

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра  
Бакалавра (Магістра)

*Дослідження ефективності хромосиліціювання для  
підвищення зносостійкості та терміну служби робочих коліс  
відцентрових компресорів*

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 25.24359.000 ПЗ

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

  
Підпис

Павло ТУРЧАНОВ  
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 06 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**

Турчанову Павлу Андрійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Дослідження ефективності хромосиліціювання для підвищення зносостійкості та терміну служби робочих коліс відцентрових компресорів».

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; робочі креслення деталі; матеріали зразків сталей 12X18H9TЛ та 20X13Л; порошкові суміші (хром, феросиліцій, активатори, наповнювачі); реторти, печі допоміжне обладнання термічної лабораторії; наукове обладнання з визначення твердості, макро- та мікроструктури, визначення приросту маси, травники, методики з визначення пористості.

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

1. Аналіз літературних джерел виготовлення деталей згідно завдання.

2. Методика досліджень.

3. Експериментальні дослідження отриманих покриттів.

4. Економічна доцільність.

5. Охорона праці, техніка безпеки та екологічність.

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>	30.09.2025	
2	<i>Методологічний розділ</i>	25.10.2025	
3	<i>Технологічний розділ</i>	10.11.2025	
4	<i>Дослідницький розділ</i>	15.11.2025	
5	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	22.11.2025	
6	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	01.12.2025	
7	<i>Нормоконтроль проекту</i>	05.12.2025	
8	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	05.12.2025	

Студент

  
 \_\_\_\_\_  
 Підпис

Керівник роботи

Павло ТУРЧАНОВ  
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ  
Павло КАПЛУН  
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## РЕФЕРАТ

**Обсяг пояснювальної записки** – 85 сторінки, кількість рисунків – 21, таблиць – 15, додатків – 1, кількість джерел згідно із переліком посилань – 24.

**Об'єкт дослідження:** лита корозійностійка сталь 20X13Л після комплексного оброблення хромвмісним і кремнієвмісним насичувачем.

**Мета роботи:** підвищення комплексу механічних і термостійкісних властивостей литої сталі 20X13Л через розроблення ефективного варіанта хіміко-термічної обробки, що ґрунтується на одночасному насиченні хромом та кремнієм.

**Результати та їх новизна:** полягає у встановленні впливу температури й тривалості хромосиліціювання на характеристики модифікованих шарів сталі 20X13Л. Уперше продемонстровано, що обробка при 1000 °С протягом шести годин спричиняє зростання жаротривкості у 1,8–2,5 раза, що свідчить про ефективність досліджуваної технології для деталей, які працюють у нагрітих середовищах.

**Рекомендації щодо використання результатів роботи:** полягає у можливості використання отриманих матеріалів під час викладання дисциплін, пов'язаних із технологіями покриттів, термічними процесами та легованими сплавами, а також у подальших робочих дослідженнях, орієнтованих на підвищення ресурсу машинобудівних компонентів.

**Перелік ключових слів:** ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ХРОМУВАННЯ, МІКРОТВЕРДІСТЬ, СИЛЦІЮВАННЯ, ЖАРОСТІЙКІСТЬ.

## Перелік умовних позначень

ХТО – хіміко-термічна обробка. Комплекс технологічних процесів, що передбачають дифузійне насичення поверхневих шарів металів активними елементами (Cr, Si, N, C) з метою підвищення їх твердості, зносостійкості, корозійної та жаростійкої стійкості.




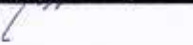
HV – мікротвердість за Віккерсом. Показник твердості матеріалу, визначений методом вдавнення алмазного індентатора у вигляді правильної чотиригранної піраміди; використовується для оцінювання твердості поверхневих покриттів і дифузійних шарів.

$\Sigma F$  – сумарна площа поверхні зразка. Геометричний параметр, що відображає площу контакту зразка з агресивним середовищем під час випробувань на жаростійкість чи корозійну стійкість; використовується для перерахунку приросту маси на одиницю площі.

$\delta$  – товщина дифузійного покриття. Відстань від зовнішньої межі покриття до межі переходу у металеву основу; визначає ступінь дифузійного насичення та впливає на довговічність захисного шару.

T – температура випробувань. Рівень теплового навантаження, при якому проводиться оцінювання жаростійкості або характеру окиснення зразків; у роботі використовували температури 800, 900 та 1000 °C.

	Зміст	С.
	Вступ	7
1	ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1	Основні відомості про деталі відцентрового компресора	9
1.2	Основні підходи до підвищення мікротвердості та жаростійкості поверхневих шарів	12
1.3	Висновки до розділу	14
2	МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МАТЕРІАЛИ	16
2.1	Матеріал дослідження	16
2.2	Методика нанесення захисного шару	25
2.3	Металографічний аналіз	32
2.4	ДюрOMETричний аналіз	40
2.5	Визначення мікропористості	42
2.6	Визначення жаростійкості	43
2.7	Висновки до розділу	46
3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ	48
3.1	Підсумкові результати мікроструктурного аналізу та дюрOMETричних випробувань	48
3.2	Визначення мікропористості	57
3.3	Результати випробувань на жаростійкість	60
3.4	Верифікація результатів дослідження	65
3.5	Висновки до розділу	67
4	ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	68
4.1	Теоретична частина	68

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження ефективності хромосиліювання для підвищення зносостійкості та терміну служби робочих коліс відцентрових компресорів	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Турчанов					5	85
Перевір.		Каплун				<i>XHV, МТВАм-24-1</i>		
Реценз.								
Н. Контр.		Бабак						
Затверд.		Диха						

4.2	Розрахункова частина	70
4.3	Висновки за розділом	73
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ	75
5.1	Конструктивне, інженерно-технічне облаштування приміщень	75
5.2	Засоби індивідуального та колективного захисту	75
5.3	Організаційні заходи та навчання персоналу	76
5.4	Оцінка виробничих ризиків та умови праці	76
5.5	Екологізація виробництва	77
5.6	Висновки за розділом	79
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	81
	Список використаних джерел	83
	Додатки	85

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## ВСТУП

**Актуальність** запропонованої проблематики обумовлена потребою підвищення твердості, жаротривкості та надійності деталі типу «робоче колесо», що функціонує в умовах значних навантажень та дії агресивного середовища. Очікується, що впровадження модернізованої технології поверхневого насичення забезпечить зростання експлуатаційних параметрів відцентрового насосного агрегата, зокрема збільшення ресурсу безвідмовної роботи та стабільності геометричних характеристик готового виробу протягом тривалого періоду експлуатації.

**Метою дослідження** є підвищення комплексу механічних і термостійкісних властивостей литої сталі 20Х13Л через розроблення ефективного варіанта хіміко-термічної обробки, що ґрунтується на одночасному насиченні хромом та кремнієм.

**До основних завдань належать:** аналіз публікацій, які висвітлюють питання хромосиліціювання; визначення оптимальної композиції активного середовища, параметрів температурного режиму та тривалості циклу; виконання експериментальної обробки зразків із зазначеного матеріалу; дослідження мікроструктури та встановлення мікротвердості, товщини й пористості дифузійних шарів; оцінювання жаротривкості в умовах підвищених температур; формування висновків і рекомендацій щодо раціональних технологічних рішень.

**Об'єктом вивчення** виступає лита корозійностійка сталь 20Х13Л після комплексного оброблення хромвмісним і кремнієвмісним насичувачем. Предмет охоплює фазовий склад, морфологічні особливості та характеристичні параметри сформованих дифузійних шарів, а також взаємозв'язок макро- і мікропоказників зі змінами твердості, поруватості та жаростійкості обробленого матеріалу.

Методики ґрунтуються на використанні сучасного лабораторного обладнання: контактне насичення у герметизованому контейнері,

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

металографічні спостереження, дюрOMETричні вимірювання, визначення товщини й пористості покриттів, а також термостійкі випробування.

**Наукова новизна** полягає у встановленні впливу температури й тривалості хромосиліціювання на характеристики модифікованих шарів сталі 20X13Л. Уперше продемонстровано, що обробка при 1000 °С протягом шести годин спричиняє зростання жаротривкості у 1,8–2,5 рази, що свідчить про ефективність досліджуваної технології для деталей, які працюють у нагрітих середовищах.

**Практичне значення** полягає у можливості використання отриманих матеріалів під час викладання дисциплін, пов'язаних із технологіями покриттів, термічними процесами та легованими сплавами, а також у подальших робочих дослідженнях, орієнтованих на підвищення ресурсу машинобудівних компонентів.

**Особистий внесок** здобувача включає пошук і аналіз наукових джерел, формування мети та постановку завдань, виготовлення зразків, підготовлення активного середовища, виконання експериментальної частини, опрацювання результатів і повне оформлення роботи.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

# 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

## 1.1 Основні відомості про деталі відцентрового компресора

Подальший розвиток промислових комплексів – хімічного виробництва, нафто- та газовидобування, металургії, а також систем трубопровідного транспорту – зумовлює стабільне зростання потреби в машинах для переміщення газових потоків. Серед таких агрегатів важливе місце займають відцентрові компресори, призначені для перекачування газу або повітря від області з нижчим тиском до зони з вищим. Подібні установки отримали широкий попит через конструкційну простоту, відсутність зворотно-поступальних механізмів, зменшені вимоги до фундаментів та відсутність елементів, що інтенсивно зношуються. Завдяки зазначеним особливостям вони ефективно працюють у процесах подачі чистого чи запиленого газу, дуття у вагранки, доменні або плавильні печі, а також у системах пневматичного транспортування сипких матеріалів, включаючи зерно, деревний пил чи волокнисту сировину.

Ключовою складовою будь-якого відцентрового компресора є робоче колесо, кількість яких у одному корпусі може змінюватися від одного до восьми, залежно від потреби в заданому ступені підвищення тиску. Зазначена деталь є елементом, у якому механічна енергія приводу перетворюється на енергію потоку, що перекачується. Через це до конфігурації проточної частини, режимів виготовлення та якості поверхонь висуваються особливо жорсткі вимоги. Колесо закритого типу складається з основного й покривного дисків, між якими розміщена система профільованих лопаток, що формують просторову решітку. Під час роботи деталь зазнає змінних навантажень від тиску робочого середовища, відцентрових сил, вібрацій та дії неврівноважених впливів.

На деталь також суттєво впливає середовище, що транспортується. Агресивні гази спричиняють корозійні ураження, а температура визначає тривалість служби поверхневого шару, від якого залежить опір втомним руйнуванням та інтенсивності зношування. Робочі колеса зі значними дефектами

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– тріщинами, наскрізними раковинами, надмірним спрацюванням контактних ділянок – вилучаються з експлуатації. Якщо усунення пошкоджень неможливе, деталі підлягають заміні, оскільки їх руйнування може викликати аварію всього агрегату.

До типових форм локальних руйнувань належать щілинна та виразкова корозія, а також корозійне розтріскування, яке виникає внаслідок сумісної дії хімічно активних компонентів середовища й локалізованих механічних напружень. Деградаційні процеси найчастіше концентруються на лопатках, ущільнювальних каналах і посадкових поверхнях під вал, де спостерігається підвищена чутливість до циклічних навантажень та абразивного впливу домішок. Пошкодження крайок інколи усувають проточуванням за максимальним діаметром, проте за наявності глибоких дефектів елемент підлягає заміні.

Газова корозія є специфічним різновидом хімічної взаємодії та формується переважно у гарячому повітрі, перегрітому парі або реакційних газах, що містять сірку, азот чи продукти згорання палива. Окрім окиснення киснем, поширеними механізмами є сульфідація та нітрування поверхонь. Підвищена температура інтенсифікує ці процеси, формуючи оксидні або змішані плівки зі зниженою міцністю та високою крихкістю.

Хром, алюміній та кремній забезпечують формування щільних оксидних шарів, здатних значною мірою сповільнювати швидкість окиснення та газової взаємодії. Відомо, що сталь із вмістом 12–14% Cr зберігає високу стійкість при 750–820 °С, а при концентрації 18–22% Cr тривало працює за температур 900–1000 °С. Кремній у межах 1,5–3,0% сприяє утворенню SiO<sub>2</sub>-плівок, які ефективні у середовищах із високим вмістом кисню та підвищеним тиском газів. Алюміній у кількості 4–6% формує захисний шар Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з надзвичайно низькою проникністю, завдяки чому жаростійкість сплаву може збільшуватися у 2–3 рази залежно від температури. Саме тому використання легувальних елементів або

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

дифузійних покриттів є ключовим шляхом підвищення ресурсу елементів відцентрових компресорів у високотемпературних газових потоках.

Діапазони температурної стабільності оксидних плівок Cr-Si-Al

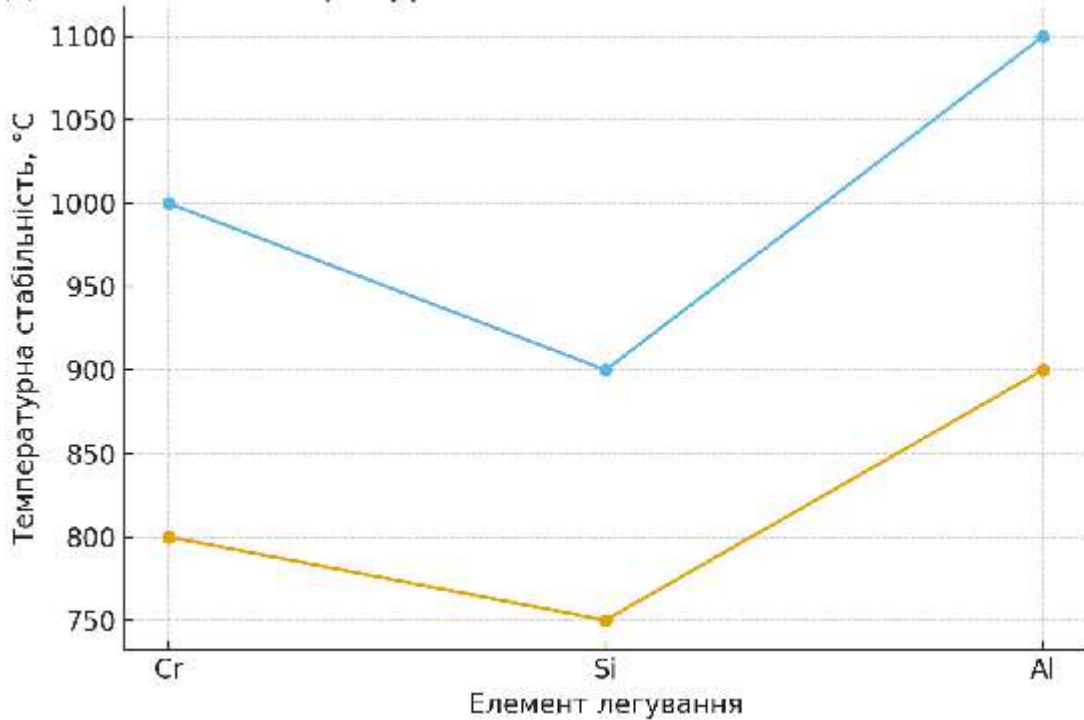


Рисунок 1.1 – Порівняльна діаграма стабільності оксидних плівок

Таблиця 1.1 – Основні параметри центробіжного компресора

Робоче середовище	Природний газ
Кінцевий тиск, МПа	3,75
Відношення тисків	1,6
Потужність приводу, МВт	8
Частота обертів, об/хв	8100
Температура середовища, що перекачується, °C, не більше	186

Інтенсивність корозійного руйнування визначається складом сплаву, параметрами газової атмосфери та наявністю попередньо сформованих захисних шарів. Якщо вплив агресивного середовища зменшити неможливо, застосовують

спеціальні леговані сталі або високоадгезійні покриття. Усі технічні вимоги до компресорного обладнання мають забезпечувати підвищену надійність агрегата та стабільність його функціонування в умовах тривалої експлуатації.

Технічні характеристики компресорного обладнання мають забезпечувати підвищений рівень надійності агрегата протягом усього періоду експлуатації.

З урахуванням наведеного вище, вимоги висуваються не лише до міцності основного матеріалу, який повинен витримувати циклічні та змінні навантаження, але й до стану поверхневих шарів. Останні мають демонструвати високу корозійну стійкість, зберігати працездатність за робочих температур, а під час транспортування рідин – протистояти кавітаційним руйнуванням та абразивному спрацюванню.

## 1.2 Основні підходи до підвищення мікротвердості та жаростійкості поверхневих шарів

Хіміко-термічна обробка (ХТО), яку часто визначають як поверхнєве легування, полягає у введенні в приповерхневу зону деталей одного чи кількох активних елементів з метою формування структур, що характеризуються підвищеною твердістю, жаростійкістю та зносостійкістю. Збагачення поверхні відбувається завдяки перенесенню атомів або йонів з насичувального середовища до границі розділу, після чого ініціюється дифузія в глиб металу [2].

Процедури ХТО реалізують у газових, порошкових або рідких фазах, де створюються умови для утворення підвищеної концентрації активних атомів біля поверхні металу. Після взаємодії з кристалічною ґраткою основного матеріалу вони утворюють хімічні сполуки та твердорозчинні фази, які змінюють мікроструктурні, механічні та теплові властивості поверхні. До типових технологій належать цементація, азотування, ціанування, силіціювання, алітування, хромування та борування [2].

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Окреме місце в сучасних дослідженнях займають комбіновані покриття на основі хрому та кремнію. Згідно з результатами роботи [1], дифузійне хромосиліціювання дає можливість сформувати на сталі комплексні карбідні та силіцидні шари з мікротвердістю до 19,5 ГПа біля поверхні. У таких покриттів загальна товщина сягає приблизно 110 мкм, причому мікротвердість поступово знижується до 4 ГПа в напрямку до основного металу. Встановлено, що сформовані структури характеризуються підвищеною жаростійкістю та корозійною стійкістю в технологічно важливих розчинах ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ,  $H_3PO_4$ ,  $CH_3COOH$ ,  $NaCl$  тощо). Випробування, проведені за температур 950–1000 °С, підтвердили збереження цілісності захисних шарів [1].

Практичні дослідження на сталях типу 20 і 45 показали, що нанесення хромосиліцидних покриттів підвищує корозійну стійкість у промислових середовищах у 2,5–30 разів залежно від складу розчину [1; 3]. Додаткове введення 3 г/л  $Na_2MoO_4$  у кислотні розчини значно покращує захисні властивості покриттів – на рівні 75–96 % [3].

Експериментальні результати, отримані у спеціальних реакційних камерах із контрольованою реакційною атмосферою, свідчать, що при 6-годинному процесі насичення за температури 1323 К на сталі 45 формується двошаровий дифузійний комплекс. Зовнішній карбідний шар містить фази  $Cr_{23}C_6$  та  $Cr_7C_3$ , тоді як внутрішня зона (~80 мкм) представлена твердим розчином кремнію й хрому у феритній матриці [4]. Такі покриття забезпечують значний приріст зносостійкості, ерозійної стійкості та опору корозії в умовах агресивних газових та водних середовищ.

До важливих практичних результатів відносять підвищення жаростійкості труб теплообмінників зі сталі 12X18H10T після нанесення хромосиліцидних шарів, що підтверджено випробуваннями на окиснення [3].

Комплексні хіміко-термічні методи також широко застосовують для високолегованих та низьколегованих чавунів. Як зазначається у [5],

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хромотитанування підвищує корозійну стійкість сталі 45 у 44 рази, хромосиліціювання – у 31 раз, а хромування – у 27 разів. Багатокомпонентні способи (хромотитаноалітування, хромотитаносиліціювання, титаноалюмосиліціювання) забезпечують захист на рівні 1,3–1,5 рази. Для сірого чавуну показано, що модифікація поверхні дифузійним внесенням Cr, Ti, Al, Mn або Si дає змогу збільшити його експлуатаційні властивості у 1,5–3 рази [5].

Важливою закономірністю є вплив кількості кремнію в порошкових сумішах: зі зростанням його частки та збільшенням часу процесу товщина модифікованої зони збільшується, але зовнішня частина шару стає пористішою. Покриття, отримані послідовною обробкою, мають вищу твердість завдяки утворенню значної кількості карбідів хрому [4].

### 1.3 Висновки до розділу

На основі проведеного аналізу літературних джерел, експериментальних звітів і результатів сучасних досліджень встановлено закономірності роботи деталі «робоче колесо» у відцентрових компресорних агрегатах, а також підсумовано основні фактори, що визначають його експлуатаційну надійність. Узагальнення інформації дало змогу визначити критичні умови навантаження, серед яких домінують циклічні напруження, вібраційні дії, абразивні чинники, локальні термічні зони та хімічно активні домішки транспортованого середовища. Сукупність цих впливів формує підвищені вимоги до складу матеріалу, чистоти обробки та структури поверхневого шару.

На підставі огляду встановлено, що традиційні методи підвищення експлуатаційної стійкості – легування, термічне зміцнення чи очищення поверхні – не завжди забезпечують необхідний рівень зносостійкості, жаростійкості та корозійної стабільності в умовах інтенсивної роботи відцентрових пристроїв. Водночас хіміко-термічні методи формують багатофазні дифузійні структури, які здатні істотно зменшити швидкість

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

деградації металу. Серед них перспективним напрямом є технологія одночасного насичення хромом і кремнієм, яка поєднує переваги карбідних і силіцидних систем.

Проаналізовані джерела демонструють, що хромосиліціювання створює захисні шари зі стабільною мікротвердістю, високою адгезією та низьким коефіцієнтом окиснення за температур понад 900–1000 °С. Мікроструктурні дослідження підтверджують утворення градієнтних шарів, що складаються з карбідів хрому на поверхні та твердих розчинів Cr–Si у феритній матриці на більшій глибині. Застосування технології приводить до значного підвищення стійкості до корозії, ерозії, кавітації та газового окиснення, що підтверджено в працях з різних класів сталей і чавунів.

Встановлено залежність структури покриття від ряду технологічних параметрів – температури, тривалості, складу порошкових сумішей, активності газової фази, а також від хімічного складу основного металу. Вибір оптимальних умов дозволяє керувати товщиною модифікованої зони, пористістю зовнішніх ділянок та рівнем твердості, що відкриває можливість адаптації процесу до деталей з різною геометрією та експлуатаційними вимогами.

Загальний аналіз підтверджує, що хромосиліціювання є ефективною технологією підвищення довговічності та надійності робочих коліс відцентрових компресорів, теплотехнічних елементів та інших деталей, які працюють у високотемпературних і корозійно активних середовищах. Комбіновані покриття Cr–Si доцільно розглядати як один із найбільш перспективних напрямів модифікації поверхонь матеріалів у сучасному машинобудуванні, що здатен забезпечити комплексне підвищення експлуатаційних характеристик без суттєвої зміни базової конструкції виробу.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

## 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МАТЕРІАЛИ

### 2.1 Матеріал дослідження

Для виготовлення робочих коліс відцентрових компресорів доцільно застосовувати корозійностійкі сталі з гарантованою жароміцністю, зносостійкістю та стабільністю механічних властивостей у умовах дії агресивних газових і рідинних середовищ. До таких матеріалів належать литі хромисті та хромонікелеві сталі, що задовольняють вимоги до робочих коліс високонавантажених агрегатів.

У машинобудівній практиці широкого застосування набули сталі 20X13Л, 12X18Н9ТЛ та 12X18Н12М3ТЛ, які регламентуються відповідними державними стандартами.

Нижче наведено актуальні стандарти на зазначені марки:

#### 1. Сталь 20X13Л

Нормативний документ: ДСТУ 5632:2014 «Сталі та сплави корозійно- та жаростійкі. Марки». Застосовується до литих виробів: ДСТУ 977–2006 «Сталі литі. Загальні технічні умови». Європейські та американські аналоги:

- X20Cr13 (EN 1.4021),
- ASTM A743 Grade CA6NM (близька за властивостями).

#### 2. Сталь 12X18Н9ТЛ

Нормативний документ: ДСТУ 5632:2014 Литі деталі: ДСТУ 977–2006.

Міжнародні аналоги:

- AISI 321 (тільки деформована, але близький склад),
- EN 1.4541 (X6CrNiTi18-10).

#### 3. Сталь 12X18Н12М3ТЛ

Нормативний документ: ДСТУ 5632:2014. Сфера застосування: жаростійкі деталі, сильнодіючі корозійні середовища. Зарубіжні відповідники:

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

- EN 1.4571,
- AISI 316Ti (аналог за властивостями, відмінність — підвищений вміст Ni, Mo).

Нижче наведено склад відповідно до ДСТУ 5632:2014 (масові частки, %).

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталей

Марка	Тип:	Елемент, вміст, %								
		C	Cr	Ni	Mo	Ti	Mn	Si	S	P
Сталь 20X13Л (X20Cr13)	мартенситно-феритна корозійно-стійка сталь	0.16	12.0	≤0.6	–	–	≤1.0	≤0.8	≤0.0	≤0.0
		– 0.22	– 14.0						25	3
Сталь 12X18Н9ТЛ (Х6CrNiTi18-10)	аустенітна корозійно-стійка сталь	≤0.1 2	17.0 – 19.0	8.0– 11.0	–	0.2– 0.7	≤2.0	≤1.0	≤0.0 2	≤0.0 35
Сталь 12X18Н12М3ТЛ	аустенітна корозійно-стійка, жаростійка сталь підвищеної легованості	≤0.1 2	17.0 – 20.0	10.0 – 11.0	2.0– 3.0	0.2– 0.7	≤2.0	≤1.0	≤0.0 2	≤0.0 35

Сталь 20X13Л (X20Cr13) – має задовільну корозійну стійкість у слабких кислотах і нейтральних середовищах, утворює мартенсит при гартуванні, забезпечує твердість і опір абразивному зносу.

Сталь 12X18Н9ТЛ (Х6CrNiTi18-10) – відзначається високою пластичністю, тривалою корозійною стійкістю, стабільною роботою при температурі 650–750 °С. Наявність Ti знижує міжкристалітну корозію.

Сталь 12X18Н12М3ТЛ (близька до AISI 316Ti) – завдяки підвищеному вмісту нікелю та молібдену сталь проявляє стійкість у хлоридовмісних та кислотних середовищах, має підвищену жаростійкість (до 800–850 °С) і відмінний опір точковій та щілинній корозії.

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір указаних марок сталей зумовлений їх структурною стабільністю, високим опором механічному навантаженню та здатністю працювати у середовищах з підвищеною агресивністю. Мартенситно-феритна сталь 20Х13Л забезпечує необхідний баланс твердості та корозійної стійкості у конструкціях, де важливо забезпечити опір абразивному і кавітаційному зношуванню. Аустенітні сталі 12Х18Н9ТЛ і 12Х18Н12М3ТЛ значно краще працюють у середовищах, де можливе локальне окиснення, підвищений вміст хлоридів або довготривала дія температур понад 600 °С.

Завдяки високому вмісту Cr, Ni, Mo і Ti ці сталі мають здатність формувати щільні захисні оксидні плівки, що ефективно знижують швидкість корозійних процесів, а їх аустенітна матриця забезпечує необхідну пластичність і тривалу міцність у складних умовах роботи.

Сталь 12Х18Н9ТЛ застосовують для виготовлення широкої номенклатури деталей машинобудування, що функціонують за температур не вище 700 °С. Цей матеріал належить до аустенітного класу, характеризується стабільною корозійною стійкістю, здатністю працювати при температурі до 750 °С без інтенсивного окиснення та зберігати жароміцність у межах приблизно 600 °С. Сталь 12Х18Н12М3ТЛ також має аустенітну структуру й використовується для елементів, що контактують із сірчаною киплячою кислотою, ортофосфатною, мурашиною, оцтовою та іншими агресивними середовищами, а також для деталей, які тривалий час працюють під механічним навантаженням при температурах до 800 °С.

Корозійностійкі хромонікелеві сталі з вмістом хрому близько 18 % та нікелю 8–12 % набули значного поширення в машинобудуванні, енергетичному обладнанні, побутових виробках, а також у архітектурних та декоративних конструкціях. Додавання нікелю у зазначеній кількості переводить хромисту сталь у стабільний аустенітний стан у всьому робочому діапазоні температур, завдяки чому підвищуються механічні властивості, зменшується ймовірність

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

укрупнення зерен та суттєво збільшується опір корозії, а також зникає холодноламкість матеріалу [6].

Для нержавіючих хромонікелевих сталей характерне утворення спеціальних карбідів, переважно типу  $Me_{23}C_6$ , кількість яких визначається вмістом вуглецю. Розчинність карбідних фаз у аустеніті при кімнатній температурі та до приблизно 700 °C становить лише близько 0,05 %, проте при нагріванні понад 800 °C вона різко збільшується. За температури 1050 °C можливо повністю розчинити приблизно 0,05 % карбідів, а при 1150 °C у розчин переходять майже всі карбіди навіть за вмісту вуглецю до 0,15 %. При цьому додавання нікелю зменшує їх розчинність у високолегованому аустеніті [9]. Така різниця у фазовій рівновазі сприяє тому, що нагрівання та швидке охолодження забезпечують формування пересиченого твердого розчину, а подальше відпускання в межах 500–700 °C призводить до вторинного виділення карбідів.

Процес виділення карбідних фаз часто відбувається уздовж меж зерен, що за певних умов спричиняє окрихчення та розвиток корозійного руйнування міжкристалітного типу. Інтеркристалітна корозія пов'язана зі збідненням прикордонних областей на хром: у формуванні карбідної фази  $Me_{23}C_6$  бере участь практично весь доступний вуглець, який швидко дифундує до меж зерен, тоді як хром не встигає переміщуватися з глибин зерен через малу швидкість дифузії. У результаті вміст хрому в твердій розчинній фазі на кордонах знижується нижче 12 %, що є критичною межею для забезпечення корозійної стійкості. Через це корозійне руйнування поширюється переважно саме вздовж цих ділянок.

Металографічні дослідження підтверджують, що утворення суцільної сітки карбідів по межах зерен є передумовою розвитку міжкристалітної корозії. Якщо карбіди з'являються локально, не утворюючи неперервної сітчастої структури, або присутні окремі коагульовані частинки, міжкристалітне руйнування, як правило, не ініціюється [7].

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Інтеркристалітна корозія виникає лише у разі нагрівання попередньо загартованої аустенітної сталі в інтервалі 500–700 °С, оскільки саме за цих умов відбувається активне виділення карбідних фаз у пересиченому аустеніті. Зменшити схильність до такого типу руйнування можна двома шляхами: зниженням вмісту вуглецю або введенням елементів-стабілізаторів, зокрема титану чи ніобію. Останні утворюють карбіди типу MeC, які мають низьку розчинність в аустеніті та перешкоджають утворенню хромистих карбідів на межах зерен, тим самим запобігаючи міжкристалітному ослабленню структури.

Аустенітні корозійностійкі сталі, попри значний комплекс експлуатаційних переваг, можуть проявляти схильність до ще одного специфічного виду руйнування — корозійного розтріскування під дією напружень, яке виникає в умовах поєднання хімічних факторів та локальних механічних впливів [7]. Матеріали цього класу широко застосовують завдяки їх високій технологічності, стабільній пластичності та добрим антикорозійним властивостям. Вони легко деформуються у гарячому й холодному станах, витримують глибоке витягування, добре зварюються та не виявляють окрихчення у зоні термічного впливу. Термічне оброблення таких сталей є відносно нескладним і полягає у нагріванні до 1050–1100 °С з подальшим гартуванням у воді. Цей режим забезпечує повне розчинення хромвмісних карбідів, а швидке охолодження фіксує пересичений твердий розчин. Натомість повільне зниження температури неприпустиме, оскільки викликає повторне виділення карбідів та погіршує корозійну стійкість і пластичність. У порівнянні з мартенситно-феритними сталями, гартування для аустенітних сплавів є пом'якшувальною операцією, оскільки не збільшує твердість, а, навпаки, знижує її та підвищує пластичні характеристики.

Беручи до уваги умови роботи робочого колеса та вимоги до матеріалу, у дослідженні запропоновано застосувати сталь 20X13Л, яка відповідає критеріям жаростійкості, стабільності структури та корозійної стійкості. Цей сплав

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

використовують у багатьох галузях, включаючи енергетичне машинобудування, нафтопереробку та виробництво обладнання для високотемпературних процесів. Завдяки поєднанню підвищеної міцності та здатності протистояти окисненню за температур до 500 °С, сталь демонструє надійну роботу у слабкоагресивних середовищах. Вона стійка до дії розведених органічних кислот і солей, проте не призначена для тривалого використання у середовищах з високою часткою хлоридів, включно з морською водою [8].

Введення в сплав 12–14 % Cr забезпечує позитивний електрохімічний потенціал та формування захисної оксидної плівки Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, яка надає сталі корозійну стійкість у водних, атмосферних та слабкислотних середовищах. Висока стійкість можлива лише за умови, що основна частина хрому перебуває у твердому розчині; надлишок вуглецю сприяє утворенню карбідів, що знижують концентрацію хрому та формують двофазну мікроструктуру, менш стійку до корозійних процесів і окрихчення. Термічне оброблення, включаючи гартування та високе відпускання, а також створення гладкої поверхні з полірованою структурою, істотно покращують антикорозійні властивості металу.

Основу сталі 20X13Л становлять залізо, хром і вуглець. У корозійностійких хромистих сплавах надмірна частка вуглецю небажана, оскільки він активно зв'язує хром у карбіди, зменшуючи його концентрацію в твердому розчині. При цьому втрата маси під час окиснення залежить від вмісту вуглецю: для сталей з високим умістом Cr цей вплив мінімальний, проте для сплавів середньої легованості при 0,9 % C відзначається різке підвищення інтенсивності окиснення. Значний вплив має і температура процесу, тоді як стан поверхні виконує другорядну роль. Це підтверджує, що жаростійкість визначається головним чином хімічним складом і властивостями оксидних плівок, які формуються під час роботи сплаву.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

За різних температурних умов вуглець у хромистих сталях може існувати у формі твердого розчину (в інтервалі стабільності  $\gamma$ -фази) або у вигляді карбідів, що утворюються за нижчих температур. Виділення карбідних частинок під час повільного охолодження чи внаслідок нагрівання нижче межі їх розчинності інколи супроводжується локальною зміною концентрації хрому, особливо вздовж меж зерен. У окремих випадках це провокує посилене окиснення, хоча подібне явище рідше спостерігається в легованих хромом сталях через природу їх фазової рівноваги.

Хромисті корозійностійкі сталі є одними з найбільш доступних та широко застосовуваних матеріалів завдяки порівняно низькій собівартості та достатньо високій стійкості до корозійних процесів. Мінімальний уміст хрому – приблизно 12 % – забезпечує формування пасивного шару та переведення сплаву у категорію кислотостійких матеріалів. Хром добре розчиняється як у  $\alpha$ -, так і у  $\gamma$ -залізі, досягаючи максимальної розчинності 0,5 % у фериті при 20 °С та близько 12,8 % у аустеніті за температури 510 °С.

Антикорозійний опір можна суттєво підвищити шляхом мінімізації вмісту вуглецю та введенням легуючих елементів, які зміщують електродний потенціал сплаву у більш позитивну область за рахунок стабілізації твердого розчину. Хром, окрім забезпечення пасивації, є активним карбідоутворювачем. Формування карбідів зменшує частку хрому в твердому розчині, спричиняє виникнення двофазної структури та погіршує стійкість проти корозійного руйнування. Термічна обробка з підвищенням дисперсності карбідних частинок та наступним укрупненням після відпускання здатна зменшувати кількість дрібних карбідів, які найчастіше каталізують корозійні процеси.

Усі легуючі компоненти, що розчиняються у залізі, впливають на температурний інтервал існування його алотропічних форм, тобто зміщують критичні точки на шкалі фазових перетворень. Хром, зокрема, змінює поліморфізм заліза та зменшує інтервал між точками  $A_3$  та  $A_4$ . Для сталі 20X13Л

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

характерні такі температури фазових перетворень:  $A_{c1} = 810 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c3} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{r3} = 660 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{r1} = 710 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $M_n \approx 320 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [6, 7].

Таблиця 2.2 – Вплив температури на фазові перетворення сталі 20X13Л

Інтервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Умовне позначення критичної точки	Структурний стан та фазові перетворення
$T < 320$	$M_n \approx 320$	Завершення мартенситного перетворення при охолодженні; структура – переважно мартенсит з незначною кількістю залишкового аустеніту.
320 ... 660	$A_{r3} = 660$	При охолодженні: поступове перетворення аустеніту на феритно-карбідну суміш; зростає частка фериту, можливе виділення карбідів хрому у феритній матриці.
660 ... 710	$A_{r1} = 710$	Завершення розпаду аустеніту; структура наближається до феритно-карбідної, при повільному охолодженні – схильність до утворення грубих карбідів по межах зерен.
710 ... 810	$A_{c1} = 810$	При нагріванні: початок аустенітного перетворення, зародження $\gamma$ -фази по межах феритних зерен; частина карбідів починає розчинятися в аустеніті.
810 ... 900	$A_{c3} = 900$	Формування повністю аустенітної структури; більшість карбідів хрому переходить у твердий розчин, з'являється можливість отримати однорідну $\gamma$ -структуру для подальшого гартування.
900 ... 1000	–	Стабілізація аустеніту; при надмірній витримці зростає ризик укрупнення зерна, але забезпечується повне розчинення карбідної фази перед гартуванням.
$T > 1000$	–	Інтенсивний ріст зерна аустеніту, зниження в'язкості та ударної міцності; небажаний інтервал для тривалої витримки деталей з 20X13Л.

**Примітка:** значення критичних точок для сталі 20X13Л прийняті як орієнтовні:  $A_{c1} \approx 810 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c3} \approx 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{r1} \approx 710 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{r3} \approx 660 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $M_n \approx 320 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Хром також впливає на стабільність аустеніту, зміщуючи С-подібні криві праворуч і збільшуючи прогартуваність сплаву. Оскільки сталь 20X13Л належить до мартенситного класу, охолодження практично в будь-якому середовищі забезпечує утворення мартенситної структури; лише дуже повільне охолодження разом із піччю сприяє формуванню феритно-карбідної суміші.

Тривала витримка при 600–650  $^{\circ}\text{C}$  стимулює зародження інтерметалідної фази, яка різко знижує в'язкість і викликає окрихчення матеріалу. Аналогічно витримка у діапазоні близько 500  $^{\circ}\text{C}$  спричиняє появу впорядкованого твердого

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розчину, що також призводить до втрати пластичності. Підвищення температури понад 1000 °С викликає інтенсивний ріст зерен і, відповідно, зменшення ударної в'язкості. Тому під час вибору режимів термічної обробки необхідно уникати зон, у яких можливе охрупчування або деградація механічних властивостей сталі.

Хром є ключовим легувальним елементом у системі жаростійких та корозійностійких сталей, оскільки саме він визначає здатність сплаву протистояти високотемпературному окисненню та утворювати на поверхні стійкі захисні плівки. Зі зростанням концентрації хрому в залізній матриці межа початку активного окиснення зміщується в область значно вищих температур, що прямо пов'язано з формуванням тонкої та щільної оксидної плівки навіть на дуже гладких поверхнях. За підвищеного вмісту хрому кількість окалини суттєво зменшується на всіх температурних рівнях, а швидкість окиснення сповільнюється в багато разів. Разом із тим для кожного температурного режиму існує мінімальна концентрація хрому, необхідна для забезпечення жаростійкості, і перевищення цього рівня не приносить додаткових переваг, тому оптимальний вміст хрому завжди прив'язують до конкретних умов експлуатації виробів.

Надзвичайна ефективність хромовмісних сплавів пояснюється тим, що під час нагрівання хром утворює оксид  $Cr_2O_3$ , який має високу стабільність, тугоплавкість та низьку проникність для дифузії кисню. Така плівка зберігає захисні властивості навіть після охолодження в умовах відновлювальних середовищ, зокрема водню, що свідчить про її особливу хімічну інертність. У залізохромистих сплавах чистий  $Cr_2O_3$  формується переважно за умов дуже високої концентрації хрому ( $\approx 30\%$ ), тоді як при менших частках у складі окалини переважають змішані оксидні фази. Наприклад, у сталях із вмістом хрому близько 13% перехід шпінельних оксидів у  $\alpha-Fe_2O_3$  відбувається при температурі приблизно 400–450 °С. Вважається, що  $Cr_2O_3$  та  $Fe_2O_3$  можуть утворювати тверді розчини завдяки близькості параметрів ґратки, що додатково стабілізує структуру плівки.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

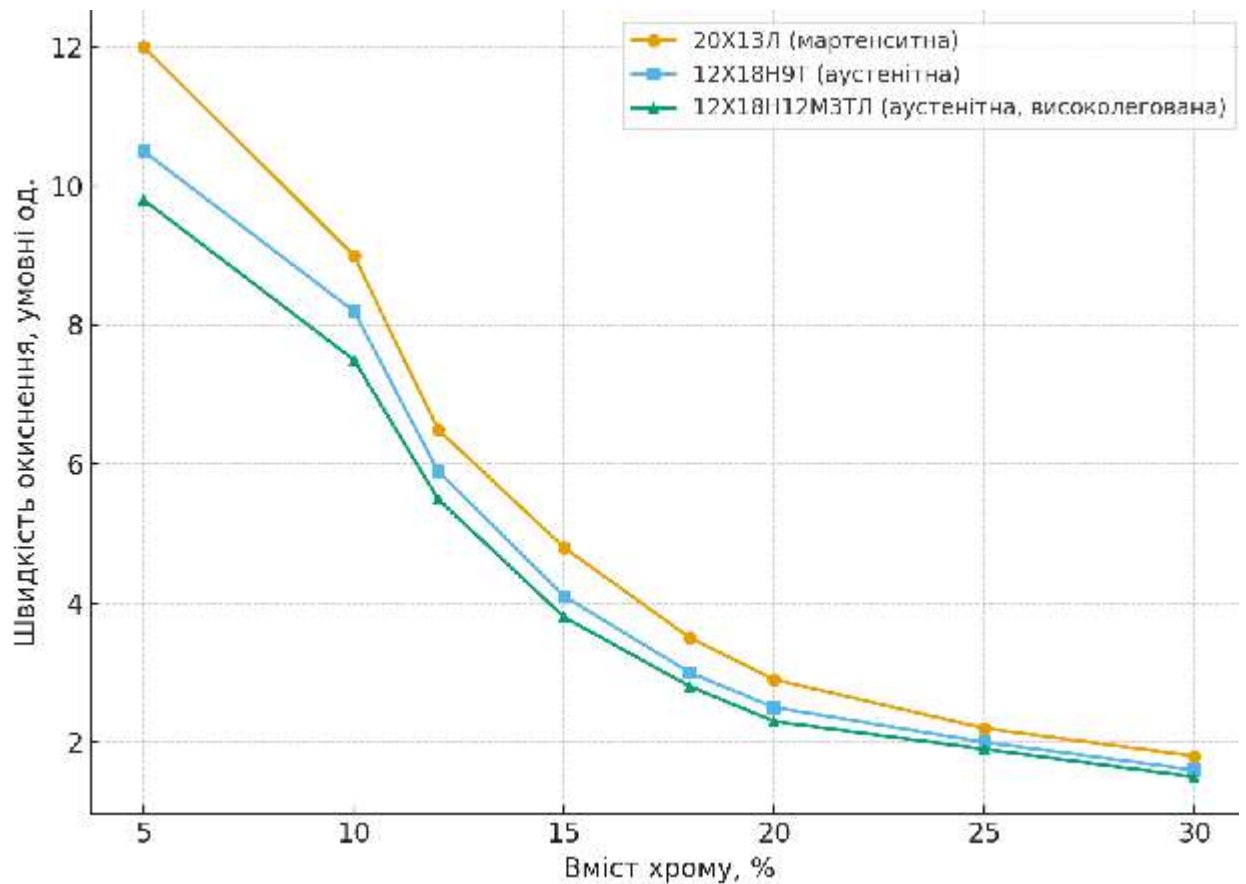


Рисунок 2.1 – Порівняння швидкості окиснення сталей від вмісту хрому

Підвищення стійкості таких сплавів до газової корозії досягається також введенням до системи алюмінію, кремнію або нікелю, які змінюють кінетику окиснення та сприяють формуванню багатошарових захисних оксидів. У межах цієї роботи запропоновано інший підхід – зміцнення сталі 20X13Л шляхом нанесення дифузійного покриття. З цією метою застосовано сучасний варіант хіміко-термічного насичення, що передбачає одночасне введення хрому та кремнію. Такий процес, відомий як хромосиліціювання, дозволяє сформувати комплексні високотемпературні бар'єрні шари з підвищеною корозійною та жаростійкою здатністю, істотно збільшуючи довговічність відповідальних деталей.

## 2.2 Методика нанесення захисного шару

Метод хромосиліціювання належить до групи дифузійних хіміко-термічних процесів, у яких поверхня сталевих деталей насичується хромом і

кремнієм у замкненому просторі при підвищених температурах. Процедура спрямована на отримання комплексних високотемпературних захисних шарів, що істотно підвищують жаростійкість, корозійну та абразивну стійкість сталі 20Х13Л.

**Підготовка поверхні.** Перед насиченням поверхні проводять багатоетапну підготовку, що включає механічне очищення від окалини, шліфування, знежирення у лужних або органічних розчинах, промивання та сушіння. Поверхня має бути однорідною, очищеною від забруднень, продуктів корозії та мастил, оскільки будь-які залишки можуть вплинути на рівномірність дифузії.

### **Приготування порошкової суміші**

Насичувальну суміш формують із:

- феросиліцію як джерела кремнію;
- металевого хрому або оксиду  $Cr_2O_3$  у поєднанні з відновниками;
- активаторів (галогенідів типу  $NH_4Cl$  або  $CCl_4$ ), що переводять насичувальні компоненти у газофазний стан;
- інертних наповнювачів ( $Al_2O_3$ , кварцовий пісок), які стабілізують структуру суміші та забезпечують рівномірність теплопереносу.

### **Заповнення контейнера і герметизація**

Деталі повністю занурюють у порошкове середовище, після чого контейнер герметизують шляхом вальцювання або нанесення жаростійкої глини. Герметичність є критичним фактором, оскільки запобігає надмірному окисненню реагентів і забезпечує стабільність активних газофазних частинок.

### **Нагрівання і витримка**

Насичення виконують у муфельних чи шахтних печах. Типові параметри процесу:

- температура: 1000–1100 °С (оптимально – 1050 °С);

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- тривалість: 4–8 годин;
- атмосфера нагрівання: повітря або інертний газ.

Під час витримки відбуваються: утворення летких сполук хрому та кремнію; реакція газової фази з поверхнею деталі; дифузійне проникнення елементів у приповерхневий шар металу; формування структурних зон покриття (силіцидна, карбідна та перехідна).

### **Охолодження та завершальна обробка**

Після витримки контейнер охолоджують разом із піччю до 200–300 °С для уникнення термічних тріщин. Подальше охолодження проводять на повітрі. Деталі очищають від залишків суміші механічними та хімічними способами, після чого проводять контроль товщини покриття, мікротвердості та мікроструктури.

### **Характеристики отриманого покриття**

Стандартна структура захисного шару на сталі 20Х13Л містить:

- зовнішню карбідно-силіцидну зону ( $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_3Si$ ,  $CrSi_2$ );
- внутрішню область твердого розчину хрому і кремнію в  $\alpha$ -Fe;
- типову товщину 80–120 мкм;
- мікротвердість 10–20 ГПа;
- жаростійкість до 1000 °С;
- підвищення корозійної стійкості у кислотах у 3–30 разів.

Дифузійне комбіноване насичення поверхні сталі 20Х13Л елементами хрому та кремнію здійснювали шляхом оброблення у порошкових насичувальних сумішах, розміщених у щільно герметизованих реакційних контейнерах.

Для забезпечення рівномірного дифузійного насичення та стабільності процесу хромосиліціювання деталі розміщували всередині реакційного контейнера на спеціальній підставці або внутрішній вставці. Таке компонування

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перешкоджає безпосередньому контакту зразків із дном контейнера, що мінімізує нерівномірність прогріву та локальні дефекти шару внаслідок теплових перепадів.

Порошкова насичувальна суміш повністю оточувала зразки, заповнюючи увесь міжзорний об'єм. Це забезпечувало постійний контакт активних частинок із поверхнею сталі та створювало однакові умови дифузії по всьому периметру деталі. Товщина шару суміші над деталями становила не менше 10–20 мм, що гарантувало стабільність хімічної взаємодії протягом усього процесу.

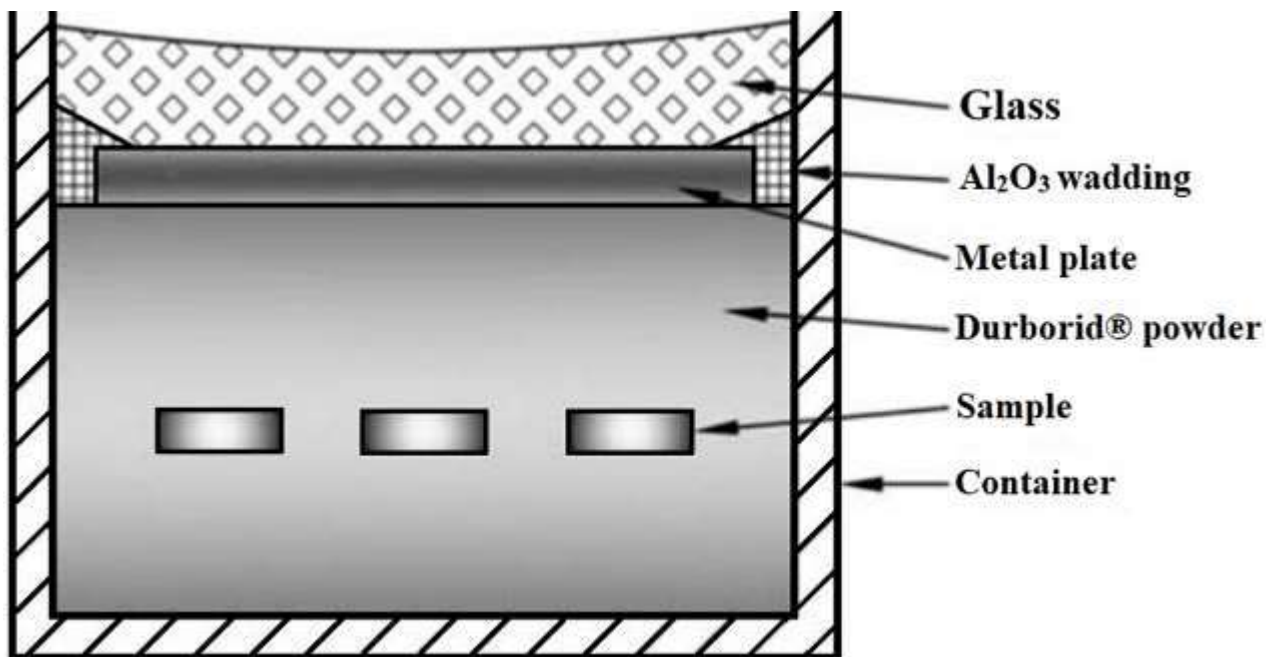


Рисунок 2.2 – Схема пакування зразків до контейнеру

Для виключення доступу атмосферного кисню, який здатен інтенсифікувати окислення насичувальних компонентів і знижувати ефективність утворення активної газової фази, контейнер герметизували. Герметизацію виконували за допомогою кришки з ущільненням або спеціальної жаростійкої обмазки на основі глини чи керамічних паст. Така конструкція забезпечувала напівзамкнений об'єм із контрольованою реакційною атмосферою під час нагрівання.

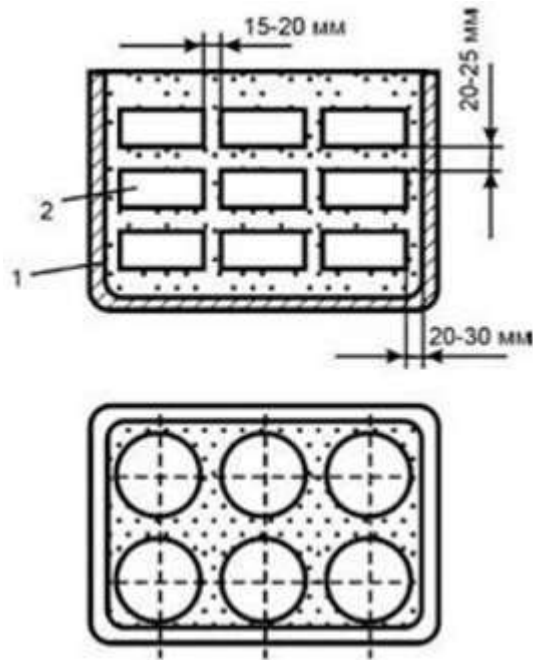


Рисунок 2.3 –Контейнер для хромосиліювання: 1 – стінка; 2 – зразки.

Методика упакування є універсальною і може застосовуватися як для дрібних лабораторних зразків (пластини, циліндричні заготовки, секторні вирізи), так і для деталей складної геометрії. Конфігурація внутрішніх елементів контейнера та спосіб розміщення вибираються з урахуванням геометрії та маси виробу, щоб забезпечити рівномірний тепловий режим і сталий доступ активної суміші до всієї поверхні.

Зразки попередньо очищували від залишків забруднень шляхом знежирення етиловим спиртом, після чого їх розміщували всередині контейнера, виготовленого з жароміцного сплаву. На дно ємності заздалегідь укладали частину насичувальної суміші, а подальше завантаження здійснювали таким чином, щоб кожна деталь була повністю ізольована від стінок і сусідніх елементів. Мінімальна відстань між поверхнями зразків та внутрішніми гранями контейнера становила 15–20 мм, що забезпечувало рівномірність термічного поля та виключало місцеві концентрації активних компонентів.

Після засипання зразків порошковий карбюратор вирівнювали до повного перекриття деталей, контейнери закривали металевою кришкою та

герметизували. Ущільнення виконували нанесенням декількох шарів вогнетривкої глини, що перекривала всі можливі зазори між кришкою і корпусом. Після висихання глиняного покриття контейнер завантажували у піч, де здійснювали поступовий нагрів разом із розміщеними усередині зразками. На підставі аналізу довідкових характеристик було встановлено раціональний склад шихти карбюризатора, що забезпечує оптимальні умови дифузійного насичення.

Таблиця 2.3 – Склад суміші для хромосиліціювання сталі 20Х13Л

№	Складові карбюризатора	Хімічний склад	Компонент, %
1	Кремній кристалічний	Si	2–6
2	Хром порошковий	Cr	50–54
3	Оксид алюмінію	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42
4	Хлорид амонію	NH <sub>4</sub> Cl	2

Дифузійне насичення поверхневих шарів здійснюється за рахунок введення до шихти кристалічного кремнію та порошкового хрому, причому гранулометричний склад металевих частинок підтримується в межах 200–300 мкм. Для уникнення злежування або спікання реагентів у суміш додають оксид алюмінію, який виконує функцію термостабілізатора і забезпечує необхідну сипучість. Активатором, що ініціює утворення газофазних переносників та інтенсифікує дифузію, виступає хлорид амонію.

Комплексне насичення сталі хромом і кремнієм проводили за двома технологічними режимами (таблиця 2.4), які відрізнялися температурою ізотермічної витримки та її тривалістю. Метою експерименту було визначення раціональних параметрів хромосиліціювання, що забезпечують максимальні значення мікротвердості та жаростійкості покриття сталі 20Х13Л.

Перший варіант реалізовували при температурі 900 °С зі збереженням ізотермічного стану протягом 4 годин — це мінімальні умови, прийнятні для протікання процесу хромосиліціювання (таблиця 2.4, рис. 2.4 а). Другий режим

відповідає найбільш поширеному у промисловій практиці: температура 1000 °С і витримка 6 годин, що забезпечує інтенсивніше протікання дифузійних реакцій та формування більш розвиненої структурної зони покриття (таблиця 2.4, рис. 2.4 б).

Таблиця 2.4 – Компоненти й параметри хромосиліціювання сталі 20Х13Л

№ ХТО	Склад карбюризатора	Час насичення, г.	Температура, °С
1	1. Хром порошковий (50-54%) 2. Кремній кристалічний (2-5%)	4	900
2	3. Оксид алюмінію (42%) 4. Хлорид амонію (2%)	6	1000

Після закінчення ізотермічної витримки контейнери із зразками залишали в печі для контрольованого охолодження. Після зниження температури до безпечного рівня ємності розкривали, а деталі вилучали, промивали водою та ретельно очищали від залишків насичувальної порошкової суміші.

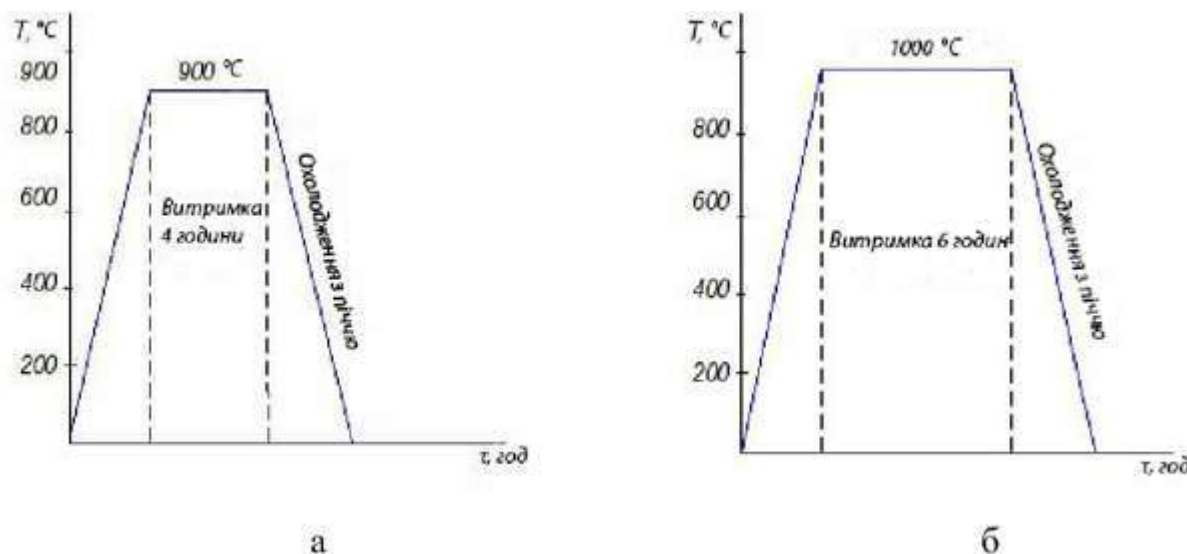


Рисунок 2.4 – Графіки хромосиліціювання:

а –  $T = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 4$  години; б –  $T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 6$  годин.

Після завершення етапу очищення поверхні переходили до виготовлення мікрошліфів, необхідних для подальшого металографічного аналізу структури

сталі після хромосиліціювання. Підготовка перерізів включала послідовне шліфування на наждачних паперах різної зернистості, полірування з використанням алмазних суспензій та подальше травлення у відповідних реактивах для виявлення мікроструктурних елементів. Такий підхід дозволяє отримати високоякісні площини, придатні для вивчення фазового складу, товщини дифузійних зон і характеру морфологічних змін.

Методика металографічної підготовки вирізняється відносною простотою виконання та не потребує спеціальних виробничих дільниць чи складного обладнання, що робить її широко застосовуваною у лабораторних дослідженнях. Перед початком робіт усі компоненти шліфувальних та полірувальних матеріалів ретельно зважували та адаптували для подальшого використання. Для стабілізації властивостей робочих сумішей їх прогартувували у герметизованих контейнерах при температурі 100–200 °С упродовж 1–1,5 годин. Після термообробки матеріали подрібнювали, гомогенізували та перемішували до отримання однорідної структури, що забезпечувало сталість параметрів при виготовленні мікрошліфів.

### 2.3 Металографічний аналіз

Металографічний аналіз є фундаментальним методом вивчення будови металів і сплавів, що дозволяє встановлювати закономірності формування структурних складових, їхній фазовий зміст, морфологію та взаємозв'язок із експлуатаційними властивостями матеріалу. Даний підхід охоплює сукупність методів і процедур, спрямованих на дослідження мікроструктури металу за допомогою оптичних, електронних, рентгенівських та інших засобів фізичного аналізу. З огляду на те, що структура металів визначає їхню твердість, пластичність, зносостійкість, корозійну поведінку та жаростійкість, металографія є одним із ключових інструментів інженера-матеріалознавця, необхідним при розробленні нових технологій обробки, модифікації та

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

зміцнення поверхневих шарів, включно з процесами хіміко-термічної обробки, зокрема хромосиліціювання.

Металографічний аналіз спрямований на встановлення особливостей внутрішньої будови матеріалу на різних масштабних рівнях — від зонального макроскопічного огляду до детального вивчення кристалічної решітки. Основна мета методу полягає у визначенні фазового складу, розмірів зерен, мікронеоднорідностей, дефектів кристалічної структури, а також характеристик перехідних зон і приповерхневих шарів, що особливо важливо при дослідженні дифузійних покриттів.

До ключових завдань металографічного аналізу відносять:

- виявлення фаз, що сформувалися внаслідок термічного або хіміко-термічного впливу;
- оцінювання морфології поверхневих шарів, характеру їх формування та глибини дифузії;
- визначення топографії зерен, їхнього розміру, однорідності та орієнтації;
- встановлення наявності дефектів: пористості, мікротріщин, включень, карбідів, силіцидів, нітридів тощо;
- кореляцію між мікроструктурою та властивостями матеріалу — мікротвердістю, жаростійкістю, корозійною поведінкою;
- контроль якості обробки, включно з правильністю режимів нагрівання, охолодження та технологічною відповідністю процесу.

У випадку хромосиліціювання сталі 20X13Л металографічний аналіз дозволяє визначити товщину дифузійного шару, наявність силіцидних і карбідних фаз, ступінь проникнення хрому та кремнію у приповерхневу зону, а також встановити рівномірність структури й можливі дефекти покриття.

Металографічний аналіз умовно поділяють на два взаємопов'язані рівні: макроструктурний і мікроструктурний.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Макрорівень передбачає дослідження структури металу неозброєним оком або за допомогою лупи з невеликим збільшенням. Такий аналіз дозволяє виявити:

- сегрегацію елементів;
- порушення суцільності;
- зональність литих виробів;
- значні концентрації включень;
- неоднорідність термічної обробки;
- дефекти лиття або кування.

У контексті хромосиліціювання макроаналіз використовується для первинної оцінки суцільності шару, глибини проникнення дифузантив та наявності тріщин, що могли виникнути під час термічних циклів.

#### Мікроструктурний аналіз

Мікрорівень досліджують за допомогою оптичної металографічної мікроскопії при збільшеннях від 50× до 2000×, а також за допомогою сканувальних електронних мікроскопів (SEM). Мікроструктурний аналіз дозволяє:

- визначити фазовий склад покриття;
- спостерігати окремі карбідні, силіцидні та інтерметалідні включення;
- оцінити перехідні зони й характер їхнього формування;
- виявити мікрорівневі дефекти;
- виміряти товщину дифузійних підшарів та фазових меж.

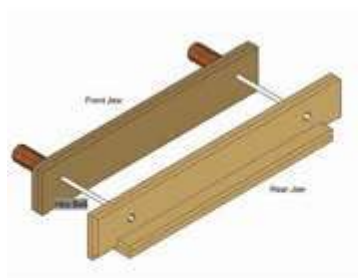
Для сталі 20X13Л, насиченої хромом та кремнієм, мікроскопічні методи є ключовими, оскільки саме вони дають змогу визначити морфологію утворених фаз  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_3Si$ ,  $CrSi_2$  та оцінити їхній вплив на мікротвердість та жаростійкість покриття.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Підготовка мікрошліфів до аналізу.

Однією з найважливіших стадій металографічного дослідження є правильне виготовлення мікрошліфів. Процес включає кілька послідовних операцій.

Вирізання зразків. Відповідну ділянку деталі відокремлюють за допомогою абразивної або електроіскрової різки. Важливо, щоб тепловий вплив під час різання був мінімальним, щоб не спричинити змін структури.



а



б



в

Рисунок 2.5 – Фіксація зразків при металографічному аналізі:

а – струбцина; б – металеве кільце; в – епоксидна смола

Монтування зразка. Крихкі або дрібні фрагменти монтують у полімерні маси – бакеліт, акрил або епоксидні смоли. Це полегшує подальше шліфування.

Шліфування. Виконується ступінчасто:

- грубе шліфування на абразивних шкурках Р180–Р320;
- середнє – Р600–Р800;
- фінішне – Р1200–Р2500.

Шліфування має бути рівномірним, без рисок, які можуть приховувати реальні межі зерен або структуру покриття. Після завершення багатоступеневого шліфування здійснюють процес полірування, метою якого є отримання дзеркально рівної поверхні, придатної для подальшого мікроструктурного аналізу. Цю операцію виконують як вручну, застосовуючи алмазні пасти та

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

щільний папір типу ватман, так і на спеціалізованих полірувальних установках із регульованою швидкістю обертання диска.

Полірування. Полірування здійснюють на тканинних дисках з використанням паст або суспензій з зерном 1–3 мкм і, за потреби, 0,25 мкм. Мета – отримати дзеркальну поверхню без механічних дефектів. У якості полірувального середовища часто використовують суспензію оксиду хрому в дистильованій воді. Отримана зеленувата гомогенна суміш, нанесена на фетровий диск або полірувальну тканину, створює активний абразивний шар, який забезпечує видалення залишків дрібних рисок, зменшення шорсткості та формування якісної площини мікрошліфа.



Рисунок 2.6 – Шліфувально-полірувальний машина

Хімічне травлення. Травлення проводять у спеціальних реактивах, які контрастують мікроструктуру. Для хромистих сталей застосовують:

- реактив Вілла ( $\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{етанол}$ );
- гліцерин-азотнокислі суміші;
- електролітичне травлення при слабкому струмі.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Травлення дає змогу виявити зерна, карбіди, силіциди, межі фаз і мікротріщини.

Для виявлення структурних складових та меж зерен використовували високореакційну травильну суміш типу «царської води» – концентровану комбінацію соляної та азотної кислот у визначених пропорціях. Такий реагент інтенсивно взаємодіє з металевою поверхнею, вибірково розчиняючи окремі фази та забезпечуючи контрастне проявлення мікроструктури.

Процес травлення здійснюють у контрольованих умовах: визначається тривалість експозиції, температуру та ступінь активності реактиву, оскільки надмірне агресивне впливання може призвести до переоздоблення поверхні або руйнування дрібних структурних елементів. Після завершення травлення зразок негайно промивають у проточній воді, нейтралізують залишки реагенту та висушують безконтактним способом, що дозволяє зберегти отриманий мікроструктурний рельєф.

Сучасні металографічні методи включають: оптичну мікроскопію котра дає можливість визначати розмір зерен; морфологію фаз; товщину дифузійних шарів; тип структурної складності сталі після обробки. Оптична мікроскопія добре підходить для контролю якості покриттів після хромосиліціювання.

Сканувальна електронна мікроскопія (SEM) дозволяє отримати високодеталізовані зображення поверхні; інформацію про хімічний склад за допомогою EDS-аналізу; глибинні профілі та локальне розподілення елементів. Для дифузійних покриттів SEM ідеально підходить для встановлення механізму утворення шарів і виявлення зон збагачення Cr і Si.

Дослідження мікроструктури проводили за допомоги металографічного мікроскопа МИМ-7.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.7 – Металографічний мікроскоп МИМ-7

Енергодисперсійна спектроскопія (EDS) застосовується для визначення концентрації насичувальних елементів; аналізу перехідних зон; побудови профілів розподілу елементів. EDS дає можливість кількісно підтвердити наявність силіцидів та карбідів.

Методи кількісної металографії передбачають визначення об'ємної частки фаз; підрахунок кількості включень; встановлення коефіцієнтів однорідності. Кількісна оцінка є необхідною для визначення параметрів, що впливають на зносостійкість покриття.

В умовах даного дослідження металографічний аналіз виконує кілька ключових функцій, а саме: дозволяє визначити товщини дифузійного шару. Метод дозволяє виміряти зовнішню карбідну зону, середню силіцидну область,

внутрішню твердофазну область насичення. Ці параметри визначають робочу жаростійкість та корозійний опір.

Щоб провести визначення складу фаз при хромосиліціюванні, потрібно розуміти, що за цим процесом утворюються складні карбідно-силіцидні структури. Металографія дозволяє виявити такі з них:  $Cr_{23}C_6$ ;  $Cr_7C_3$ ;  $Cr_3Si$ ;  $CrSi_2$ ; зони Cr-Si-Fe твердих розчинів. Кожна з цих фаз має специфічний вплив на твердість і хімічну інертність покриття.

Нерівномірності обробки проявляються у вигляді зміни товщини шару, різних концентрацій елементів, локальної пористості, поверхневих дефектів. Металографія дозволяє своєчасно виявити недоліки технології.

Порівнюючи структури після  $900\text{ }^\circ\text{C} \times 4\text{ год}$  і  $1000\text{ }^\circ\text{C} \times 6\text{ год}$ , можна зробити висновки про найкращі умови формування дифузійного шару.

Сучасне матеріалознавство неможливе без металографічних методів, адже структура матеріалу визначає його властивості. Метод є обов'язковим при розробці нових технологій зміцнення, оптимізації термічної та хіміко-термічної обробки, контролі якості продукції, оцінці довговічності деталей. У системах, де високі температури та агресивні середовища створюють великі екстремальні навантаження (компресорні робочі колеса, турбінні лопатки, клапани тощо), металографія стає ключем до прогнозування ресурсу та запобігання передчасним відмовам. Цей метод є незамінним при дослідженні структури металів та сплавів, що дозволяє глибоко оцінити якість технологічних процесів і визначити закономірності формування фазових складових. Його застосування забезпечує можливість встановлення оптимальних умов хромосиліціювання сталі 20X13Л, оцінювання структурних змін і визначення найбільш ефективних режимів насичення. Завдяки детальному аналізу мікроструктури формуються науково обґрунтовані рекомендації щодо технологічних параметрів хіміко-термічної обробки та прогнозування експлуатаційної поведінки отриманих покриттів.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

## 2.4 ДюрOMETричний аналіз

ДюрOMETричний аналіз є одним із фундаментальних методів експериментального матеріалознавства, що дозволяє кількісно оцінювати твердість металів і сплавів шляхом визначення опору поверхні локальному проникненню індентора. Значення твердості виступає інтегральним параметром, який відображає пружнопластичні властивості матеріалу, ступінь структурного зміцнення та кореляцію з низкою експлуатаційних характеристик, таких як зносостійкість, жароміцність і опір корозії.

Основою дюрOMETричного аналізу є вимірювання глибини або площі відбитка, залишеного наконечником стандартизованої форми (конус, піраміда або кулька) після прикладання навантаження протягом певного часу. Матеріал із вищою твердістю чинить більший опір формуванню інденту, що дозволяє отримати числовий показник, безпосередньо пов'язаний з його деформаційною здатністю та станом поверхневого шару.

Оскільки твердість є локальною характеристикою, її значення значною мірою залежать від фазового складу, розмірів і морфології зерен, рівня дисперсних зміцнювальних фаз, а також від технології попередньої термічної або хіміко-термічної обробки.

Метод Віккерса (HV) – застосовує алмазну піраміду з кутом  $136^\circ$ . Це найточніша методика, що використовується для оцінки тонких зміцнених зон і дифузійних шарів. Вимірювання мікротвердості (HV0.05, HV0.1) – дозволяє встановлювати градієнт властивостей у дифузійних покриттях товщиною 10–200 мкм і є основним методом для аналізу результатів хромосиліціювання.

У зразках зі сталі 20X13Л після хромосиліціювання типовими є значення мікротвердості 18–20 ГПа на поверхні, зі зниженням до 4–5 ГПа у перехідній зоні, що підтверджує формування градієнтного зміцнення й насичення поверхні активними елементами.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Метод характеризується рядом переваг: простота апаратурного забезпечення, висока точність при оцінюванні твердості дифузійних покриттів, можливість створення графічних профілів зміцнення, чутливість до структурних перетворень, тісний зв'язок із механічними та триботехнічними властивостями.

Для дифузійних шарів, отриманих методом хромосиліціювання, дюрOMETричний аналіз є ключовим, адже дозволяє визначити: концентрацію легувальних елементів у поверхневій зоні через їхній вплив на мікротвердість, ступінь формування карбідів та силіцидів хрому, наявність зон можливого окрихчення або перегріву, однорідність структури та глибину дифузійного прошарку.



Рисунок 2.8 – Мікротвердомір ПМТ-3 (фото)

Вимірювання мікротвердості проводили вздовж перерізу – від зовнішньої поверхні дифузійного шару до металевої основи відповідно до вимог ДСТУ ISO 6507-1:2007. Під час визначення твердості методом інденціювання

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

використовували навантаження 50 та 100 г, вибір яких здійснювали з урахуванням передбачуваних розмірів ромбічного відбитка на поверхні мікрошліфа.

Оцінювання мікротвердості захисних дифузійних шарів виконували на приладі ПМТ-3 (рис. 2.8) у не менш ніж 10–15 різних полях зору, що забезпечувало достовірність отриманих значень. Як індентор застосовували алмазну піраміду з чотирма гранями, яка забезпечує високу точність формування відбитків та дозволяє проводити вимірювання в тонких поверхневих шарах.

Середнє значення мікротвердості визначали за формулою:

$$H_{\mu}^i = \frac{1.854 \cdot P}{d^2}, \text{ кгс/мм}^2 \quad (2.1)$$

де  $P$  – навантаження в грамах;  $d$  – діагональ відбитку в мікрометрах.

Тоді:

$$H_{\mu}^i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} H_{\mu}^i, \text{ кгс/мм}^2 \quad (2.2)$$

Середня похибка вимірювання мікротвердості:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} H_{\mu}^{Cp} - H_{\mu}^i}, \quad (2.3)$$

де  $n$  – кількість вимірювань;  $H_{\mu}^i$  – результати окремих вимірювань;

$H_{\mu}^{Cp}$  – середнє значення всіх вимірювань, за формулою 2.2.

Товщину хромосиліційованого шару визначали за розміром світлої, нетравленої ділянки на мікрошліфі. Перехідну область встановлювали як інтервал, у межах якого значення мікротвердості помітно відхиляється від характеристик основного металу, тобто від твердості вихідної матриці сплаву.

## 2.5. Визначення мікропористості

Капілярну (проникну) мікропористість хромосиліційованих шарів визначали за процедурою, суть якої полягає в такому: попередньо очищені

					<i>KPMMTBA25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

етиловим спиртом зразки щільно притискали до фільтрувального паперу, змоченого у спеціальному хімічному розчині. У ході випробування застосовували підготовлений реагент заданого складу (табл. 2.5). Дослідний розчин рівномірно наносили на поверхню покриття та витримували протягом 10 хвилин, після чого оцінювали характер проникнення і прояви пористості.

Таблиця 2.5 – Вміст реактиву при випробуваннях на капілярну пористість

№ п/п	Склад реактиву (компоненти)	Вміст компоненту, мг/л
1	Хлористий натрій	60
2	Червона кров'яна сіль	10
3	Хлористий літій	60
4	Дистильована вода	1,0 л

Рівень мікропористості визначали за числом зафіксованих пор на площі 1,0 см<sup>2</sup> поверхні отриманого покриття. Проведення макроскопічного аналізу дає змогу виявити капілярні пори, встановити їх просторове розташування та оцінити характер розподілу дефектів на поверхні сталі 20Х13Л після процесу хромосиліціювання.

## 2.6. Визначення жаростійкості

У межах даного дослідження випробування жаростійкості виконували згідно з вимогами ISO 11130:2017 Corrosion of metals and alloys – Alternate immersion test in salt solution [10], використовуючи ваговий метод, заснований на фіксації приросту маси зразків під час окиснення. Перед початком експерименту здійснили стандартну підготовку поверхні: окремо підготували контрольні зразки сталі 20Х13Л у вихідному стані та матеріал після хромосиліціювання. Усі зразки ретельно знежирили та провели первинне зважування на аналітичних вагах Radwag ХА 220.4 Y (рис. 2.9), що забезпечують високу точність вимірювань.

Ключовою умовою коректного проведення випробувань є забезпечення такого газового середовища в робочому просторі печі, хімічний склад якого

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

максимально наближений до умов реальної експлуатації матеріалу. Під час визначення жаростійкості ваговим методом, що базується на фіксації приросту маси внаслідок окиснення, використовують спеціальні керамічні тиглі. Такі тиглі дозволяють вільно проникати реакційному газу до поверхні зразка і утримують продукти окиснення, запобігаючи їх втраті під час випробування.



Рисунок 2.9 – Аналітичні ваги Radwag XA 220.4 Y (фото)

Перед початком досліду тиглі попередньо прожарюють до сталої маси. Після зважування дослідного матеріалу можна визначити різницю у прирості маси між вихідними зразками та зразками, обробленими хромосиліціюванням. Усі зразки сталі 20X13Л проходили однакову попередню підготовку.

Для коректної оцінки жаростійкості було визначено ефективну площу поверхні, що бере участь в окисненні. Вимірювання геометричних параметрів здійснювали з точністю  $\pm 0,1$  мм, після чого розраховували повну площу відповідно до формули (2.4):

$$S_{\text{заг}} = 2S_{\text{осн}} + S_{\text{бічпов}} = 2 \cdot \pi \cdot R^2 + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H, \quad (2.4)$$

де  $S_{\text{заг}}$  – загальна площа циліндричного зразка;

$S_{\text{осн}}$  – площа основи зразка, коло;  $S_{\text{бічпов}}$  – площа бічної поверхні циліндричного зразка.

Загальна площа зразка без обробки становить:

					<i>KPMMTBA25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

$$S_{\text{очн}} = 226,08 + 753,6 = 979,68 \text{ мм}^2 = 0,00097968 \text{ м}^2$$

Загальна площа зразка після хромосиліціювання становить:

$$S_{\text{очн}} = 189,97 + 621,72 = 811,69 \text{ мм}^2 = 0,00081169 \text{ м}^2$$

Перед проведенням випробувань поверхню зразків очищали шляхом знежирення етиловим спиртом, після чого їх ретельно висушували. Подальше зважування виконували з точністю не гірше  $\pm 0,1$  мг. Отримані масові показники наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Вага зразків до випробування на жаростійкість

№ зразка	Температура випробувань, °С	Вага зразка без обробки/ після ХТО, г	Розміри зразка		
			Діаметр d, мм	Діаметр D, мм	Загальна площа поверхні зразка, м <sup>2</sup>
1*	800	19,45565	12,0	20,0	0,00097968
1		20,04060	11,0	18,0	0,00081169
2*	900	19,45565	12,0	20,0	0,00097968
2		20,04060	11,0	18,0	0,00081169
3*	1000	19,45565	12,0	20,0	0,00097968
3		20,04060	11,0	18,0	0,00081169

\* – зразки сталі 20Х13Л після хромосиліціювання за другим режимом

Шість зразків, три із яких піддавали ХТО, після попередньої підготовки завантажують в піч. Допускається завантаження зразків в холодну піч. Початком випробування вважають момент досягнення в робочій зоні печі заданої температури (таблиця 2.4). Кінцем випробування вважають момент вимкнення печі або вивантаження зразків після закінчення часу випробування. При випробуваннях тривалістю не більше 100 год. зразки завантажують в піч, що має задану температуру. Кінцем випробування вважається момент вивантаження зразків з гарячої печі. Випробування на жаростійкість проводяться з періодичним охолодженням зразків разом з піччю або на спокійному повітрі. Цикли охолодження вибираються в залежності від призначення досліджуваного

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

металу. Температуру випробувань встановлюють залежно від умов експлуатації досліджуваного матеріалу. Аналіз літературних джерел дає інформацію про те, що саме хромосиліціювання дозволяє підвищувати стійкість до окислення за високих температур. В нашому випадку ми застосовуємо три різні температури: 800, 900, 1000 °С. Час випробування приймаємо 100 годин. Визначення збільшення маси зразка визначають за різницею результатів зважування зразків у тиглях до випробування і після охолодження. Для визначення коефіцієнта С випробовують не менше трьох зразків. При цьому в процесі випробування фіксують збільшення маси зразка, а зменшення його маси визначають відповідно до вимог ДСТУ.

## 2.7. Висновки до розділу

У роботі здійснено всебічний аналіз експлуатаційних переваг і технологічних обмежень сталей 20Х13Л, 12Х18Н9ТЛ та 12Х18Н12М3ТЛ як матеріалів для виготовлення робочих коліс відцентрових компресорів. На основі узагальнених даних рекомендовано застосування корозійностійкої сталі 20Х13Л, яка забезпечує оптимальне поєднання міцності, жаростійкості та стабільності структури в умовах змінних навантажень.

Запропоновано сучасний метод підвищення поверхневої твердості та термостійкості цієї сталі — хромосиліціювання. На основі літературних джерел визначено раціональний склад порошкової насичувальної суміші, що містить 2–5 % кристалічного кремнію, 50–54 % порошкового хрому, 42 % оксиду алюмінію та 2 % хлориду амонію, що забезпечує інтенсивне дифузійне насичення та формування жаростійких фаз.

Розглянуто два режими одночасного введення хрому й кремнію:

- режим 1 – 900 °С, ізотермічна витримка 4 год.;
- режим 2 – 1000 °С, витримка 6 год., що є традиційним технологічним варіантом.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

На першому етапі експерименту проведено металографічний аналіз структури сталі 20Х13Л після хромосиліціювання з використанням мікроскопа МИМ-7. Другий етап передбачає визначення мікротвердості та товщини дифузійного шару методом інденціювання на приладі ПМТ-3. Третій етап охоплює оцінювання мікропористості сформованого покриття та встановлення характеру дефектності захисного шару.

Фінальним етапом дослідження є визначення жаростійкості сталі 20Х13Л після хромосиліціювання при температурах 800, 900 та 1000 °С ваговим методом за приростом маси зразків на високоточних аналітичних вагах Radwag ХА 220.4 У.

Комплексна оцінка отриманих експлуатаційних характеристик дозволить обґрунтовано рекомендувати хромосиліціювання як перспективний метод хіміко-термічної обробки для підвищення довговічності сталевих деталей у високотемпературних і агресивних умовах експлуатації.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Підсумкові результати мікроструктурного аналізу та дюрOMETРИЧНИХ випробувань

Експериментальне дослідження, що включало хіміко-термічну обробку методом хромосиліціювання – одночасного твердофазного дифузійного насичення поверхні хромом і кремнієм – проводили на спеціально виготовлених зразках зі сталі 20Х13Л. Перед початком процесу кожен зразок піддавали ретельній механічній підготовці: поверхню очищали від окалини, корозійних нашарувань та забруднень на заточному і шліфувальному обладнанні, після чого промивали у проточній воді та знежирювали органічним розчинником. Наявність будь-яких залишкових забруднень, жирових плівок або локальних дефектів типу піттингів може спричинити нерівномірне насичення, формування покриття змінної товщини та зниження адгезії дифузійного шару до металевої основи. Тому якісна підготовка поверхні є ключовою умовою формування однорідного зміцнювального шару.

Однорідність дифузійного шару визначається також умовами доступу насичувального середовища до поверхні виробу, що напряму залежить від обраної технологічної схеми пакування та способу введення активної суміші.

Після проведення хромосиліціювання за двома досліджуваними режимами (нагрівання до встановленої температури, ізотермічна витримка та охолодження разом із піччю) зразки вилучали з контейнерів, промивали водою та очищали від залишків порошкової суміші. Первинний візуальний огляд показав формування рівномірного сріблястого блиску без видимих дефектів, раковин чи зон локального перегріву. Подальше металографічне дослідження поперечних мікрошліфів дозволило визначити структурні особливості дифузійного шару, його мікротвердість і товщину.

За результатами аналізу мікрошліфа, отриманого після першого режиму обробки ( $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 4\text{ год}$ ), встановлено, що дифузійні процеси насичення

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

розвинулись недостатньо інтенсивно. На мікроструктурних зображеннях (рис. 3.1) видно, що сформований шар нерівномірний і має малу товщину, яка змінюється в межах 25–40 мкм. Підтвердженням слабкого насичення є і значення мікротвердості, наведені в таблиці 3.1: показники по глибині знаходяться у діапазоні 0,7–10,2 ГПа, що є суттєво нижчим від очікуваних для повноцінних хромосиліційованих покриттів.

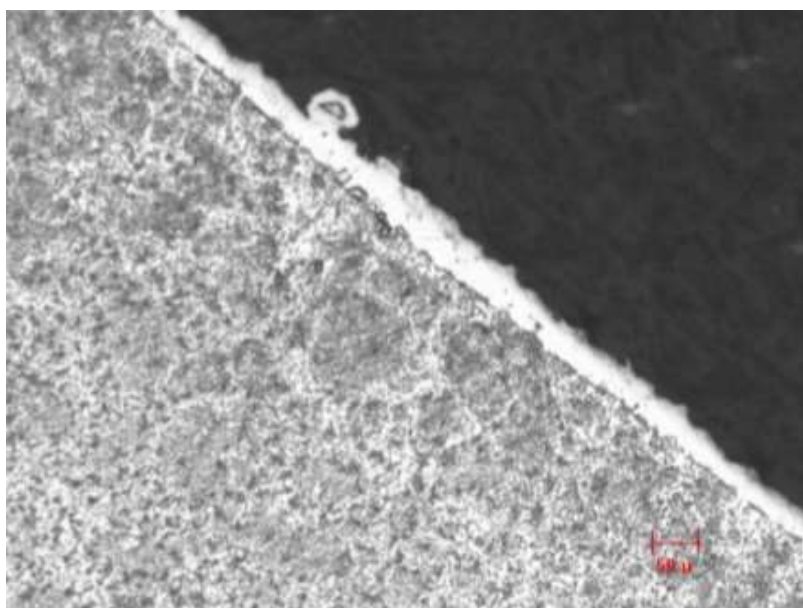


Рисунок 3.1 – Мікроструктура сталі 20X13Л після хромосиліціювання за режимом №1 ( $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 4$  год)

Таблиця 3.1 – Мікротвердість хромосиліційованого шару, отриманого на сталі 20X13Л при реалізації першого режиму ( $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 4$  години)

№ відбитка	Відстань від поверхні, мкм	Мікротвердість, ГПа
1	20	10,15
2	25	9,28
3	30	7,44
4	35	3,72
5	40	5,01
6	45	1,98
7	50	3,37
8	55	2,69
9	60	2,41

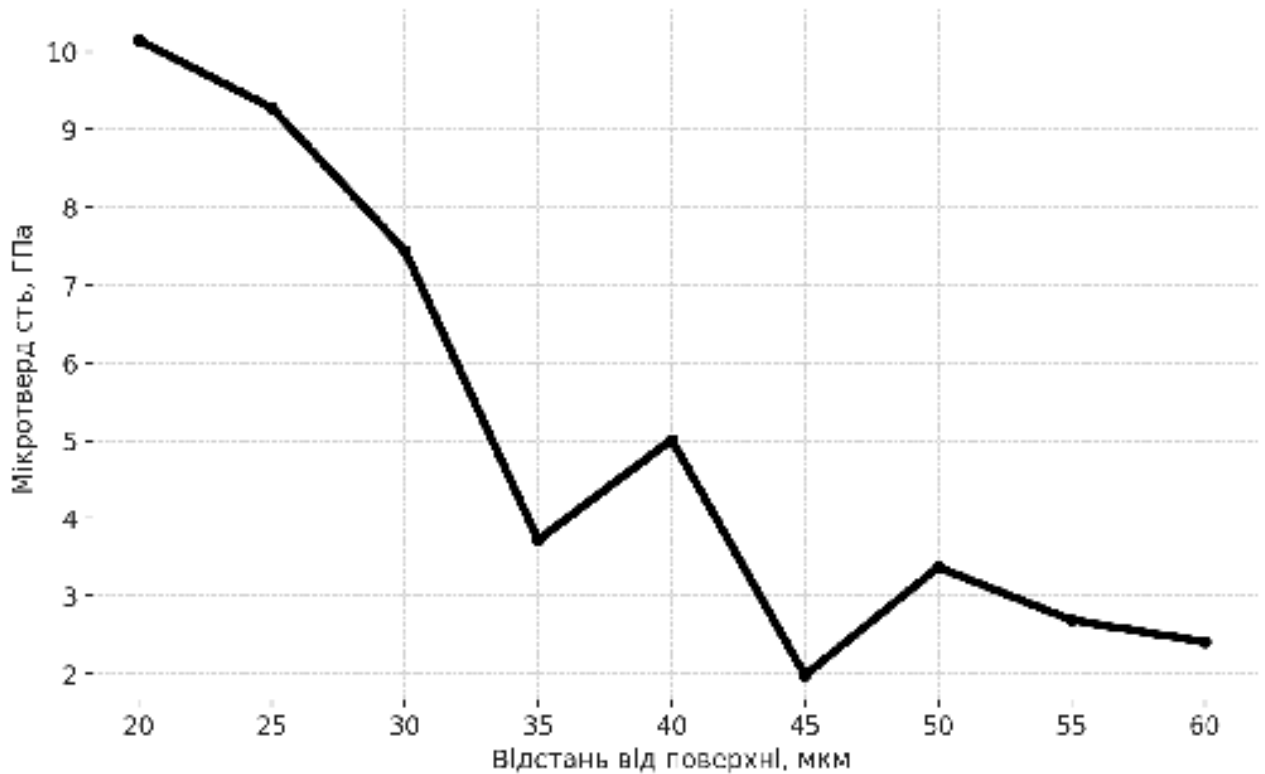


Рисунок 3.2 – Розподіл мікротвердості по глибині покриття у сталі 20X13Л після хромосиліціювання за режимом №1 ( $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 4$  год)

Такі характеристики свідчать про неповноту проходження дифузійних реакцій при зазначених температурно-часових умовах. Отриманий шар не здатний забезпечити достатній бар'єр проти окиснення, абразивного впливу та дії агресивних середовищ, а отже не гарантує довготривалого захисту поверхні деталі та може призвести до прискореного руйнування під час експлуатації.

Мікроструктурне дослідження зразків сталі 20X13Л після хромосиліціювання за режимом №2 ( $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 6$  год) свідчить про формування значно одноріднішого й безперервного дифузійного шару. Отримане покриття має стабільну будову та демонструє товщину 60–110 мкм (рис. 3.3). Вимірювання мікротвердості показали, що значення твердості знаходяться в діапазоні 15,94–10,65 ГПа, що підтверджено результатами, наведеними в таблиці 3.2.

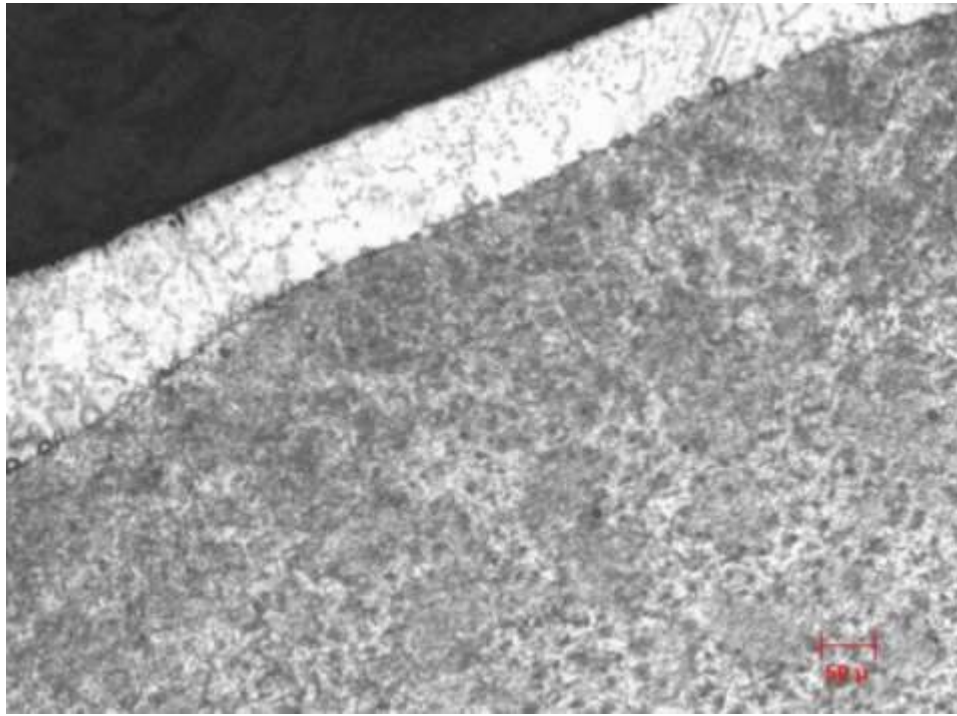


Рисунок 3.3 – Мікроструктура сталі 20Х13Л після хромосиліціювання за режимом №2 ( $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 6$  год)

Таблиця 3.2 – Мікротвердість хромосиліційованого шару, отриманого на сталі 20Х13Л при реалізації другого режиму ( $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 6$  годин)

№ відбитка	Відстань від поверхні, мкм	Мікротвердість, ГПа
1	20	15,94
2	30	12,23
3	40	9,86
4	50	10,65
5	70	7,76
6	75	9,28
7	80	8,82
8	90	6,61
9	100	7,03
10	120	3,51
11	140	2,27
12	160	2,18
13	180	2,58
14	200	2,46

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРММТВА25.24359.000 ПЗ

Арк.

51

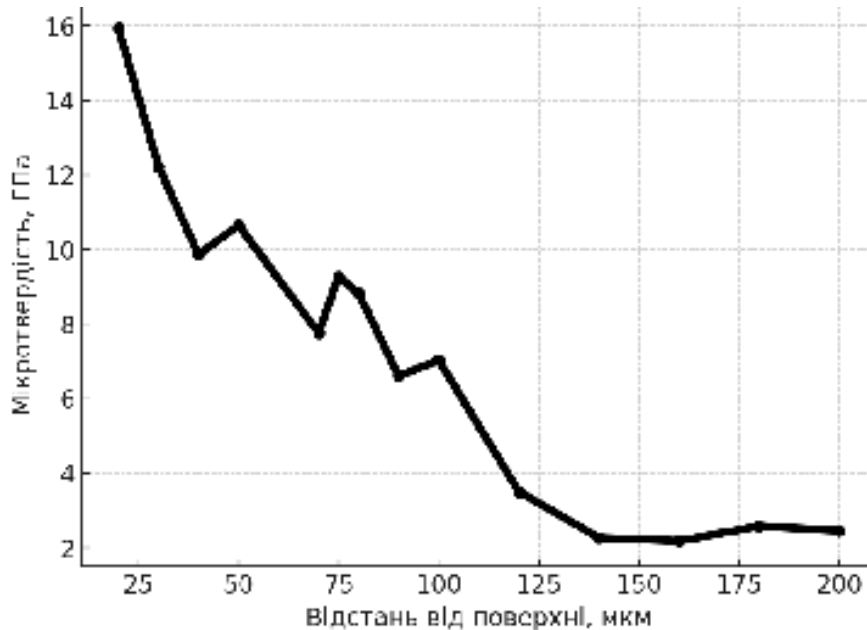


Рисунок 3.4 – Розподіл мікротвердості по глибині покриття у сталі 20X13Л після хромосиліціювання за режимом №2 ( $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 6\text{ год}$ )

Аналіз отриманих результатів свідчить, що температура насичення та тривалість ізотермічної витримки істотно впливають на формування дифузійного шару. Зростання цих параметрів зумовлює не лише збільшення товщини зміцненого покриття, але й підвищення його мікротвердості. Це пов'язано з тим, що сформований шар являє собою впорядкований твердий розчин типу  $(\text{Fe,Cr})_2\text{Si}$ , у якому зі збільшенням температури приблизно на  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  та подовженням витримки на дві години зростає концентрація хрому й кремнію в залізній матриці. Посилене насичення поверхні легувальними елементами забезпечує інтенсивніше укріплення приповерхневих зон і стабільнішу структуру покриття.

Вибір раціонального складу та потрібної товщини захисного шару має ґрунтуватися на комплексному урахуванні всіх взаємопов'язаних факторів: хімічної природи матеріалу основи, кінетики фазоутворення, умов проведення хіміко-термічної обробки та специфіки майбутнього експлуатаційного середовища [11]. Тільки врахування сукупності цих чинників дозволяє забезпечити довготривалу працездатність і надійність виробу.

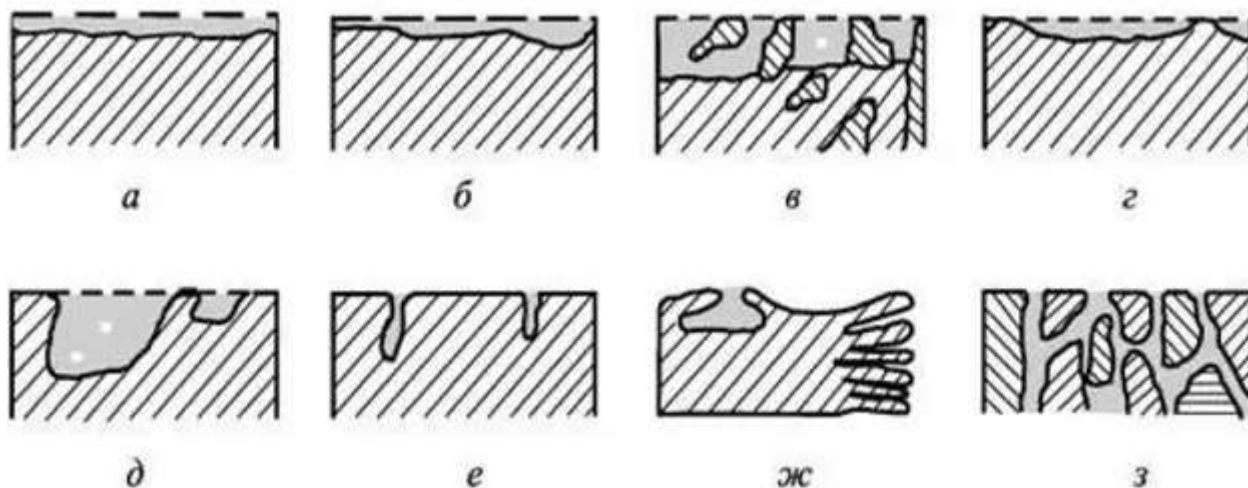


Рисунок 3.5 – Види корозії: *a* – суцільна рівномірна; *б* – суцільна нерівномірна; *в* – структурно-вибіркова; *г* – плямиста; *д* – виразкова; *е* – точкова (піттингова); *ж* – підповерхнева; *з* – міжкристалітна

Невід’ємною передумовою ефективного функціонування будь-якого типу захисного шару є надійне зчеплення з основою та повна відсутність наскрізних дефектів. Якщо корозійний осередок виникає у ділянці мікропори чи подряпини, але покриття міцно прив’язане до матриці, руйнування зазвичай залишається локалізованим у межах невеликої ділянки (рис. 3.5, а). За умов ослабленої адгезії процес окиснення супроводжується поступовим відшаровуванням плівки по периферії ураження, через що зона контакту металу з агресивним середовищем безперервно поширюється (рис. 3.5, в). Характер прилипання визначається двома складовими – специфічною, що залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалів, та механічною, пов’язаною зі станом поверхні під час нанесення покриття.

Недостатня адгезія у поєднанні з системою наскрізних пор істотно прискорює протікання електрохімічних процесів, особливо коли основний метал є хімічно активнішим за сформований шар. Із зростанням товщини дифузійного шару кількість дефектів, які досягають поверхні основи, зменшується, і при певному значенні плівка може вважатися практично непористою. Водночас відомо, що надмірне збільшення товщини супроводжується виникненням

внутрішніх напружень, що знижують міцність зчеплення, особливо у випадках, коли деталі працюють під дією складних механічних або теплових навантажень. Тому товщина шару не може бути єдиним критерієм довговічності, і для окремих умов доцільно застосовувати багат шарові комбіновані системи [11].

Початкова стадія формування покриття пов'язана з утворенням твердого розчину. Зі збільшенням тривалості витримки у дифузійній зоні з'являються вкраплення надлишкових фаз, що з часом можуть трансформуватися у безперервний шар. Зростання концентрації надлишкових фаз інтенсифікується при продовженні насичення.

На поверхні хромосиліційованого шару формується впорядкований твердий розчин  $Fe_3Si$ , легований хромом, із мікротвердістю 7,1–8,5 ГПа; у структурі фіксуються виділення фази  $Cr_3Si$ , що виникають під час повільного охолодження. Під цим шаром розташована область твердого розчину хрому та кремнію в  $\alpha$ -залізі з мікротвердістю 2,7–3,5 ГПа. Далі формується зона твердих розчинів і карбідів  $Cr_3C_2$ ,  $(Cr,Fe)_{23}(C,Si)_6$  та  $(Cr,Fe)_7C_3$ , мікротвердість яких досягає 13,0–16,5 ГПа. Біля поверхні концентрація хрому сягає 62,4 %, а кремнію – близько 4,0 %. Основу мікроструктури становить перліт із твердістю 1,9–2,9 ГПа, за яким розташована слабовуглецьована зона, що межує з серцевиною матеріалу.

Аналіз фазових діаграм (рис. 3.7–3.9) підтверджує, що сформовані в дифузійному шарі фази мають складну природу та належать до важковідтворюваних систем. Їх поява свідчить про інтенсивний перебіг багатостадійних хімічних реакцій, характерних для процесу хромосиліціювання, де одночасно реалізуються дифузійні, твердофазні та міжметалідні перетворення.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

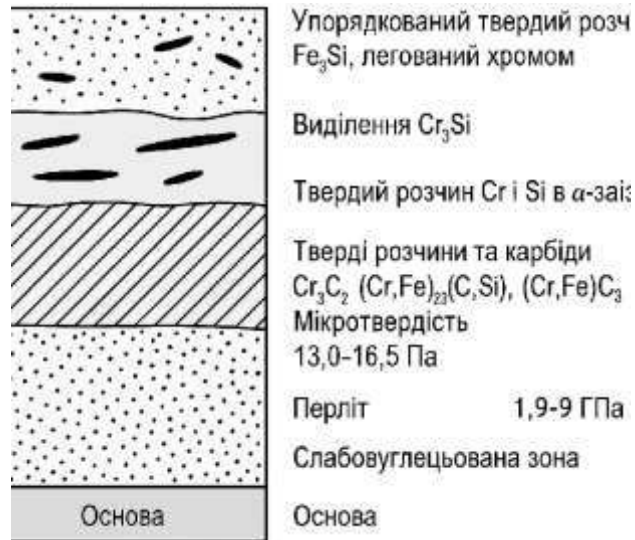


Рисунок 3.6 – Шар дифузійного покриття

Структура сформованого шару визначається умовами насичення, тривалістю витримки, температурою, а також початковим складом сплаву – зокрема вмістом вуглецю та супутніх легувальних елементів. Змінюючи ці параметри, хромосиліціювання забезпечує можливість формувати покриття з різною морфологією, фазовою конфігурацією та співвідношенням хрому й кремнію.

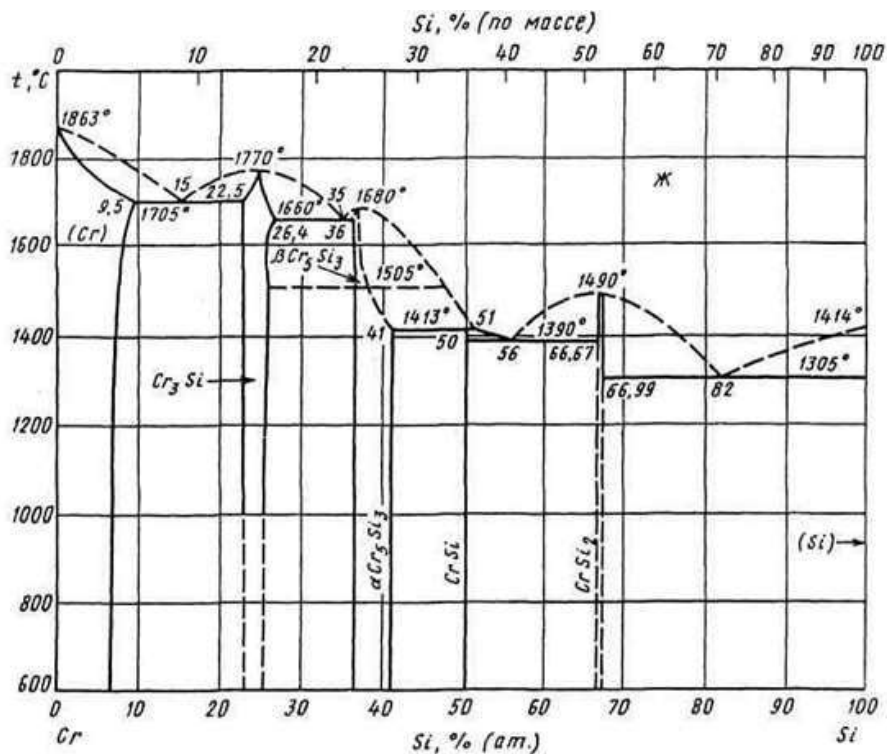


Рисунок 3.7 – Діаграма стану хром-кремній

Такі шари демонструють широкий діапазон фізико-хімічних властивостей: різну мікротвердість, жаростійкість, опір окисненню та здатність протистояти корозійним середовищам, що відкриває можливість оптимізації складу для конкретних умов експлуатації.

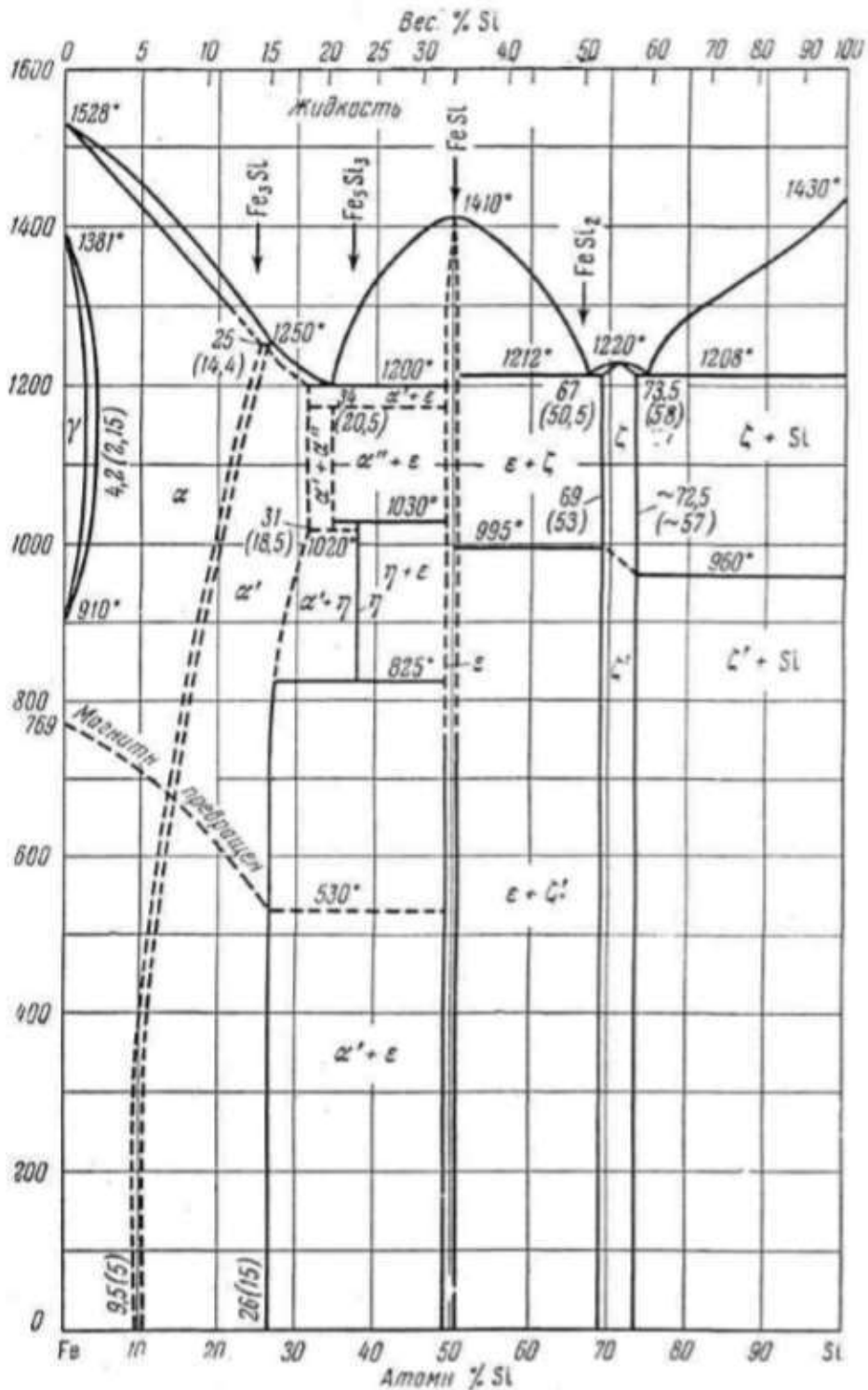


Рисунок 3.8 – Діаграма стану залізо-кремній

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРММТВА25.24359.000 ПЗ

Арк.

56

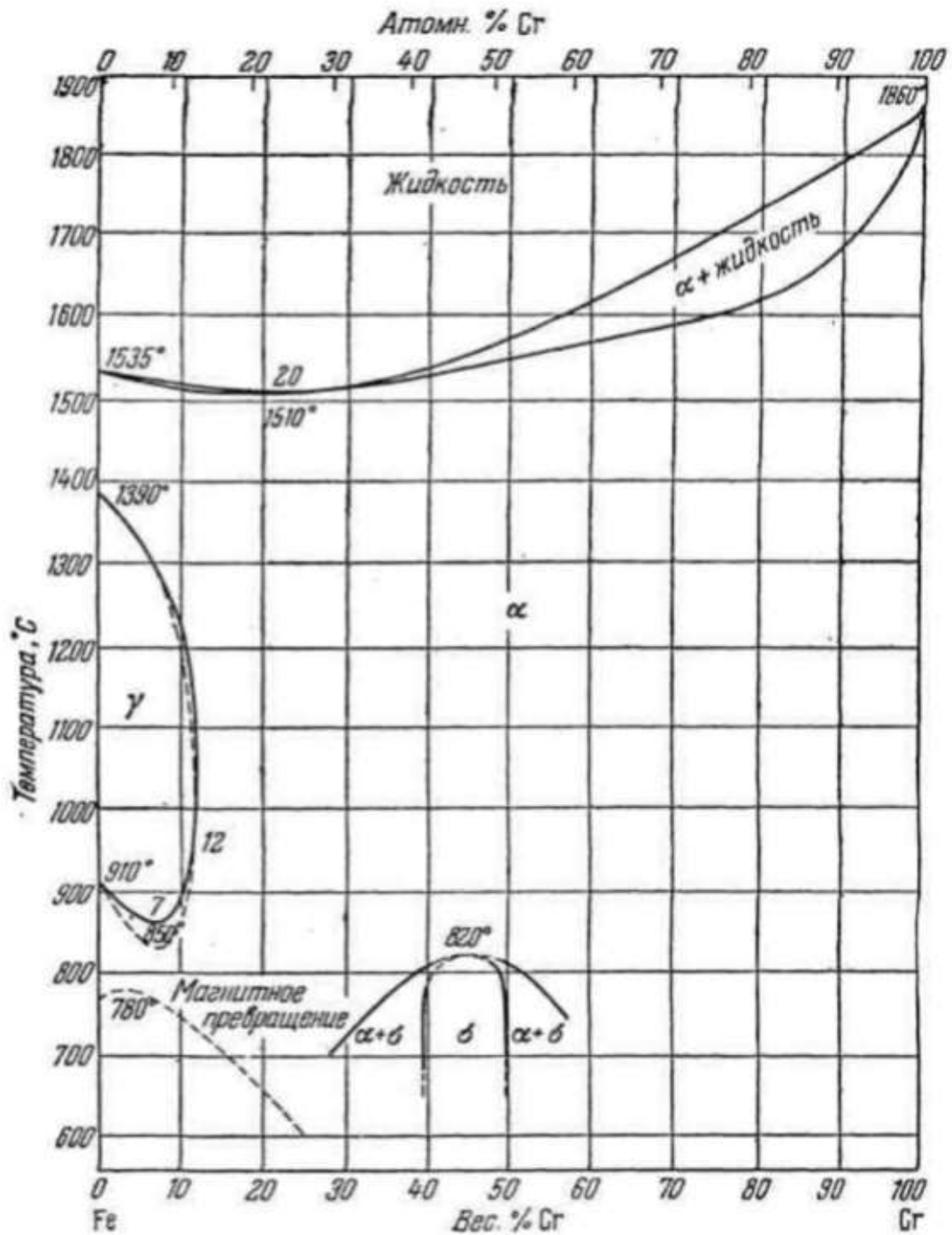


Рисунок 3.9 – Діаграма стану залізо-хром

### 3.2 Визначення мікропористості

Результати дослідження мікропористої структури показують, що експлуатаційні властивості зміцнювальних шарів значною мірою визначаються їх цілісністю та відсутністю дефектів. У численних публікаціях, присвячених

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ролі пор у формуванні довговічності та надійності поверхневих шарів, підкреслюється, що саме мікропорожнини слугують початковими зонами зародження руйнування. Їхнє виникнення призводить до помітного зниження жаростійкості, опору корозійним середовищам та стійкості до кавітаційного впливу, оскільки розвиток деградаційних процесів відбувається насамперед у ділянках, де спостерігається найбільше скупчення таких дефектів. Експериментальні дані свідчать, що перехід від бездефектних шарів до матеріалу з пористістю лише близько 5% спричиняє двократне падіння міцності карбіду титану при згині, що демонструє інтенсивне стимулювання крихкого руйнування під дією механічного навантаження.

У доступних джерелах кількість інформації щодо пористості покриттів на базі елементів, що утворюють карбіди, залишається обмеженою. За результатами порівняння встановлено, що за спаданням пористості карбідні шари, отримані на вуглецевих сталях, формують послідовність: NbC → VC → TiC → ZrC → Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Аналіз розрахункових даних показав важливу закономірність: зі збільшенням твердості та схильності покриття до крихкого руйнування небезпека появи пор різко зростає. Підкреслено, що такі дефекти мають дифузійне походження. У процесі термодифузійного насичення в приповерхневій зоні утворюються надлишкові вакансії, а їх концентраційні градієнти та подальше стікання в локалізовані області спричиняють формування мікропор.

Покриття, одержане нами на ливарній сталі 20X13Л унаслідок хромосиліціювання, характеризується високою щільністю, значною мікротвердістю та рівномірністю структури. Доведено, що хром, присутній у хімічному складі основи, частково переходить у зміцнений шар, впливаючи на кінетику дифузійних перетворень. Існують відомості, що підвищений рівень легування основного металу сприяє помітному зменшенню мікропористості сформованого шару. Аналіз експериментальних даних установив, що найбільша кількість мікропор спостерігається у покриттів, отриманих за режимом №1 (табл.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3), тоді як за режимом №2 пористість істотно менша, що дозволяє розмістити їх у відповідний спадний ряд.

Таблиця 3.3 – Мікропористість покриттів на сталі 20Х13Л після хромосицілювання

№ режиму хромосицілювання	Параметри хромосицілювання	Пористість, см <sup>2</sup>
1	Температура 900 °С Час ізотермічної витримки 4 год.	0,008
2	Температура 1000 °С Час ізотермічної витримки 6 год.	0,003

Пористість шару, сформованого на сталі 20Х13Л після комплексного хіміко-термічного насичення, суттєво нижча порівняно з покриттям, отриманим у результаті однокомпонентного процесу [16]. Така різниця пояснюється меншою здатністю заліза та інших елементів матриці розчинятися у зміцненому шарі. Аналіз отриманих даних свідчить, що застосування режиму хромосицілювання №2 забезпечує формування покриття, щільність якого перевищує покриття, отримане за режимом №1, приблизно у 2,5–2,7 раза. Іншими словами, підвищення температурних параметрів та збільшення тривалості ізотермічної витримки сприяють утворенню більш однорідного, майже бездефектного шару зі значним зменшенням кількості мікропустот у структурі.

Зменшення мікропористості в умовах зростання температури та часу витримки при різних режимах хромосицілювання можна пов'язати з активізацією дифузійних процесів. Інтенсифікація масоперенесення спричиняє часткове «заліковування» дефектів кристалічної решітки, а також посилення легування шару хромом, що додатково покращує структурну однорідність сформованого покриття.

Варто наголосити, що відсутність пор у захисному шарі має важливий позитивний вплив на його експлуатаційні характеристики, визначаючи довговічність та надійність роботи зміцненої поверхні.

### 3.3 Результати випробувань на жаростійкість

#### 3.3.1 Огляд результатів на сталях 20, 45, У10А

Автори у роботі [17], що є класичною роботою по жаростійкості дифузійних хромосиліцидних шарів на вуглецевих сталях отримали за таких умов результати, що наведені нижче.

Процес нанесення покриття відбувався шляхом газового хромосиліціювання в замкненому реакційному об'ємі за  $t \approx 1323 \text{ K}$  ( $\approx 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\tau = 6 \text{ год}$ ,  $p$  газової фази  $\sim 10^4 \text{ Па}$ . Вихідними реагентами були порошки Cr, Si та  $\text{CCl}_4$ . У результаті була отримана будова шару для сталей 20 та 45 як двозонна структура:

- зовнішня зона  $(10-15) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ : карбіди  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  і  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ;
- внутрішня  $(60-80) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ : твердий розчин Si і Cr в  $\alpha\text{-Fe}$ ;
- загальна товщина покриття на сталі 45  $\sim 120 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

При застосуванні високотемпературного окиснення за параметрам термогравіметрія при нагріванні в повітрі до  $1273 \text{ K}$  протягом 1 год, проводилися ізотермічні випробування при  $623, 823, 923, 1023 \text{ K}$  протягом 1–3 год.

Кінетика окиснення:

- залежності  $\Delta m - \tau$  для зразків з хромосиліцидним покриттям мають параболічний характер на всіх температурах ( $623-1023 \text{ K}$ ), що свідчить про дифузійний механізм росту оксидної плівки;
- графіки в координатах  $\lg K_m - \lg \tau$  ( $K_m$  – масометричний показник корозії) – прямі лінії з коефіцієнтом кореляції  $0,96-0,99$ .

Швидкість окиснення,  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{год}$ , після  $3600 \text{ с}$ :

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- при 623 К: У10А – 3,13; сталь 20 – 2,00; сталь 45 – 1,00;
- при 823 К: У10А – 6,27; сталь 20 – 2,90; сталь 45 – 1,50;
- при 1023 К: У10А – 7,84; сталь 20 – 4,00; сталь 45 – 3,00.

Тобто найнижчу швидкість окиснення мала сталь 45 з хромосиліцидним покриттям.

Механізм жаростійкості: формування на поверхні тонкої щільної плівки  $\text{SiO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ , а також складного оксиду типу  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . Оксид  $\text{SiO}_2$  утворюється переважно на поверхні дифузійного шару і практично відсутній уже на глибині  $\sim 15 \cdot 10^{-6}$  м, тобто виконує роль тонкої бар'єрної плівки. Автори роблять висновок, що хромосиліцидні покриття, отримані газовим методом, зберігають високу жаростійкість до 1273 К.

Це прямий, добре кількісно описаний приклад термогравіметричних випробувань жаростійкості хромосиліцидних дифузійних покриттів (для вуглецевих сталей, але дані по масоприросту,  $K_m$  і характеру оксидної плівки ти можеш екстраполювати/порівняти з 20Х13Л).

3.3.2 Огляд результатів CrSi-покриття на 316 нержавійній сталі (Cr-легована основа)

У роботі [18] автори проводили нанесення покриття використовуючи замкнену установку магнетронного розпилення (PVD). Зразки розміщували як окремі мішені, на котрі наносили Cr і Si. Отримана товщина покриття  $\approx 1,5 \mu\text{m}$ ; вміст Si в покриттях 4,3–9,4 ат.% (серії CS2, CS3, CS4).

Умови випробувань на жаростійкість – окиснення в повітрі при 600, 700 і 800 °С протягом 80 год. Результати отримували шляхом зважування до й після випробувань (чутливість ваг  $10^{-4}$  г). Було виявлено, що:

- для CrSi-покритих зразків масоприріст істотно менший, ніж у «голового» 316;

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- мінімальний приріст маси  $0,04 \text{ mg/cm}^2$  зафіксовано для зразка CS4-06 (Si  $\approx 9,4$  ат.%) при  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- при  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  найкраще поводить ся покриття CS3 (Si  $\sim 7\text{--}8$  ат.%):
  - ✓  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $\Delta m \approx 0,24 \text{ mg/cm}^2$ ;
  - ✓  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $\Delta m \approx 0,33 \text{ mg/cm}^2$ ;
  - ✓ для незахищеної сталі 316 при тих самих режимах масоприріст значно більший, утворюється товстий шар оксидів ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $(\text{FeCr})_3\text{O}_4$ ) і сильне руйнування поверхні.

При проведенні досліджень мікроструктури й фазового складу оксидного шару за допомоги SEM виявлено формування полігональних частинок оксидів, розмір яких зростає з температурою. При дослідженнях XRD отримали підтвердження наявності оксидів Cr та силіцидних оксидів, ферум-оксиди ( $\text{FeO}_x$ ) виявляють лише на незахищеній сталі, а не в зоні CrSi-покриття. Також виявили що при  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  на CrSi-покритих зразках зберігається суцільний захисний шар, тоді як 316 без покриття сильно пошкоджується.

Автори зробили висновки:

- усі CrSi-покриття забезпечують істотне підвищення жаростійкості 316 сталі;
- оптимальний вміст Si  $4\text{--}7$  ат.% (особливо близько  $7\text{--}8$  ат.% для CS3) – дає мінімальний масоприріст і найкращу адгезію півки при  $700\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- надто високий вміст Si ( $\sim 10$  ат.%) робить покриття крихкішим, підсилює дифузю кисню по межах колонок і сприяє відшаровуванню при  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.3.3 Огляд результатів Хром-модифікованих силіцидних покриттів

Китайські дослідники пропонують застосовувати Cr-модифіковане силіцидне покриття для Nb-Ti-Si-сплавів [19]. Їх покриття на основі сплаву Nb-

					<i>KPMMTBA25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ti-Si-Cr-Al-Hf після ізотермічного окиснення при 1250 °С протягом 100 годин отримало приріст маси у 2,5–4,5 мг/см<sup>2</sup>, що характеризує дуже високу жаростійкість. Хоча це не сталь, патент добре демонструє роль Cr-модифікації силіцидного шару в зниженні швидкості окиснення при надвисоких температурах.

### 3.3.4 Огляд результатів властивостей сталі 20X13Л

Після проведення процесу хромосиліціювання провели оцінювання її жаростійкості. Аналіз наукових даних щодо впливу легувальних елементів на газову корозію дає змогу стверджувати, що підвищення термічної стійкості сталей забезпечується введенням до їх складу хрому, кремнію та алюмінію. Встановлено, що збільшення концентрації цих елементів у матриці сприяє формуванню більш стабільних оксидних фаз, які уповільнюють окисні процеси за високих температур. У даній роботі значення хрому та кремнію як ключових елементів захисного шару було підтверджено експериментально: саме вони визначають формування бар'єрної плівки, яка утворюється під час хромосиліціювання поверхні сталі 20X13Л.

Після завершення випробувань на опір високотемпературному окисненню тиглі зі зразками обережно вилучали з печі та піддавали зважуванню на аналітичних вагах. Процедура вимірювання повинна проводитися таким чином, щоб забезпечити повне збереження продуктів окиснення, які виникли у процесі експозиції при підвищених температурах і залишилися в тиглях разом зі зразками. Це необхідно для отримання коректних даних щодо зміни маси та оцінки кінетики окислення. Підсумкові результати дослідження наведено в таблиці 3.4 та на рисунку 3.10.

Обробка сталі 20X13Л методом хромосиліціювання за режимом №2 ( $t = 1000$  °С,  $\tau = 6$  год) забезпечує суттєве зростання її жаростійкості, підвищуючи опір високотемпературному окисненню приблизно у 1,6–2,9 раза порівняно з необробленим матеріалом. Найвищий рівень термічної стійкості після

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

проведеної ХТО спостерігається за температури 900 °С. Подальше збільшення температури випробувань до 1000 °С супроводжується певним зниженням опору окиснювальним процесам, що свідчить про наближення температури, за якої захисна плівка починає втрачати стабільність.

Таблиця 3.4 – Результати випробувань сталі 20Х13Л після хромосицілювання

Т, °С	№ п/п	Вага до випробувань, г	Вага після випробувань, г	Збільшення маси, г	Розмір зразка		Σ площа поверхні зразка, м <sup>2</sup>	Збільшення маси до площі зразка, г/м <sup>2</sup>	Збільшення стійкості в раз
					Д, мм	Н, мм			
800	1*	20,0406	20,0850	0,02460	12	20	0,000980	25,11	1,6
	1	19,4556	19,5977	0,03315	11	18	0,000811	40,84	
900	2*	20,0406	20,0755	0,01515	12	20	0,000980	15,46	2,9
	2	19,4556	19,6009	0,03635	11	18	0,000811	44,78	
1000	3*	20,0406	20,1137	0,05330	12	20	0,000980	54,40	2,5
	3	19,4556	19,6770	0,11245	11	18	0,000811	138,54	

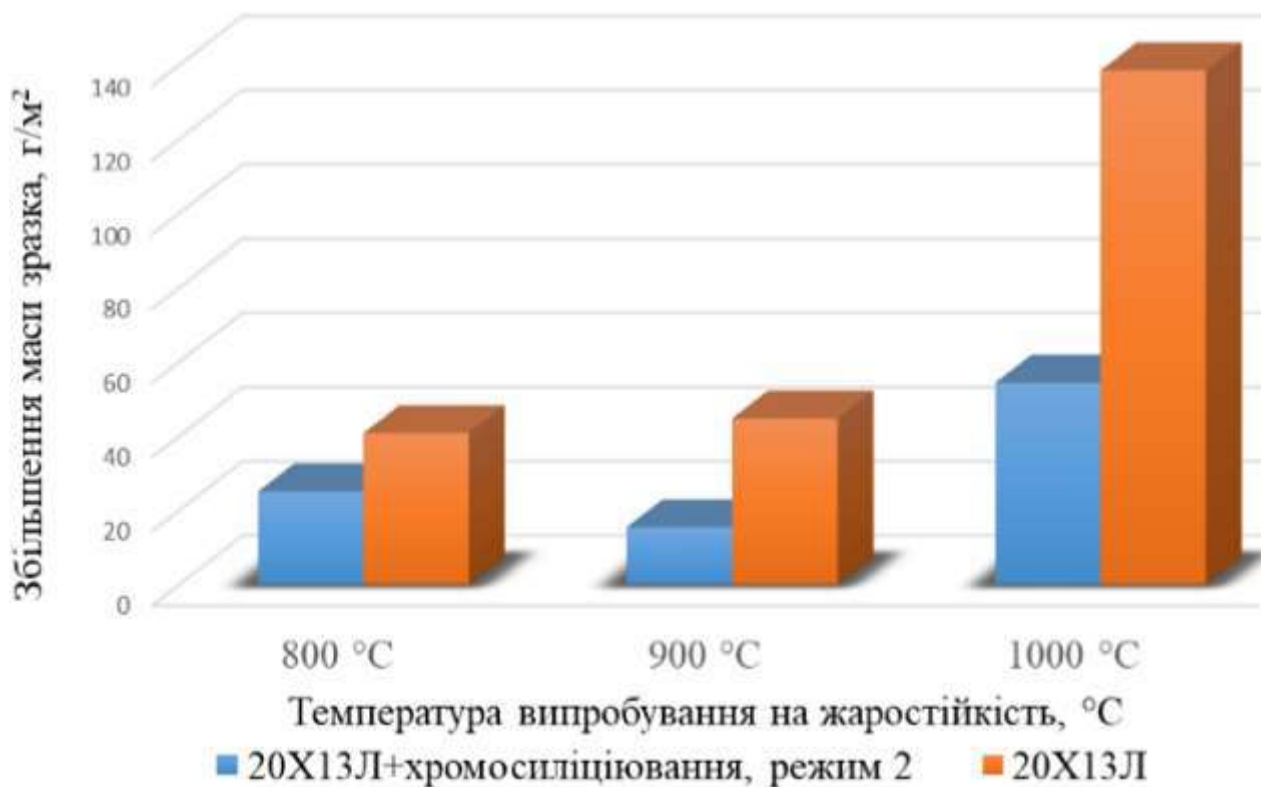


Рисунок 3.10 – Діаграма зміни маси зразків сталі 20Х13Л без термохіміко обробки та з нанесеним захисним шаром після проведення випробувань на жаростійкість.

Підвищена жаростійкість сталі 20Х13Л після хромосиліціювання пояснюється утворенням на поверхні щільного, малопроникного шару оксидів типу  $(Cr,Fe)_2O_3$ , змішаного оксиду  $FeO \cdot Cr_2O_3$  та  $SiO_2$ . Ці фази характеризуються високими бар'єрними властивостями, що ефективно уповільнюють дифузійні процеси й забезпечують довготривалий захист матеріалу в умовах дії підвищених температур.

### 3.4 Верифікація результатів дослідження

Отримані експериментальні дані свідчать, що нанесення хромосиліцидного покриття за режимом №2 забезпечує істотне зниження швидкості високотемпературного окиснення сталі 20Х13Л. За температури 800 °С приріст маси становить 25,11 г/м<sup>2</sup> для зразка з покриттям та 40,84 г/м<sup>2</sup> для необробленої сталі, що відповідає підвищенню жаростійкості у 1,6 раза. За 900 °С ефект захисту проявляється ще інтенсивніше: приріст маси зменшується з 44,78 г/м<sup>2</sup> до 15,46 г/м<sup>2</sup>, тобто жаростійкість збільшена приблизно у 2,9 раза. При 1000 °С зразок з покриттям демонструє приріст маси 54,40 г/м<sup>2</sup>, тоді як без покриття – 138,54 г/м<sup>2</sup>, що еквівалентно підвищенню жаростійкості приблизно у 2,5 раза.

Порівняння з літературними даними підтверджує закономірність, встановлену у наших дослідженнях. Для дифузійних хромосиліцидних шарів на сталях 20 і 45 Погребова І. С. показала параболічний характер окиснення та значне зниження швидкості масоперенесення у діапазоні 623–1023 К, що узгоджується з нашими результатами щодо формування захисної плівки типу  $(Cr,Fe)_2O_3 + SiO_2$ . Аналогічно, у роботі [18] встановлено, що для нержавіючої сталі 316 Cr–Si-покриття при 800 °С забезпечує зменшення приросту маси до 0,33 mg/cm<sup>2</sup>, що більш ніж удвічі нижче за незахищений матеріал. Це підтверджує ефективність хромосиліцидних шарів саме в інтервалі 700–900 °С, який у нашому випадку виявився оптимальним для сталі 20Х13Л.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Отже, результати дослідження узгоджуються з сучасними науковими публікаціями та демонструють, що після хромосиліціювання за режимом №2 на сталі 20X13Л формується високоенергетично стабільна оксидна плівка, здатна знижувати інтенсивність окиснення у 1,6–2,9 раза в діапазоні 800–1000 °С. Максимальна захисна дія спостерігається за температури 900 °С, що пов'язано з оптимальним співвідношенням оксидів хрому та діоксиду кремнію, які забезпечують найменшу проникність оксидного шару.

Таблиця 3.5 – Верифікація результатів досліджень

Температура, °С	Джерело даних	Матеріал / покриття	Приріст маси	Ефективність покриття	Примітка
800	Експеримент (20X13Л)	20X13Л + хромосиліцидне покриття	25,11 г/м <sup>2</sup>	Підвищення жаростійкості у <b>1,6</b> раза	–
	Експеримент (20X13Л)	20X13Л без покриття	40,84 г/м <sup>2</sup>	–	–
	Gurtaran et al., 2023	316SS + Cr–Si coating	0,33 mg/cm <sup>2</sup>	Зменшення масоприросту більш ніж удвічі	Оптимум при ~7–8 ат.% Si
900	Експеримент (20X13Л)	20X13Л + хромосиліцидне покриття	15,46 г/м <sup>2</sup>	Підвищення жаростійкості у <b>2,9</b> раза	Максимальна ефективність
	Експеримент (20X13Л)	20X13Л без покриття	44,78 г/м <sup>2</sup>	–	–
	Погребова, 2011	Сталь 45 + хромосиліцидне покриття	Параболічна кінетика; зниження $K_m$ у 2–3 рази	Підтверджено формування $Cr_2O_3 + SiO_2$	Аналогічна поведінка
1000	Експеримент (20X13Л)	20X13Л + хромосиліцидне покриття	54,40 г/м <sup>2</sup>	Підвищення жаростійкості у <b>2,5</b> раза	Часткове збільшення проникності плівки
	Експеримент (20X13Л)	20X13Л без покриття	138,54 г/м <sup>2</sup>	–	–
	Gurtaran et al., 2023	316SS + Cr–Si coating	Масоприріст зростає, але < незахищеної сталі	Покриття залишається працездатним	Плівка $Cr_2O_3 + SiO_2$ стабільна до 800–900 °С

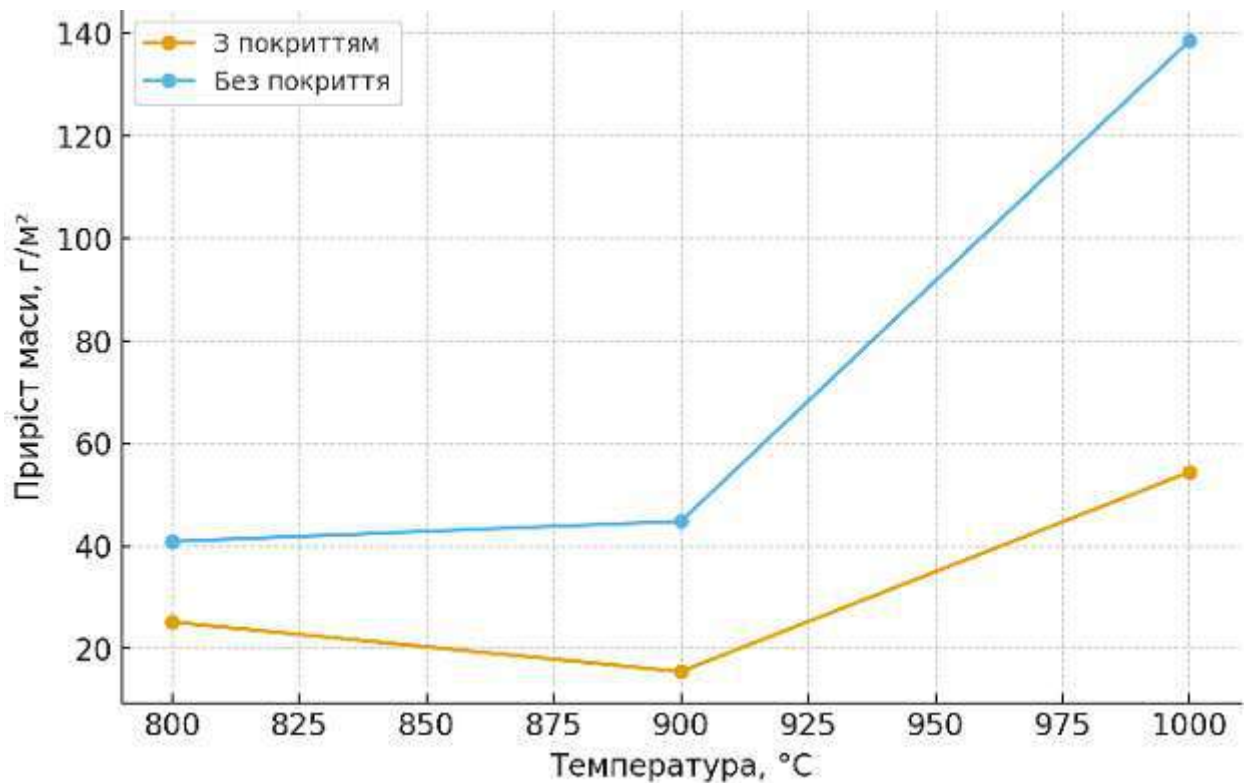


Рисунок 3.11 – Залежність приросту маси від температури для сталі 20X13Л

### 3.5 Висновки до розділу

У ході проведеного експериментального та аналітичного вивчення встановлено, що одночасне насичення сталі 20X13Л хромом і кремнієм забезпечує формування компактного одношарового захисного покриття. Структура утвореного шару представлена карбідами типу  $(Cr,Fe)_{23}C_6$  та  $(Cr,Fe)_7C_3$ , легованими кремнієм, які рівномірно розподіляються по всій товщині модифікованої зони. Зміцнений шар характеризується доброю адгезією і щільним приляганням до металевої основи, що є необхідною умовою для забезпечення стабільних експлуатаційних властивостей.

Найбільш розвинене за товщиною та мікротвердістю покриття формується при проведенні процесу за режимом №2: його товщина досягає 60–110 мкм, а мікротвердість – 15,9 ГПа, що свідчить про інтенсивніше протікання дифузійних процесів за підвищеної температури та тривалішої витримки. Для порівняння,

при застосуванні режиму №1 товщина шару становить лише 25–40 мкм, а поверхнева твердість – 10,2 ГПа, що підтверджує меншу ефективність даного режиму щодо формування зміцнювального шару.

Структурні дослідження показали, що хромосиліціювання сприяє утворенню майже безпористого, суцільного дифузійного шару. Максимальна пористість 0,008 см<sup>2</sup> спостерігається у зразків, оброблених за режимом №1, тоді як режим №2 забезпечує формування практично щільного покриття з пористістю лише 0,003 см<sup>2</sup>. Зменшення кількості дефектів пояснюється інтенсифікацією дифузійних процесів, «заліковуванням» кристалічних вакансій і підвищеним легуванням стикового шару хромом та кремнієм.

Важливою практичною характеристикою отриманих покриттів є їхня жаростійкість. Проведені випробування довели, що хромосиліціювання сталі 20Х13Л за режимом №2 ( $t = 1000$  °С,  $\tau = 6$  год) забезпечує зростання опору високотемпературному окисненню у 1,6–2,9 раза порівняно з необробленим матеріалом. Максимальний захисний ефект проявляється в інтервалі 900 °С, що узгоджується з формуванням щільної оксидної плівки складу  $(Cr,Fe)_2O_3$  і  $SiO_2$ , яка виконує роль бар'єра для дифузії кисню.

Сукупність отриманих результатів підтверджує високу ефективність хромосиліціювання за режимом №2 для підвищення твердості, щільності, структурної однорідності та жаростійкості сталі 20Х13Л. Таким чином, даний режим доцільно рекомендувати як оптимальний для формування функціонально стійких захисних покриттів на відповідальних елементах, що працюють в умовах підвищених температур і дії агресивних газових середовищ.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

## 4. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 4.1 Теоретична частина

Економічна ефективність процесів термічної та хіміко-термічної обробки (ХТО) визначається сукупністю техніко-економічних показників, що характеризують співвідношення між витратами на проведення процесу та отриманими покращеннями властивостей деталей. До ключових факторів, що визначають економічність, належать: енергетичні витрати, вартість робочих середовищ і реагентів, тривалість технологічного циклу, ступінь завантаження обладнання та окупність отриманого приросту ресурсу [20].

Однією з головних переваг термічної і хіміко-термічної обробки є можливість скорочення витрат на виготовлення та експлуатацію деталей за рахунок збільшення їхньої довговічності, зниження частоти ремонтів і заміни, а також зменшення втрат, спричинених простоєм обладнання. Покращення властивостей поверхневих шарів – твердості, жаростійкості, корозійної та зносостійкості – дозволяє багаторазово підвищувати ресурс роботи деталей, що у більшості випадків значно перевищує первинні витрати на проведення ХТО [21].

Економічна доцільність хромосиліціювання, зокрема, полягає в поєднанні високої ефективності зміцнення поверхні з порівняно низькими витратами на реагенти та забезпечення процесу. Контактні порошкові методи характеризуються меншою енергоємністю порівняно з газовими процесами, адже не потребують створення високих тисків або подачі газових потоків. Крім того, порошкові суміші можуть використовуватись повторно частково або повністю, що додатково зменшує собівартість операції.

Збільшення ресурсу деталей, оброблених методом хромосиліціювання (у 1,6–2,9 раза за результатами роботи), безпосередньо впливає на зниження вартості експлуатації машин і механізмів, оскільки зменшується потреба в технічному обслуговуванні, ремонтах та запасних частинах. У випадку серійного

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

виробництва це призводить до суттєвої економії протягом усього життєвого циклу обладнання.

Таким чином, економічність процесів ХТО, і особливо хромосиліціювання, визначається оптимальним балансом між витратами на проведення процесу та технічними перевагами, що проявляються у підвищеній зносостійкості, жаростійкості та тривалому ресурсі роботи деталей. Це робить метод доцільним для використання у виробництві відповідальних елементів, що працюють в умовах інтенсивного термічного навантаження.

Для оцінювання економічної доцільності впровадження процесу хромосиліціювання у виробництво в таблиці 4.1 наведено склад порошкової суміші та її вартісні характеристики. Це дозволяє визначити питомі витрати на формування захисного покриття та порівняти їх з отриманим технічним ефектом.

Таблиця 4.1 – Вартість карбюризаторів

Процес	Склад карбюризатора, %				Вартість 100 кг/ грн.
	Cr	Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> Cl	
Хромосиліціювання	50-54	2-5	40	2	2380

#### 4.2 Розрахункова частина

Для проведення економічного аналізу були використані такі вихідні дані. Об'єктом дослідження є робоче колесо відцентрового компресора з габаритними розмірами Ø616×120 мм. Плановий річний обсяг виробництва становить 5000 штук.

У базовому варіанті виготовлення деталі передбачало застосування високолегованої аустенітної сталі 12Х18Н9ТЛ, до якої після лиття здійснювали традиційну термічну обробку – гартування та відпуск. В альтернативному варіанті дороговартісний матеріал було замінено на сталь 20Х13Л, після чого для підвищення експлуатаційної надійності робочого колеса застосовували зміцнювальну хіміко-термічну обробку методом хромосиліціювання. Доведено,

що після проведення ХТО термін служби таких виробів зростає у 4–5 разів порівняно з аналогічними деталями, які не піддавалися дифузійному насиченню.

Розрахунок енергетичних витрат виконано для печі СШЗ-10.15/12 із встановленою потужністю 156 кВт. Коефіцієнт використання потужності печі прийнято на рівні 0,6, а тариф на електроенергію становить 10 грн/кВт·год.

Для проведення хіміко-термічної обробки застосовується технологічна тара з жаростійкої сталі 15Х25Т вартістю 150 грн/кг. У робочий контейнер одночасно завантажуються 4 деталі. Габарити контейнера становлять Ø730×1250 мм, товщина стінок– 10–15 мм, маса – 150 кг.

Розраховані показники собівартості процесу хромосиліціювання подано в таблиці 4.2, де наведено усі статті витрат, пов'язані з виконанням даної хіміко-термічної операції.

Таблиця 4.2 – Розрахунок собівартості процесу хромосиліціювання

№ п/п	Операція	Вартість, грн.
1	Вартість контейнера для порошкової суміші 150·150	22500
2	Вартість електроенергії. Витрати електроенергії для прогартування порошковою суміші при тривалості процесу 4 години складає $156 \cdot 4 \cdot 0,6 = 374,4$ кВт/год.; $374,4 \cdot 10$ Витрати електроенергії для хромосиліціювання при тривалості процесу 10 годин складає $156 \cdot 10 \cdot 0,6 = 936$ кВт/час. Вартість $936 \cdot 10$ Загальна вартість електроенергії	3744  9360 13104
3	Заробітна плата Один робітник 4-го розряду обслуговує дві печі. Тарифна ставка однієї години робітника з надбавками складає $\approx 30$ грн. Прогартування суміші: $30 \cdot 4/2$ Хромосиліціювання: $30 \cdot 10/2$ Заробітна плата:	60 150 210
4	Вартість карбюризатора. Необхідна кількість суміші для хромосиліціювання 4 деталей – 940 кг Загальна вартість карбюризатора: $940 \cdot 23,80$	22372
Сумарна вартість процесу хромосиліціювання		58186

Для оцінювання інтегрального економічного ефекту від упровадження хромосиліціювання необхідно зіставити витрати на обробку деталей із використанням цього процесу та без нього, враховуючи при цьому додаткову економію, що досягається завдяки подовженню ресурсу роботи виробів і поліпшенню їхніх експлуатаційних характеристик.

$$E = E_1 + E_2, \quad (4.1)$$

де:  $E$  – повний економічний ефект, грн.;

$E_1$  -економічний ефект без урахування терміну служби деталей, грн.;

$E_2$  – економічний ефект від збільшення обліку терміну служби, грн.

Таблиця 4.3 – Вихідні дані для розрахунку собівартості

№ п/п	Показник	Позначення	Одиниці виміру	Базовий варіант	Новий варіант
1	Річна собівартість виготовлення продукції	$C$	млн. грн	24	46,75
2	Термін служби робочого колеса	$T$	рік	0,45	2,03
3	Вартість обладнання, що застосовується	$K$	грн	880000	1380000
4	Нормативний коефіцієнт	$E_n$	–	0,2	0,2

Визначення економічного ефекту (без урахування терміну служби деталей) проводимо за формулою:

$$E_1 = (C_1 + E_n \cdot K_1) - (C_2 + E_n \cdot K_2), \quad (4.2)$$

де  $C_1$  – собівартість виготовлення річної продукції за основними змінними статтями до впровадження заходів, грн;

$C_2$  – собівартість річного обсягу продукції за тими ж елементами після реалізації заходів, грн;

$K_1$  – вартість обладнання, що використовується до впровадження заходів, грн;

$K_2$  – відповідна вартість обладнання після проведення заходів, грн;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності, який для машинобудування становить 0,2.

$$E_1 = (2400000 + 0,2 \cdot 880000) - (46750000 + 0,2 \cdot 1380000) = -22850000 \text{ грн.}$$

Обчислення економічного ефекту, отриманого внаслідок збільшення ресурсу роботи деталей, здійснюється за такою формулою:

$$E_2 = C_2 + C_k, \quad (4.3)$$

де  $C_2$  – собівартість річного обсягу продукції після впровадження нової технології;

$C_k$  – скоригована собівартість обробки річної програми випуску.

$$C_k = \frac{C_2 - T_{СК}}{T_{НК}}, \quad (4.4)$$

де  $T_{СК}$  – строк служби виробу попередньої якості, років;

$T_{НК}$  – строк експлуатації виробу підвищеної якості.

$$E_2 = C_2 - \frac{C_2 - T_{СК}}{T_{НК}}, \quad (4.5)$$

$$E_2 = 46750000 - \frac{46750000 - 0,45}{2,03} = 23720443 \text{ грн.}$$

Отже, відповідно до формули (4.1), загальний економічний ефект від упровадження процесу хромосиліціювання становитиме:

$$E = -22850000 + 23720443 = 870443 \text{ грн.}$$

#### 4.3 Висновки за розділом

Загальноприйнято, що будь-який технологічний процес має бути економічно доцільним. Проте історичний досвід свідчить, що на ранніх етапах упровадження інноваційні технології нерідко виявляються фінансово малоефективними, а відчутна економічна перевага формується лише після подальшого вдосконалення процесів. Тому наукові дослідження не завжди

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

одразу демонструють повну економічну вигоду, хоча й закладають основу для майбутньої оптимізації виробництва.

У цій роботі здійснено детальні розрахунки витрат, пов'язаних із упровадженням нової технології хіміко-термічної обробки деталі «колесо робоче». Оцінювання економічної ефективності хромосиліціювання виконано поетапно: визначено витрати на впровадження процесу, проведено порівняння його собівартості з традиційним методом виготовлення та враховано всі супутні технологічні статті витрат, що впливають на кінцевий результат.

Здійснений аналіз показав, що застосування хромосиліціювання для зміцнення робочого колеса зі сталі 20X13Л забезпечує відчутний позитивний економічний ефект. Сукупна економія від упровадження запропонованої технології становить 870 443 грн, що підтверджує доцільність її застосування в умовах серійного виробництва.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						74
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Організація дільниці термообробки металевих виробів повинна здійснюватися з дотриманням нормативних документів з охорони праці, а також з урахуванням всіх факторів ризику, властивих подібним технологічним процесам. Зокрема, нормативним підґрунтям є НПАОП 28.5-1.02-07 «Правила охорони праці при термічній обробці металів».

### 5.1 Конструктивне та інженерно-технічне облаштування приміщень

Виробничі й допоміжні приміщення термоцехів повинні бути обладнані системами опалення, загальнообмінної вентиляції та, за потреби – кондиціонування, що забезпечують підтримання безпечного мікроклімату, відповідно до санітарно-гігієнічних норм.

Вікна, світлоаераційні ліхтарі та інші елементи освітлення повинні регулярно очищатися від пилу й бруду, але не рідше одного разу на три місяці, щоб підтримувати належне освітлення та зменшувати ризик порушення видимості.

Усі підлоги, проходи та робочі місця мають бути утримані в чистоті; слід уникати загромодження матеріалів чи сторонніх предметів, що можуть стати причиною травм або перешкод у евакуації.

### 5.2 Засоби індивідуального та колективного захисту

Працівники, зайняті на термообробці, зобов'язані використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): термостійкі рукавички, спецвзуття, спецодяг, захисні окуляри або щитки – залежно від умов нагріву та видимості.

Під час обробки гарячих заготовок необхідно користуватися спеціальним інструментом – щипцями, кліщами з подовженими ручками або іншими засобами, які забезпечують безпечне переміщення деталей без прямого дотику до гарячих поверхонь.

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

У зоні обслуговування печей, особливо якщо використовується газове або палинкове нагрівання, слід передбачити засоби захисту від іскор, відкритого полум'я, спалахів – у тому числі застосування негорючих матеріалів, пожежогасників, екранування робочої зони.

### 5.3 Організаційні заходи та навчання персоналу

Кожен працівник, допущений до роботи на дільниці термообробки, має пройти навчання і перевірку знань з охорони праці – відповідно до вимог, встановлених для галузі.

Необхідно вести інструктаж із безпечних прийомів роботи: правильне завантаження й розвантаження печей, порядок дій у випадках аварій, порядок користування ЗІЗ, правила пожежної безпеки.

Робочі зони повинні бути чітко позначені, із чіткими маршрутами руху працівників, а також шляхами евакуації. Слід забороняти присутність сторонніх осіб під час виконання технологічних операцій, особливо нагріву та охолодження металів.

### 5.4 Оцінка виробничих ризиків та умови праці

До виконання термічних операцій необхідно оцінити потенційну наявність шкідливих чи небезпечних факторів (висока температура, випари, пилю, іскри, відкрите полум'я), і при незадовільних умовах робочої зони передбачити колективні заходи – вентиляцію, екранування, ізоляцію зони, регулярний контроль мікроклімату.

Необхідно обмежувати тривалість перебування працівників безпосередньо біля джерел тепла; передбачати перерви, приміщення з охолодженням та охолоджувальні заходи під час роботи у спекотних умовах – з урахуванням сучасних рекомендацій із захисту від теплового стресу.

Разом із температурою повітря у цеху та безпосередньо на робочих місцях на стан здоров'я та працездатність персоналу істотно впливають також відносна

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вологість і швидкість повітряного потоку, що формуються під дією природної або штучної вентиляції. Для нових промислових підприємств Санітарні норми визначають оптимальні та допустимі значення температури, вологості та швидкості руху повітря для різних типів виробничих приміщень залежно від тепловиділення. У документі також наведено рекомендовані величини швидкості повітря при організації повітряного душування робочої зони відповідно до категорії роботи, рівня теплового випромінювання та фактичної температури повітря.

### 5.5 Екологізація виробництва

Екологізація виробництва є невід'ємним складником сучасної системи організації промислових процесів та спрямована на мінімізацію негативного впливу технологічних операцій на навколишнє природне середовище. У контексті термічної й хіміко-термічної обробки металів екологічний підхід передбачає оптимізацію витрат енергії, зниження викидів шкідливих речовин, раціональне використання ресурсів і впровадження технологій, що забезпечують безвідходність або маловідходність виробництва.

Одним із ключових напрямів екологізації є зменшення енергоспоживання термічних установок. Оскільки робота печей пов'язана з високими тепловими втратами, важливо застосовувати енергозберігальні футерівки, системи рекуперації тепла, автоматизоване керування режимами нагрівання та ізоляційні матеріали з низькою теплопровідністю. Це дозволяє одночасно скорочувати викиди парникових газів і зменшувати собівартість продукції.

Важливим екологічним аспектом є контроль і мінімізація шкідливих викидів, які утворюються під час нагрівання металів, взаємодії компонентів порошкових сумішей чи продуктів газового середовища. Для зменшення впливу токсичних відходів використовуються високоефективні вентиляційні системи, газопоглинальні фільтри, циклонні уловлювачі, локальні очисні установки та витяжки над печами. Усі ці заходи спрямовані на запобігання потраплянню в

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

атмосферу оксидів азоту, вуглецю, пилу та продуктів розкладу хімічних реагентів.

Не менш важливим напрямом є раціональне використання матеріальних ресурсів. У технологіях хромосиліціювання та інших видах ХТО можливе повторне застосування частини порошкових сумішей, що знижує кількість утворених відходів та зменшує навантаження на навколишнє середовище. Це узгоджується з принципами циркулярної економіки, яка передбачає повернення матеріалів у технологічний цикл.

Додатковою складовою екологічної безпеки є правильне поводження з відходами. Особливо це стосується використаних порошків, продуктів очищення, окалини та забруднених матеріалів. Відходи необхідно збирати в герметизовані контейнери та передавати спеціалізованим підприємствам для утилізації відповідно до чинних екологічних норм. Недотримання цих вимог може призвести до забруднення ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод.

Важливо також забезпечити екологічний моніторинг виробничих процесів, який включає систематичний контроль рівнів шкідливих речовин у повітрі, температурних режимів, концентрацій пилу та ефективності систем очищення. Регулярний екологічний аудит дозволяє своєчасно виявляти проблемні ділянки та оптимізувати технологічні процеси.

Необхідним компонентом екологізації є підвищення екологічної свідомості персоналу виробництва, впровадження навчальних програм, інструктажів та систем мотивації для дотримання екологічних стандартів. Формування культури відповідального ставлення до використання ресурсів і поводження з відходами є важливим чинником у забезпеченні сталого розвитку виробництва.

У підсумку екологізація виробництва термічної обробки металів є комплексним процесом, що охоплює технічні, організаційні та нормативні заходи. Реалізація цих вимог сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля,

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

підвищенню енергоефективності та покращенню загальної екологічної безпеки підприємства

#### 5.6 Висновки за розділом

У результаті проведеного аналізу встановлено, що безпечна організація робіт на дільниці термічної та хіміко-термічної обробки металів потребує комплексного виконання нормативних вимог, спрямованих на збереження життя та здоров'я персоналу, зменшення виробничих ризиків та мінімізацію впливу шкідливих чинників на довкілля.

З'ясовано, що умови праці під час термообробки відзначаються наявністю високих температур, теплового випромінювання, можливих аерозольних та газових викидів, а також небезпекою опіків і пожеж. Тому першочергового значення набуває правильне інженерне облаштування робочих приміщень, ефективна вентиляція, дотримання температурного балансу, забезпечення персоналу сертифікованими засобами індивідуального та колективного захисту, а також організація чітких проходів та зон безпеки. Важливу роль відіграє систематичний інструктаж і підготовка працівників, що гарантує їхню готовність до дій у штатних та аварійних ситуаціях.

Особлива увага приділялася питанням мікроклімату. Оцінено вплив температури, вологості та швидкості руху повітря на працездатність персоналу та встановлено необхідність дотримання санітарних норм, що регламентують параметри виробничого середовища. Забезпечення оптимальних умов мікроклімату мінімізує ризик теплового стресу, підвищує продуктивність праці та знижує імовірність професійних захворювань.

Важливою складовою аналізу стала екологізація виробництва. Доведено, що сучасні технології термічної і хіміко-термічної обробки повинні реалізовуватися з урахуванням вимог екологічної безпеки та сталого розвитку. Це включає раціональне використання матеріальних ресурсів, зниження енерговитрат, впровадження заходів із зменшення шкідливих викидів,

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

організацію систем очищення повітря, а також правильне поводження з відходами, що утворюються під час технологічних процесів. Окрема увага приділяється екологічному моніторингу, який дозволяє оперативно оцінювати стан виробничого середовища та коригувати технологічні параметри.

Узагальнюючи, впровадження системи охорони праці та екологічної безпеки на ділянці термічної обробки забезпечує мінімізацію професійних ризиків, підвищення рівня безпеки виробництва та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Комплексність і системність реалізації таких заходів є необхідною умовою ефективного та сталого функціонування підприємства в сучасних умовах.

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
						80
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження закономірностей формування дифузійних хромосиліцидних покриттів на сталі 20Х13Л, визначено їх структурні, мікромеханічні та експлуатаційні характеристики, а також обґрунтовано доцільність застосування даної технології для підвищення ресурсу робочих коліс відцентрових компресорів.

Проведений аналітичний огляд засвідчив, що робоче колесо є однією з найбільш навантажених деталей компресорного агрегату, що працює в умовах дії циклічних навантажень, високотемпературних газових потоків, агресивних середовищ і абразивних включень. Встановлено, що традиційні методи захисту не забезпечують необхідного рівня довговічності, тоді як формування градієнтних дифузійних шарів на основі хрому та кремнію є одним із найбільш ефективних шляхів підвищення зносостійкості, корозійної та жаростійкої стійкості деталей.

Експериментально підтверджено, що процес контактного порошкового хромосиліціювання сталі 20Х13Л приводить до утворення захисного шару, який складається з карбідів  $(Cr,Fe)_{23}C_6$ ,  $(Cr,Fe)_7C_3$ , а також силіцидовмісних структур із рівномірним переходом до твердого розчину Cr–Si у феритній матриці. Покриття характеризується високою адгезією та рівномірною товщиною.

Встановлено вплив параметрів ХТО на формування шару. За режимом №2 (1000 °С, 6 год) сформувався захисне покриття товщиною 60–110 мкм із мікротвердістю 15,9 ГПа. Для режиму №1 товщина шару становила 25–40 мкм, а поверхнева твердість – 10,2 ГПа. Збільшення температури та тривалості насичення приводить до інтенсифікації дифузійних процесів і формування більш щільного та однорідного шару.

Показано значне зменшення мікропористості, що є критично важливим для жаростійкості. Максимальна пористість у покриттів за режимом №1 становила

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

0,008 см<sup>2</sup>, тоді як для режиму №2 – 0,003 см<sup>2</sup>. Підвищена температура та збільшений час витримки сприяють «заліковуванню» дифузійних дефектів і формуванню практично безпористого шару.

Встановлено підвищення жаростійкості сталі 20Х13Л після нанесення хромосиліцидного покриття. За результатами випробувань, приріст стійкості до окиснення становить: – у 1,6 разу при 800 °С, – у 2,9 разу при 900 °С, – у 2,5 разу при 1000 °С. Підвищена жаростійкість зумовлена формуванням щільних оксидних шарів (Cr,Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та SiO<sub>2</sub>, які мають низьку проникність і високі бар'єрні властивості.

Економічний аналіз довів доцільність заміни високолегованої сталі 12Х18Н9ТЛ на сталь 20Х13Л з подальшим хромосиліціюванням. Собівартість виробів з урахуванням ХТО є нижчою, а збільшення ресурсу в 4–5 разів забезпечує значний річний ефект. Загальний економічний ефект склав 870 443 грн, що свідчить про високу доцільність впровадження технології у серійне виробництво.

Питання охорони праці та екологічної безпеки розглянуті згідно з чинними нормативними документами. Проаналізовано ризики термічних ділянок, вимоги до вентиляції, температурного режиму, поводження з порошковими сумішами та забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту. Наголошено на необхідності екологізації виробництва, утилізації відходів і мінімізації теплового та газового забруднення.

Узагальнюючи, робота доводить, що контактне хромосиліціювання є ефективним методом модифікації поверхні сталі 20Х13Л, який забезпечує комплексне підвищення експлуатаційних характеристик робочих коліс відцентрових компресорів, зменшення впливу корозійних та термічних факторів, подовження їхнього ресурсу та економічно обґрунтовану доцільність технології для промислового впровадження.

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Improvement of Hot Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steel by Chromizing-Siliconizing. – Materials Science Forum, 2018.
2. Surface enrichment in Al, Si, and Cr for high-temperature oxidation resistance. – Materials Advances, 2024.
3. Жаростійкість сталі після дифузійного хромосиліціювання. – НТУУ «КПІ», 2020.
4. Structure and Wear Resistance of Diffusion Coatings with Chrome and Silicon. – International Journal of Engineering Research, 2022.
5. Комплексні дифузійні покриття для сталей та чавунів: вплив Cr, Ti, Al і Si на корозійну стійкість. – Наукові праці з металознавства, 2017.
6. Руденко В. М., Федоренко В. С. Жаростійкі та корозійностійкі сталі та сплави: властивості, застосування, технологія. – Київ: Наукова думка, 2011. – 412 с.
7. Седрикс А. Дж. Коррозия нержавеющей сталей. – М.: Металлургия, 1987. – 392 с.
8. „X20Cr13 / 1.4021 Stainless Steel Data Sheet.“ – Argent Steel, 2025. – 5 p
9. Гладишев В.М., Цюпа С.В., Штангей С.В. Хіміко-термічна обробка металів і сплавів. – Київ: Либідь, 2010. – 328 с.
10. ISO 11130:2017. Corrosion of metals and alloys – Alternate immersion test in salt solution. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 12 p.
11. Погребова І.С., Янцевич К.В. Структура та зносостійкість дифузійних покриттів на основі хрому і кремнію – Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки», 2022, № 4 (72), С. 6–11.
12. ASM Handbook, Vol. 3: Alloy Phase Diagrams. ASM International, 2016.
13. Odhiambo J. G., Li W., Zhao Y., Li C. Porosity and Its Significance in Plasma-Sprayed Coatings // Coatings. – 2019. – Vol. 9, No. 7. – Art. 460. – DOI: 10.3390/coatings9070460
14. Ndumia J. N., Kang M., Gbenontin B. V., Lin J., Nyambura S. M. A Review on the Wear, Corrosion and High-Temperature Resistant Properties of Wire Arc-

					КРММТВА25.24359.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

- Sprayed Fe-Based Coatings // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11, No. 10. – Art. 2527. – DOI: 10.3390/nano11102527.
15. Mao H., Shen F., Zhang Y., Wang J., Cui K., Wang H., Lv T., Fu T., Tan T. Microstructure and Mechanical Properties of Carbide Reinforced TiC-Based Ultra-High Temperature Ceramics: A Review // Coatings. – 2021. – Vol. 11, No. 12. – Art. 1444. – DOI: 10.3390/coatings11121444.
  16. Pavlenko, I.; Zajac, J.; Kharchenko, N.; Duplák, J.; Ivanov, V.; Kostyk, K. Estimation of wear Resistance for Multilayer Coatings Obtained by Nitrogenchroming. Metals 2021, 11, 1153. <https://doi.org/10.3390/met11081153>
  17. Погребова І.С. та співавт. Дифузійні хромосиліцидні покриття на сталях 20, 45, У10А (газове хромосиліціювання), Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2011
  18. Gurtaran M. et al. “High-Temperature Oxidation Behaviour of CrSi Coatings on 316 Austenitic Stainless Steel”, Materials, 2023
  19. Патент CN100462471C – High-temperature oxidation-resistant chromium-modified silicide coating, Китай.
  20. ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. ASM International, 2013. – 748 p.
  21. Totten G. E., Xie L. (eds.). Heat Treatment and Surface Engineering: Processes and Technologies. CRC Press, 2021. – 512 p.
  22. НПАОП 28.5-1.02-07 «Правила охорони праці при термічній обробці металів». Затверджено Наказом Держкомпраці України від 18 грудня 2007 р.
  23. OSHA. Metal Heat Treating (код 3398) – опис діяльності, пов’язаної з термічною обробкою металів, із переліком потенційних ризиків та необхідних заходів безпеки
  24. ILO / EU-OSHA. «Guidance for workplaces: Heat at work – managing risks from hot environments» (2023) – рекомендації щодо запобігання тепловому стресу та підтримки безпечного мікроклімату на робочих місцях із підвищеними температурами

					<b>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

ДОДАТКИ

					<i>КРММТВА25.24359.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		85