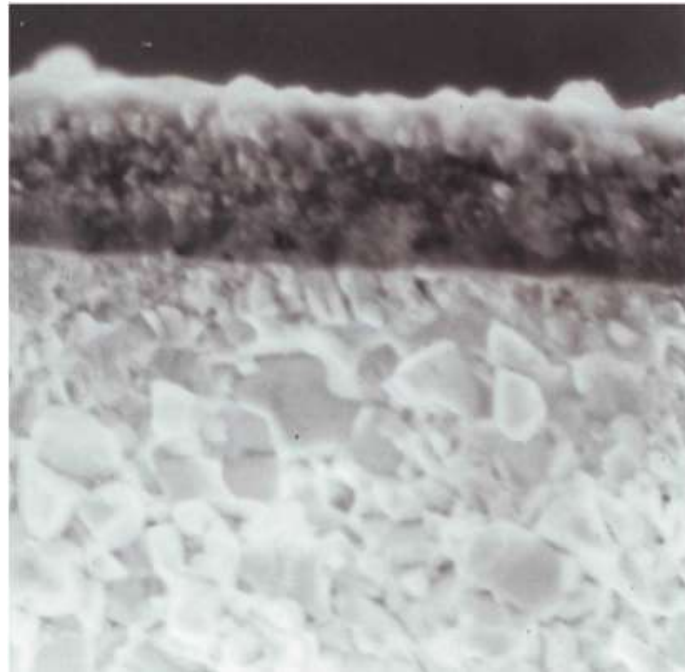


Рисунок 3.11 – Мікроструктура твердого сплаву Т15К6 після титанування: $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ год.}$; $\times 4000$.



Рисунок 3.12 – Мікроструктура сталі 45 титанування: $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ год.}$
На рисунку 3.12 представлено поперечний шліф сталі AISI 1045 (аналог – сталь 45) після дифузійного насичення титаном. Структура демонструє чітко виражений поверхневий шар карбиду титану (TiC), який проявляється як світла,

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

однорідна смуга з рівномірною щільністю травлення. Товщина цього шару типово становить кілька мікрметрів і суттєво залежить від температури та тривалості процесу.

Безпосередньо під TiC-шаром простежується перехідна зона, у якій спостерігається поступове зменшення вмісту титану та підвищення концентрації вуглецю, що дифундує з матриці. Ця область характеризується зміною травлення зерен ферито-перлітної матриці та наявністю збагачених карбідів, які утворюються внаслідок взаємодії вуглецю з титановмісними фазами.

У глибині шліфа бачимо основну структуру сталі 1045, представлену рівномірним перлітом із вкрапленнями фериту. Контраст між основою та поверхневим шаром підкреслює ефективність дифузійної взаємодії: чим вища температура обробки, тим помітнішим є розмиття межі між зонами.

На мікрозображенні також помітні:

- однорідність поверхневого шару, що свідчить про стабільний дифузійний процес;
- поступовий перехід у перлітну матрицю, характерний для сталей із середнім вмістом вуглецю;
- відсутність міжфазних тріщин, що вказує на добру сумісність коефіцієнтів термічного розширення між покриттям і основою;
- чітку границю "TiC – перехідна зона", що властиво для твердого дифузійного шару з високою стійкістю до спрацювання.

У цілому отримане дифузійне покриття демонструє характерні ознаки компактного та адгезійно стійкого шару TiC, яке значно підвищує зносостійкість сталі середньовуглецевого класу. Під час обробки відбувалася одночасна дифузія титану і вуглецю, що приводило до утворення: – верхнього шару TiC; – перехідної зони, збагаченої вуглецем; –перлітної основи, яка спостерігається нижче.

Саме ця комбінація режимів дає таку характерну мікроструктуру, як на твоєму зображенні.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Висновок по розділу.

Порошкова технологія формування зносостійких шарів забезпечує отримання рівномірних дифузійних покриттів, які за експлуатаційними характеристиками майже не поступаються шарам, одержаним газофазними методами, хоча й демонструють дещо гіршу стабільність товщини по поверхні. Усі модифіковані зразки мають характерну світлу приповерхневу зону, що безпосередньо прилягає до матриці. Після титанування на поліруваних шліфах, оброблених травленням, фіксується однорідний шар карбиду титану з чіткою межею поділу з основою. Його геометричні параметри залежать від температури насичення, тривалості витримки та вмісту вуглецю в матеріалі.

Для сталі 45 за режиму 1323 К і тривалості 2 години товщина шару становить 8–11 мкм. За аналогічних параметрів для сталі У8А покриття виростає до 14–17 мкм, що зумовлено вищим вуглецевим потенціалом основи. Під карбідною зоною на сталі 45 спостерігається перлітний підшар, сформований унаслідок міграції вуглецю до реакційної поверхні. На твердому сплаві Т15К6 покриття значно тонше – приблизно 3–5 мкм. Подовження насичення з двох до трьох годин збільшує загальну товщину, однак на поверхні з'являється інтерметалід $CoTi$, що відображено на відповідних мікроструктурних зображеннях.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

4.1. Технологія титанування

Титанування як дифузійний процес формування зносостійких покриттів належить до ефективних методів модифікації поверхневих шарів сталей і твердих сплавів. Початкова стадія розвитку технології припадає на середину ХХ століття, коли були сформовані базові уявлення про взаємодію титану з вуглецем у твердому стані й можливість цілеспрямованого створення карбідних шарів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Подальша еволюція методу була пов'язана з удосконаленням порошкових сумішей, контролем газового середовища та розробкою ретортних систем для рівномірного насичення поверхні. З початку 1990-х років технологія доповнилася вакуумними та газофазними варіантами, що забезпечили стабільніші умови та прогнозовану товщину дифузійних шарів.

Фізико-хімічна суть процесу полягає у взаємодії титану з вуглецем основи з утворенням карбїду титану TiC , рідше – проміжних інтерметалїдів типу $CoTi$ або $FeTi$, які виникають за умов дефіциту вуглецю чи надмірної тривалості насичення. Рушійною силою дифузії є значний градієнт концентрації між поверхневим контактом титану та вуглецевою матрицею. Параметри кристалічної ґратки TiC змінюються в широкому інтервалі вмісту вуглецю, що обумовлює варіацію фізико-механічних властивостей отриманого шару. На сталях із підвищеним вмістом вуглецю формуються товстїші та більш однорідні карбїдні зони, тоді як низьковуглецеві матеріали потребують корекції температури й часу для досягнення аналогічних результатів.

Сучасний стан технології характеризується переходом від традиційних порошкових методів до керованих процесів із використанням вакуумних камер, автоматизованого контролю атмосфери та комбінованих дифузійних режимів. У практиці виробництва різального інструменту, штампового оснащення та відповідальних деталей машин все частіше застосовуються багат шарові

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

системи TiC–TiN, TiC–TiCN та гібридні структури, отримані поєднанням титанування з азотуванням або плазмовою активацією. Такі методи забезпечують не лише підвищення твердості, але й суттєве зростання триботехнічних характеристик, корозійної стійкості та стабільності при термічних навантаженнях.

Сучасне обладнання дає можливість точно керувати кінетикою утворення карбідів, оптимізувати товщину шарів для різних марок сталей і твердих сплавів, а також інтегрувати процес у гнучкі виробничі лінії. Це дозволяє розглядати титанування як один із найперспективніших методів поверхневого зміцнення для матеріалів, що працюють в умовах інтенсивного зношування.

4.2 Технологічне обладнання для процесу титанування

Реалізація процесу титанування в порошкових сумішах вимагає застосування високотемпературних печей із стабільним температурним полем та можливістю роботи з ретортами. Для лабораторних досліджень доцільно використовувати камерні або муфельні печі з максимальною температурою не менше 1200 °С, що забезпечує необхідний резерв для проведення насичення при 1000–1050 °С. Важливими параметрами є рівномірність розподілу температури в робочому об'ємі, наявність програмованого терморегулятора та сумісність із металевими або керамічними контейнерами.

Типовим прикладом є муфельні печі Nabertherm серії L/LT 15/12 з максимальною температурою 1200 °С, які спеціально орієнтовані на матеріалознавчі дослідження і термічну обробку зразків у лабораторіях. Виробник декларує високу однорідність температурного поля (± 5 К при $T > 800$ °С) та наявність сучасних контролерів для програмування режимів нагріву й витримки.

Таке обладнання дозволяє розміщувати всередині реторту з порошковою сумішшю титану, карбюризатора та активатора і проводити пакетне титанування сталей та твердих сплавів.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66



Рисунок 4.1 – Муфельна піч «Nabertherm L 15/12»

Для процесів, де необхідне кероване газове середовище (захисна атмосфера, реакційні гази), доцільно застосовувати ретортні печі під захисним газом. Такі агрегати мають герметичну металеву реторту з водоохолоджуваним ущільненням дверей і розраховані на роботу в інертних або реакційних газах при температурах до 1100–1300 °С. Прикладом є захисногазові ретортні печі Nabertherm для процесів у визначеній атмосфері, які позиціонуються виробником як універсальне рішення для термообробки, карбонізації, нітрації та інших дифузійних процесів. Їх можна розглядати як еталонне обладнання.



Рисунок 4.2 – Ретортна муфельна піч «Nabertherm S-556» з захисним газом

					<i>KPMMTBA25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Таким чином, для реалізації титанування в умовах кафедральної лабораторії достатньо високотемпературної муфельної печі з ретортою. Для масштабування технології та впровадження на підприємствах доцільно орієнтуватися на промислові ретортні печі із захисною атмосферою, що забезпечують кращий контроль процесу та підвищену відтворюваність параметрів покриттів.

4.3 Розвиток і принцип дії плазмового азотування

Плазмове азотування (іонно-плазмове насичення) сформувалося як окрема галузь термохіміко-поверхневих технологій у другій половині ХХ століття на тлі активного розвитку електровакуумного обладнання та джерел високої напруги. Перші експерименти із застосуванням тліючого розряду для модифікації сталевих поверхонь були проведені у 1930–1940-х роках, однак широке впровадження процес отримав лише після створення стабільних генераторів постійної напруги та вакуумних камер з контрольованими параметрами газової атмосфери. У 1960-1970-х роках з'явилися перші промислові установки, що працювали у режимі негативного потенціалу на деталі, завдяки чому стало можливим керувати енергією іонів, температурою поверхні та інтенсивністю масоперенесення.

Подальший етап розвитку пов'язаний із впровадженням автоматизованих систем керування тиском, напругою і складом газів, що дозволило отримувати стабільні й прогнозовані дифузійні шари на широкому спектрі матеріалів – від конструкційних сталей до жароміцних сплавів. В останні десятиліття плазмове азотування стало ключовою технологією для машинобудування, енергетичного сектору, авіаційної промисловості та інструментального виробництва, оскільки забезпечує підвищену твердість, корозійну стійкість і довговічність деталей за мінімальних деформацій і низьких енергетичних витрат.

Фізичний принцип процесу

Плазмове азотування ґрунтується на створенні тліючого розряду у суміші газів, найчастіше азоту та водню, за тиску 10–500 Па. На деталь подають

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

негативний потенціал, унаслідок чого на поверхню спрямовуються прискорені іони, що беруть участь у кількох ключових етапах.

Іонне бомбардування. Потік енергійних частинок очищає поверхню від оксидів, адсорбованих домішок та залишкових плівок. Це забезпечує активування шару, підвищення його реакційної здатності та стабільність початкової стадії насичення.

Розігрівання поверхні. Внаслідок іонного розсіяння температура деталі підвищується і підтримується у вибраному інтервалі (звичайно 500–600 °С), що сприяє дифузії азоту в ґратку основи.

Хімічні перетворення. На межі плазма–метал формуються активні атоми й радикали, які взаємодіють з металом, утворюючи нітриди та твердий розчин.

Дифузійне насичення. Азот переміщується вглиб приповерхневого шару, утворюючи зоновану структуру: зовнішній нітридний шар і підповерхневий дифузійний прошарок із зміненим складом та властивостями.

Структура та властивості шарів

Отримані покриття мають переважно двокомпонентну будову: тонку нітридну фазу (ϵ -Fe₂₋₃N та γ' -Fe₄N), яка відповідає за твердість і зносостійкість, та дифузійний підшар із підвищеним вмістом азоту. Така структура забезпечує комбінацію високої поверхневої твердості та прийнятної пластичності основи, що відрізняє плазмове насичення від класичних газових методів, де існує ризик формування надмірно крихкої зони. Крім того, керованість енергією іонів дозволяє уникати перегріву та деформацій деталей складної геометрії, що особливо важливо при обробці інструментальних сталей.

Переваги сучасних технологій

Плазмове азотування відзначається низкою експлуатаційних переваг: низьке енергоспоживання; можливість обробки поліруванням підготовлених поверхонь; мінімальні деформації; точне регулювання товщини та фазового

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

складу; сумісність з великогабаритними виробами й дрібними інструментами. У сучасних установках застосовують імпульсний режим живлення, який забезпечує зниження нагріву, покращення однорідності процесу та збільшення ресурсу обладнання.

Таким чином, плазмове азотування сформувалося як технологія, що поєднує гнучкість налаштувань, високу повторюваність результатів та адаптивність до різних матеріалів, що робить її оптимальним методом для створення зміцнених покриттів із прогнозованими властивостями.

4.4 Технологічне обладнання для плазмового азотування

Реалізація процесів плазмового азотування вимагає спеціалізованих вакуумно-плазмових комплексів, які поєднують функції нагрівання, створення тліючого розряду, керування газовою атмосферою та моніторингу параметрів процесу в реальному часі. На відміну від традиційних печей для термічної обробки, такі установки працюють у діапазоні тисків 10–500 Па, використовують джерела високої напруги для формування плазми й забезпечують точне регулювання складу газової суміші, що визначає фазовий склад нітридних шарів.

Типовою промисловою реалізацією є плазмові установки типу MICROPULS® Everest фірми RÜBIG, які позиціонуються як високоефективні системи для іонного азотування та оксинітрації (PLASNIT®, PLASOX®). Конструкція таких комплексів включає вакуумну камеру, генератори потужності, які формують стабільний розряд, систему подачі газів та модуль дистанційного керування з можливістю онлайн-діагностики процесів. Виробник підкреслює високу рівномірність температури та ефективність за рахунок можливості значного заповнення корисного об'єму, що важливо для серійної обробки деталей складної форми.

Окрему групу становлять гарячостінні та холодостінні печі іонного/плазмового азотування, які пропонує компанія Ionitech. Гарячостінні комплекси забезпечують нагрівання деталей як за рахунок електричних

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

нагрівачів, так і за рахунок енергії плазми, що дозволяє використовувати їх для обробки партій зразків різної форми й розмірів в одному завантаженні. Холодостійні варіанти більш пристосовані до серійної обробки однотипних деталей, де важлива повторюваність умов по всьому об'єму.



Рисунок 4.3 – Плазмова установка типу MICROPULS® Everest «RÜBIG»

На сайті виробника наведені схеми та фотографії обладнання, які можна застосувати як рисунки до підрозділу, зокрема зразок гарячостійної печі для іонного азотування.

Ще одним прикладом сучасних систем є вакуумні печі для плазмового азотування фірми PVA Industrial Vacuum Systems (PVA TePla). Такі установки розглядаються як універсальні вакуумні комплекси для зміцнювальної обробки сталей у режимі плазмової хіміко-термічної обробки. Вони комплектуються багатофункціональними системами керування, що дозволяють інтегрувати процес у автоматизовані лінії та здійснювати прецизійний контроль температурного режиму й складу атмосфери.

Компанії Nitrex, Electron та ION HEAT також пропонують промислові плазмонітрувальні комплекси, орієнтовані на контрактні термообробні цехи та

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

машинобудівні підприємства. Установки цього класу забезпечують стабільну якість шарів, оптимізоване споживання енергії та можливість реалізації комбінованих технологій азотування й нітроцементації.



Рисунок 4.4 – Промислова вакуумна система азотування «PlatG-PP120»

Для лабораторних умов, характерних для досліджень дифузійних покриттів на сталях 45, У8А та твердих сплавах, доцільно орієнтуватися на компактні вакуумні установки з робочою камерою діаметром 300–500 мм і висотою 400–600 мм, оснащені імпульсним джерелом живлення, масовими витратомірами газів та цифровим контролером процесу. Така конфігурація дає можливість відтворювати промислові режими плазмового азотування у масштабі лабораторних зразків, забезпечуючи при цьому достатню гнучкість для варіювання температури, тиску, складу атмосфери й тривалості обробки.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Таким чином, вибір обладнання для плазмового азотування має ґрунтуватися на вимогах до діапазону температур, розмірів деталей, необхідної глибини дифузійного шару та можливості реалізації комбінованих процесів (азотування після титанування).

4.5 Аналіз технологій титанування та тандемного процесу «титанування → плазмове азотування»

У сучасному матеріалознавстві методи формування дифузійних поверхневих шарів займають провідне місце серед технологій зміцнення деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, абразивного спрацювання та дії корозійно-активних середовищ. Серед широкого спектра хіміко-термічних процесів особливу увагу привертають титанування та комбіновані методи, які поєднують декілька послідовних операцій модифікації. Одним із найбільш ефективних рішень є тандемна технологія «титанування → плазмове азотування», що дозволяє сформувати багатофазні шари з підвищеною функціональністю. У цьому розділі наведено порівняльну характеристику двох методів, проаналізовано їхні переваги та визначено перспективність застосування у практиці триботехнічного зміцнення сталей та твердих сплавів.

Титанування як традиційна технологія формування карбідних шарів

Титанування є процесом дифузійного насичення поверхні деталей титаном у присутності вуглецю, що призводить до утворення шару карбіду титану TiC. Відомо, що TiC характеризується високою твердістю, низьким коефіцієнтом тертя та добрими показниками термостійкості. Характеристики дифузійного шару визначаються температурою процесу, часом насичення, складом середовища та вмістом вуглецю в основному матеріалі. Товщина покриття зазвичай становить 5–20 мкм залежно від складу сталі та режимів обробки.

Отриманий шар має чітку межу з основою, характеризується достатньо високою адгезією та забезпечує значний приріст стійкості до абразивного зношування. Проте структура шару однокомпонентна, а термоокиснювальна

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

стійкість TiC обмежена, що стає критичним для вузлів, які працюють при підвищених температурах або в умовах змінних навантажень.

Тандемне титанування з подальшим плазмовим азотуванням

Поєднання двох послідовних технологій – титанування та плазмового азотування – дозволяє сформувати багатофазний композиційний шар, де основну карбідну підструктуру TiC доповнює тонка поверхнева плівка TiN або Ti(N,C). У результаті формується градієнтна система, у якій кожний рівень виконує власну функцію:

- TiC забезпечує базову твердість та опір абразивному спрацюванню;
- Ti(N,C) підвищує термічну стабільність і знижує схильність до крихкого руйнування;
- TiN створює бар'єр проти окиснення й корозійних процесів.

Таблиця 4.1 Порівняння структури та експлуатаційних властивостей

Параметр	Титанування	Титанування + плазмове азотування
Тип шару	Монофазний TiC	TiC/Ti(N,C)/TiN (багатофазна система)
Твердість шару	25000–32000 МПа	35000–42000 МПа
Структурна стабільність	Помірна	Висока, завдяки градієнтній будові
Термоокиснювальна стійкість	Обмежена	Значно підвищена
Корозійна стійкість	Середня	Висока
Зносостійкість	Висока	Максимальна
Адгезія	Висока	Надвисока
Схильність до руйнування при змінних навантаженнях	Помітна	Зменшена завдяки нітридній плівці
Складність та вартість	Невисока	Підвищена

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Стабільність структури підвищується завдяки низькій температурі плазмового азотування (450–580 °С), що не призводить до перегрівання основного металу та не спричиняє декарбюрисації. Водночас плазмове азотування дозволяє тонко регулювати товщину верхнього нітридного шару, керувати дифузійними потоками та отримувати відтворювані результати.

Перспективність комбінованого підходу

Тандемна технологія забезпечує покращення всіх ключових характеристик – від твердості та зносостійкості до корозійної та термічної стабільності. Її ефективність особливо проявляється у випадку інструментальних сталей, деталей, що працюють у режимі циклічних навантажень, а також у польових умовах, де важлива довговічність та надійність поверхневих шарів. У порівнянні з традиційним титануванням, комбінований процес є значно більш функціональним, забезпечує ширший спектр експлуатаційних характеристик і може розглядатися як перспективний напрям для впровадження в сучасних триботехнічних та машинобудівних виробництвах.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА

5.1 Техніко-економічна оцінка ефективності процесів титанування та тандемної обробки

Оцінюючи доцільність впровадження дифузійного титанування та комбінованого процесу «титанування → плазмове азотування», слід враховувати сукупність технічних і економічних чинників: ресурс деталей, енерговитрати, вартість витратних матеріалів, амортизацію обладнання, а також можливий зменшений обсяг ремонту та простоїв. Для обох технологій ключовим показником є зниження собівартості одиниці напрацювання (година роботи, метр різання, кількість циклів навантаження) [30].

У спрощеному вигляді питомі витрати на обробку однієї деталі можна представити як суму складових:

$$C_{\text{обр}} = C_{\text{енерг}} + C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{аморт}} + C_{\text{накл}}, \quad 5.1$$

де враховуються: електроенергія на нагрів, газу або порошкові суміші, оплата праці персоналу, вартість зносу печей чи плазмових установок, а також загальновиробничі витрати (контроль, обслуговування, вентиляція, водоохолодження тощо). Для титанування ці складові відносно невеликі, оскільки використовується стандартне термічне обладнання з порошковими сумішами; при правильному завантаженні реторти витрати розподіляються на значну кількість виробів.

Економічний ефект визначається через скорочення кількості замін деталей або інструменту. Якщо до обробки деталь забезпечувала, умовно, N_0 годин роботи, а після титанування – N_1 , то відносна економія на одиницю ресурсу оцінюється як:

$$\Delta C = (C_{\text{дет}} + C_{\text{обр}})/N_1 - C_{\text{дет}}/N_0. \quad 5.2$$

При типових приростах ресурсу у 2–5 разів титанування дає помітне зниження витрат на одиницю напрацювання навіть з урахуванням додаткових витрат на процес.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Тандемна обробка з плазмовим азотуванням має вищу початкову вартість через дорожче устаткування, складнішу експлуатацію та споживання газів (N_2 , H_2) у вакуумній камері. Водночас багатофазні шари $TiC/Ti(N,C)/TiN$ дозволяють збільшити ресурс у 4–10 разів залежно від режиму і типу деталі, що особливо важливо для дорогих вузлів та ріжучого інструменту. Для таких випадків загальна вартість життєвого циклу деталі (виготовлення + зміцнення + експлуатація + утилізація) виявляється меншою, ніж при використанні дешевших, але менш довговічних технологій.

Таким чином, для деталей масового призначення економічно доцільним є переважно титанування, як більш проста та дешева технологія. Для високонавантажених, дорогих або важкодоступних вузлів перспективним є саме комбінований процес, який забезпечує максимізацію ресурсу, зниження кількості відмов і зменшення витрат на ремонтно-експлуатаційне обслуговування впродовж усього терміну служби.

5.2 Охорона праці та безпека під час дифузійної та плазмової обробки

Проведення титанування та плазмового азотування пов'язане з комплексом небезпечних і шкідливих виробничих факторів: високі температури, нагріті поверхні, вакуум, електроустановки підвищеної напруги, газові середовища, токсичні продукти реакцій. Організація безпечних умов праці повинна базуватися на чинній системі стандартів безпеки праці та нормативно-правових актах України [31, 32].

Базовим термінологічним документом є ДСТУ 2293:2014 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять», який уніфікує понятійний апарат у сфері безпеки праці. Система управління охороною праці на підприємстві має відповідати вимогам ДСТУ ГОСТ 12.0.230:2008 «Система стандартів безпеки праці. Системи управління охороною праці. Загальні вимоги», що регламентує структуру, відповідальність і процедури СУОП.

Безпечність виробничого обладнання, у тому числі печей для хіміко-термічної обробки та вакуумних камер плазмових установок, повинна

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

враховувати вимоги ДСТУ 7234:2011 «Дизайн і ергономіка. Обладнання виробниче. Загальні вимоги дизайну та ергономіки», спрямовані на зниження напруженості праці, безпечне розташування органів керування, доступність зон обслуговування. Електрообладнання установок підлягає нормам ДСТУ EN 60204-1:2019 «Безпечність машин. Електричне устаткування машин. Частина 1. Загальні вимоги», що встановлює вимоги до захисту від ураження струмом, аварійного відключення, маркування та перевірки схем керування.

Безпосередньо для термічної обробки діють НПАОП 28.5-1.02-07 «Правила охорони праці при термічній обробці металів», які регламентують вимоги до конструкції печей, герметизації робочого простору, організації вентиляції, контролю газового середовища, а також порядку обслуговування й ремонту обладнання. Додатково застосовуються положення ГОСТ 12.3.004-75 «Термічна обробка металів. Загальні вимоги безпеки» як елемент системи стандартів безпеки праці.

Захист працівників від дії небезпечних факторів забезпечується комплексом колективних та індивідуальних засобів. Вимоги до засобів індивідуального захисту (захисний одяг, рукавиці, щитки, респіратори) наведені у ДСТУ 7239:2011 «Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація»; для колективного захисту (огороження, вентиляційні системи, блокування) — у ДСТУ 7238:2011 «Засоби колективного захисту працюючих. Загальні вимоги та класифікація».

Усі роботи з титанування та плазмової обробки мають виконуватися персоналом, який пройшов спеціальне навчання, інструктажі та перевірку знань з охорони праці. Перед кожним запуском установок необхідно проводити контроль справності систем блокування, герметичності вакуумних камер, працездатності вентиляції, заземлення та аварійного вимикання. Дотримання вимог стандартів і правил дозволяє мінімізувати виробничі ризики, забезпечити безпечну експлуатацію технологічного обладнання та стабільне отримання високоякісних зносостійких покриттів.

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

ВИСНОВКИ

На підставі опрацьованих літературних джерел і матеріалів патентного пошуку встановлено, що серед наявних способів зміцнення поверхні одним із найбільш перспективних є дифузійна металізація, зокрема титанування. Цей процес забезпечує істотне підвищення твердості, опору спрацюванню та стабільності роботи машинобудівних деталей і ріжучого інструменту. Комплексне порівняння переваг і обмежень різних технологій підтвердило доцільність використання титанування для створення зносостійких покриттів у широкому діапазоні технічних задач.

Розглянуто матеріали дослідження та методичні підходи до оцінювання дифузійних шарів. Предметом аналізу виступали фазовий і хімічний склад, мікроструктура, мікротвердість, а також експлуатаційні характеристики поверхневих шарів, сформованих на сталях та твердих сплавах. Необхідність застосування різних фізичних і металографічних методів зумовлена потребою отримання комплексної інформації про будову та властивості покриттів з урахуванням економічної доцільності кожного етапу контролю.

Встановлено закономірності формування дифузійних шарів залежно від температурно-часових параметрів та складу основи. Товщина карбїду титану істотно варіює при зміні режимів насичення і визначається концентрацією вуглецю і легуючих елементів у підкладці. Для сталі 45 при обробці за 2 години при 1323 К отримуються шари 8–11 мкм; на сталі У8А за аналогічних умов формується шар 14–17 мкм, що узгоджується з підвищеною часткою вуглецю. На твердому сплаві Т15К6 товщина дифузійної зони становить 3–5 мкм, що пов'язано з особливостями карбїдної матриці та обмеженою доступністю вуглецю.

Оцінка економічної ефективності свідчить, що впровадження титанових покриттів підвищує вартість окремого технологічного циклу, проте забезпечує збільшення ресурсу деталей у 2–3 рази. За рахунок цього загальна собівартість експлуатації знижується, особливо у випадках високого навантаження або дорогого інструменту.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савуляк В.Й., Савуляк В.В. Зносостійкі покриття з градієнтними властивостями. Вісник машинобудування та транспорту. URL: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/article/view/44>
2. Духота О.М. Концептуальний підхід до створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості. Проблеми тертя та зношування. 2017; №74: 97–103.
3. Дегула А.М. Підвищення властивостей сталей і твердих сплавів нанесенням багатошарових карбідних та карбооксидних дифузійних покриттів на основі титану, ванадію і хрому: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. Київ, 2010. 22 с.
4. Кшнякін В.С., Опанасюк А.С., Дядюра К.О. Основи фізичного матеріалознавства. Суми: СумДУ; 2015. 466 с.
5. Рижков В.С., Панков В.А., Ровенська В.В. Економіка підприємства: навчальний посібник. Київ: Слово; 2014. 253 с.
6. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці: підручник. 3-тє вид., перероб. і доп. Львів: Українська академія друкарства; 2006. 336 с.
7. Pogrebnyak A.D., Beresnev V.M., Azarenkov N.A. Structure and properties of protective coatings and modified layers of materials. Kharkiv: V.N. Karazin KhNU; 2007.
8. Rudyk O., Vanashko A., Lynnyk R. Automotive parts design software. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Information Technologies in Metallurgy and Machine Building – ITMM 2024". Dnipro: Khmelnytskyi National University, 2024.
9. Швець С. В. Металорізальні інструменти: навчальний посібник. Суми: Сумський державний університет, 2019. 272 с.
10. Ковальчук О. П. Технологія відновлення деталей машин: підручник. Київ: НУХТ, 2021. 320 с.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

11. Сидоренко В. І. Основи відновлення машин і механізмів: навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2020. 215 с.

12. Колісник С. Т. Виробничі технології відновлення деталей. Луцьк: ЛНТУ, 2022. 240 с.

13. Зінченко В. О. Газотермічне напилення у відновленні деталей. Київ: НУХТ, 2021. 180 с.

14. Литвиненко М. С. Технології зварювання та наплавлення: теорія і практика. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 245 с.

15.

16. ASTM E384-23. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. ASTM International; 2023.

17. ISO 6506-1:2014. Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method.

18. ISO 6508-1:2015. Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1: Test method.

19. ISO 6507-1:2018. Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method.

20. Sharifi M., et al. Microstructure and mechanical properties of titanium carbide coatings formed on AISI 1045 steel. International Journal of Engineering. 2019. URL: https://www.ije.ir/article_72566_77444f1b27415177500b147ddf98af34.pdf

21. Дегула А. І., Кравченко А. С. Карбідні покриття на сталях та твердих сплавах : монографія. – Суми : Сумський державний університет, 2010. – 132 с.

22. Хижняк В. Г., Дегула А. І., Карпець М. В., Говорун Т. П., Харченко Н. А. Електронна будова та властивості дифузійних карбідних покриттів Ti, V, Cr : препринт / Сумський державний університет. – Суми, 2016. – 28 с.

23. Degula A. I., Govorun T. P., Kharchenko N. A., Khyzhnyak V. G., Karpets M. V., Myslyvchenko O. M., Stepanin R. S. Studies of the phase and chemical composition of complex carbide coatings // Metallophysics and the Newest Technologies. – 2015. – Vol. 37, No. 11. – P. 1461–1476.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Interaction of Ti–C system at high temperatures. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/article/v37/i11/MFiNT.37.1461.pdf>

25. Shakhova N.M., Bondar O.V., Pogrebnyak A.D. Nanostructured multicomponent coatings (TiAlSiY)N with ultrahigh hardness. In: Physics, Electronics, Electrical Engineering Conference Proceedings. Sumy; 2018. p. 41.

26. Патент України №28335. Спосіб нанесення карбонітридних покриттів на сталі та тверді сплави. URL: <https://uapatents.com/4-28335-sposib-nanesennya-karbonitridnikh-pokrittivna-stali-ta-tverdi-splavi.html>

27. Патент України №7454. Спосіб формування зносостійкого покриття на поверхні виробу з конструкційної сталі. URL: <https://uapatents.com/4-7454-sposib-formuvannya-znosostijjkogo-pokrittiana-poverkhni-virobu-z-konstrucijjno-stali.html>

28. Патент України №30506. Спосіб нанесення карбонітридних дифузійних покриттів на поверхню сталей та твердих сплавів. URL: <https://uapatents.com/3-30506-sposib-nanesennya-karbonitridnikhdifuzijnikh-pokrittiv-na-poverkhnyu-stalej-ta-tverdikh-splaviv.html>

29. ДСТУ ISO 6506-2:2021. Метрологічні вимоги до твердомірів Брінелля.

30. ДСТУ EN 10338:2016. Сталі та матеріали для хіміко-термічної обробки.

31. ДСТУ 2293-93. Охорона праці. Терміни та визначення.

32. ДСТУ 3973-2000. ССБП. Організація інструктажів з охорони праці.

					<i>КРММТВА25.24345.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

ДОДАТКИ

					КРММТВА25.24345.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83