

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи матеріалів, технологій та гостинності
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

**Вплив хромування на структуру і
властивості сталі типу Grade 3 / The effect
of chromium coating on the structure and
properties of Structural Steel Grade 3**

132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Індустріальний інжиніринг і менеджмент
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)с-31
Панузик Артем Юрійович

(підпис)

Керівник:
д.т.н., професор
Єфременко Василь Георгійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“03 ” січня _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Панузику Артему Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Вплив хромування на структуру і властивості сталі
myny Grade 3 / The effect of chromium coating on the structure and properties of
Structural Steel Grade 3*

керівник роботи *Єфременко Василь Георгійович, д.т.н., професор*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *05.06.25* року № *540/01-02*

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« *23* » *травня* *2026* р.

3. Вихідні дані до роботи *Хімічний склад та механічні властивості Grade 3;*
типова технологія хромування; довідникові матеріали;
умови роботи хромованих виробів; методичні вказівки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) *вступ; розділ 1 Огляд технічної літератури;*
розділ 2 Технологічна частина; розділ 3 Дослідна частина;
розділ 4 Визначення твердості та міцності;
Список використаних джерел; Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Титульна сторінка - 1 л. ф. А4, 2. Аналіз видів покриттів - 1 л. ф. А4,

3. Експлуатаційні вимоги до штока. Хімічний склад Grade 3 - 1 л. ф. А4,

4. Властивості та призначення видів гальванічних покриттів - 1 л. ф. А4,

5. Характеристика основних типів хромових покриттів - 1 л. ф. А4,

*6. Схема технологічного процесу до та після хромування - 2 л. ф. А4, 7. Вплив параметрів
процесу на властивості і якість покриття - 1 л. ф. А4, 8. Структура Grade 3 після*

*хромування - 1 л. ф. А4, 9. Товщина та твердість покриття - 1 л. ф. А4, 10. Міцність та
пластичність зразків - 1 л. ф. А4, 11. Висновки - 1 л. ф. А4.*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>	<i>03.01.26</i>	<i>23.05.26</i>

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ, розділ 1 Огляд технічної літератури.</i>	<i>05.05.26</i>	
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Технологічна частина.</i>	<i>12.05.26</i>	
	<i>Розділ 3 Дослідна частина.</i>		
<i>3</i>	<i>розділ 4 Визначення твердості та міцності.</i>	<i>19.05.26</i>	
	<i>Висновки. Додатки.</i>		
	<i>Графічна частина</i>		

Здобувач вищої освіти Панузик А.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи Єфременко В.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Панузик А. Ю. Назва теми: «Вплив хромування на структуру і властивості сталі типу Grade 3»

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, додатків.

У кваліфікаційній роботі аналіз структурних змін, та властивостей сталі Grade 3 після нанесення хромового покриття, проаналізовано та обгрунтовано вибір хромування для штоку торгового обладнання; проаналізовано особливості катодних та анодних процесів під час електролітичного хромування

Основні рішення, прийняті в роботі направлені на забезпечення комплексу необхідних властивостей досліджуваної сталі та технологічного процесу, а також встановлення доцільності застосування запропонованого методу хромування для деталей та елементів торгового обладнання.

Загальний обсяг роботи: 57 сторінок, 4 розділи та висновки, 21 рисуноків, 12 таблиць, 19 літературних джерел.

Ключові слова: слаль Grade 3, елементи торгового обладнання, хромування, гальванічні покриття, електрохімічні процеси, зношування, катод, анод.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вплив хромування на структуру і властивості сталі типу Grade 3 / The effect of chromium coating on the structure and properties of Structural Steel Grade 3	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробив	Панузик								
Перевірив	Єфременко						3	57	
						ЛНТУ, каф.матеріалознавства, гр. ПМ(ПМ)с-31			
Н. Контр	Мисковець								
Затв.	Імбірович								

ABSTRACTS

Panuzyk, A. Yu. Thesis Title: “The Effect of Chromium Plating on the Structure and Properties of Grade 3 Steel”

Bachelor’s Thesis in the “Materials Science” Educational Program, Major 132: Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor’s thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a bibliography, and appendices.

The thesis analyzes structural changes and the properties of Grade 3 steel after chromium plating; it analyzes and justifies the choice of chromium plating for commercial equipment components; and it examines the characteristics of cathodic and anodic processes during electrolytic chromium plating

The main decisions made in this work are aimed at ensuring the set of necessary properties of the studied steel and the technological process, as well as establishing the feasibility of applying the proposed chromium plating method for parts and components of commercial equipment.

Total volume of the work: 56 pages, 4 chapters and conclusions, 15 figures, 6 tables, 25 references.

Keywords: Grade 3 steel, retail equipment components, chromium plating, electroplating, electrochemical processes, wear, cathode, anode.

					БП 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	8
1.1 Захисні покриття, їх особливості та призначення	8
1.2 Гальванічні покриття	13
1.3 Електрохімічні процеси хромування	16
1.4 Типи, властивості і призначення хромованих покриттів	19
1.5 Висновки та постановка завдань	23
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	26
2.1. Характеристика хромових покриттів	26
2.2. Підготовка поверхні	30
2.3. Обробка деталей після хромування.....	35
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	37
3.1. Характеристика об'єкту дослідження	37
3.2. Характеристика сталі Grade 3	39
3.3. Дослідження мікроструктури	42
3.4. Дослідження поверхні після тертя	45
РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ТА МІЦНОСТІ	47
4.1. Аналіз твердості покриття	47
4.2. Вплив хромування на механічні властивості основного металу	50
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Однією з ключових проблем експлуатації металевих матеріалів, зокрема сталей, є їх схильність до зношування та термічної деградації, що призводить до передчасного виходу з ладу елементів конструкцій. Сучасна промисловість характеризується зростанням навантажень на матеріали та переходом до більш жорстких умов експлуатації (високі температури, швидкості, агресивні середовища), що вимагає підвищення зносостійкості деталей без значного збільшення їх вартості.

Згідно з сучасними дослідженнями, процеси зношування та корозії є причиною понад 80 % відмов механічних компонентів у промисловості, що обумовлює значні економічні втрати та потребу у вдосконаленні матеріалів і технологій їх захисту [1]. Особливо це актуально для деталей, що працюють в умовах комбінованого впливу механічного навантаження, високих температур і агресивних середовищ.

Хромисті сталі широко застосовуються у різних галузях техніки завдяки їх високій міцності, корозійній стійкості та здатності до зміцнення. Вміст хрому забезпечує формування стабільних карбідних фаз та оксидних плівок, що підвищують стійкість матеріалу до окиснення і зношування [2]. Однак навіть ці сталі за умов інтенсивної експлуатації не завжди забезпечують необхідний рівень зносо- та термостійкості, що обмежує їх ресурс роботи.

Ефективним напрямом підвищення експлуатаційних характеристик сталей є застосування захисних покриттів. Сучасні покриття (нітридні, карбідні, композиційні, високоентропійні тощо) дозволяють істотно підвищити твердість, зносостійкість, термостійкість і корозійну стійкість поверхневого шару без зміни властивостей основного матеріалу. Використання покриттів може значно зменшити коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування, що особливо важливо для деталей тертя [3].

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ефективність захисних покриттів визначається не лише їх складом, але й мікроструктурою, адгезією до підкладки, технологією нанесення та умовами експлуатації [4]. Важливим є також встановлення взаємозв'язку між структурою покриття та його експлуатаційними властивостями, зокрема зносостійкістю та термостійкістю.

Аналіз властивостей захисних покриттів на хромистих сталях, а також дослідження факторів, що впливають на їх ефективність, є важливим науково-практичним завданням сучасного матеріалознавства та інженерії поверхні. Активний розвиток технологій нанесення покриттів і створення нових матеріалів із покращеними трибологічними та термічними властивостями, включаючи багат шарові, наноструктуровані та композиційні покриття є досить актуальним для багатьох галузей промисловості.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Захисні покриття, їх особливості та призначення

Для забезпечення довговічності деталей машин, технологічного оснащення та конструкцій в умовах дії агресивних середовищ широко застосовують захисні покриття. Основним призначенням таких покриттів є запобігання корозійному руйнуванню, підвищення зносостійкості, покращення декоративних характеристик та надання поверхні спеціальних функціональних властивостей. Сучасні технології поверхневої інженерії дозволяють формувати покриття з комплексом властивостей, адаптованих до конкретних умов експлуатації.

Залежно від функціонального призначення розрізняють захисні, декоративні та спеціальні покриття (рисунк 1.1). Захисні покриття застосовують для підвищення корозійної стійкості металів у різних агресивних середовищах, у тому числі при дії підвищених температур та вологи. Декоративні покриття поєднують захисні властивості з покращенням зовнішнього вигляду виробів. Спеціальні покриття забезпечують формування додаткових функціональних властивостей: підвищеної твердості, зносостійкості, електроізоляційних, магнітних або антифрикційних характеристик.

Металеві захисні покриття повинні відповідати ряду вимог: бути суцільними, рівномірними, щільними, мати високу адгезію до основного металу, достатню твердість та корозійну стійкість. Однією з головних умов ефективності покриття є його здатність запобігати проникненню агресивного середовища до основного металу.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Класифікація захисних покриттів

У сучасному машинобудуванні застосовують декілька основних методів нанесення захисних покриттів:

- гальванічний;
- дифузійний;
- газотермічне розпилення;
- гаряче занурення;
- плакування;
- вакуумне та іонно-плазмове осадження.

Гальванічні покриття формуються шляхом електролітичного осадження металу на поверхню деталі з водних розчинів електролітів під дією постійного електричного струму (рисунок 1.2). При цьому деталь виконує роль катода, а анодом служить пластина металу, що осаджується, або нерозчинний електрод.

Основними перевагами гальванічних покриттів є:

- рівномірність розподілу;
- можливість регулювання товщини;
- висока декоративність;

- хороша якість поверхні;
- можливість автоматизації процесу.

До недоліків належить пористість покриттів та необхідність ретельної підготовки поверхні.



Рисунок 1.2 – Схема процесу електролітичного осадження

Дифузійні покриття формуються внаслідок насичення поверхневого шару металу атомами іншого елемента при підвищених температурах. У процесі термодифузійної обробки відбувається взаємна дифузія елементів з утворенням твердих розчинів або нових фаз у поверхневому шарі матеріалу. Основною особливістю таких покриттів є відсутність чіткої межі між покриттям і основним металом, що забезпечує високу адгезію та термічну стабільність. Дифузійні покриття широко застосовуються для підвищення жаростійкості, корозійної стійкості та зносостійкості деталей турбін, штамсів, ріжучого інструменту та елементів енергетичного обладнання.

Газотермічні покриття отримують шляхом напилення розплавленого металу або порошкового матеріалу на поверхню виробу за допомогою газового полум'я, електричної дуги або плазмового струменя. Основною перевагою даного методу є можливість нанесення покриттів на

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

великогабаритні конструкції та відновлення зношених деталей без значного термічного впливу на основу. Такі покриття використовуються для захисту резервуарів, мостових конструкцій, валів, корпусних деталей та елементів, що працюють в умовах абразивного або корозійного зношування. Сучасні технології плазмового напилення дозволяють отримувати щільні покриття з високою адгезією та зносостійкістю.



Рисунок 1.3. Різні види покриттів на виїбках:

а – дифузійне покриття шестерень;

б – газотермічне покриття;

в – зразок після плакування;

г – деталі з вакуумним та лазерним покриттям

Гарячі покриття формуються шляхом занурення деталей у розплавлений метал, найчастіше цинк, алюміній, олово або свинець. У процесі контакту з розплавом на поверхні виробу утворюється захисний металевий шар та дифузійна зона взаємодії між покриттям і основним металом. Основною особливістю гарячих покриттів є висока корозійна стійкість в атмосферних умовах та відносна простота технології. Найбільшого поширення гаряче

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цинкування набуло у виробництві металоконструкцій, труб, кріпильних елементів, листового прокату та деталей транспортного машинобудування.

Плакування є методом формування багатошарових металевих матеріалів шляхом з'єднання основного металу з корозійностійким облицювальним шаром за допомогою гарячої прокатки, пресування або вибухового зварювання. Основною особливістю плакованих матеріалів є поєднання високої міцності основного металу з корозійною стійкістю або спеціальними властивостями облицювального шару. Плакування широко застосовується у хімічному машинобудуванні, енергетиці, суднобудуванні та виробництві апаратури, що працює в агресивних середовищах. Найчастіше сталь плакують нержавіючою сталлю, міддю, нікелем або алюмінієм.

Вакуумні та іонно-плазмові покриття формуються у вакуумному середовищі шляхом конденсації атомів або іонів матеріалу на поверхні виробу. До найбільш поширених технологій належать PVD- та CVD-покриття. Такі покриття характеризуються надзвичайно високою твердістю, низьким коефіцієнтом тертя, високою адгезією та стабільністю властивостей при підвищених температурах. Вони широко застосовуються для зміцнення ріжучого інструменту, прес-форм, деталей авіаційної техніки, медичних інструментів та високоточних вузлів тертя.

Наноконпозиційні покриття є сучасним напрямом розвитку поверхневої інженерії та формуються шляхом введення до металевої матриці наночастинок карбідів, оксидів або інших зміцнювальних фаз. Такі покриття характеризуються підвищеною мікротвердістю, зносостійкістю, жаростійкістю та корозійною стійкістю. Завдяки дрібнодисперсній структурі наноконпозиційні покриття забезпечують ефективний захист деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, високих температур та агресивних середовищ. Вони активно впроваджуються в авіаційному двигунобудуванні, енергетиці та високоточному машинобудуванні.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Гальванічні покриття

Сутність гальванічного осадження полягає в електрохімічному виділенні металу з електроліту на поверхні виробу під дією постійного електричного струму. У процесі електролізу деталь виконує роль катода, а джерелом іонів металу виступає електроліт або анод. У результаті на поверхні формується суцільний металевий шар необхідної товщини та структури.

Гальванічні покриття використовуються для підвищення корозійної стійкості, зносостійкості, твердості поверхневого шару, відновлення зношених поверхонь, а також для надання виробам декоративних і спеціальних функціональних властивостей. Значною перевагою гальванічних методів є можливість точного регулювання товщини покриття в широкому діапазоні – від часток мікрометра до сотень мікрометрів.

Якість гальванічного покриття визначається його адгезією до основного металу, мікротвердістю, пористістю, рівномірністю товщини, шорсткістю та корозійною стійкістю. На формування структури та властивостей покриття впливають склад електроліту, температура розчину, густина струму, режим перемішування та стан поверхні основи.

Залежно від функціонального призначення гальванічні покриття поділяють на захисні, захисно-декоративні та спеціальні (рисунок 1.4). Захисні покриття забезпечують корозійну стійкість деталей в агресивних середовищах. Захисно-декоративні покриття поєднують антикорозійні властивості з високою якістю зовнішнього вигляду. Спеціальні покриття призначені для надання поверхні особливих властивостей – підвищеної твердості, зносостійкості, електропровідності або антифрикційних характеристик.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.4 – Класифікація видів гальванічних покриттів

Одними з найбільш поширених є цинкові покриття, які належать до анодних покриттів. Цинк має більш негативний електродний потенціал порівняно зі сталлю, тому навіть у разі локального пошкодження покриття забезпечується електрохімічний захист основного металу. Цинкові покриття широко застосовуються для захисту кріпильних елементів, труб, кузовних деталей автомобілів та будівельних конструкцій.

Нікелеві покриття характеризуються високою твердістю, декоративністю та корозійною стійкістю (таблиця 1.1). Вони широко використовуються як самостійні захисно-декоративні шари або як проміжні підшари у багатошарових системах типу «мідь–нікель–хром». Сучасні технології дозволяють отримувати матові, блискучі та композиційні нікелеві покриття з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Хромові покриття відзначаються високою мікротвердістю, зносостійкістю та низьким коефіцієнтом тертя. Їх використовують для зміцнення деталей тертя, штоків гідроциліндрів, валів, прес-форм та деталей

авіаційної техніки. Залежно від умов електролізу можуть формуватися тверді, блискучі або пористі хромові покриття.

Таблиця 1.1 – Характеристика гальванічних покриттів

Вид покриття	Основні властивості	Основне призначення
Цинкове	Анодний захист від корозії	Атмосферостійкі деталі
Нікелеве	Декоративність, твердість	Захисно-декоративні покриття
Хромове	Висока твердість, зносостійкість	Деталі тертя
Мідне	Висока електропровідність	Підшари та електротехніка
Олов'яне	Корозійна стійкість	Харчова промисловість
Срібне	Висока електропровідність	Контакти та електроніка

Мідні покриття характеризуються високою електропровідністю та пластичністю. Найчастіше вони використовуються як проміжні шари перед нікелюванням або хромуванням, а також у виробництві електротехнічних виробів. Олов'яні покриття мають високу корозійну стійкість у нейтральних середовищах та є безпечними для контакту з харчовими продуктами, тому широко застосовуються у харчовій промисловості та виробництві тари.

За механізмом захисної дії гальванічні покриття поділяють на анодні та катодні. Анодні покриття мають більш негативний електродний потенціал порівняно з основним металом і забезпечують електрохімічний захист навіть при пошкодженні покриття. Катодні покриття, навпаки, ефективно захищають основу лише за умови суцільності та відсутності пор або тріщин.

Гальванічні покриття є важливим інструментом сучасної поверхневої інженерії, що дозволяє забезпечити ефективний захист деталей від корозії та зношування, підвищити їх довговічність і надати необхідних функціональних властивостей. Раціональний вибір типу покриття та параметрів електролізу забезпечує формування поверхневих шарів із заданими експлуатаційними характеристиками.

1.3. Електрохімічні процеси при хромуванні

Процес електролітичного хромування характеризується складним перебігом електрохімічних реакцій, які одночасно відбуваються на катоді та аноді. На відміну від більшості гальванічних процесів, під час хромування значна частина електричної енергії витрачається не лише на осадження металевого хрому, а й на побічні процеси – виділення водню та відновлення сполук шестивалентного хрому до тривалентного стану. Саме особливості катодних і анодних процесів визначають вихід хрому по струму, швидкість осадження, стабільність електроліту та властивості покриття.

1.3.1 Катодний процес

Під час хромування на поверхні катода одночасно відбувається декілька взаємопов'язаних процесів: осадження металевого хрому, виділення водню, відновлення сполук шестивалентного хрому до тривалентного стану та формування тонкої катодної плівки з продуктів відновлення електроліту.

Катодний процес у хромовокислих електролітах є значно складнішим порівняно з іншими гальванічними процесами (рисунок 1.5). Це пов'язано з багатостадійним механізмом відновлення хромової кислоти та високою часткою побічних реакцій. Встановлено, що на ефективність осадження хрому істотно впливає концентрація активних аніонів, насамперед сульфат-іонів.

Вихід хрому по струму залежить від співвідношення концентрацій хромового ангідриду та сірчаної кислоти. Максимальний вихід по струму досягається при концентрації сірчаної кислоти близько 1 % від концентрації CrO_3 . При подальшому збільшенні концентрації сульфат-іонів зростає швидкість утворення тривалентного хрому, що призводить до зниження ефективності осадження металевого хрому (таблиця 1.2).

Після подачі струму катодна густина струму спочатку різко зростає, а потім швидко зменшується. Таке явище пояснюється утворенням на поверхні

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

катода тонкої плівки з продуктів відновлення електроліту. Після вимкнення струму плівка поступово розчиняється, а при повторному ввімкненні процес повторюється.

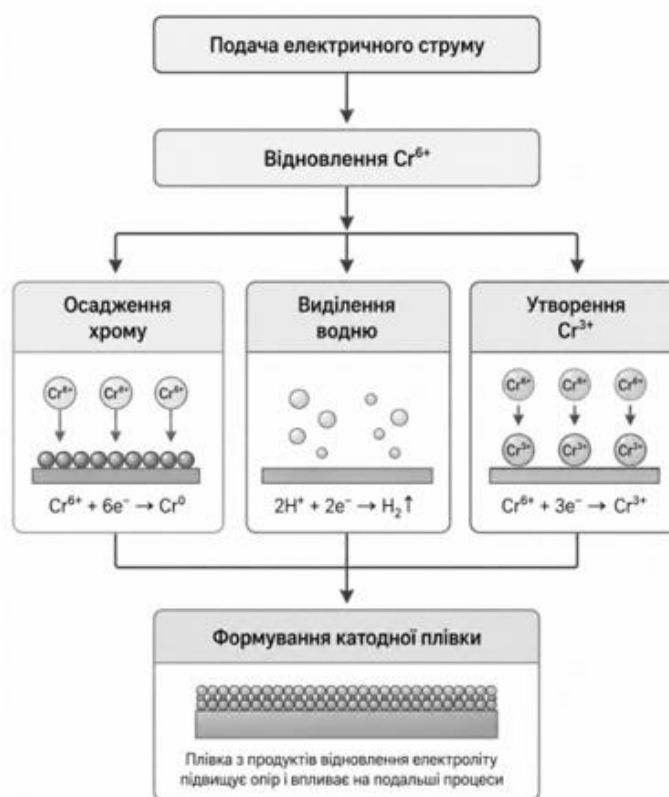


Рисунок 1.5 – Електрохімічні процеси та осадження хрому

Таблиця 1.2 – Вплив катодних процесів на ефективність хромування

Катодний процес	Основний результат	Вплив на покриття
Осадження хрому	Формування покриття	Підвищення твердості
Виділення водню	Побічний процес	Зниження виходу по струму
Відновлення $\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$	Накопичення Cr^{3+}	Погіршення роботи електроліту
Формування катодної плівки	Підвищення поляризації	Можливість осадження хрому

Катодна плівка відіграє важливу роль у механізмі осадження хрому. Вона підвищує поляризаційний опір катода та зміщує його потенціал у бік значень, за яких можливе виділення металевого хрому.

У розчинах хромової кислоти без добавки сірчаної кислоти на катоді переважно відбувається виділення водню (рисунок 1.6). Введення сульфат-іонів суттєво змінює характер поляризаційної кривої та створює умови для осадження хрому.

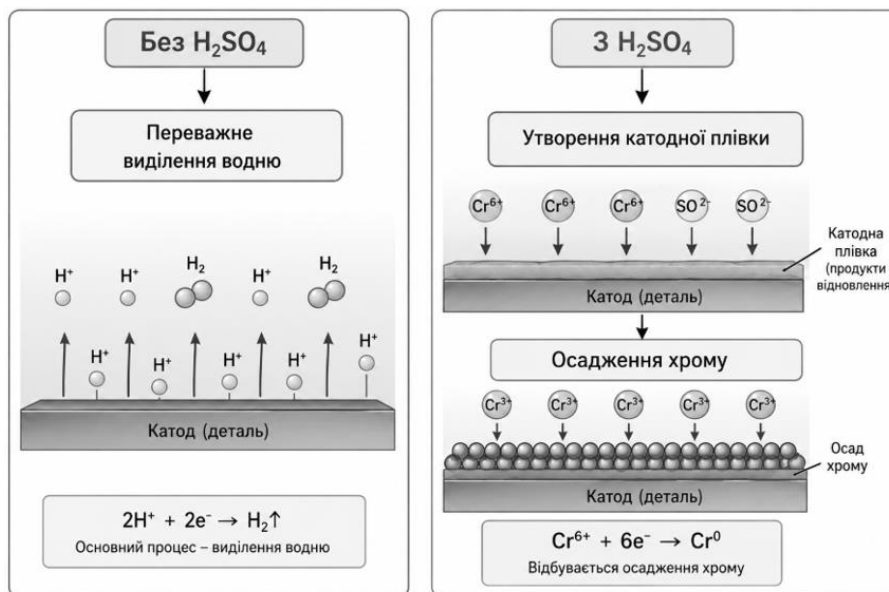


Рисунок 1.6 – Порівняння процесів катодного виділення

1.3.2 Анодний процес

При електролітичному хромуванні використовують лише нерозчинні аноди, виготовлені зі свинцю або його сплавів із сурмою та оловом. Використання розчинних хромових анодів є недоцільним, оскільки швидкість їх розчинення значно перевищує швидкість осадження хрому на катоді (рисунок 1.7). Це призводить б до постійного зростання концентрації хрому в електроліті та порушення стабільності процесу.

Крім того, при використанні розчинних анодів недостатньо інтенсивно відбувається окиснення тривалентного хрому до шестивалентного, що сприяє накопиченню Cr^{3+} у розчині та погіршенню роботи електроліту.

На нерозчинному свинцевому аноді відбувається виділення кисню та окиснення тривалентного хрому до шестивалентного стану.

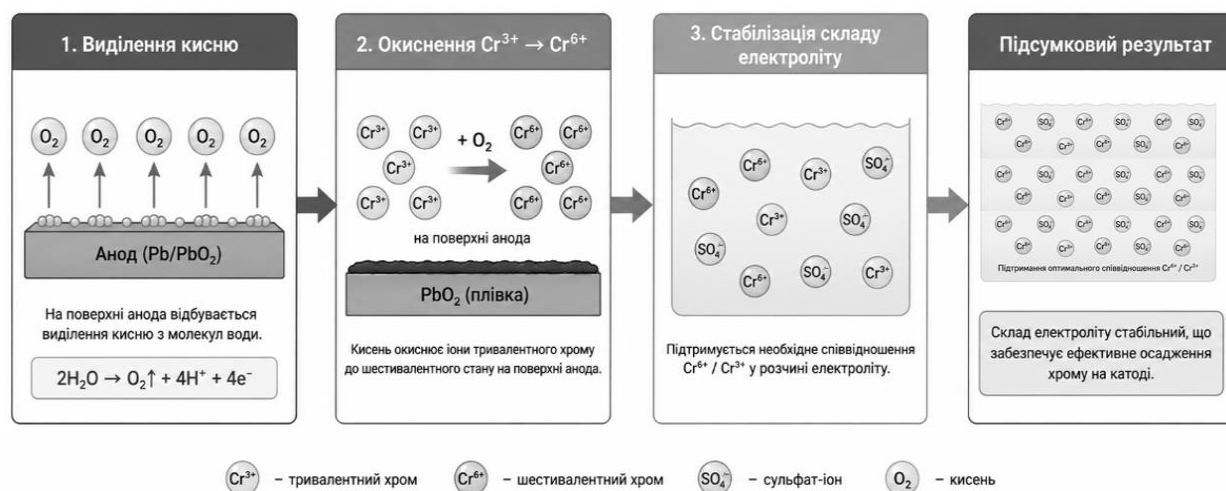


Рисунок 1.7 – Схема етапів анодного процесу

Частина кисню, що виділяється на аноді, взаємодіє зі свинцем з утворенням шару діоксиду свинцю PbO_2 . Даний шар має високу електропровідність та забезпечує підвищене перенапруження виділення кисню, що додатково інтенсифікує процес окиснення Cr^{3+} до Cr^{6+} .

Ефективність процесу хромування визначається складною взаємодією катодних та анодних процесів. Катодні реакції забезпечують осадження металевого хрому, тоді як анодні процеси підтримують стабільність електроліту шляхом окиснення тривалентного хрому. Раціональний вибір складу електроліту, співвідношення площ електродів та режимів електролізу дозволяє забезпечити стабільність процесу та отримання покриттів із необхідними експлуатаційними властивостями.

1.4. Типи, властивості та призначення хромових покриттів

Електролітичне хромування належить до найбільш важливих процесів гальванічної обробки поверхні та широко застосовується у виробництві технологічного оснащення. Значне поширення хромових покриттів обумовлене поєднанням високої твердості, корозійної стійкості, жаростійкості та антифрикційних властивостей.

Хром у ряді електрохімічних потенціалів належить до електронегативних металів, однак завдяки здатності до пасивації на його поверхні формується тонка оксидна плівка, яка забезпечує високу хімічну стійкість покриття. У результаті хромові покриття проявляють корозійну поведінку, близьку до благородних металів. Вони стійкі до дії атмосферної вологи, органічних кислот та багатьох агресивних середовищ, а також зберігають зовнішній вигляд при нагріванні до 480...500 °С.

Висока твердість і низький коефіцієнт тертя зумовлюють широке застосування хромових покриттів для зміцнення деталей тертя, відновлення зношених поверхонь, підвищення зносостійкості та забезпечення декоративного оздоблення виробів.

За структурою та властивостями хромові покриття поділяють на матові, блискучі та молочні.

Матові покриття характеризуються порівняно низькими фізико-механічними властивостями та обмеженим практичним застосуванням. До цієї групи належать також сірі антиадгезійні покриття, які відзначаються низькою змочуваністю та здатністю перешкоджати прилипанню матеріалів до поверхні.

Блискучі хромові покриття мають високу твердість (до 900...1200 HV), значну зносостійкість та низький коефіцієнт тертя. Їх структура є мікротріщинуватою, що частково знижує корозійну стійкість, проте забезпечує високі антифрикційні властивості.

Молочні покриття характеризуються меншою твердістю (500...600 HV), однак мають нижчу пористість і практично не містять мікротріщин. Завдяки цьому вони забезпечують кращу корозійну стійкість та можуть застосовуватись як самостійні захисні покриття.

За функціональним призначенням хромові покриття поділяють на захисно-декоративні, захисні, зносостійкі та антифрикційні.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4.1. Захисно-декоративні покриття

Захисно-декоративні покриття забезпечують одночасно високі естетичні характеристики та корозійну стійкість. Найчастіше застосовують блискучі мікротріщинуваті покриття товщиною 0,25...1,0 мкм, які осаджують на підшар нікелю або системи «мідь–нікель». Такі покриття мають високу відбивну здатність і тривалий час зберігають блиск без потемніння.

Захисно-декоративне хромування широко використовується для:

- деталей автомобілів і мотоциклів;
- сантехнічного обладнання;
- медичних інструментів;
- побутової техніки;
- оптичних та декоративних виробів.

Окрім блискучих покриттів застосовують матові та чорні хромові покриття. Матові покриття використовують для декоративного оздоблення оптичної апаратури та інструменту, тоді як чорний хром застосовують у приладобудуванні, медичній техніці та оптичних системах.

1.4.2. Захисні покриття

Захисні хромові покриття можуть бути одношаровими, двошаровими або багатшаровими. Одношарові молочні покриття завдяки низькій пористості та відсутності мікротріщин здатні ефективно захищати сталеві поверхні від корозії без додаткових підшарів.

Двошарові системи поєднують молочний шар із зовнішнім блискучим шаром, що забезпечує одночасно високу корозійну стійкість та зносостійкість. Такі покриття застосовуються для деталей, які працюють у морському середовищі або при значних механічних навантаженнях.

Багатшарові системи типу «мідь–нікель–хром» або «нікель–мідь–нікель–хром» є найбільш універсальними та поєднують високі захисні й декоративні властивості.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.3 – Види захисних покриттів

Тип покриття	Особливості	Сфера застосування
Одношарове	Низька пористість	Захист сталей
Двошарове	Корозійна стійкість + твердість	Шахтне та морське обладнання
Багатошарове	Декоративність і довговічність	Автомобільна промисловість

1.4.3. Зносостійкі та антифрикційні покриття

Зносостійкі хромові покриття широко застосовуються для підвищення довговічності деталей, що працюють в умовах тертя та високих питомих навантажень. Нанесення твердого хрому дозволяє збільшити ресурс деталей у 2...3 рази, а в окремих випадках – більше.

Пористі мікротріщинуваті покриття використовують для важконавантажених деталей, що працюють в умовах мастила. Наявність пор і мікротріщин сприяє утриманню мастильних матеріалів, що знижує коефіцієнт тертя та зменшує зношування.

Безпористі тверді покриття застосовують для деталей, які працюють при невеликих навантаженнях та помірних температурах, а також для відновлення зношених поверхонь.

Товщина зносостійких покриттів залежить від умов експлуатації. Для інструменту вона становить 3...20 мкм, тоді як для валів, прес-форм та деталей машин може досягати 50...60 мкм. При відновленні зношених деталей товщина шару інколи перевищує 0,5 мм.

Сірі хромові покриття характеризуються високими антиадгезійними властивостями та низькою змочуваністю. Такі покриття застосовують для прес-форм, штампів та деталей, на поверхні яких небажане прилипання матеріалів.

Хромові покриття поєднують широкий комплекс експлуатаційних властивостей, серед яких найбільше значення мають твердість, корозійна стійкість, зносостійкість та антифрикційні характеристики. Раціональний

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибір типу покриття та його структури дозволяє забезпечити необхідні функціональні властивості деталей машин і технологічного оснащення.

1.5. Висновок та постановка завдання

У результаті аналізу сучасних науково-технічних джерел та технологічних особливостей електролітичного хромування встановлено, що хромові покриття є одним із найбільш ефективних способів поверхневого зміцнення та захисту деталей машин і конструкцій від корозійного та механічного руйнування. Поєднання високої мікротвердості, зносостійкості, жаростійкості, низького коефіцієнта тертя та корозійної стійкості забезпечує широке застосування хромових покриттів у машинобудуванні, транспортній галузі, енергетичному обладнанні, приладобудуванні та виробництві торгового оснащення.

Формування властивостей хромових покриттів визначається складною взаємодією катодних і анодних процесів, параметрами електролізу, складом електроліту, температурою, густиною струму та станом поверхні основного металу. Особливу роль відіграє катодна поляризація та утворення тонкої катодної плівки, яка забезпечує можливість осадження металевого хрому. Значний вплив на структуру та якість покриття мають також побічні процеси виділення водню та накопичення тривалентного хрому в електроліті.

Блискучі покриття характеризуються найвищою твердістю та зносостійкістю, тоді як молочні покриття мають нижчу пористість і кращу корозійну стійкість. Пористі хромові покриття є ефективними для деталей, що працюють в умовах тертя та мастила, оскільки здатні утримувати мастильні матеріали у мікротріщинах поверхні.

Якість хромових покриттів значною мірою залежить від правильності підготовки поверхні перед електролізом та режимів фінішної обробки після

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хромування. Недотримання параметрів шліфування, знежирення або термічної обробки може призводити до утворення дефектів покриття, зниження адгезії, підвищення пористості та зменшення довговічності деталей.

Об'єктом дослідження у роботі обрана конструкційна сталь Grade 3, яка застосовується для виготовлення елементів металоконструкцій, торгового обладнання, корпусних деталей та виробів загальномашинобудівного призначення. Дана сталь характеризується достатньою технологічністю, доброю оброблюваністю та доступністю, однак потребує додаткового поверхневого зміцнення для підвищення корозійної стійкості та зносостійкості в умовах експлуатації.

Предметом дослідження є структура поверхневого хромового шару, закономірності його формування та зміна властивостей сталі Grade 3 після електролітичного хромування.

Метою роботи є дослідження структури та властивостей сталі Grade 3 до і після хромування, а також аналіз технологічних особливостей нанесення хромових покриттів на елементи торгового обладнання.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено вирішення таких задач:

- провести аналіз сучасних літературних джерел щодо технологій електролітичного хромування та властивостей хромових покриттів;
- дослідити фізико-механічні та експлуатаційні властивості сталі Grade як основи під хромування;
- проаналізувати особливості катодних та анодних процесів під час електролітичного хромування;
- визначити вплив параметрів електролізу на структуру та властивості хромового покриття;
- дослідити мікроструктуру поверхневого шару після хромування;
- проаналізувати особливості застосування хромових покриттів у виробництві торгового обладнання;

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– визначити технологічні рекомендації щодо підвищення якості та довговічності хромових покриттів.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Електролітичні хромові покриття належать до найбільш поширених функціональних покриттів у сучасному машинобудуванні, авіаційній техніці, енергетичному обладнанні, приладобудуванні та виробництві технологічного оснащення. Їх широке застосування обумовлене поєднанням високої твердості, значної зносостійкості, корозійної стійкості, низького коефіцієнта тертя та стабільності властивостей в умовах підвищених температур і циклічних навантажень. У сучасних умовах електролітичне хромування використовується не лише як декоративне або захисне покриття, а і як ефективний метод поверхневого зміцнення деталей машин.

Хромові покриття забезпечують підвищення ресурсу деталей тертя на 25...60 %, зменшення інтенсивності зношування та покращення антифрикційних характеристик. Особливо ефективними такі покриття є для деталей гідравлічних систем, валів, штоків, плунжерів, прес-форм, поршневих кілець та елементів авіаційних двигунів.

Формування структури та властивостей хромових покриттів визначається сукупністю технологічних параметрів електролізу: температурою електроліту, густиною струму, концентрацією хромового ангідриду, складом каталізаторів та станом поверхні основи. Залежно від режимів осадження можуть формуватися сірі, блискучі, матові або молочні покриття.

2.1. Характеристика хромових покриттів

Хромовий ангідрид – це неорганічна сполука складу CrO_3 (оксид хрому(VI)), яка є основним компонентом електролітів для хромування. У

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

твердому стані він являє собою темно-червоні або багряні кристали, добре розчинні у воді з утворенням хромової кислоти.

У технології електролітичного хромування хромовий ангідрид використовується як джерело іонів хрому, з яких під дією електричного струму на поверхні деталі осаджується металевий хром. Саме концентрація CrO_3 значною мірою визначає швидкість осадження, блиск, твердість та структуру хромового покриття (рисунок 2.1).

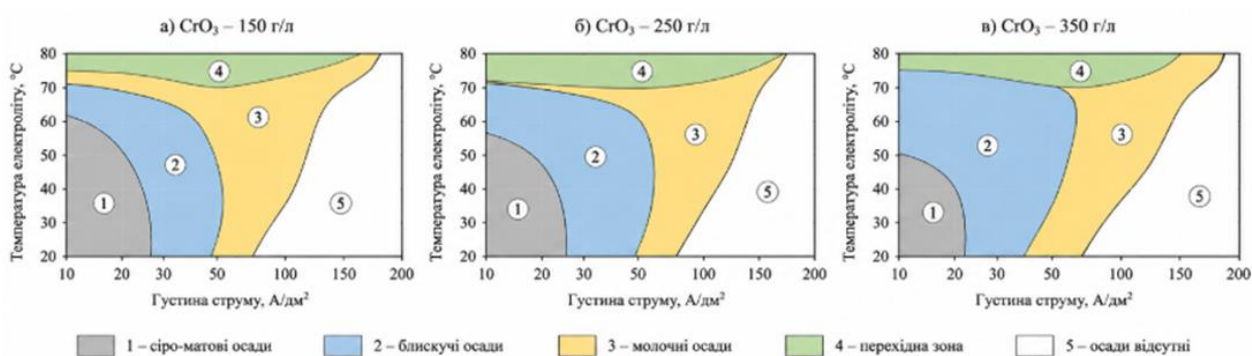


Рисунок 2.1 – Області отримання осадів хрому різного типу в сульфатних електролітах при різній концентрації хромового ангідриду

Сірі хромові покриття формуються переважно при температурах до 35°C та густині струму $20 \dots 100 \text{ А/дм}^2$. Для таких покриттів характерна низька змочуваність і мінімальна адгезія до інших матеріалів. Саме тому сірий хром широко застосовується при хромуванні прес-форм, штампів, калібрів та валів для виробництва мідної фольги. У сучасній скляній промисловості подібні покриття використовують для формування поверхонь ливарних форм, оскільки низька адгезія полегшує вилучення готових виробів та зменшує ризик пошкодження поверхні.

Блискучі тверді хромові покриття є найбільш поширеними у промисловому виробництві. Їх осадження здійснюється переважно зі стандартних або розбавлених електролітів при температурах $45 \dots 65^\circ\text{C}$ та густині струму $30 \dots 100 \text{ А/дм}^2$. Такі покриття характеризуються високою мікротвердістю ($850 \dots 1100 \text{ НВ}$), значною зносостійкістю та низьким

коефіцієнтом тертя. У сучасному машинобудуванні блискучий хром використовують для зміцнення поверхонь штоків гідроциліндрів, поршневих кілець, валів, плунжерів, деталей паливної апаратури та елементів авіаційної техніки.

Найбільш поширеним промисловим режимом електролізу є густина струму близько 50 А/дм² при температурі електроліту 55плюс мінус 1 °С, що забезпечує формування щільного покриття з рівномірною структурою та мінімальною кількістю дефектів.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика основних типів хромових покриттів

Тип покриття	Температура, °С	Густина струму, А/дм ²	Основні властивості	Основні сфери застосування
Сірий хром	20-35	20-100	Низька змочуваність, слабка адгезія	Прес-форми, штампи, скляні форми
Блискучий хром	45-65	30-100	Висока твердість, зносостійкість	Вали, штоки, деталі тертя
Молочний хром	65-80	20-60	Підвищена пластичність, менша пористість	Деталі з ударними навантаженнями
Захисно-декоративний	48-50	10-30	Високий блиск, корозійна стійкість	Автомобільні та декоративні елементи

Підвищення температури електроліту до 70...75 °С дозволяє збільшити допустиму густину струму до 150 А/дм², що сприяє зростанню швидкості осадження покриття та підвищенню продуктивності процесу. Проте надмірне підвищення температури може призводити до утворення молочних покриттів зі зниженою твердістю. У сучасних автоматизованих лініях хромування для стабілізації процесу широко використовують системи цифрового контролю температури та густини струму, що дозволяє забезпечити стабільність структури осаду та повторюваність властивостей покриття.

Для отримання тонких захисно-декоративних покриттів товщиною 0,3...0,8 мкм застосовують концентровані електроліти з вмістом

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

CrO_3 300...400 г/л та каталізаторів 3...4 г/л. При цьому підтримують порівняно низьку густину струму – 10...20 А/дм². Такі покриття використовуються переважно в автомобільній, меблевій та електротехнічній галузях, де важливими є високі декоративні властивості поверхні та корозійна стійкість.

Важливою особливістю блискучих хромових покриттів є висока чутливість до стану поверхні основи. Формування дзеркально-блискучого шару можливе лише за умови ретельної механічної та електрохімічної підготовки поверхні. Як правило, основу попередньо полірують, а в багатошарових системах додатково наносять блискучі шари міді або нікелю. Наявність мікродфектів або підвищеної шорсткості призводить до погіршення зовнішнього вигляду та зниження адгезійної міцності покриття.



Рисунок 2.2 – Вплив параметрів процесу на властивості покриття

Однією з основних сучасних тенденцій розвитку технологій хромування є перехід від електролітів на основі шестивалентного хрому до більш екологічних електролітів на основі тривалентного хрому. Традиційні електроліти Cr^{6+} характеризуються високою токсичністю та канцерогенністю, що обумовлює необхідність впровадження більш безпечних технологічних рішень.

Сучасні електроліти на основі Cr^{3+} забезпечують:

- зменшення токсичності процесу;
- покращення екологічної безпеки;
- зниження витрат на очищення стічних вод;
- стабільність кольору та декоративних властивостей покриття.

Перспективним напрямом є використання композиційних хромових покриттів, модифікованих наночастинками оксидів або карбідів. Найбільш поширеними є покриття типу $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$, Cr-SiC та Cr-WC . Властивості хромових покриттів безпосередньо визначаються режимами електролізу та складом електроліту. Раціональний вибір параметрів процесу дозволяє формувати покриття з необхідним поєднанням твердості, пластичності, корозійної стійкості та декоративних характеристик, що забезпечує їх ефективне використання у сучасному машинобудуванні та високотехнологічних галузях промисловості.

2.2. Підготовка поверхні

Підготовка поверхні деталей перед хромуванням є одним із визначальних етапів технологічного процесу, оскільки саме від якості попередньої обробки залежить адгезія покриття, рівномірність осадження, пористість, мікротвердість та довговічність хромового шару. Наявність на поверхні оксидних плівок, мастил, залишкових напружень, мікротріщин або підвищеної шорсткості може призводити до локального відшаровування покриття, утворення дефектів та зниження експлуатаційних характеристик деталей.

У сучасному гальванічному виробництві підготовка поверхні включає комплекс послідовно виконуваних механічних, термічних, електрохімічних та

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допоміжних операцій. Типова послідовність підготовки деталей до хромування наведена на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Послідовність підготовки
поверхні деталей до хромування

Механічна обробка деталей перед хромуванням проводиться з метою забезпечення необхідних геометричних параметрів, видалення дефектів поверхні та формування необхідної шорсткості. Найчастіше застосовують шліфування, суперфінішування та полірування.

Особливе значення механічна підготовка має при нанесенні товстих зносостійких покриттів, оскільки зі збільшенням товщини хромового шару підвищується шорсткість поверхні. Встановлено, що при товщині хромового покриття 0,08...0,10 мм шорсткість поверхні може бути у 1,5...2 рази більшою, ніж у вихідної поверхні деталі. Зростання шорсткості супроводжується підвищенням пористості та зниженням мікротвердості покриття.

Для шліфування застосовують круги з електрокорунду нормального або білого типу зернистістю 25...16, твердістю СМ1-С1, зі структурою 5...12 та керамічною або бакелітовою зв'язкою.

При обробці деталей із твердістю понад 35 HRC особливо важливо дотримуватись рекомендованих режимів шліфування для запобігання виникненню припалів та шліфувальних тріщин. Наявність таких дефектів може призводити до локального відшаровування покриття, зниження втомної міцності та руйнування деталей у процесі експлуатації.

Таблиця 2.2 – Вплив дефектів поверхневої обробки на якість покриття

Дефект поверхні	Причина виникнення	Вплив на покриття
Припали	Перегрів при шліфуванні	Відшаровування хрому
Шліфувальні тріщини	Надмірне навантаження	Зниження міцності
Риски та задирки	Низька якість обробки	Підвищення пористості
Висока шорсткість	Грубе шліфування	Нерівномірність покриття

Для деталей із високоміцних сталей, які працюють в умовах циклічних навантажень, перед хромуванням доцільно застосовувати методи поверхневого пластичного деформування: алмазне вигладжування, накочування роликми або дробоструминне зміцнення. Такі методи дозволяють сформувати стискуючі залишкові напруження та підвищити опір втомному руйнуванню. При нанесенні захисно-декоративних покриттів типу «мідь–нікель–хром» поверхня деталей повинна бути ретельно відполірована.

Блискучий хром формується лише на поверхнях із мінімальною шорсткістю та високою чистотою обробки. Полірування виконують на тих самих верстатах, що і шліфування, використовуючи повстяні або тканинні круги з полірувальними пастами. До складу паст входять дрібнодисперсні абразивні порошки зернистістю М7-М14.

У сучасних автоматизованих виробництвах дедалі частіше використовуються роботизовані системи полірування, які забезпечують стабільність параметрів обробки та високу повторюваність якості поверхні.

Після шліфування у поверхневому шарі деталей виникають залишкові напруження розтягу (рисунок 2.3). Для їх зменшення перед хромуванням проводять низький відпуск.

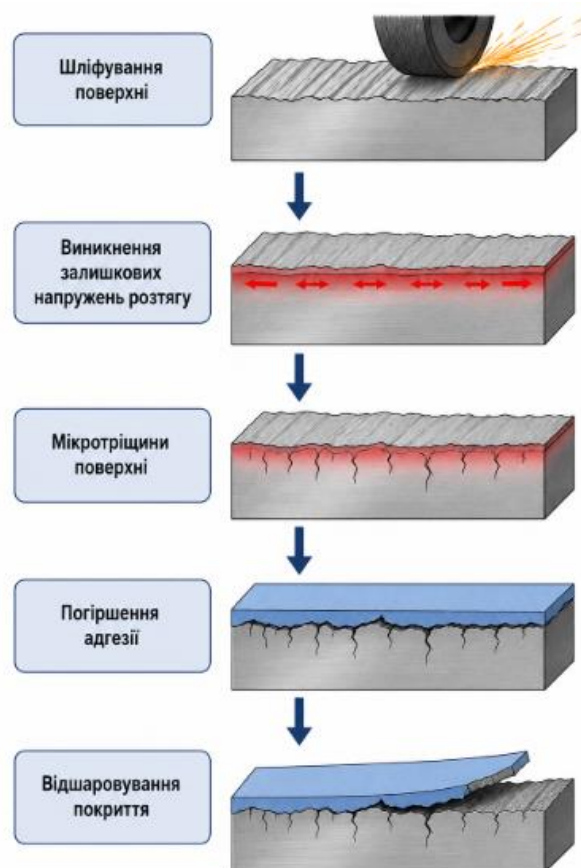


Рисунок 2.3 – Вплив залишкових напружень на якість хромового покриття

Температура термічної обробки повинна бути на 10...20 °С нижчою за температуру попереднього відпуску сталі. Для високоміцних сталей відпуск зазвичай проводять при температурах 200...230 °С протягом 2,5...3 годин у повітряному або масляному середовищі.

Якщо перед хромуванням застосовувались методи поверхневого пластичного деформування, необхідність у додатковому відпуску може бути відсутньою.

Поверхні деталей, які не підлягають хромуванню, повинні бути ретельно ізольовані. Для цього використовують свинець, текстоліт, фторопласт, полімерні композиції або спеціальні хімічно стійкі лаки.

Найбільш ефективним є використання електропровідних матеріалів, зокрема свинцю, для закладення отворів. У цьому випадку забезпечується рівномірний розподіл силових ліній струму та стабільна товщина покриття.

При використанні неелектропровідних матеріалів спостерігається локальна концентрація силових ліній, що призводить до підвищення густини струму та нерівномірного нарощування шару.

Ізоляційні матеріали повинні бути стійкими до дії гарячих хромокислих електролітів та лужних розчинів знежирення. Руйнування ізоляційних матеріалів може призводити до забруднення електроліту та погіршення якості покриття.

При хромуванні використовуються значні густини струму, тому особливе значення має забезпечення надійного електричного контакту між деталлю, підвіскою та струмопідвідною шиною. Поверхні контактів повинні бути ретельно зачищені та очищені від оксидів і забруднень. Перетини струмоведучих елементів мають бути достатніми для запобігання перегріву.

Деталі необхідно розташовувати таким чином, щоб забезпечити:

- рівномірний розподіл струму;
- відсутність екранування поверхонь;
- вільне видалення водню;

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– ефективно стікання електроліту.

Деталі з глибокими отворами або складною геометрією хромують із застосуванням додаткових анодів.

У сучасних автоматизованих лініях хромування широко використовують титанові підвіски та цифрове моделювання розподілу струму, що дозволяє прогнозувати рівномірність товщини покриття ще на етапі проектування технологічного процесу.

Перед хромуванням поверхня деталей повинна бути повністю очищена від мастил, полірувальних паст, емульсій та інших забруднень. Для цього застосовують хімічне або електролітичне знежирення.

Деталі, що підлягають зносостійкому хромуванню, зазвичай знежирюють електролітичним методом. Для деталей із високоміцних сталей катодне знежирення є небажаним через небезпеку водневого окрихчення. У таких випадках застосовують анодне або хімічне знежирення.

Після знежирення поверхня повинна рівномірно змочуватись водою без утворення окремих крапель або масляних плівок. Завершальним етапом є ретельне промивання деталей у теплій або гарячій воді.

2.3. Обробка деталей після хромування

Після завершення процесу електролітичного хромування деталі піддаються комплексу технологічних операцій (рисунки 2.4), спрямованих на стабілізацію властивостей покриття, усунення залишків електроліту, зниження внутрішніх напружень та забезпечення необхідних геометричних параметрів поверхні. Якість післяопераційної обробки суттєво впливає на мікротвердість, пористість, адгезійну міцність та довговічність хромового покриття.

Після вилучення деталей із хромового електроліту їх послідовно промивають у ванні з непроточною водою для уловлювання залишків

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електроліту, після чого здійснюють промивання у проточній холодній та гарячій воді. Завершальним етапом є сушіння деталей гарячим повітрям або у сушильних шафах.



Рисунок 2.4 – Послідовність технологічних операцій після хромування

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Характеристика об'єкту дослідження

Об'єктом дослідження у роботі є шток торгового обладнання, виготовлений зі сталі Grade 3, на поверхню якого наноситься електролітичне хромове покриття.

Використання сталі Grade 3 обумовлене її технологічністю, доступністю та широким застосуванням у конструкціях торгового й меблевого обладнання. Нанесення хромового покриття дозволяє підвищити корозійну стійкість, декоративні характеристики та зносостійкість поверхні виробу.

Об'єктом дослідження у роботі є хромований шток торгового обладнання, виготовлений зі сталі Grade 3. Даний виріб належить до конструктивних елементів торгових та виставкових систем і використовується як несуча або напрямна деталь у стелажному, меблевому та демонстраційному обладнанні.

Вибір даного виробу як об'єкта дослідження обумовлений широким застосуванням хромованих поверхонь у сучасному торговому обладнанні, де одночасно висуваються вимоги до декоративного вигляду, корозійної стійкості, зносостійкості та довговічності поверхні. Хромові покриття забезпечують формування гладкої блискучої поверхні, стійкої до стирання, дії вологи, мийних засобів та механічних пошкоджень.

Сталь Grade 3 характеризується доброю технологічністю, достатньою пластичністю, високою оброблюваністю та зварюваністю, що забезпечує її широке застосування у виготовленні конструкцій загального машинобудівного та торгового призначення. Разом із тим, дана сталь має недостатню корозійну

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стійкість при експлуатації у вологих середовищах, що обумовлює необхідність застосування захисно-декоративних покриттів.



Рисунок 3.1 – Приклади хромованих виробів

Конструктивно шток являє собою циліндричний елемент із гладкою шліфованою поверхнею, на яку наноситься електролітичне хромове покриття. Така геометрія є технологічно зручною для дослідження рівномірності осадження хрому, мікроструктури покриття, мікротвердості та адгезійної міцності поверхневого шару.

Основними функціями хромового покриття для даного виробу є:

- захист від атмосферної корозії;
- підвищення декоративних характеристик;
- зменшення коефіцієнта тертя;
- підвищення стійкості до подряпин і стирання;
- покращення санітарно-гігієнічних властивостей поверхні.

Хромовані елементи торгового обладнання працюють переважно в умовах змінної вологості повітря, контакту з мийними засобами, періодичного механічного навантаження, тертя та стирання поверхні, багаторазового контакту з руками та іншими виробами. Під час експлуатації на поверхні можуть виникати локальні пошкодження, мікроподряпини та ділянки підвищеного зношування. Саме тому до покриття висуваються вимоги щодо

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високої адгезії, рівномірності товщини, низької пористості та достатньої мікротвердості. Залежно від умов експлуатації товщина хромового покриття для торгового обладнання зазвичай становить 10...40 мкм. У більшості випадків застосовуються багатошарові системи типу «мідь-нікель-хром», які забезпечують одночасно високі захисні та декоративні властивості.

Таблиця 3.1 – Експлуатаційні вимоги до хромованого штока

Вимога	Значення для експлуатації
Корозійна стійкість	Захист від вологи та мийних засобів
Декоративність	Стабільний блиск поверхні
Зносостійкість	Опір стиранню та подряпинам
Адгезія покриття	Запобігання відшаровуванню
Низька шорсткість	Покращення зовнішнього вигляду

Важливою особливістю виробу є необхідність отримання рівномірного блискучого покриття без пор, тріщин та локальних дефектів. Це потребує ретельного контролю густини струму, температури електроліту та стану поверхні основного металу.

3.2. Характеристика сталі Grade 3

Для виготовлення хромованого штока торгового обладнання обрана конструкційна вуглецева сталь Grade 3, яка належить до сталей звичайної якості та широко застосовується для виготовлення елементів металоконструкцій, торгового обладнання, меблевих систем, корпусних деталей і конструкцій загального призначення. Дана сталь характеризується доброю технологічністю, високою зварюваністю, достатньою пластичністю та задовільними механічними властивостями, що забезпечує її широке використання у виробництві виробів декоративно-функціонального призначення.

Для деталей торгового обладнання сталь Grade 3 є доцільною завдяки хорошій оброблюваності різанням, можливості шліфування та полірування

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхні перед нанесенням гальванічних покриттів. Однак через невисоку корозійну стійкість дана сталь потребує застосування захисно-декоративних покриттів, зокрема електролітичного хромування.

Хімічний склад сталі Grade 3 суттєво впливає на її механічні властивості, зварюваність та здатність до поверхневої обробки (таблиця 3.2).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі Grade 3

Хімічний елемент	Вуглець (C)	Кремній (Si)	Марганець (Mn)	Хром (Cr)	Нікель (Ni)	Мідь (Cu)	Сірка (S)	Фосфор (P)
Вміст, %	0,14-0,22	до 0,30	0,40-0,65	до 0,30	до 0,30	до 0,30	до 0,05	до 0,04

Низький вміст вуглецю забезпечує сталі достатню пластичність та добру зварюваність, що є важливим для виготовлення конструктивних елементів торгового обладнання. Водночас помірний вміст марганцю та кремнію сприяє підвищенню міцності та покращенню технологічних властивостей матеріалу. Твердість сталі Grade 3 у вихідному стані становить приблизно 120...140 HB (таблиця 3.2), що забезпечує достатню оброблюваність матеріалу перед нанесенням хромового покриття. Механічні властивості сталі визначають її поведінку під дією зовнішніх навантажень, а також опір пластичній деформації та руйнуванню. Для елементів торгового обладнання важливими є достатня міцність, пластичність та стабільність геометричних параметрів при експлуатації.

Таблиця 3.2 – Механічні властивості сталі Grade 3 при 20 °C

Показник	Значення
Границя міцності σ_b , МПа	380-490
Границя текучості σ_t , МПа	195-235
Відносне видовження δ , %	25
Твердість HB	120-140

Сталь Grade 3 характеризується доброю зварюваністю без обмежень та не схильна до утворення флокенів і відпускнуї крихкості. Це дозволяє використовувати її для виготовлення зварних конструкцій і декоративних

елементів складної форми. Структурною основою сталі є феритно-перлітна структура, яка забезпечує поєднання пластичності та міцності. Ферит є пластичною та відносно м'якою складовою, тоді як перліт підвищує твердість і міцність сталі.

Властивості сталі значною мірою залежать від наявності домішок. До шкідливих домішок належать сірка та фосфор. Сірка сприяє утворенню гарячеламкості, тоді як фосфор підвищує холодноламкість і знижує пластичність матеріалу. Тому їх вміст у конструкційних сталях суворо обмежується. Під час експлуатації конструкцій із низьковуглецевих сталей можливе явище старіння, яке супроводжується зміною структури та властивостей матеріалу внаслідок перерозподілу атомів вуглецю та азоту. Старіння сталі може призводити до підвищення межі текучості та зниження пластичності.

Для виготовлення деталей торгового обладнання найчастіше використовують холоднокатаний або гарячекатаний прокат із подальшим механічним обробленням поверхні. Перед хромуванням поверхня штока проходить шліфування та полірування для забезпечення мінімальної шорсткості та підвищення адгезії покриття. Використання сталі Grade 3 у поєднанні з електролітичним хромуванням дозволяє отримати вироби з високими декоративними характеристиками, достатньою міцністю та підвищеною стійкістю до корозії й механічного зношування. Це забезпечує широке застосування таких виробів у торговому обладнанні, меблевих конструкціях та декоративно-функціональних системах.

3.3. Дослідження мікроструктури

Металографічне дослідження мікроструктури сталі Grade 3 проводили методом оптичної мікроскопії на попередньо підготовлених шліфах після

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шліфування, полірування та хімічного травлення 4 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь). Аналіз структури здійснювали для визначення співвідношення фериту та перліту, оцінки однорідності структури, наявності дефектів та зміни поверхневого шару після різних видів обробки. Фотографії мікроструктури досліджуваних зразків були отримані після підготовки поверхні за загальною методикою.

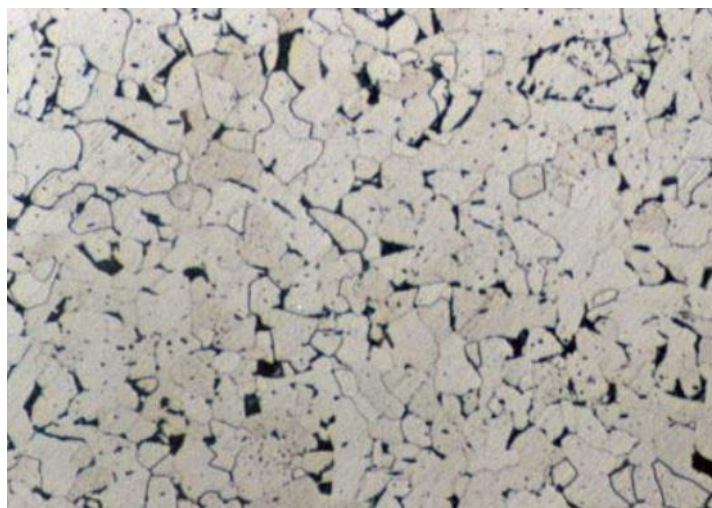


Рисунок 3.1 – Мікроструктура Grade 3 у вихідному стані. $\times 200$

На представленому мікрошліфі спостерігається типова феритно-перлітна структура низьковуглецевої конструкційної сталі Grade 3 у нормалізованому або гарячекатаному стані. Основну частину структури становить світлий полігональний ферит, який утворює рівновісні зерна з чітко вираженими межами. Темні ділянки між зернами фериту відповідають перліту, який рівномірно розподілений у структурі та має вигляд окремих колоній. Формування такої структури характерне для низьковуглецевих сталей із вмістом вуглецю близько 0,14...0,22 %. Наявність значної кількості фериту забезпечує сталі високу пластичність, добру зварюваність та в'язкість, тоді як перліт підвищує міцність і твердість матеріалу. Структура є достатньо однорідною, без виражених дефектів, великих неметалевих включень або ознак перегріву. Спостережувана дрібнозерниста феритно-перлітна структура є сприятливою для подальшого нанесення гальванічного хромового покриття,

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оскільки забезпечує достатню пластичність основи та стабільність поверхневого шару під час механічної й електрохімічної обробки.

Після електролітичного хромування у поверхневому шарі сталі формується тонке хромове покриття, яке на мікрошліфах має вигляд світлого суцільного шару з чіткою межею поділу між основним металом і покриттям. Основою структури сталі Grade 3 залишається феритно-перлітна матриця, однак у приповерхневій зоні спостерігається ущільнення структури та формування дрібнодисперсного поверхневого шару (рисунок 3.2).

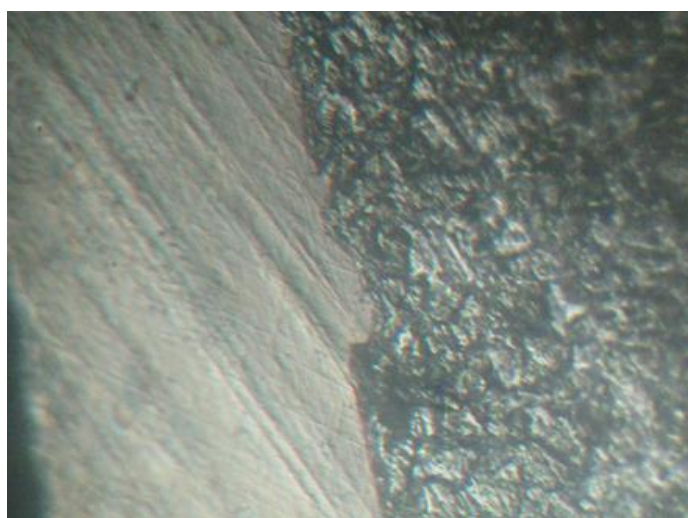


Рисунок 3.2 – Структура Grade 3 після хромування. $\times 100$

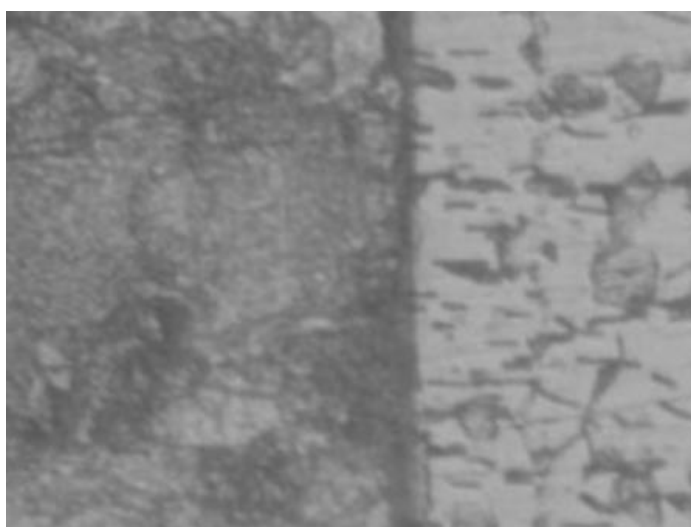
Структура сталі після хромування характеризуються дрібнокристалічною структурою. Блискучий осад хрому характеризуються шаруватою структурою і наявністю на поверхні тонкої сітки тріщин.

На відміну від блискучого хрому молочний осад характеризуються стовбчатою структурою і відсутністю сітки тріщин. Відсутність тріщин і пор в молочному хромі дає можливість осаджувати це покриття без підшару безпосередньо на сталеві деталі, які експлуатуються в корозійно-агресивних середовищах. Для оцінки зносостійкості хромованого покриття на сталі Grade 3 було вивчено мікроструктуру та стан поверхні зразків.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 3.3 – Структура Grade 3 після хромування:

а – без травлення. $\times 500$;

б – протравлено. $\times 800$

Структура хромового шару формується з мікротріщинами внаслідок внутрішніх залишкових напружень, що виникають під час електролітичного осадження. У випадку зносостійкого хромування така структура є допустимою та навіть сприяє утриманню мастильних матеріалів на поверхні деталей тертя.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Дослідження поверхні після тертя

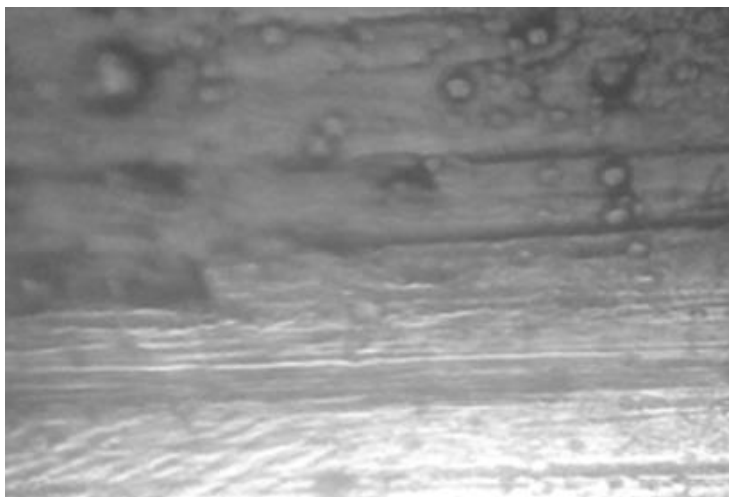
Аналіз поверхонь тертя показав, що після випробувань у всьому діапазоні прикладених навантажень поверхня зразків набуває характерної смугастої структури. Така морфологія поверхні формується внаслідок орієнтованого переміщення структурних елементів граничного шару та є характерною ознакою абразивного механізму зношування.

Після випробувань за різних питомих навантажень спостерігається зміна геометричних параметрів борозен тертя. Формування борозен відбувається внаслідок пластичного деформування поверхневого шару твердими частинками, присутніми у зоні контакту. Джерела утворення таких частинок можуть бути різними: потрапляння абразивних домішок із навколишнього середовища, окиснення продуктів зношування, локальне зміцнення матеріалу після інтенсивної пластичної деформації або руйнування поверхневого шару елементів пари тертя.

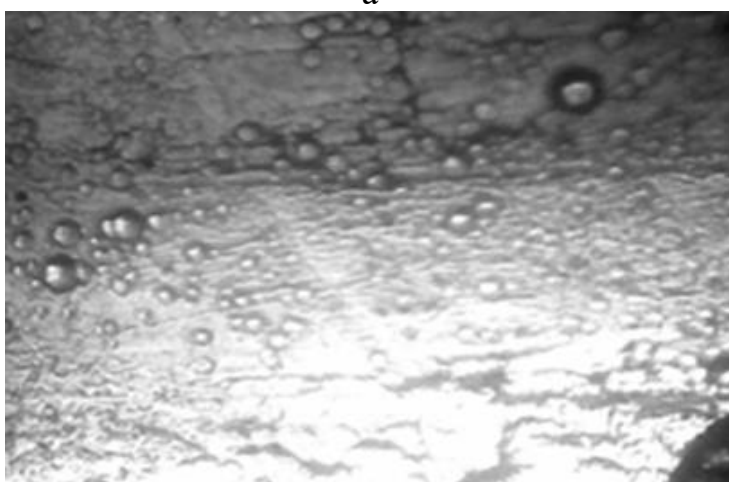
Встановлено, що зі збільшенням питомого навантаження відстань між борознами зменшується. Так, при навантаженні 0,5 МПа середня відстань між борознами становила близько 48 мкм, при 2 МПа – приблизно 36 мкм, а при 4 МПа зменшувалася до 9 мкм. Зменшення відстані між борознами свідчить про підвищення інтенсивності пластичної деформації поверхневого шару та збільшення концентрації абразивних частинок у зоні контакту.

Найбільші абразивні частинки зношування утворювалися при питомому навантаженні 0,5 МПа, тоді як при 4 МПа їх розміри були значно меншими. Після випробувань за навантаження 2 МПа ознак сколювання хромового покриття не виявлено, що свідчить про достатню адгезійну міцність і стійкість покриття до контактних навантажень. Водночас на поверхні спостерігалися локальні дефекти у вигляді виривів матеріалу та слідів мікрорізання, характерних для абразивно-адгезійного механізму зношування.

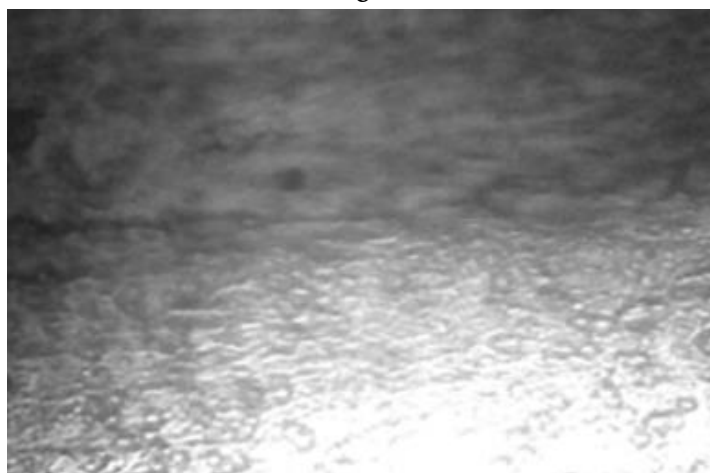
					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б



в

Рисунок 3.4 – Поверхні тертя за питомого навантаження:

а – 4МПа $\times 100$; б – 2 МПа $\times 100$; в – 0,5 МПа $\times 100$

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ ТА МІЦНОСТІ

4.1. Аналіз твердості покриття

4.1.1. Визначення твердості основного металу

Дослідження проводили для зразків зі сталі Grade 3 без покриття.

Для оцінювання механічних властивостей основного металу проводили вимірювання твердості сталі Grade 3 методом Роквелла за шкалою В (HRB), що є доцільним для низьковуглецевих конструкційних сталей із відносно невисокою твердістю. Випробування виконували на твердомірі з використанням сталеві кульки діаметром 1,588 мм при загальному навантаженні 1000 Н. Для кожного зразка здійснювали не менше трьох вимірювань із подальшим визначенням середнього значення твердості (таблиця 4.1).

Визначення твердості проводили для основного металу в об'ємі зразка, тобто без урахування впливу гальванічних покриттів. Це дозволило оцінити механічні властивості сталі Grade 3 як основи під нікелювання та хромування.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювання твердості

№ вимірювання	1	2	3	Середнє значення
Твердість HRB	78	81	80	79, 7

Отримані результати відповідають типовим значенням твердості низьковуглецевих конструкційних сталей у гарячекатаному або нормалізованому стані (рисунок 4.1). Відносно невисока твердість сталі Grade 3 забезпечує добру оброблюваність різанням, можливість шліфування та полірування поверхні перед нанесенням гальванічних покриттів.

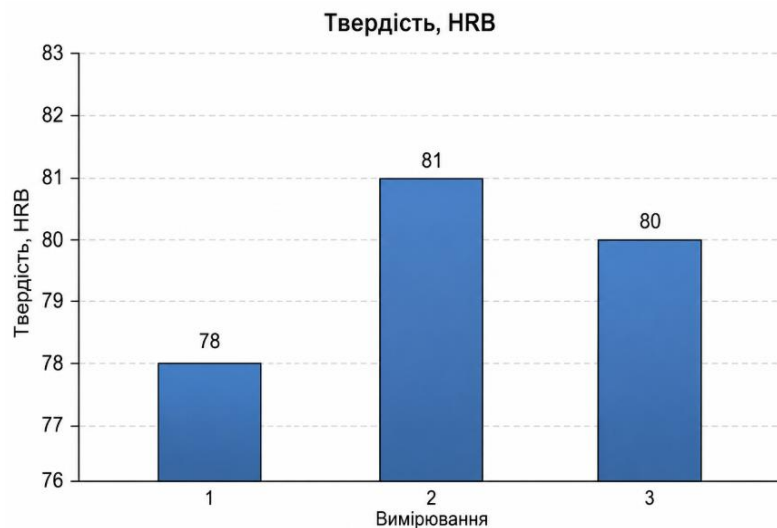


Рисунок 4.1 – Результати вимірювання твердості

Порівняння результатів вимірювання твердості основного металу та поверхневих гальванічних шарів свідчить, що електролітичне хромування суттєво підвищує твердість поверхні без помітної зміни властивостей сталі в об'ємі деталі. Таким чином, хромове покриття виконує функцію локального поверхневого зміцнення, забезпечуючи підвищення зносостійкості та довговічності виробу при збереженні пластичності та в'язкості основного металу (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Очікувані результати після хромування

4.1.2. Визначення твердості гальванічних покриттів

Оскільки нікелеве та хромове покриття наносили гальванічним способом, оцінювання їх твердості доцільно проводити методом Вікерса при малих навантаженнях. Це дозволяє більш коректно визначити твердість тонкого поверхневого шару без істотного впливу основного металу. Для сталі Grade 3 без покриття твердість може бути подана як базова характеристика основи, тоді як для нікелевого та хромового покриттів доцільно використовувати мікротвердість HV (таблиця 4.2, рисунок 4.4).

Таблиця 4.2 – Твердість та товщина гальванічних покриттів

Стан поверхні	Метод оцінювання	Орієнтовна твердість	Орієнтовна товщина шару
Сталь Grade 3 без покриття	HB / HV	120-160 HV	-
Гальванічне нікелеве покриття	HV	250-450 HV	10-25 мкм
Гальванічне хромове покриття	HV	800-1100 HV	0,3-1,0 мкм 10-40 мкм

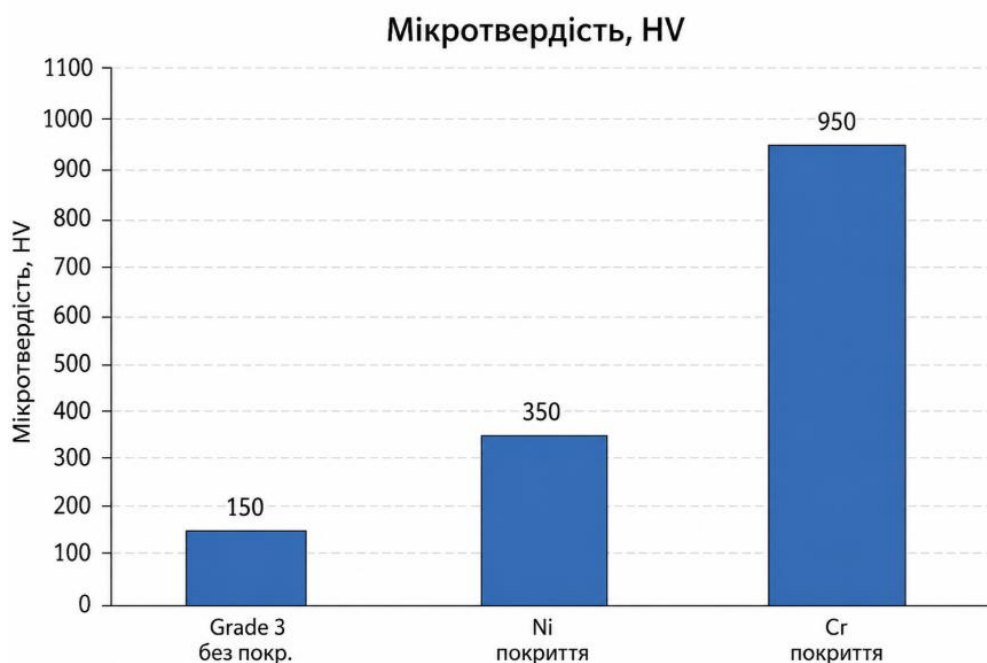


Рисунок 4.4 – Твердість гальванічних покриттів

Орієнтовна товщина гальванічного нікелевого підшару для захисно-декоративного покриття становила 10...25 мкм, а товщина хромового шару – 0,3...1,0 мкм для декоративного хромування або 10...40 мкм для функціонального зносостійкого хромування. Для штока торгового обладнання більш логічною є система Ni-Cr, де нікель виконує основну захисну функцію, а хром забезпечує блиск, твердість і стійкість до стирання і підвищену опірність подряпинам.

Отримані значення свідчать, що нікелювання помірно підвищує твердість поверхні, однак основний зміцнювальний ефект забезпечує саме хромове покриття. Це пояснюється високою твердістю електролітичного хрому та його здатністю формувати щільний зносостійкий поверхневий шар. Для деталей торгового обладнання така система покриттів є доцільною.

4.2. Вплив хромування на механічні властивості основного металу

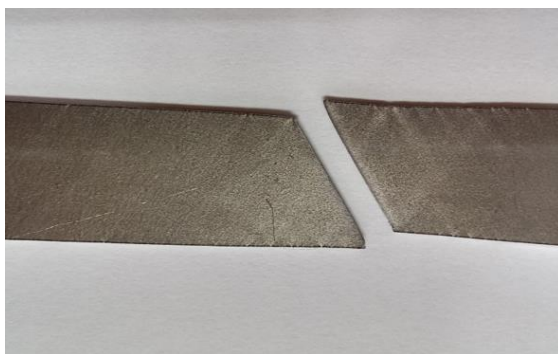
Нанесення хромового покриття суттєво впливає на експлуатаційні характеристики поверхневого шару сталі Grade 3. Після хромування спостерігається підвищення твердості, зносостійкості та корозійної стійкості поверхні, що пов'язано з формуванням високоміцного дрібнокристалічного хромового шару.

Однією з найважливіших характеристик конструкційних матеріалів є границя міцності, яка визначає здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією зовнішнього навантаження (рисунок 4.5). Для оцінювання впливу гальванічних покриттів на механічні властивості сталі Grade 3 проводили статичні випробування на розтяг відповідно до стандартної методики.

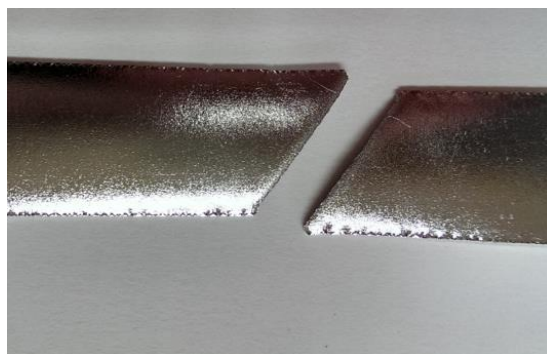
Під час випробувань стандартний зразок навантажували осьовими силами, які плавно збільшувалися до моменту руйнування. На основі отриманих результатів оцінювали границю міцності та відносне видовження зразків без покриття, після нікелювання та після хромування.

Нікелеве покриття наносили гальванічним способом як проміжний захисний шар, який забезпечує покращення адгезії хрому до основного металу та підвищення корозійної стійкості поверхні. Крім того, нікелювання позитивно впливає на міцність поверхневого шару без істотного зниження пластичності сталі.

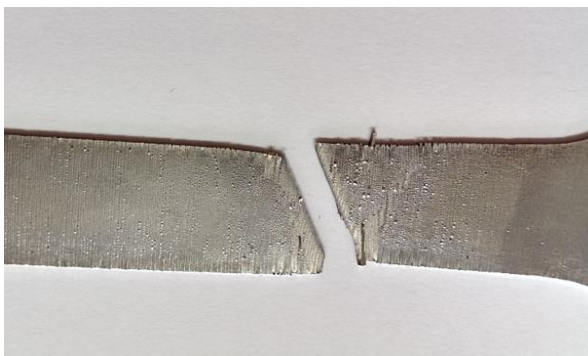
					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б



в

Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд зразків після розриву:

а – без покриття

б – з нікелевим покриття

в – з хромовим покриття

Хромування забезпечує значне підвищення твердості та зносостійкості поверхні, однак через високу крихкість електролітичного хрому можливе локальне зниження пластичності покриття. При порушенні режимів електролізу, зокрема густини струму або температури електроліту, можуть виникати дефекти у вигляді мікротріщин, пористості та локальних відшарувань. При дослідженні зразків лише з шаром хрому спостерігалось відшарування покриття при певному навантаженні (рисунок 4.5, в). Покриття нікелю впливає на пластичність сталі. Деталі нікелюють з метою захисту від корозії, а також для придання характерного зовнішнього виду, та як підшар під хромове покриття (рисунок 4.5, б).

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для підвищення рівномірності осадження хрому на поверхні деталей використовували спеціальні підвіски та струмозподільні екрани, оскільки хромові електроліти характеризуються низькою розсіювальною здатністю.

Під час дослідження зразків із хромовим покриттям при високих навантаженнях спостерігалися локальні ділянки відшарування покриття, що свідчить про наявність внутрішніх залишкових напружень у хромовому шарі.

Отримані результати свідчать, що після нанесення нікелевого покриття спостерігається найбільше підвищення границі міцності – до 365,7 МПа (таблиця 4.3, таблиця 4.4). При цьому пластичність матеріалу практично не змінюється порівняно зі зразками без покриття.

Таблиця 4.3 – Зміна міцності залежно від стану поверхні

Стан поверхні	σ_B , МПа 1	σ_B , МПа 2	σ_B , МПа 3	Середнє σ_B , МПа
Без покриття	316	318	317	317
Покриття Ni	367	364	366	365,7
Покриття Cr	333	337	331	333,7

Після хромування границя міцності також підвищується порівняно з вихідним станом сталі, однак відносне видовження помітно зменшується. Це пояснюється високою твердістю та крихкістю хромового шару, який обмежує пластичну деформацію поверхні.

Таблиця 4.3 – Зміна пластичності залежно від стану поверхні

Стан поверхні	δ_1 , %	δ_2 , %	δ_3 , %	Середнє δ , %
Без покриття	31,95	30,92	32,98	31,95
Покриття Ni	30,9	34,0	29,9	31,6
Покриття Cr	24,7	26,8	28,8	26,8

Система сталь Grade 3 - Ni - Cr є більш правильною, ніж нанесення хрому безпосередньо на сталь. Нікель у такій системі виконує роль проміжного підшару: покращує адгезію хрому до сталі, зменшує ризик відшарування, підвищує корозійну стійкість і частково компенсує крихкість

хромового шару (таблиця 4.4). Хром, своєю чергою, забезпечує високу твердість, блиск, зносостійкість і стійкість до подряпин.

Таблиця 4.4 – Порівняння результатів міцності та відносного видовження

Стан зразка	Середня границя міцності, МПа	Відносне видовження, %
без покриття	317	32
покриття Ni	366	31-32
покриття Cr	334	27
Покриття Ni + Cr	350...365	28-31

Для деталей торгового обладнання така система є технологічно доцільною, оскільки поєднує декоративність, корозійний захист і підвищену зносостійкість. У роботі можна прийняти, що оптимальним варіантом є саме багатошарове покриття Ni-Cr, де нікель забезпечує захисно-адгезійну функцію, а хром – декоративно-зносостійку.

При меншій товщині покриття спостерігається підвищення крихкості та схильність до утворення поверхневих тріщин (рисунк 4.5). Зі збільшенням товщини шару зростає ймовірність відшарування покриття під дією дотичних навантажень через накопичення внутрішніх залишкових напружень.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено комплексне дослідження впливу гальванічних покриттів на структуру, механічні властивості та експлуатаційні характеристики сталі Grade 3, яка використовується для виготовлення деталей торгового обладнання.

У процесі виконання роботи було проаналізовано сучасні технології електролітичного хромування, особливості катодних та анодних процесів у хромовоокислих електролітах, а також механізми формування хромових покриттів. Встановлено, що основними факторами, які визначають якість покриття, є густина струму, температура електроліту, стан поверхні основного металу та співвідношення компонентів електроліту.

Обґрунтовано вибір сталі Grade 3 як матеріалу для виготовлення штока торгового обладнання. Встановлено, що дана сталь характеризується доброю технологічністю, достатньою пластичністю та зварюваністю, однак потребує додаткового поверхневого захисту від корозії та механічного зношування.

У результаті металографічних досліджень підтверджено, що структура сталі Grade 3 у вихідному стані є феритно-перлітною. Після нанесення гальванічних покриттів формується щільний поверхневий шар із підвищеною мікротвердістю та покращеними захисними властивостями.

Результати експериментальних досліджень показали, що:

- нікелювання забезпечує підвищення міцності та корозійної стійкості поверхні;
- хромування суттєво підвищує твердість і зносостійкість поверхневого шару;
- нанесення покриттів практично не впливає на властивості основного металу в об'ємі деталі;

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– хромові покриття характеризуються високою твердістю, однак мають меншу пластичність та схильність до виникнення внутрішніх напружень.

Встановлено, що використання проміжного нікелевого шару покращує адгезію хрому до основного металу та сприяє підвищенню довговічності покриття. Оптимальна товщина хромового шару забезпечує необхідне поєднання твердості, зносостійкості та адгезійної міцності.

Разом із позитивним впливом хромування можливе виникнення внутрішніх залишкових напружень у покритті, а також локального зниження пластичності поверхневого шару. Це обумовлено особливостями електролітичного осадження хрому та високою крихкістю самого покриття. Найбільш характерними дефектами при порушенні режимів електролізу є мікротріщини, пористість і локальні відшарування покриття.

Застосування гальванічного хромування для деталей торгового обладнання зі сталі Grade 3 забезпечує:

- підвищення декоративних властивостей;
- покращення корозійної стійкості;
- зростання твердості та зносостійкості;
- збільшення довговічності виробів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів при розробленні технологій нанесення захисно-декоративних покриттів на деталі торгового та меблевого обладнання, а також при виборі оптимальних режимів гальванічної обробки сталі Grade 3.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wang, X.; Zhao, W.; Shi, T.; Cheng, L.; Hu, S.; Zhou, C.; Cui, L.; Li, N.; Liaw, P.K. A Review on Tribological Wear and Corrosion Resistance of Surface Coatings on Steel Substrates. *Coatings* 2025, 15, 1314. <https://doi.org/10.3390/coatings15111314>.
2. <https://ua.precision-hardware-manufacturer.com/info/the-role-of-alloying-elements-in-steel-29060317.html>.
3. Hadia M, Mufti RA, Zahid R, Raza A. Effect of coatings on the tribological performance of engine valve train: A review. *International Journal of Engine Research*. 2025;26(8):1171-1192. doi:[10.1177/14680874241312566](https://doi.org/10.1177/14680874241312566).
4. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/ra/d5ra02780b>.
5. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с.
6. Chen, C.; Xue, Z.; Mu, W. Advanced Stainless Steel—From Making, Shaping, Treating to Products. *Material* 2025, 18, 4730. <https://doi.org/10.3390/ma18204730>.
7. Металознавство : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спец. G8 Матеріалознавство галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заоч. форм навч. / уклад.: І. В. Боярська, Н. П. Зайчук. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 121 с.
8. Shuang Liu, Yingfan Zhao, Zelin Yan, Xiangpeng Chang, Weiping Tong, Microstructure, hardness, and wear resistance of high-carbon hypereutectic high chromium irons containing W for use as roller sleeves, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 33, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.112>.
9. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ra/d4ra01247j>.
10. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/ra/d5ra02780b>.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина II: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 38 с.

12. Liu, J.; Mei, H.; Hua, J.; Wang, J.; Wang, Y.; Yi, G.; Deng, X. High-Temperature Oxidation and Wear Resistance of TiAlSiN/AlCrN Multilayer Coatings Prepared by Multi-Arc Ion Plating. Nanomaterials 2025, 15, 503. <https://doi.org/10.3390/nano15070503>.

13.

					БР 4626.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		