

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра
Бакалавра (Магістра)

ВИКОРИСТАННЯ СЕРЕДОВИЩА ОКСИДІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЧАВУННИХ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

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 24448. 000 ПЗ

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


Підпис

Богдан МАЗУР
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н, доцент
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

Ольга ДРОБОТ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ
Посада


Підпис

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва

Дата 10 12 2025


Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Мазуру Богдану Анатолійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Використання середовища оксидів для підвищення зносостійкості чавунних деталей автомобілів».

Рівень роботи Дробот Ольга Савівна, к.т.н., доцент

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 4 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація по розбиранню, дефектації, складанню і регулюванню вузла тертя; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні ремонтних робіт; техніко – економічні показники роботи підприємства.

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

1 Дослідження видів пошкодження робочих поверхонь блоку циліндрів;

2 Технологія лиття блоку циліндрів;

3 Технологія термічної і хіміко-термічної обробки чавунних деталей

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

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання_ ----

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

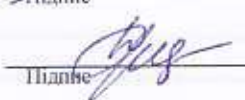
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примі
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>30.09.2025</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.10. 2025</i>	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	<i>15.11. 2025</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>22.11. 2025</i>	
5	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	<i>1.12. 2025</i>	
6	<i>Нормоконтроль кваліфікаційної роботи</i>	<i>5.12. 2025</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>5.12. 2025</i>	

Студент


Підпис

Богдан Мазур
ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник роботи


Підпис

Ольга Дробот
ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Тем
Вміст
кількість
Рух
згоряння
надійної
його сери
внутрішн
агрегати.
функції.
як базова
Блок заб
складові
трактор
виникаю
крихкого
Актуал
задачею
найважли
стійкістю
вартісне.
критерію
неможли
пералітну
Викорис
сірого ча
перетвор
потрібно
фериту.
чавуну с
Мета та
циліндрі
зносоств
технолог
середов
Завданн
заліза та
Дослідит
дифузійн
3. Дослід
Запропо
для отрим
Отриман
НRC) ма
гартуван
наступни
Абразивн
чавуну,
хромисто

Перелік
ЗНОС, І

Реферат

Тема роботи : «Використання середовища оксидів для підвищення зносостійкості чавунних деталей автомобілів».

Вміст пояснювальної записки – 73 сторінки, кількість рисунків - 42, таблиць - 24, додатків 20, кількість джерел згідно із переліком посилань - 14.

Рух автомобіля забезпечується механічною енергією, яку виробляє двигун внутрішнього згоряння. Надійна і тривала робота двигуна внутрішнього згоряння безпосередньо залежить від надійної роботи кожного вузла двигуна. Двигун внутрішнього згоряння має основну деталь, яка є його серцем – блок циліндрів. Блок циліндрів - це основний корпусний елемент двигуна внутрішнього згоряння, в якому розташовані циліндри, і до якого кріпляться інші вузли та агрегати. Він служить основою для двигуна, забезпечуючи камери згоряння та інші важливі функції. Блок циліндрів – складний вилівок, в якому об'єднана група циліндрів.. Блок циліндрів, як базова деталь двигуна, використовується переважно у двигунах з рідинним охолодженням. Блок забезпечує цілісність конструкції, яка необхідна для роботи двигуна, утримуючи окремі складові в єдине ціле, слугує міцною основою для забезпечення руху поршня, не змінюючи траєкторію його руху навіть за значних навантажень. В чавунних блоках циліндрів переважно виникають дефекти, що пов'язані з властивостями матеріалу. Сірий чавун має схильність до крихкого руйнування, особливо при дії динамічних навантажень та температурних впливів.

Актуальність роботи Покращення експлуатаційних характеристик деталей машин є основною задачею матеріалознавства. Задача підвищення строку служби зносостійких виробів є найважливішою. Основними матеріалами, які поєднують антифрикційні властивості з корозійною стійкістю, є чавуни. Найкращі властивості мають леговані чавуни, але отримання їх дороге вартісне. Поширеним матеріалом в машинобудуванні, який є недорогим та відповідає висунутим критеріям – це сірий чавун, марок СЧ15, СЧ20, СЧ25. Суттєвим недоліком таких матеріалів є неможливість зміцнення за допомогою гартування. Об'ємне гартування дає можливість отримати перлітну структуру металевої основи, що не достатньо для забезпечення високої зносостійкості. Використання гартування струмом високої частоти не доцільне з причин, що металева основа сірого чавуну не здатна до загартування так як містить від 60 до 90% фериту, який не здатен перетворюватись на мартенсит при гартуванні СВЧ. Отже, для зміцнення деталей із сірого чавуну потрібно змінити структуру металевої основи на перлітну, чи перліто-феритну з малим вмістом фериту. Розробка простого і надійного методу модифікації поверхневого шару деталей із сірого чавуну є актуальною задачею.

Мета та задачі досліджень – підвищити зносостійкість робочих посадочних поверхонь блоку циліндрів з сірого чавуну поверхневим зміцненням в середовищі оксидів для забезпечення зносостійкості поверхні при мінімальних змінах вихідної структури та мікрогеометрії, розробка технологічного процесу отримання зносостійкого шару на поверхні чавунних деталей в середовищі оксидів заліза та хрому.

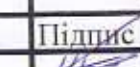



Завдання по роботі: Виконати теоретичний аналіз процесу дифузійного окислення оксидами заліза та хрому фериту в поверхневому шарі сірого чавуну з метою перетворення його в перліт. 2. Дослідити особливості формування мікроструктури поверхневого шару деталі в процесі дифузійного окислення структурних складових чавуну оксидами заліза та хрому (FeO та Cr_2O_3). 3. Дослідити хімічний склад зміцненого шару деталі та його фізико-механічні властивості. 5. Запропонувати технологію дифузійного хромування поверхневого шару деталей оксидом хрому для отримання мартенситних структур.

Отримані результати: Твердість дифузійного шару після обробки чавуна оксидом хрому (58-65 HRC) майже сягає твердості високоміцного чавуну з кулястим графітом після поверхневого гартування струмом високої частоти (СВЧ) 56-63 HRC. Дифузійним хромуванням сірого чавуну з наступним зміцненням отримано зміцнений шар у 2 рази товщий, ніж при обробці лазером. Абразивний знос поверхні деталі після взаємодії з окалиною у два рази менший, ніж у вихідного чавуну, а після взаємодії з оксидом хрому зносостійкість сірого чавуну підвищується до рівня хромистого чавуну.

Перелік ключових слів: ТЕРТЯ, ЗНОШУВАННЯ, БЛОК ЦИЛІНДРІВ, ОКСИДИ, ЛІНІЙНИЙ ЗНОС, МІЦНІСТЬ, КАРБИДИ, МАРТЕНСИТ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, ОКИСНЕННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА УМОВИ РОБОТИ БЛОКУ ЦИЛІНДРІВ.....	
1.1 Конструкція, функції та умови роботи блоку циліндрів.....	
1.2 . Функції блоку циліндрів.....	
1.3. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
Мета роботи.....	
Задачі досліджень	
Наукова новизна.	
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.	
2.1. Матеріали для виготовлення блоків циліндрів.....	
2.1.1. Характеристика сірих чавунів.....	
2.1.2. Алюмінієві сплави.....	
2.1.3. Магнієві сплави та інші для блоків циліндрів.....	
2.1.4. Способи підвищення зносостійкості блоків циліндрів з алюмінієвих сплавів.....	
2.1.5. Механічні властивості сірого чавуну.....	
2.1.6. Фрикційні властивості сірого чавуну.....	
2.1.7. Зносостійкість.....	
2.1.8. Знос сірого чавуну з різною структурою металеві основи.....	

						<i>КРМ МТВА 25 24448. 000 ПЗ</i>		
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Використання середовища оксидів для підвищення зносостійкості чавунних деталей автомобілів	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		М азур					4	75
Перевір.		Дробот				ХНУ МТВАм-24-1		
Н.контр.		Бабак						
Затвер.		Диха						

ВСТУП

Сучасні автомобілі є складною конструкцією, яка містить різноманітні деталі, що відрізняються формою, функціями та матеріалами, з яких їх виготовлено.

Двигун внутрішнього згоряння має основну деталь, яка є його серцем – блок циліндрів. Блок циліндрів - це основний корпусний елемент двигуна внутрішнього згоряння, в якому розташовані циліндри, і до якого кріпляться інші вузли та агрегати. Він служить основою для двигуна, забезпечуючи камери згоряння та інші важливі функції. Блок циліндрів – складний виливок, в якому об'єднана група циліндрів поршневого двигуна внутрішнього згоряння або поршневого компресора (рис. 1.1).



Рисунок 1.1- Загальний вигляд блоку циліндрів

До блоку циліндрів кріпляться інші частини двигуна. Він об'єднує циліндри, де відбувається фактичне згоряння палива, служить опорою для колінчастого вала та інших вузлів, а також знижує рівень шуму двигуна. Блок циліндрів, як базова деталь двигуна, використовується переважно у двигунах

з рідинним охолодженням, причому порожнини блоку утворюють сорочку охолодження. У двигунах з повітряним охолодженням виготовлення циліндрів в одному блоці вагомих переваг не дає, і тому майже не застосовується.

РОЗДІЛ 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА УМОВИ РОБОТИ БЛОКУ ЦИЛІНДРІВ.

1.1 Конструкція та умови роботи блоку циліндрів.

Блок циліндрів має опорні поверхні, на яких кріпитися колінчастий вал. У верхній частині блоку розміщують головку блоку циліндра. В нижній частині розміщують опорні поверхні для розподільного валу.

Основні елементи конструкції блоку циліндрів: корпус, в якому розміщені циліндри та опорні поверхні для колінчастого вала.

У блоці циліндрів розташовані порожнини, в яких рухаються поршні. В деяких конструкціях, особливо в алюмінієвих блоках, використовуються змінні гільзи для збільшення терміну служби циліндрів. Головка блоку циліндрів кріпиться до верхньої частини блоку і містить камери згоряння, клапани та інші деталі. Нижня частина блоку циліндрів утворює картер, який служить для збору моторного масла.

1.2 . Функції блоку циліндрів.

Блок забезпечує цілісність конструкції, яка необхідна для роботи двигуна, утримуючи окремі складові в єдине ціле, слугує міцною основою для забезпечення руху поршня, не змінюючи траєкторію його руху навіть за значних навантажень. Він є опорою для інших вузлів: головки блоку кривошипно-шатунного механізму, коробки передач та інших деталей. Завдяки блоку циліндрів утворюється необхідний об'єм для згоряння паливно повітряної суміші. Він також сприяє зменшенню рівня шуму під час роботи двигуна, а також сприяє відведенню тепла від циліндрів, що охолоджуються рідиною або повітрям. Додатковими функціями блоку

циліндрів - він слугує основною частиною системи мащення, а в двигунах рідинного охолодження – системи охолодження.

Розміри блоку визначаються трьома величинами — діаметром циліндра, ходом поршня і кількістю циліндрів. Умови роботи блоку циліндрів досить важкі- під час роботи блок циліндрів піддається значним механічним, тепловим, хімічним, кавітаційним впливам, що викликає спрацювання робочих поверхонь, утворення тріщин та пробоїн, деформацію базових поверхонь та корозію. Під час роботи двигуна зношуються робочі поверхні циліндрів, зношуються гільзи. Якщо блок циліндрів не має змінних гільз, то його розточують до потрібного ремонтного розміру. Під час експлуатації можуть виникати тріщини сорочки, негерметичність, жолоблення та відхилення розмірів.

В чавунних блоках циліндрів переважно виникають дефекти, що пов'язані з властивостями матеріалу. Сірий чавун має схильність до крихкого руйнування, особливо при дії динамічних навантажень та температурних впливів. Можливі дефекти блоку циліндрів наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Дефекти блоку циліндрів.

Дефекти блоку циліндрів	Заходи для усунення дефектів
Пробоїни	Залатати листовим матеріалом або склотканиною. Пробоїни великих розмірів не усувають, а виліток бракують.
Тріщини	Заварюють аргонодуговим зварюванням (блоки з алюмінієвих сплавів) , чавунні блоки запаюють латунним припоєм, або заклеюють епоксидним клеєм. При наявності великих тріщин деталь бракують.
Обломи	Місця дефектів наплавляти, приварювати чи остаточно бракувати.

Деформація та знос місць під корінні підшипники	Розточування гнізд під ремонтний розмір, хонінгування, напилення, насталування, плазмова металізація та інше.
Деформація отворів	Наплавлення. Встаноалення втулок.
Жолоблення площини стику з головкою циліндрів	Механічна обробка: фрезерування, шліфування, притирання.

Дефекти чавунних гільз і заходи для їх усунення наведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2. Дефекти чавунних гільз та способів їх усунення.

Вид дефекта	Заходи для усунення дефектів
Тріщини та обломи	Бракують
Задирки, знос робочої поверхні	Механічна обробка: розточування до ремонтного розміру.
Знос чи деформація посадочної поверхні	Насталування з наступною обробкою до номінального розміру, металізація.

дифузійного хромування значно зростає і не поступається хромистому чавуну.

Розділ 2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.

2.1. Матеріали для виготовлення блоків циліндрів.

Блок циліндрів виготовляють із сірого чавуну або з алюмінієвих сплавів.

За умовами експлуатації блок циліндрів повинен мати високу жорсткість, щоб не допускати деформації та появи задирок на поршнях. Якщо не має у замовника вимог до маси, то блок циліндрів виготовляють з сірого чавуну.

Якщо потрібно зменшити масу двигуна внутрішнього згорання, то перевагу віддають легким сплавам на основі алюмінію чи магнію.

Особливо відповідальні двигуни – авіаційні, ракетні, для дронів потребують більш якісних і надійних матеріалів таких, як високолеговані сталі, титанові, магнієві, алюмінієві сплави та композити.

Блоки циліндрів, виготовлені з сірого чи легovanого чавуну, здатні забезпечити конструктивну жорсткість двигуна [1].

Чавун є недорогим матеріалом у порівнянні з кольоровими сплавами і володіє кращими ливарними властивостями, ніж зазначені матеріали.

Чавун має досить високу міцність, високі показники при стисканні, зносостійкий та здатний гасити вібрації. Матеріал має високу теплоємність та високу антикорозійну стійкість. Переваги сірого чавуну як конструкційного матеріалу можна визначити як:

- невисока ціна;
- гарні технологічні властивості (висока рідкотекучість, мала усадка, добра оброблюваність різанням);
- стабільність властивостей в значному інтервалі температур;
- високі демпфуючі властивості матеріалу;
- підвищена твердість, малочутливість до перегріву;
- зручність ремонту тріщин (можливість паяння латунню, заварка, епоксидний клей);

- досить висока зносостійкість та антифрикційні властивості

Основний недолік сірого чавуну – вага, яка є досить високою (густина чавуну $7,8 \text{ г/см}^3$), що збільшує витрати палива та менша теплопровідність, ніж у алюмінію.

Ливарні сталі для виливки блоків не застосовують, оскільки їхні ливарні властивості гірші, ніж у чавуна. Демпфуюча здатність сталей теж гірша, ніж у чавунів.

2.1.1. Характеристика сірих чавунів.

Значну кількість деталей автомобіля виготовляють з сірого чавуну. Сірий чавун – сплав заліза з вуглецем з вмістом вуглецю від 2,5 до 3,6%. Для покращення властивостей сірі чавуни легують нікелем, хромом, титаном, міддю. Хімічний склад сірих чавунів представлено в таблиці 2.1.

Графітні кристали в сірому чавуні формуються під час кристалізації і мають форму пластинок, які об'єднані в розетки (рис.2.1).

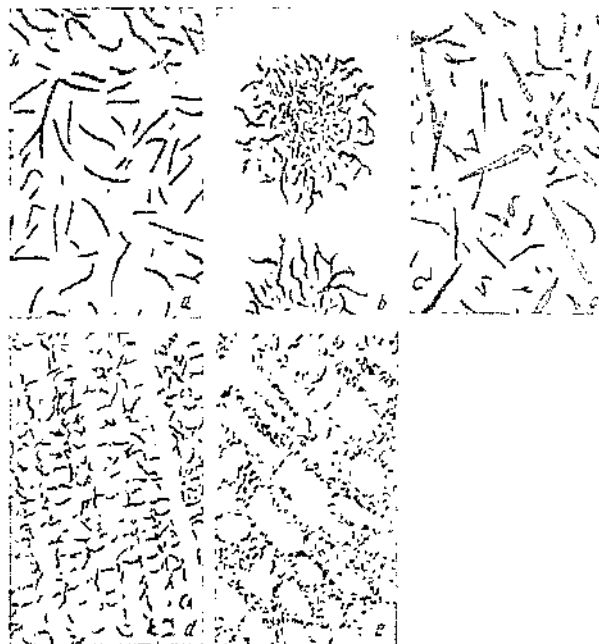


Рисунок 2.1 - Основні типи розміщення графіту в сірому чавуні x100:

а – неорієнтовані ; б – розеточний; с- лінійчатий нерівно розподілений; д – точковий між дендритний; е –дрібнопластинчатий сітчастий.

Графітні кристали можуть утворюватись також при розпаді цементиту, форма графіту при цьому пластівчаста. Фізико механічні та службові властивості сірого чавуну визначаються в значній мірі розміром, кількістю та формою графітних включень (рис.2.2).

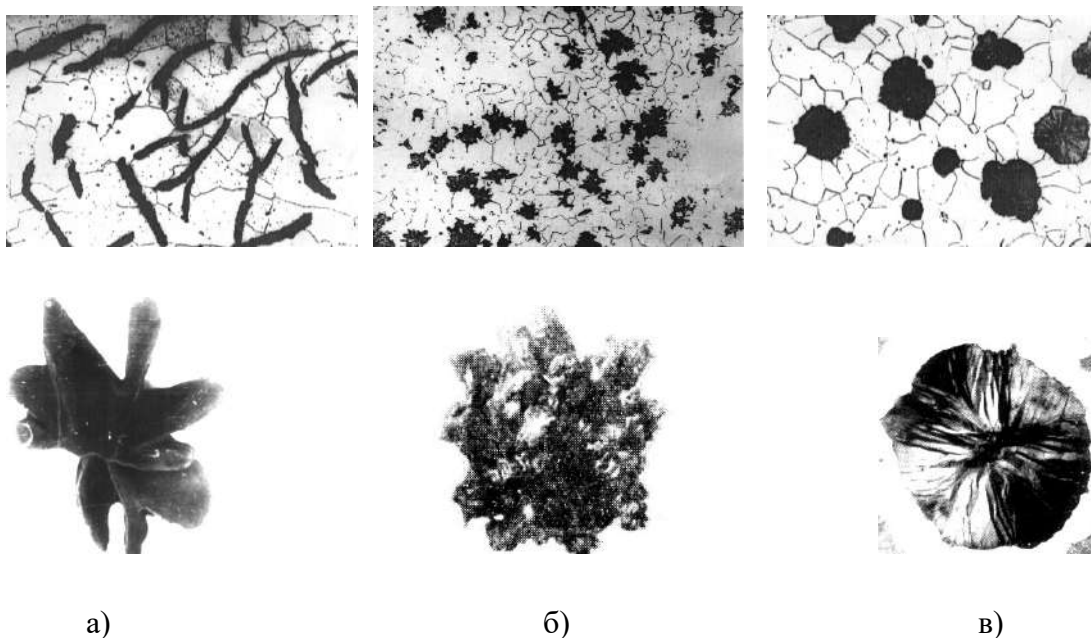


Рисунок 2.2 – Форма графітних включень в сірих чавунах
а) - пластинчаста б) - пластівчаста в) - куляста

Пластинчастий графіт в сірому чавуні забезпечує поєднання високих високих антифрикційних властивостей з високою зносостійкістю, малою чутливістю до концентраторів напружень. Сірий чавун має високу демпфуючу здатність (гальмувати коливання) і зменшує вібрації.

Сірий чавун – сплав заліза з вуглецем з вмістом вуглецю від 2,5 до 3,6%. Для покращення властивостей сірі чавуни легують нікелем, хромом, титаном, міддю. Хімічний склад сірих чавунів представлено в таблиці 2.1.

Марки чавуну СЧ20, СЧ21, СЧ25 використовують для деталей, які працюють при підвищених статичних та динамічних навантаженнях, такі як: блоки циліндрів, каретки, барабани зчеплення, поршні тощо [2].

Чавуни з пластинчатим графітом (ГОСТ 1412-88) **СЧ15, СЧ20, СЧ25**

Таблиця 2.1. Хімічний склад сірих чавунів

Марка чавуну	Склад хімічних елементів, %				
	C	Si	Mn	S	P
СЧ15	2,9 - 3,0	1,2 - 3,0	0,4 - 1,1	0,2	0,12
СЧ 20	2,7 - 3,5	1,5 - 2,4	0,6 - 1,2	до 0,12	до 0,3
СЧ 25	2,4 – 3,3	1,0 – 2,3	0,6 - 1,2	до 0,12	до 0,3

Таблиця 2.2. Механічні властивості сірих чавунів.

Міцність МПа	Твердість, НВ
В залежності від товщини стінки виливка 380 - 205	290 - 179

Легування титаном, міддю, хромом, нікелем збільшує кількість зв'язаного вуглецю в перліті до одного відсотка. Завдяки утворенню комплексних карбідів підвищується стабільність перліту, збільшується твердість і покращуються механічні властивості чавуну, зокрема – стійкість

до спрацьовування. Твердість чавунних блоків, виміряних за методом Брінелля *НВ* 180...250.

2.1.2. Алюмінієві сплави

Для зменшення ваги автомобіля поширеним є використання в якості матеріалів для блоків циліндрів сплавів на основі алюмінію та магнію. Однак в цьому випадку виникає потреба в додатковому захисті циліндрів від зносу (до прикладу, використання гільз). Часто алюмінієві блоки циліндрів оснащують чавунними або сталевими гільзами циліндрів або наносять зносостійке покриття для зменшення тертя.

Блоки циліндрів, виготовлені із алюмінієвого сплаву, мають меншу вагу, що визначається малою густиною алюмінію ($2,7 \text{ г/см}^3$). Алюмінієві сплави мають кращу тепловіддачу ніж чавунні, проте вони значно дорожчі за чавунні та активно взаємодіють з водою та повітрям.

Блоки з алюмінієвих сплавів для підвищення експлуатаційних властивостей покривають шаром хрому, нікасиллом, алюмосилом.

Склад алюмінієвих сплавів для блоків циліндрів.

Таблиця 2.3. Склад алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Вміст хімічних елементів, %						
	Si	Mn	Ni	Cu	Mg	Zn	Fe
AK9	8 - 11	0,2 - 0,5	0,3	до 1	0,2	0,4	до 0,5
AK5M	4- 22	0,2 - 0,8	0,1-0,3 Ti	1- 8	0,2 - 0,3		

2.1.3. Магнієві сплави та інші для блоків циліндрів

Блоки магнієвого сплаву дозволяють ще більше знизити масу блоку, ніж застосування алюмінію. Найбільша ефективність від цього досягається в потужних бензинових двигунах швидкісних машин. Але магнієві ливарні сплави майже такі ж дорогі, як і алюмінієві, складніше технологічно, а механічні властивості магнію дещо гірші (менша пластичність дає зниження міцності втомі проти алюмінієвих сплавів). Це дозволяє отримати вигоду у вазі переважно на вузькоспеціалізованих спортивних моторах https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BB%D0%BE%D0%BA_%D1%86%D0%B8%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%B4%D1%80%D1%96%D0%B2 - cite note-17. Деякий виняток — двигун "Запорожця" з картером з авіаційного магнієвого сплаву МЛ-5 (і окремими чавунними циліндрами), бензопили. Твердість і корозійна стійкість магнієвих сплавів зазвичай поступається металам з переважанням алюмінію. Магнієві сплави мають дуже високе демпфування, отже, такі двигуни працюють тихіше.

Таблиця 2.4. Склад магнієвих сплавів

Марка сплаву	Вміст хімічних елементів, %						
	Al	Mn	Si	Cu	Ni	Zn	Fe
МЛ5	7 - 9	0,15 - 0,5	0,25	до 0,1	0,01	0,2-0,8	до 0,06
МЛ6	9- 10,2	0,1 - 0,5	0,25	0,1	0,01	0,6 - 1,2	0,07

Проводилися експерименти зі створення пластикового двигуна, з армуванням арамідом.

На початку розвитку автомобілебудування використовували латунні блоки циліндрів, що пояснювалось високою технологічністю цього сплаву під час лиття.

2.1.4. Способи підвищення зносостійкості блоків циліндрів з алюмінієвих сплавів.

Сучасні способи підвищення експлуатаційних властивостей блоків циліндрів передбачають легування сірих чавунів та нанесення зносостійких покриттів

Для двигуна Chevrolet Vega у 1971 році блок циліндрів виготовляли із силуміну з 17 кремнію. Спеціальною обробкою – хімічним травленням (вимиванням алюмінію з поверхні деталі збагачували поверхневі шари кристалами кремнію та підвищували твердість. Нажаль двигун виявився уразливим до перегрівання, якості мастила. Спосіб не впроваджено.

Наразі застосовується технологія *Locasil®II*, яка краще задовольняє поставлені технічні вимоги. Пористі преформи із вмістом 25 % дрібнодисперсного (30...70 мкм) кремнію виготовляють з використанням гель-сублімаційного лиття, з подальшим спіканням з доевтектичним ливарним сплавом вторинного алюмінію, що використовується для виливання блока. Для виготовлення блока використовується процес лиття під високим тиском який забезпечує поряд з повільним заповненням форми високий тиск для належного взаємного проникнення матеріалів. Завершальною операцією є спеціальний процес хонінгування з отриманням оптимальних трибологічних параметрів поверхні.

В іншому рішенні, спочатку фірма PEAK Werkstoff GmbH почала виготовляти гільзи зі сплаву AlSi17Cu4Mg методом лиття під високим тиском. Далі з'явилося технологічне рішення від Daimler AG — *Silitec®*. Суть цього методу полягає в тому, що у звичайний алюмінієвий блок запресовуються при виробництві кремнієвмісні гільзи, отримані методом

відцентрового лиття з упорскуванням розпиленого розплаву (англ. *spray compaction technology*). Кремній у результаті швидкого охолодження при твердінні набуває дрібнозернистої щільної структури з високою однорідністю і довговічністю властивостей.

Альтернативна технологія Nicasil — нікелеве покриття на алюмінієвих стінках циліндрів з напиленням кристалів карбиду кремнію, застосовувалася ще в 60-ті — 70-ті роки для двигунів дорогих спортивних автомобілів, зокрема — використовуваних у Formula 1. Із сучасних двигунів такі блоки мали мотори M60 і M52 фірми BMW, причому їх продажі в деяких країнах супроводжувалися скандалом — «нікасіл» руйнувався від реакції з деякими сортами палива, що містять підвищену концентрацію сірки (що характерно, зокрема, для деяких регіонів США та Росії)). Головний же недолік «нікасілу» — тонке нікелеве покриття легко пошкоджується, наприклад, при обриві шатуна або прогарі поршня, і блок не підлягає відновленню.

Досить поширеним є спосіб газотермічного напилення на алюмінієву поверхню циліндра. В результаті плазмового напилення отримують покриття товщиною 0,18...0,22 мм, яке має високу твердість та стійкість до зношування. Це покриття при первинній обробці нового блока, як і чавунну гільзу розточують під потрібний розмір та хонінгують. Плазмове покриття має ще одну особливість: воно пористе - здатне утримувати мастило. Ця особливість дозволила змінити кут нахилу борозенок, що залишаються після хонінгування, зробити цей кут меншим — і тим самим зменшити витрату моторної оливи при експлуатації [2].

Лазерне легування поверхні циліндра у блоці циліндрів, отриманому традиційними методами лиття при низькому тиску, що отримала назву *Tribosil*. Поверхні циліндрів при локальному розплавленні скануючим променем лазера збагачуються частинками кремнію (розміром < 10 мкм), що подається у зону розплавлення у вигляді струменя пудри, аж до створення

заевтектичної структури у товщині шару до 0,6 мм, яка після хонінгування характеризується високою зносостійкістю [3].

Альтернативою до напилення є технології *Nikasil* та *Galnical* — отримання гальванічним методом нікелевого покриття з вмістом (близько 10 %) кристалів (розміром 1-3 мкм) карбиду кремнію на алюмінієвих стінках циліндрів. Цю технологію обмежено застосовували ще у 1960-70-х роках для двигунів дорогих спортивних авто. Обидві технології і *Nikasil* і *Galnical* використовуються в серійному виробництві. Такі блоки мали двигуни M60 та M52 фірми BMW, причому їх продажі у деяких країнах супроводжувались скандалом — *Nikasil* руйнувався від хімічної реакції з деякими сортами пального, що містили підвищену концентрацію сірки. Ця проблема суттєво обмежила застосування такої технології.

2.1.5. Механічні властивості сірого чавуну.

Сірий чавун має гарні технологічні властивості як ливарний матеріал. Його використовують для одержання виливок завдяки його високій рідко текучості, малій усадці та малій схильності до утворення усадочних дефектів. Фізико - механічні та службові властивості чавуну визначаються співвідношенням кількості фериту (Ф) і перліту (П) в структурі металевої основи; дисперсністю перліту, розміром, розподілом та кількістю графіту, будовою зерен фериту та фосфідної евтектики, кількістю евтектичного цементиту.

Чим більшою є кількість графіту і розмір часточок та чим більше фериту в структурі, тим нижча його міцність і твердість. Розподіл графітних включень менше впливає на міцність та твердість, проте значно впливає на службові характеристики – зносостійкість, стійкість до утворення задирок.

2.1.6. Фрикційні властивості сірого чавуну

В залежності від матеріалу контактуючої спряженої поверхні вузла тертя при терті без мащення сірий чавун проявляє високі фрикційні властивості. При роботі в парі з фрикційними пластмасами сірий чавун забезпечує досить високий і стабільний коефіцієнт тертя (0,2 -0,4), гарне гальмування. Завдяки таким властивостям його використовують для виготовлення гальмівних барабанів і дисків автомобілів, літаків [11,12].

2.1.7. Зносостійкість.

Зношування пар тертя залежить від таких факторів: умов тертя (швидкості ковзання, навантаження та середовища) і матеріалів пари. Ці фактори визначають фізико – хімічні процеси взаємодії і руйнування мікроставів поверхні пар тертя, інтенсивність їх зносу. Максимальне зношування відбувається тоді, коли в зоні тертя переважає захоплення матеріалів пари та під впливом абразивів. Зношування захопленням відбувається за відсутності чи при руйнуванні плівки мастила між контактуючими поверхнями.

В такому випадку навіть при незначних навантаженнях і швидкостях ковзання матеріал мікроставів пари тертя пластично деформується, утворюються молекулярні зв'язки з наступним руйнуванням містка захоплення і виривання наклепаних часточок метала. При терті із мащенням навантаження при якому руйнується плівка мастила і відбувається захоплення, значно вищі, ніж при сухому терті. Тому захоплення і значна інтенсивність зношування відбуваються тільки при «масляному голоді», коли виникає можливість руйнування плівки мастила.

Абразивне зношування виникає при накопиченні в зоні тертя значної кількості твердих абразивних часточок і характеризується високою інтенсивністю.

При терті сірого чавуну з мащенням графітні включення всмоктують мастило. Мастило також утримується в порожнинах, які утворились від графіту, що викришився. Завдяки цьому режим тертя з мащенням

зберігається і в періоди «масляного голоду». Тому чавун в широкому інтервалі швидкостей і навантажень проявляє антифрикційні властивості і є зносостійким матеріалом.

В абразивному середовищі сірий чавун не виявляє високої зносостійкості.

В зоні тертя графітові пори (при певному співвідношенні між розмірами графіту і абразивної часточки) «поглинають» абразивні часточки, уповільнюючи абразивне зношування.

2.1.8. Знос сірого чавуну з різною структурою металевої основи.

Зносостійкість сірого чавуну залежить від структури. Сірий чавун має високу стійкість проти утворення задирок при роботі в умовах сухого тертя. Перлітна структура металевої основи має найкращу зносостійкість, вона суттєво залежить від дисперсності перліту – чим більш дисперсним є перліт, тим менший знос. Ферит (більше 5 -15%) в структурі суттєво знижує твердість та зносостійкість чавуну, погіршує опір до утворення задирок.

Після гартування (при отриманні структури мартенситу з твердістю не менше HRC 40) зносостійкість сірого чавуну підвищується.

Розмір графітних включень впливає на зносостійкість таким чином: максимальну зносостійкість при терті з мастилом мають чавуни з графітними включеннями розміром 0,125 – 0,200 мм. Важливим фактором впливу на зносостійкість є відстань між пластинами графіту. Автори [11] виявили, що оптимальна довжина пластин графіту має бути 0,042 – 0,090 мм. Суттєво підвищує зносостійкість чавуну фосфідна евтектика (до 25% фосфору), включення якої є більш твердими, ніж перліт.

Включення евтектичного цементиту в перлітному чавуні підвищують його зносостійкість.

Таблиця 2.5. Знос чавуну з різною структурою металевої основи

Металева основа	НВ	Відносний знос, % при навантаженні	
		знос, %	Навантаження, МПа
Середньопластинчастий перліт + 20-30% фериту	160	110	130
Дрібнопластинчастий перліт	205	100	100
Сорбітоподібний перліт	217	90	80

2.1.9. Вплив хімічного складу на структуру і властивості сірого чавуну.

Сірий чавун є багатокомпонентним сплавом. Окрім основних компонентів - заліза та вуглецю він містить домішки – сірку, фосфор, кремній, марганець та інші. Ці домішки суттєво впливають на умови графітизації, а отже на структуру і властивості чавуну [2].

Кремній дуже сильно впливає на структуру чавуну, він сприяє графітизації. Вміст кремнію в чавунах від 0,3 – 0,5 % до 3 - 5%.

Марганець уповільнює графітизацію, сприяє утворенню цементиту, а отже відбілу чавуну.

Сірка також гальмує графітизацію, погіршує ливарні властивості (рідкотекучість) сірого чавуну. Вміст сірки регламентують: верхня межа для дрібних виливок 0,08%, для більших 0,1– 0,12%.

Фосфор не впливає на процес графітизації, є корисною домішкою в чавуні, він покращує рідко текучість внаслідок утворення легкоплавкої потрібної евтектики, яка складається з кристалів аустеніту, збагаченого фосфором, цементиту та кристалів фосфіду заліза Fe_3P , з температурою плавлення 950°C. Тверді ділянки фосфідної евтектики підвищують загальну твердість

та зносостійкість чавуну. В леговані чавуни вводять хром, нікель, мідь, останні два сприяють графітизації.

2.2. Термічна обробка сірого чавуну

2.2.1. Термическая обработка серого чугуна.

Виливки із сірого чавуну піддають термічній обробці для зняття внутрішніх напружень та забезпечення мінімальних деформацій під час експлуатації а також для покращення оброблюваності та забезпечення зносостійкості. В окремих випадках термічну обробку проводять для усунення відбілу чавуну тобто виправлення браку.

Вибір температурного інтервалу нагрівання виливок залежить від хімічного складу чавуну і перш за все – кількості кремнію, яка коливається від 1 до 3 %. Наявність легуючих елементів також має значний вплив. На положення критичних точок суттєво впливають молібден та нікель, вплив хрому менший.

2.2.2. Гартування

Мета гартування отримання високої твердості та зносостійкості поверхневого шару деталі. Нагрівання деталі при гартуванні має забезпечити повну аустенізацію вихідної перлітної чи ферито - перлітної структури чавуна. Для аустенізації чавунні деталі нагрівають на 50 – 70°C вище за точку A_{c1} . Для зняття внутрішніх напружень, які виникають під час гартування, проводять відпуск при температурі 180 - 200°C.

Легуючі елементи уповільнюють дифузію вуглецю в аустеніті, збільшують прогартуваність чавуну і дозволяють розширити діапазон швидкостей охолодження при гартуванні. Це дає можливість використовувати більш м'які гартівні середовища (до прикладу масло на заміну води), внаслідок чого зменшується рівень гартівних напружень та деформацій.

Підвищення температури аустенізації на 100 - 150 °С вище t_{Ac_1} не сприяє підвищенню твердості, так як в структурі збільшується кількість залишкового аустеніта і твердість загартованого чавуна буде на 20 - 30 НВ нижчою. При наявності в структурі фериту час витримки для повної аустенізації збільшують. Це зумовлено поліморфними та дифузійними процесами.

При проведенні індукційного поверхневого гартування, яке визначається швидким нагріванням та короткою витримкою при температурі аустенізації важливе значення для одержання високої загартовуваності та прогартовуваності відіграють склад та вихідна структура чавуну. Загартовуваність буде вищою при гартуванні чавуну з однорідною структурою металевої основи. Наявність в структурі фериту зменшує загартовуваність [2]. Хром в чавуні значно зменшує кількість структурно вільного фериту і сприяє утворенню перліту високої степені дисперсності.

Легуючі елементи підвищують прогартовуваність та загартовуваність чавуна при індукційному гартуванні. При наявності в структурі значної кількості фериту вплив легуючих елементів не значний.

2.2.3. Поліпшення.

Чавунні виливки для отримання комплексу властивостей – таких як достатня міцність, твердість, низька крихкість, мінімум залишкових напружень піддають поліпшенню – це гартування з високим відпуском. В залежності від температури відпуску можна отримати структуру троститу відпуску, чи сорбіту відпуску, які твердіші за ферито-перлітну чи перлітну структуру вихідного чавуну. Температуру вибирають залежно від вимог, які висувають до деталей. Витримку розраховують за таких умов – 1 година на кожні 25 мм товщини стінки [7].

2.2.4. Нормалізація

Виливки із сірого чавуну піддають нормалізації для отримання перлітної металевої структури, підвищення механічних властивостей та зносостійкості чавуна з вихідною феритною та ферито-перлітною структурою. Нормалізація передбачає аустенізацію структури з наступним охолодженням виробів на повітрі. Складні виливки рекомендовано охолоджувати на повітрі до 500°C, а потім в печі із швидкістю 30 - 40°C/год. для усунення напружень. Витримка при температурі аустенізації – 1 година на 25 мм товщини перерізу вилівка. При аустенізації відбувається розчинення вуглецю (графіту) в металевій основі чавуну, підвищується кількість зв'язаного вуглецю. При підвищенні вмісту кремнію в чавуні кількість перліту в нормалізованому чавуні зменшується.

1.3.7.4. Відпал для усунення напружень.

Зменшення залишкових напружень у виливках відбувається внаслідок пластичних деформацій під дією внутрішніх чи зовнішніх напружень. Швидкість пластичної деформації залежить від рівня напружень та температури. Для пришвидшення процесу зняття напружень виливки нагрівають, проводять відпал. Температура відпалу хоч, вона не повинна створювати умови для пришвидчення процесів коагуляції евтектоїдного цементиту та його розпаду, що знижує міцність та твердість виливок. Температура відпалу не повинна перевищувати значення, вище яких починається інтенсивне падіння механічних властивостей чавуна (рис.2.3)

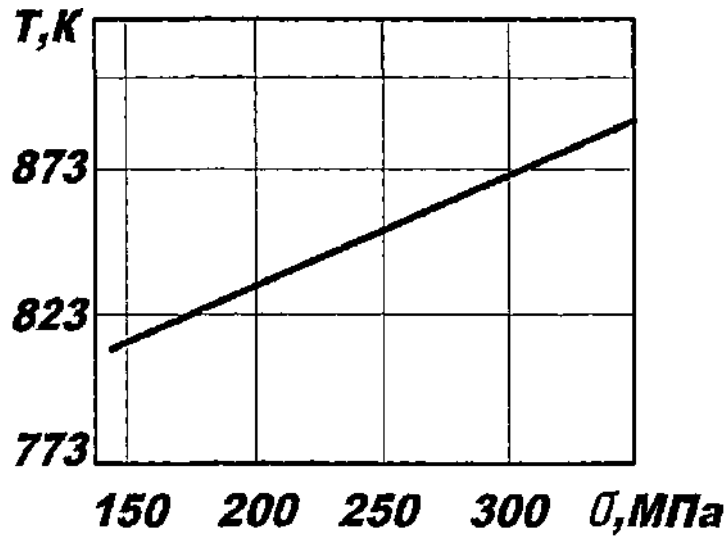


Рисунок 2.3 - Вплив межі міцності на максимально допустиму температуру відпалу для усунення напружень в залежності від марки чавуну.

В таблиці 2.6 наведені допустимі температури відпалу для зняття напружень в залежності від марки чавуну.

Таблиця 2.6. Температури відпалу

Матеріал	Марка чавуну					
	СЧ10	СЧ15	СЧ20	СЧ25	СЧ30	СЧ35
Температура °С	520	520	560	570	600	600

Підвищення температури відпалу зумовлене зниженням вмісту кремнію в чавуні при підвищенні марки. Вплив температури нагрівання на повноту зняття залишкових напружень показано на рис.2.4. Відмінність температур відпалу для усунення напружень для чавунів різних марок пояснюється різним вмістом кремнію, який прискорює графітизацію. Згідно державному стандарту кількість кремнію в чавуні зменшується при підвищенні марки (табл. 2.7):

Таблиця 2.7. Рекомендовані температури відпалу сірих чавунів.

Марка чавуну	СЧ10	СЧ15	СЧ20	СЧ25	СЧ30	СЧ35
Температура відпалу, °С	520	520	560	570	600	600

Вплив температури відпалу на зняття залишкових напружень показано на рис .2.4 1.8.

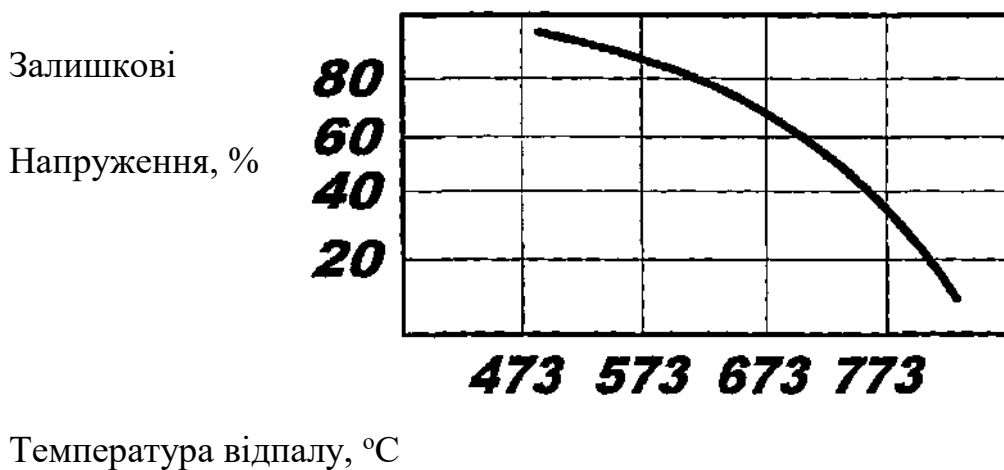
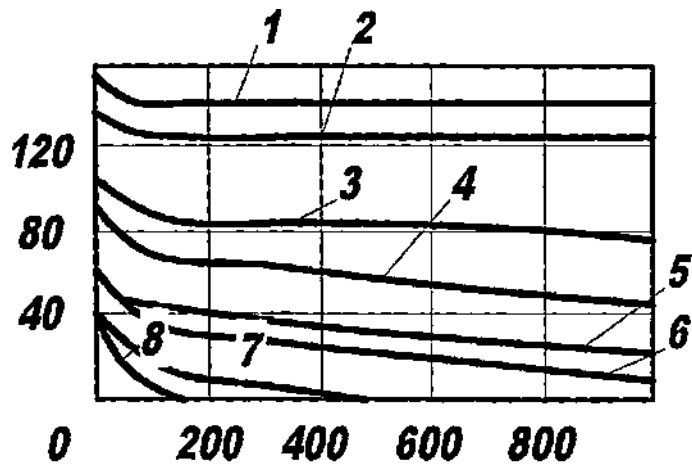


Рисунок 2.4 - Вплив температури відпалу на величину залишкових напружень

При заданій температурі ступінь зниження залишкових напружень залежить від тривалості витримки (рис. 2.5)

Залишкові напруження, %



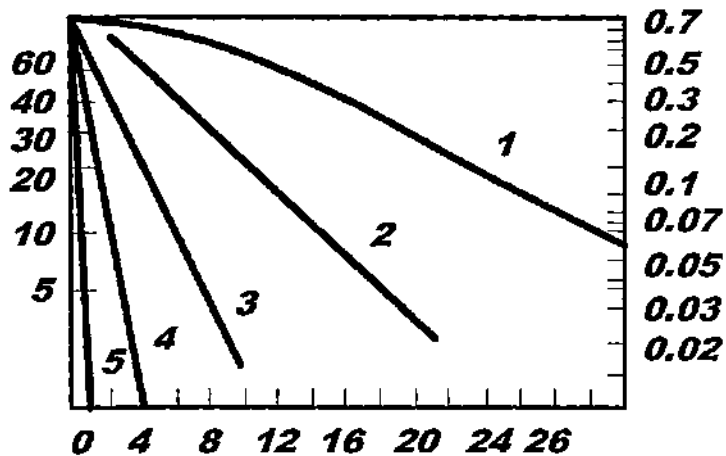
Час витримки, хв.

Рисунок 2.5- Вплив тривалості витримки на величину залишкових напружень при різних температурах відпалу, К: 1 – 295, 2 – 588; 3 – 700; 4 – 705; 5 – 783; 6 – 811; 7 – 839; 8 – 866.

Вплив температури і тривалості відпалу на зміну кількості зв'язаного вуглецю і перліту в структурі чавуну показано (рис.2.6)

Перліт, %

СЗВ.



Тривалість відпалу, год.

Рисунок 2.6 - Вплив тривалості витримки під час відпалу сірого чавуну на кількість зв'язаного вуглецю $C_{зв}$. І кількості перліту в структурі при різних температурах, °С: 1 -550; 2 – 600; 3 – 650; 4 – 700; 5 – 750.

Легування сірого чавуну хромом, нікелем, міддю суттєво підвищує допустиму температуру відпалу та зменшує зниження твердості чавунних виливок (табл.2.8).

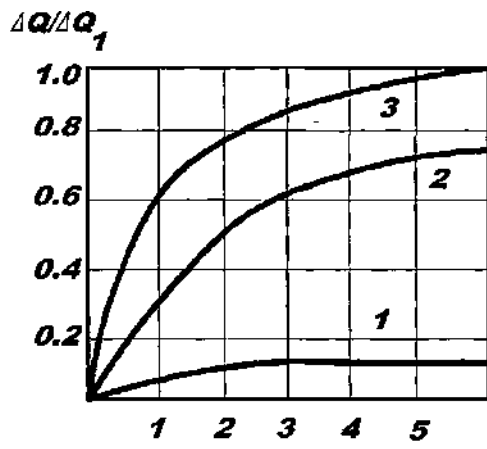
Таблиця 2.8 Вплив легування і температури відпалу на твердість та величину напружень у виливках блоку циліндрів. (головки циліндрів)

Вміст легуючих елементів, %			Вихідна твердість, НВ	Твердість, НВ при температурі відпалу, Т, К			Зняття напружень після відпалу, % до вихідних значень, при Т, К		
Cr	Ni	Cu		848	873	923	848	873	923
0,45	0,3	0,4	197	200	183	143	80	80	95
0,60	0,4	0,6	235	235	217	183	80	80	95

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що при підвищенні легуваності чавуну відпал можна проводити при більш високій температурі і внутрішні залишкові напруження знімати повніше. Тривалість витримки при температурі відпалу сягає 1,0 – 1,5 години для виливок з товщиною стінки до 20 мм і збільшується на 1.0 – 1,5 години на кожні 25 мм товщини перерізу.

Значний вплив на величину залишкових напружень має швидкість охолодження при виконанні відпалу. Швидкість охолодження для виливок простої форми не має перевищувати 200°С/на год. Швидкість охолодження до 150 °С має бути тим нижчою, чим складніша конфігурація виливка.

(рис.2.7) Для виливків складної форми швидкість охолодження не має перевищувати 10 – 30°C/на год., для простих виливок може бути 150°C/на год.



Витримка, місяці

Рисунок 2.7 – Відносне жолоблення Q/Q_T кільцевих зразків, охолоджених після відпалу при 873К: 1 – до 323 К з швидкістю 282 К/год.; 2 – 323К з швидкістю 303К/год.; 3 – до 623К з швидкістю 303 к/год.; подальше охолодження на повітрі.

За 100% вибрано жолоблення 3 зразків за 6 місяців [23]

2.2.5. Низькотемпературний відпал для підвищення оброблюваності.

Відпал виливок проводять при температурах близьких до A_3 , це забезпечує розпад евтектоїдного цементиту в перліті на ферит і графіт та суттєве зниження твердості і міцності чавуна. На положення точки A_3 в сірому чавуні дуже активно впливає кремній. Збільшення вмісту кремнію на 1% знижує температуру точки A_3 на 100°C, тому для сірих чавунів при збільшенні вмісту кремнію від 1 до 3% температуру відпалу знижують від 750 до 680°C. Тривалість витримки при температурі відпалу сягає 5 – 6 годин. Збільшення витримки не є ефективним. Вплив тривалості відпалу при 700°C на механічні властивості чавуну показано в табл 2.9.

Таблиця 2.9. Вплив тривалості відпалу на властивості чавуну.

Показник	Тривалість витримки, годин при 700 °С					
	вихідні значення	2	4	6	8	12
σ_B МПа	251	235	215	200	204	201
НВ	197	197	179	179	137	137

Легування хромом, нікелем, молібденом, міддю стабілізує евтектоїдний цементит і тому знижує швидкість його розпаду, а отже і інтенсивність зниження твердості.

Як зауважують більшість дослідників термічну обробку застосовують переважно для легованих сірих чавунів, для звичайного сірого чавуну вона не ефективна [3,4].

2.2.6. Термічна обробка і поверхневе хромування сірого чавуну при дифузійному окисненні.

Дифузійне окиснення у порівнянні з поверхневим гартуванням володіє деякими особливостями і перевагами:

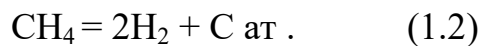
- незалежність від зовнішньої форми виробу. Обробці підлягають і складні і прості за формою виробу, на яких формується зміцнений шар однакової товщини.
- Більша різниця між властивостями серцевини та поверхні, ніж при поверхневому гартуванні. При дифузійному окисненні різниця властивостей визначається різною будовою та складом, а при поверхневому гартуванні тільки різницею в будові чавуну.
- Дефекти перегріву поверхні при дифузійному окисненні можуть бути виправлені наступною термічною обробкою. При поверхневому

гартуванні перегрів не може бути усунений так як ця операція є завершальною.

При дифузійному окисленні деталь розміщують в середовищі, яке багате на елемент, який дифундує в метал. активних

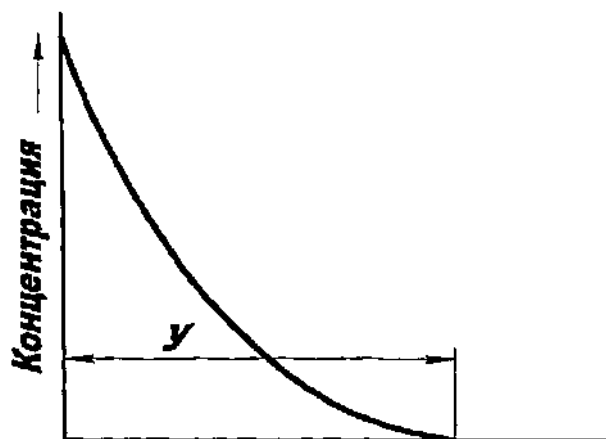
В газовому середовищі при дифузійному окисленні відбувається три елементарних процеси.

Перший процес – дисоціація, полягає в розпаді молекул і утворення атомів дифундуючого елемента. До прикладу,



Другий процес – абсорбція – поглинання поверхнею виробу вільних атомів. При цьому утворюються активні атоми вуглецю, здатні розчинятися в металі. Ступінь розпаду молекул газу називається ступенем дисоціації (%).

Третій процес – дифузія - проникнення насичуючого елемента в глиб деталі, якщо він здатний розчинятися в основному металі. В результаті утворюється дифузійний шар, на поверхні якого концентрація дифундуючого елемента найбільша і при віддаленні від поверхні концентрація падає (рис.2.8) . Глибина проникнення відповідає товщині насиченого шару. Так поводить себе дифузійний шар, коли дифундуючий елемент утворює з металом виробу систему неперервних твердих розчинів.



Відстань від поверхні

Рис.2.8 - Зміна концентрації дифундуючого елемента по глибині поверхневого шару деталі.

Якщо насичуючий елемент утворює з основним металом систему сплавів з обмеженою розчинністю чи хімічну сполуку, то насичення відбувається менш активно і концентрація на поверхні не досягає 100%, а товщина зміцненого шару вимірюється в мікрометрах.

Для підвищення поверхневої твердості, зносостійкості, корозійної стійкості поверхню виливок із сірого чавуну насичують азотом. Азотують сірі перлітні чавуни леговані хромом. Температура азотування 550 – 570°C, витримка 8 - 10 годин. Дисоціація аміаку майже 30%. Після азотування на глибину 0,4 мм твердість зростає до HV 900. Для підвищення жаростійкості та опору атмосферній корозії сірі чавуни піддають алітуванню – насиченню алюмінієм. Алітування проводять при 900 – 1000°C, витримка 2 – 6 годин, охолодження разом з піччю чи на повітрі

Для підвищення корозійної стійкості в кислотах, чавунні виливки піддають силіціюванню - насиченню поверхні кремнієм обробкою в газовому середовищі, яке містить кремній чи феросиліцій [4, 5].

Досить поширеним способом підвищення зносостійкості поверхні деталей із сірого чавуну є нанесення хромових покриттів.

Хромування здійснюють двома методами: дифузійною металізацією [6] та гальваностегією [8,9].

2.2.7. Методи дифузійного хромування.

В залежності від стану активної фази, яка містить хром, відносно металу, що обробляють, виділяють такі методи дифузійного хромування: твердий чи

паро фазовий процес, рідкий і газоподібний. Для твердого чи паро фазового процесу використовують тверді часточки чи порошки хрому або ферохрому. Перенос хрому до поверхні виробів здійснюється через парову фазу, яка виникає внаслідок випаровування хрому при його нагріванні, а не через контакт часточок хрому з поверхнею виробу. При безпосередньому контакті кусочків хрому з поверхнею виробу часто відбувається приварювання їх до поверхні металу, що погіршує поверхню виробу.

Рідкий метод полягає в зануренні виробів в розплав солей хрому $CrCl_3$. При газовому методі активною фазою є газоподібні сполуки хрому: $CrCl_2$, CrF_3 та інші. Найбільш поширеним є спосіб газового хромування, при якому в реакційному просторі присутні летючі сполуки хрому здатні за певних умов осаджувати атоми хрому на оброблювальну поверхню. Хромування в твердому середовищі, яке взаємодіє з газовою фазою, проводять в контейнері з плавким замком, в який завантажують суміші порошоків хрому чи ферохрому, оксиду алюмінію Al_2O_3 і хлористого амонію NH_4Cl . Оксид алюмінію перемішують з порошком хрому чи ферохрому, з метою не допущення спікання часточок хрому. За даними [12] кращі результати забезпечує суміш: 50% $FeCr$, 43% Al_2O_3 ; 7% NH_4Cl . Процес хромування проводять при температурі 1000 – 1100°C. Відбуваються реакції дисоціації сполук з хлором і утворення хлориду хрому $CrCl_2$. На поверхні виробу, як на каталізаторі відбувається дисоціація хлориду з виділенням атомарного хрому. Атомарний хром адсорбується поверхнею сталеві чи чавунної деталі і дифундує в метал, утворюючи твердий розчин хрому в залізі і карбідів хрому Cr_3C_2 . Твердість хромованого шару на вуглецевих сталях 600-1200 HV. Товщина хромованого шару на сталях 0,1 - 0,2 мм, на чавунних виробках значно менша – 0,02 - 0,04 мм. На рис. 2.9 показана мікроструктура хромованого шару на сталі 45. Шар складається із карбідів хрому, під яким знаходиться шар з високим вмістом вуглецю (0,8 %). Утворюється такий шар внаслідок дифузії вуглецю із внутрішніх шарів деталі назустріч хрому. Вуглець володіє більшою

швидкістю дифузії, ніж хром, тому для утвореного карбідного шару витрачається не весь вуглець. Частина його утворює перехідний шар з високим вмістом вуглецю.

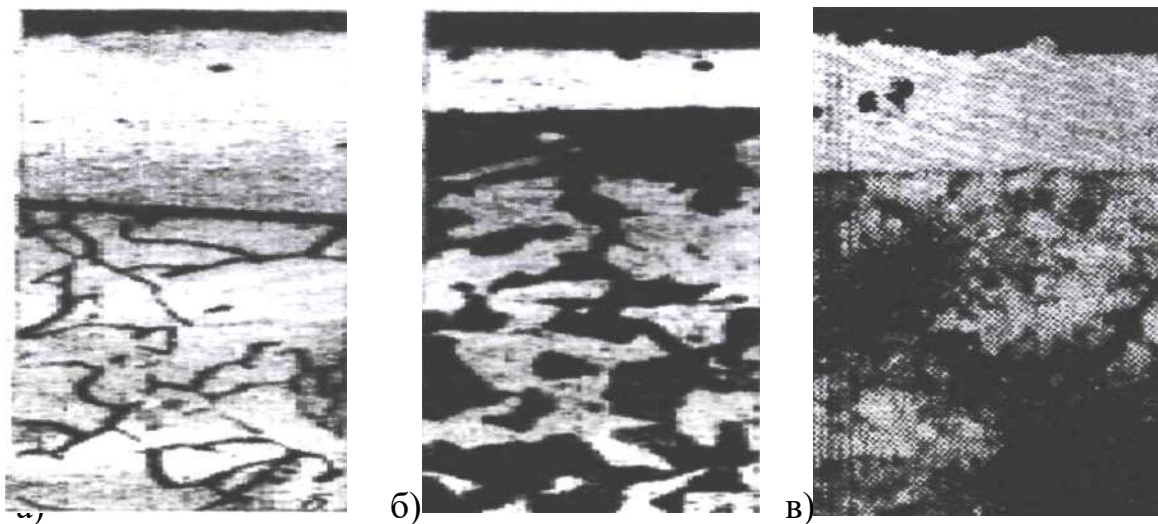


Рисунок 2.9 – Мікроструктура дифузійного шару після хромування:

а – на залізі; б - на сталі 45; в - на сталі У8. х 400.

Автори [8,10] дослідили структуру вуглецевої сталі з хромованим шаром, який нанесено після попереднього зневуглецювання. Зразки піддавались окисненню в печі при 650°C протягом 5 та 20 годин. Хромований шар формувався неконтактним методом із сублімованої фази в печі ОКБ-749 при температурі 1200 °С, з витримкою 10 годин.

На сталях 20, 45, У8 утворилась окалина на глибині 0,05 – 0,07 мм. Під окалиною сформувалась зона внутрішнього окислення товщиною, а під нею –зневуглецьована зона. Після 5 годин окислення її товщина дорівнювала 0,3; 0,1; 0,05 мм відповідно на сталях 20, 45, У8. Після 20 годин витримки товщина окисненої зони збільшилась - 0,5; 0,4; 0,10 мм. Під час відпалу вихідних зразків за режимом хромування ($T = 1200^{\circ}\text{C}$, $t = 10$ год. Тиск $P = 0,2$ мм.рт.ст. відбувалось зневуглецювання поверхневого шару на глибину 0,15 мм. Вуглець вигорав до 0,04%. Після наступного хромування на сталі 20 був отриманий дифузійний шар товщиною 0,38 мм, який мав структуру α –твердого розчину хрому в залізі з тонкою карбідною сіткою по границям зерен. Мікротвердість рівномірно зменшувалась від 300 до 200 МПа на глибині 0,38 мм. Якщо на поверхні утворюється тонкий шар дрібних карбідів, то мікротвердість перевищує 10000 МПа.

В роботі [7] показано, що легуючі елементи, які звужують аустенітну область в сталях підвищують швидкість хромування, тому що швидкість дифузії хрому в фериті більша, ніж в аустеніті.

Автори [8,12] виявили, що розчинність хрому в основному металі досить велика, проте дифузійна рухомість порівняна з рухомістю атомів розчинника. Тому проникнення хрому в глиб зерна відбувається повільніше. Концентрація хрому на границі зерен буде більшою.

Дослідження особливостей концентраційного розподілу хрому при утворенні концентраційного шару показало, що при дифузійному насиченні під час графітизації в поверхневому шарі утворився високохромистий аустеніт, який контактував з карбідами і порушував рівновагу між ними і аустенітом. Рівновага відновлювалась внаслідок дифузії хрому в карбід заліза. Під час витримки збільшувалась кількість хрому в карбідах та твердому розчині.

Цементация низько вуглецевої сталі після хромування, підвищило твердість поверхні деталі з 50 HRC до 57-58 HRC .

Окремі дослідники використовували струм високої частоти (СВЧ) для дифузійного хромування [7,10]. На виріб наносили суміш порошків хрому і хлористого амонію і нагревали СВЧ до потрібної температури. Тривалість процесу хромування завдяки СВЧ скоротилась з 6-8 ч до 10-15 хв., а глибина хромування сягала 0,2 мм при хромуванні заліза і 0,08-0,10 мм при хромуванні сталі. При використанні цього методу мікротвердість дифузійного шару на сталі У8 була 578 HV. Низька твердість дифузійного шару пояснюється дослідниками процесом інтенсивного зневуглицювання поверхні сталі при високих температурах. Дифузійне хромування з використанням СВЧ на практиці впровадження не має. Під час дифузійного насичення відбувається дифузія вуглецю із серцевини назустріч хрому, внаслідок чого вуглець зв'язує хром в карбіди. Це є причиною зниження дифузійної здатності хрому і внаслідок цього зменшується товщина насиченого шару [10]. Як правило, хромуванню піддають сталі з низьким вмістом вуглецю (менше 0,1 %С) або сталі, в яких вуглець зв'язаний в стабільні карбіди, до прикладу титаном.

Дослідження в Інституті проблем матеріалознавства АН України показали можливість заміни металевих порошків їх оксидами [4, 7, 8].

Процес отримання порошків сталей и сплавів с використанням оксидів легируючих металів полягає в змішуванні при певному співвідношенні порошку основи сплаву з оксидами легуєчих металів, сажою і хлориду амонію, упакування отриманої суміші та витримка в печі при температурі дифузійного насичення і переробка в порошок утвореної легованої губки.

За такою технологією виготовлено порошки хромистих сталей з використанням оксиду хрому. Граничний вміст хрому з використанням його оксиду не більше 12%.

Для хромування чавуну поширеним методом є електролітичне осадження хрому на поверхні деталей. Покриття характеризуються високою твердістю

3,5-11,0 ГПа, низькими пластичними властивостями, значними внутрішніми напруженнями (до 10 ГПа), високою міцністю зчеплення з сталеву основою. Хром володіє антифрикційними властивостями має низький коефіцієнт тертя ковзання в парі хром - сталь в умовах сухого тертя - 0,15-0,18, а в мастилі - 0,13. Опір механічному зношуванню хромованих деталей підвищився у 5-10 разів. Таким чином, якщо при дифузійній металізації отримують твердий розчин хрому в залізі, то при електролітичному покритті отримують на поверхні плівку хрому, яка володіє кращими антифрикційними властивостями.

Хромування переважно використовують для підвищення поверхневої зносостійкості сірих чавунів. Всі методи хромування вимагають спеціального обладнання та реактивів, є дорогі. Товщина зміцненого шару декілька мікрон.

Хромований шар надає сплавам на основі заліза та вуглецю високих фізико-механічних властивостей. Хромовані чавуни можна використовувати для зубчастих коліс, коли потрібно підвищити їх зносостійкість при високих контактних тисках і циклічних навантаженнях та інших деталей, які працюють в умовах тертя та зношування.

2.2.8. Лазерна обробка поверхні деталей із сірого чавуну.

Після лазерного гартування поверхневий загартований шар деталей із сірого чавуну має структуру білого чавуну. Мікроструктура сірого чавуну після обробки неперервним CO_2 - лазером показана на рис.2.10. Після обробки лазером утворилось дві зони - зону оплавлення і зону гартування з твердої фази. В оплавленій зоні графіт розчиняється в розплаві і після охолодження в поверхневій зоні формується структура білого чавуну без виділення вільного графіту.



Рисунок 2.10 – Мікроструктура сірого чавуну після зміцнення лазером.

Доевтектичний білий чавун починає кристалізуватись з виділення первинних кристалів аустеніту, а потім при 1147°C кристалізується евтектика - дрібнозерниста суміш кристалів аустеніту і цементиту, які мають дендритну будову. Утворюється структура ледебуриту. Присутність в зоні оплавлення графіту пояснюється його неповним розплавленням, а також надходження його з нижніх шарів. Пори у поверхні виникли внаслідок виділення газу, адсорбованого на графіті. Для зменшення пор рекомендовано проводити вакуумну обробку перед лазерним гартуванням або зменшення густини потужності випромінювання та швидкості обробки. Такі заходи сприяють зменшенню тріщин, які досить часто виникають при обробці оплавленням. Зміцнення чавунів з оплавленням при високій густині потужності не рекомендоване.

Лазерна обробка чавунів має суттєві недоліки:

- обробці піддають чавуни з дрібними включеннями графіту – ковкі та високоміцні;

- зона зміцнення мала – мікрметри і потребує шліфування;

- покриття може мати дефекти – пористість;
- висока вартість обладнання та його обслуговування.

2.2.9. Застосування сірого чавуну для деталей машин

В конструкції автомобілів та тракторів маса деталей із сірого чавуну сягає 15 – 25%. Основними з яких – блоки, головки, гільзи циліндрів, кришки корінних підшипників, гальмівні диски і диски зчеплення, гальмівні барабани, які працюють в умовах сухого тертя з високими швидкостями ковзання, повинні забезпечувати в парі з фрикційними пластмасами стабільний коефіцієнт тертя і зносостійкість. Основний дефект таких деталей – термічні тріщини, які утворюються внаслідок тепла, що виділяється в контактній фрикційній парі, та наступного швидкого охолодження. Для гальмівних барабанів і дисків середньої навантаженості використовують сірий чавун марок СЧ20, СЧ25 (табл.2.1). При високій навантаженості деталей, коли на поверхні тертя утворюються термічні тріщини, використовують спеціальні високо вуглецеві чавуни з підвищеним рівнем легування. Для важких умов роботи рекомендовані перлітні чавуни з вермикулярним графітом.

Антифрикційні чавуни використовують для виготовлення підшипників ковзання, втулок та інших деталей, що працюють в парах тертя. Такі чавуни повинні забезпечити малий коефіцієнт тертя та зносостійкість. Антифрикційні властивості чавуну визначаються співвідношенням перліту і фериту в основі, а також кількістю і формою графіту .

Деталі, які працюють в парі з загартованими чи нормалізованими сталевими валами, виготовляють із перлітних сірих чавунів. Для роботи в парі з термічно необробленими валами використовують ферито - перлітний чавун.

Перлітний чавун, який містить підвищену кількість фосфору (0,3-0,5%), використовують для виготовлення поршневих кілець. Висока зносостійкість кілець забезпечується металевою основою, структура якої

дрібнопластинчастий перліт з рівномірно розподіленими ділянками фосфідної евтектики та ізольованими виділеннями пластинчастого графіту.

2.2.10. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зроблений аналіз умов роботи блоку циліндрів показав, що найбільш напруженими та уразливими поверхнями, є робочі поверхні, а саме - поверхні циліндрів, посадочні поверхні, які зазнають значного зносу під час експлуатації. Враховуючи, що блок циліндрів є складною, дороговартісною деталлю, виготовлення якої потребує значних витрат фізичних та матеріальних, то його доцільно відновлювати, незважаючи на труднощі, які при цьому виникають.

Аналіз сучасних методів поверхневого зміцнення деталей із ферито-перлітного сірого чавуну показав, що традиційні методи термічної і хіміко-термічної обробки не застосовують. Поверхнєве гартування СВЧ не застосовують із-за досить тривалого процесу перетворення фериту в аустеніт, який при СВЧ не забезпечується. Об'ємне гартування може забезпечити формування тільки перлітних структур.

Дифузійне хромування не використовують тому що високий вміст вуглецю в чавуні не дозволяє хрому із-за утворення карбідів, проникати на глибину більшу ніж 0,02-0,04 мм.

Електролітичне хромування досить дорогий та складний процес, який дозволяє наносити покриття товщиною до 0,05-0,06 мм, а в ремонтному виробництві товщина покриття на порядок більша і має сягати 0,2- 0,5 мм.

Використання лазерного поверхневого зміцнення чавунів має також суттєві недоліки: висока вартість обладнання, низька стійкість робочих органів, використання спеціальних обмазок.

На основі викладеного матеріалу визначена Мета та Задачі досліджень.

Мета роботи – підвищити зносостійкість робочих посадочних поверхонь блоку циліндрів з сірого чавуну поверхневим зміцненням в середовищі оксидів для забезпечення зносостійкості поверхні при мінімальних змінах вихідної структури та макрогеометрії.

Задачі досліджень : розробка технологічного процесу отримання зносостійкого шару на поверхні чавунних деталей в середовищі оксидів заліза та хрому.

Завдання по роботі

1. Виконати теоретичний аналіз процесу дифузійного окислення оксидами заліза та хрому фериту в поверхневому шарі сірого чавуну з метою перетворення його в перліт .
2. Дослідити особливості формування мікроструктури поверхневого шару деталі в процесі дифузійного окислення структурних складових чавуну оксидами заліза та хрому (FeO та Cr_2O_3).
3. Дослідити хімічний склад зміцненого шару деталі.
4. Дослідити фізико-механічні властивості зміцненого шару.
5. Запропонувати технологію дифузійного хромування поверхневого шару деталей із сірого чавуну оксидом хрому для отримання мартенситних структур.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Теоретичне обґрунтування вибраних досліджень

3.1.1. Теоретичне обґрунтування дифузійного процесу окислення структурних складових сірого чавуну оксидами заліза та хрому.

Окислення сірого чавуну киснем повітря чи киснем, яке використовується сьогодні, не може вплинути на мікроструктуру основи чавуна, так як молекула кисню не розчиняється в сплаві і реагує тільки з графітом.

Якщо створити умови для окислення чавуну оксидами, які можуть дисоціювати на поверхні чавуну з виділенням атомарного кисню, то він зможе окислювати не тільки графіт чавуну, але й дифундувати вглиб, окислюючи першим кремній і марганець, які мають більшу спорідненість до вуглецю, а потім і вуглець.

Оксид заліза FeO , а також оксид хрому Cr_2O_3 – активно, здатні окислювати складові металевої основи сірих чавунів при температурі 900 – 1100 °С [10].

Вибір цих оксидів дозволить забезпечити окислення кремнію та легування металевої основи чавуна хромом, внаслідок чого є можливість позбутися фериту і змінити мікроструктуру чавуну та при гартуванні отримати мартенсит. Слідом за киснем має дифундувати хром, який змінить склад металевої основи чавуну та підвищить її прогартовуваність. Для доведення фізико-хімічної взаємодії оксидів заліза і хрому з компонентами основи чавуну проведене термодинамічне дослідження.

3.1.2 Термодинамічний аналіз процесу взаємодії оксиду заліза з кремнієм, марганцем та вуглецем сірого чавуну.

В системі $Si - FeO - SiO_2$ при температурах 900-1100 °С можуть існувати три фази - твердий розчин, оксид заліза и оксид кремнію. В системі 3 компоненти і 3 фази. Відповідно до правила фаз Гіббса число ступенів

свободи системи дорівнює ($C = K - \Phi + 2$) при постійному тиску ($P = const$) система моноваріантна, тобто має одну ступінь свободи.

Термодинамічний аналіз показав, що оксиди заліза і хрому при температурах 900 -1100°C здатні окислювати компоненти основи серого чавуну, отже змінювати структуру металевої основи чавуну. Визначена термодинамічна вигогідність окиснення марганцю, кремнію і вуглецю окалиною і оксидом хрому. Показано, що вуглець може окислюватись так активно, що поверхня чавуну може перетворитися на сталь. Термодинамічні розрахунки дозволили виявити, що в твердому розчині системи $Fe - Cr - C$ при температурах 900 -1100°C можуть утворюватись і твердий розчин хрому в залізі, і карбід хрому Cr_7C_3 .

3.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.

3.2.1. Матеріали та прилади для досліджень.

Для дослідження вибрано сірий чавун марки СЧ20.

Хімічний склад чавуну (табл. 3.1)

Таблиця.3.1. Хімічний склад чавуну СЧ20.

Марка чавуну	Склад хімічних елементів, %				
	C	Si	Mn	S	P
СЧ20	2,7 - 3,6	1,5 – 2,4	0,6 – 1,2	до 0,12	до 0,15

Таблиця 3.2. Механічні властивості чавуну

Марка чавуну	Властивості				
	Механічні			Фізичні	
	Міцність,	Твердість,	Густина,	Лінійна	Коефіцієнт лінійного

	МПа	НВ	г/см ³	усадка, %	розширення при 20 до 200°C К а, 1/К 8,05x10 ⁻⁵
СЧ20	200	131	7,1	1,1	8,05x10 ⁻⁵

Дифузійне окиснення зразків із сірого чавуну проводили в печі з графітовим нагрівачем. Зразки вкладали в алундовий тигель. Зміцнювана поверхня зразків контактувала з оксидом хрому чи закисом заліза. Зразки з оксидами зверху ізолювали від зовнішнього середовища шаром суміші глинозему з графітом. Для проведення окиснення та насичення поверхневого шару зразки нагрівали в печі з силітовими нагрівачами. Охолоджувальним середовищем вибрано воду. Температуру в печі вимірювали вольфрам - ренієвою термопарою. Точність вимірювання $\pm 10^\circ\text{C}$.

Вибір оптимальної температури і тривалості дифузійного окиснення поверхні шару деталей до визначеної товщини визначали математичною обробкою експериментальних даних. При обробці експериментальних даних використані програми Advanced Grapher и Statistika.

Металографічні дослідження зразків проведені на мікроскопах Neophot - 2 при збільшені у 200, 400, 500 и 1000 раз. Структура вихідних зразків чавуну досліджувалась на поздовжньому мікрошліфі по графіту і металевій основі.

Оцінювання структури здійснювали візуальним співставленням структури, що в мікроскопі із структурою еталону відповідної шкали ДСТУ 8833: 2019. На нетравленому шліфі оцінювали: форму (ПГф), розподіл (ПГр), розміри (ПГд) та кількість включень графіту (ПГ). При дослідженні структури металевої основи (на шліфі після травлення) оцінювали: вид структури (Пт), кількість перліту (чи фериту) (П (Ф)),

дисперсність перліту (Пд) та розподіл включень фосфідної евтектики (ФЕр).

Травлення зразків проводили ніталем (3%-ний р-н HNO_3 в спирті).

При дослідженні дифузійного шару виконувались наступні операції:

- вимірювання товщини зони поверхневого зміцнення, мм;
- вимірювання твердості зразків до та після поверхневого зміцнення.
- вивчення мікроструктури нетравлених зразків з вимірюванням товщини зміцнених зон з однаковою мікроструктурою (мм).
- визначення вмісту структурних складових у зміцнених зонах, (%)
- фотографування мікроструктури дифузійного шару;
- визначення кількості перліту чи фериту оцінювали середнім відсотком площі, зайнятої цими структурними складовими на шліфі, визначалось не менше ніж у 3-х точках.

Хімічний склад дифузійного шару визначали хімічним аналізом та за допомогою рентгеноспектрального аналізатора «Inspektor-2000GT», визначення масового вмісту елементів в сплавах виконано рентгенофлуоресцентним методом на спектрометрі «Спектроскан МАКС-G».

Визначення маси зразків до та після експериментів проводили на електронних вагах ВЛ – з точністю до 0,0001г.

Твердість зразків вимірювали твердомірами: за методом Роквелла при навантаженні 1500 Н (HRC), Виккерса - HV (Н).

Мікротвердість структурних складових визначали на приладі ПМТ-3 з навантаженням 0,2-0,5 Н (ДСТУ ISO 6507-1: 2007) [15].

Випробування на зносостійкість проведені на установці для випробування матеріалів на абразивний знос (рис.3.1). Загальний вигляд установки показана на рис.3.1.



Рисунок 3.1 – Установка для випробувань на абразивний знос.

3.3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.3.1 Поверхнєве зміцнення деталей із сірого ферито-перлітного чавуна дифузійним окисненням залізною окалиною (FeO).

Авторами [6] показано, що сталь, яка містить кисень, при нагріванні без доступу повітря дуже схильна до поверхневого знеуглецювання. Активну участь в окисненні приймає кисень, що входить до складу включень (FeO), а не розчинений.

Якщо низько вуглецева сталь містить більше 10 % , то під час її цементації відбувається окиснення вуглецю. Враховуючи ці факти запропоновано доволі простий технологічний процес, коли має відбуватись поверхнєве зміцнення деталей із ферито-перлітного сірого чавуну.

Дифузійному окисненню піддавали циліндричну деталь із ферито-перлітного чавуну СЧ20. Металева основа чавуна: перліт пластинчатий 10 - 40%, з між пластинчатою відстанню від 0,0003 до 0,0008мм, є ділянки з між пластинчатою відстанню 0,0008-0,0013мм; кількість фериту від 90 до 60%.

Вихідна мікроструктура чавуна з рівномірно розподіленим пластинчастим графітом заокругленої форми на травленом шлифе представлена на фото рис.3.2.



Рис.3.2. Мікроструктура чугуна СЧ20, х 200. Травление ниталем

Оцінка форми (ПГф), розподілу (ПГр), розмірів (ПГд) та кількості включень графіту (ПГ): ПГф2 - ПГр1 - ПГд15 - ПГЮ. Площа, зайнята графітом 8-12% (рис.3.3).



Рис. 3.3. Микроструктура чугуна СЧ20 на нетравленном шлифе, х 200

Деталь рис.3.4 завантажували в контейнер, засипали порошком залізної окалини (FeO) з певною дисперсністю часточок, зверху шаром глинозему з графітом. Деталь нагрівалась контактуючи з залізною окалиною при $900 - 1100^{\circ}C$ в печі з графітовим нагрівачем, витримували в печі декілька годин і повільно охолоджували. Попередні дослідження показали, що при такому способі окислення сірого чавуну на поверхні деталі формується видима ділянка, що за структурою відповідає сталі. Ніяких дефектів на поверхні деталі не виявлено.

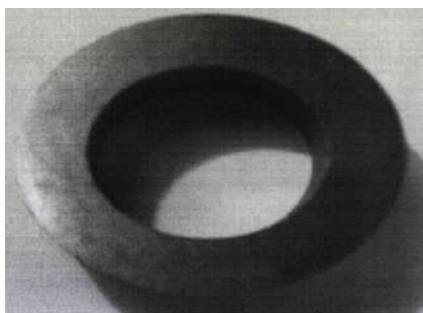


Рис. 3.4 – Деталь з чавуну, яка піддавалась окисленню

На дослідних зразках виміряна товщина окисненого шару, твердість та мікротвердість, мікроструктура до та після окислення.

На рис. 3.5. показана мікроструктура окисненого шару, який отримано внаслідок взаємодії поверхні деталі з окалиною при температурі 1000°C , протягом 8 годин (шліф після травлення).

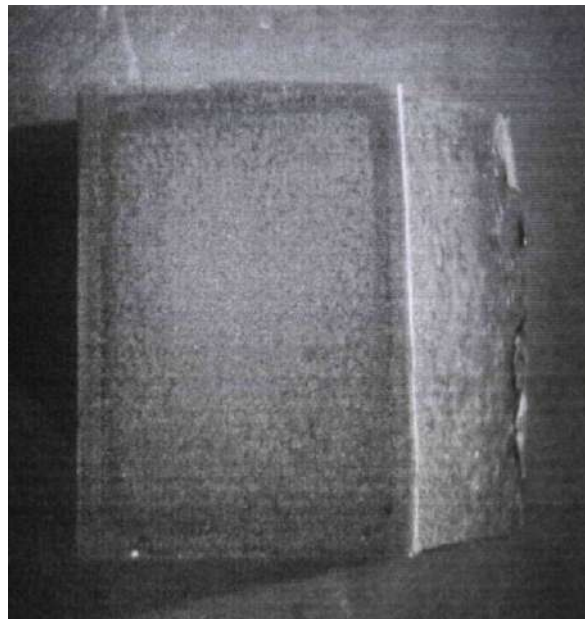


Рис.3.5 Макроструктура окисленого шару після взаємодії з сірого чавуну з
окалиною х4.



Рис. 3.6 - Мікроструктура окисленого шару на нетравленому шліфі (а) і
кулясті включення графіту в цьому шарі х 300.

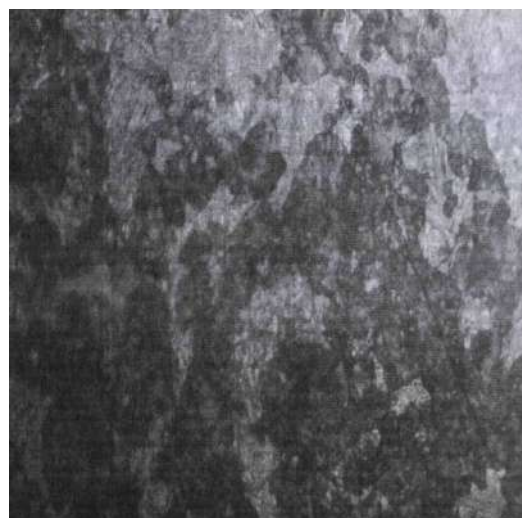
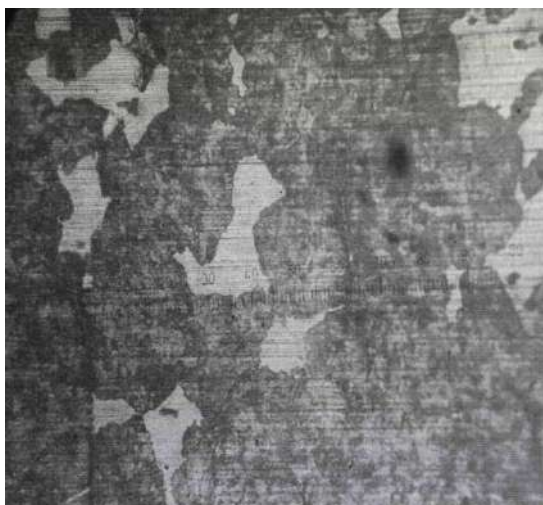


Рис. 3.7 - Мікроструктура окисленого шару на нетравленому шліфі (а) і кулясті включення графіту в цьому шарі $\times 300$.

Окиснена зона досить однорідна, ніяких дефектів не виявлено. Межа між структурою і окисненим шаром чітка. Зона термічного впливу відсутня.

Включення графіту мають кулясту форму і досить дрібні. Площа, яку займають включення графіту - 2%.

Після окиснення окалиною структура окисненого (дифузійного) шару на травлених шліфах ставала перліто-феритною, кількість фериту на шліфі не перевищувало 20% (рис. 3.7 а)



а)

б)

Рисунок 3.7 - Структура чавунних зразків після окиснення: а) – після повільного охолодження; б) – після швидкого охолодження.

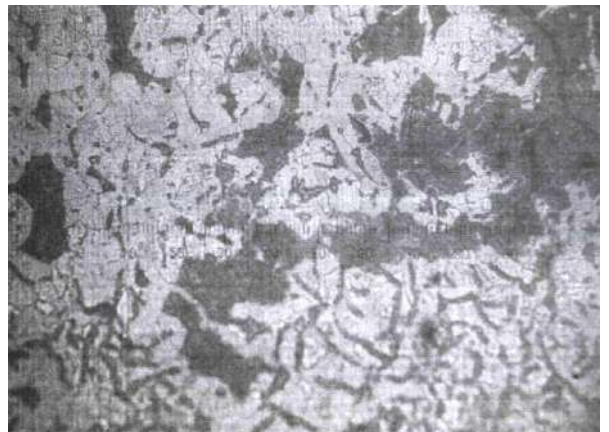
Після швидкого охолодження, перліто - феритна структура окисненого шару перетворювалась на структуру мартенситу - перліто – аустенітну (рис.3.8, б), а ферито-перлітна - в перлітну (рис.3.9).

Рисунок 3.9 – Структура окисленого шару після швидкого охолодження

На рис.3.10 показана границя чавуну і окисленого шару після швидкого охолодження.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Мікроструктура границі чавуну і окисленого шару до - (а) та після зміцнення (б), х 400.

Розподіл графіту і мікроструктура окисленого шару деталі після взаємодії чавуну з окалиною до та після зміцнення.

Окиснений шар деталі після взаємодії з окалиною FeO .

Таблиця 3.3 Структурні складові в чавунній деталі до і після обробки.

Структурні складові	
До зміцнення	Після зміцнення
Точкові включення графіту	Точкові включення графіту
Ферит -18%, Перліт – 80%, Графіт – 2%	Мартенсит- 63%; Перліт- 30%; Аустеніт - 5%; Графіт -2%
Гф2-Гд90-180-Гр2-П2	Гф2-Гд90-180-Гр2-Г12 Перліт-100%
Феррит-90%; Перліт-10%	Перліт-100%

Відповідно при вмісті аустеніту 4% середній вміст вуглецю в зміцненому шарі – 0,5%.

При окисненні сірого чавуну окалиною на поверхні деталі утворився шар фериту після охолодження у воді (табл. 3 7). При збільшенні тривалості та температури витримки при окисненні чавуну товщина зміцненого шару збільшується:

з 0,11 до 0,41 мм при 900°С, з 0,30 до 0,70 мм при 1000°С і з 0,64 до 1,02 мм при 1100°С.

Таблиця 3.4. Товщина дифузійного шару

Температура,°С	Час витримки, год.	Товщина шару, мм	
		Феритна стрічка	Дифузійний шар
900	2	0,03	0,11
	4	0,08	0,26
	8	0,13	0,41

1000	2	0,08	0,30
	4	0,12	0,48
	8	0,17	0,70
1100	2	0,11	0,64
	4	0,15	0,84
	6	0,18	0,90
	8	0,21	1,02

3.3.2 Планування і обробка двох факторного експерименту по вивченню впливу температури та тривалості витримки на товщину зміцненого шару під час дифузійного окислення окалиною деталей із сірого чавуну.

Для пошуку рівняння регресії залежності товщини зміцненого поверхневого шару деталей із сірого чавуну від впливу температури та тривалості дифузійного окиснення окалиною проведено двох факторний експеримент.

На першому етапі проведено повний факторний експеримент з метою виявлення питомої ваги кожного фактору на товщину зміцненого шару, а також перевірити гіпотезу про відсутність взаємного впливу температури та тривалості витримки.

Була отримана адитивна безрозмірна модель експерименту у вигляді неповного полінома другого степеня. Ця модель була розкодована в більш зручний вигляд для використання в інженерній практиці.

Експеримент проводили в такому діапазоні варіювання факторів: температура: $T = 900.. 1100^{\circ}\text{C}$; час витримки = 2.. .8 годин.

Аналіз рівняння показав, що найбільший вплив на товщину зміцненого шару має температура (X_i), так як коефіцієнт регресії при цьому факторі найбільший. Взаємний вплив температури і тривалості витримки в експерименті – незначний.

Рівняння регресії експеримента другого порядку має такий вигляд.

$$g = 10,7689 - 0,0196 T + 0,1304t + 8,817 \cdot 10^{-6} T^2 - 0,0082t^2 \text{ мм.}$$

Отримана математична модель дозволяє призначати технологічні режими для досягнення заданої товщини дифузійного шару деталей з чавуну окислених окалиною.

3.3.3. Хімічний склад дифузійного (окисленого) шару

Хімічний склад дифузійного (окисленого) шару досліджено на зразках у формі втулок з товщиною стінки 1,6 мм та 1,2 мм (рис. 3.11).

Втулки окиснювались з поверхні і зсередини окалиною при температурі 1100°C та 1000°C, витримка при цих температурах 4 і 8 год.

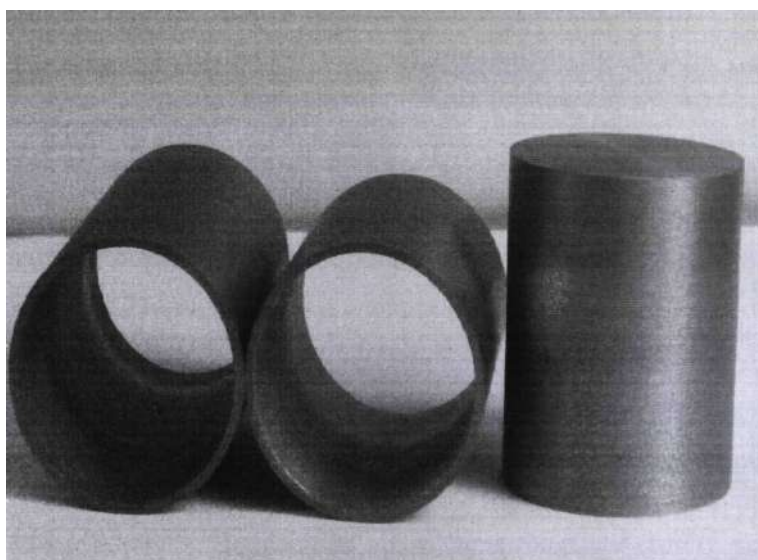


Рис. 3.11 – Зразки для визначення хімічного складу дифузійного шару. Мікроструктура поперечного перерізу втулок була перлітною, що свідчить про повне окиснення поперечного перерізу зразка. Зразки піддавали хімічному аналізу. Результати аналізу втулок показані в табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Хімічний склад дифузійного шару після взаємодії окалини з основою ферито-перлітного сірого чавуна.

Температура, °C	t, год.	Вміст елементів, %		
		C	Mn	Si
1000	4	0,49	1,1	2,16
	8	0,18	0,90	2,36
1100	4	0,28	0,90	2,30
	8	0,15	0,82	2,32

Процеси, які відбуваються при взаємодії закису заліза (FeO) з графітом і металевою основою чавуну при 900-1100°C і наступного зміцнення можна описати так:

- окиснення вуглецю основи ферито-перлітного сірого чавуну;
- перетворення фериту основи чавуну в перліт і зародження аустеніту;
- зустрічна дифузія вуглецю із внутрішніх шарів сплава до поверхні через аустеніт і продовження окиснення вуглецю;
- розчинення графіту в аустеніті;
- перетворення аустеніту на мартенсит.

Стримуючою ланкою є швидкість дифузії вуглецю в аустеніті.

Для поверхневого зміцнення деталей нагрівали до 900 - 950°C, витримували при цій температурі 30 хв. і охолоджували у воді. Після зміцнення проводили стабілізуючий відпуск при 180 - 200°C. Зміцнена зона мала структуру мартенситу, перлиту, аустеніту і дрібних кулястих включень нерозчиненого графіту.

3.3.4 Твердість і зносостійкість зміцненого поверхневого шару деталей із ферито-перлітного сірого чавуну .

Твердість окисленого шару деталі після нагрівання та охолодження з швидкістю $V_{охол.} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ дорівнює 40-42 HRC. Таку твердість має ковкий чавун після гартування струмом високої частоти. На рис. 3.12 показано розподіл мікротвердості по товщині дифузійного шару після дифузійного окиснення деталі із сірого чавуну окалиною. Мікротвердість поверхневого шару чавуну збільшилась у 2 рази.

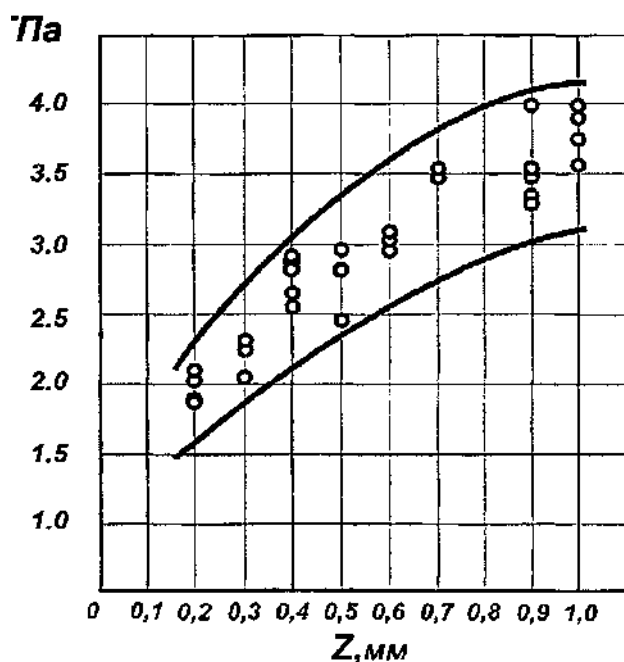


Рис. 3.12. – Розподіл мікротвердості по товщині дифузійного шару після взаємодії поверхні деталі із чавуну СЧ20 з окалиною при 1000 °С та охолодження у воді. При підвищенні температури дифузійного окиснення вміст вуглецю в

дифузійному шарі зменшується і мікротвердість його падає. Подібні структури і мікротвердість отримали після плазмової обробки ковкого чавуну з кулястим графітом [11].

3.3.5. Результати випробування на абразивний знос

Зносостійкість зміцненого чавуну визначали за величиною питомої роботи його зносу, яка дорівнює загальній роботі тертя віднесеної до втрати маси зразка [14].

В таблиці 3.6 показані результати випробувань на абразивний знос зразків чавуну С20 після окиснення FeO при $1100^{\circ}C$ протягом 8 годин і зміцнення

За отриманими результатами розрахована питома робота абразивного зносу зміцненого шару сірого чавуну.

Таблиця 3.6 . Знос чавунних зразків

Матеріал	a , Дж/	мг
Сірий чавун СЧ 20	0,15 ±	0,06
Зміцнений шар сірого чавуну	0,33±0,19	

ВИСНОВКИ

1. Доведена можливість дифузійного окиснення основи ферито-перлітного сірого чавуну окалиною FeO при температурах $900 - 1100^{\circ}C$, експерименти показали, що після дифузійного окиснення основи чавуну окалиною ніяких дефектів в окисненому шарі не виявлено.
2. Знайдена математична залежність товщини зміцненого шару поверхні деталей із сірого чавуну від впливу технологічних параметрів – температури і тривалості витримки при дифузійному окисненні окалиною. Доведена відсутність взаємного впливу температури та тривалості витримки на товщину зміцненого шару.

3. Перетворення структури окисненого шару в мартенситно-перлітну дозволяє підвищити твердість і зносостійкість поверхневого шару товщиною до 1 мм. Абразивний знос зміцненого шару деталі зменшується у 2 рази у порівнянні з абразивним зносом сірого чавуну.

4. Показано, що твердість поверхневого шару деталей із сірого чавуна після дифузійного окиснення і зміцнення не поступається твердості деталей із ковкого чавуну після гартування СВЧ, а мікротвердість поверхневого шару підвищилась у 1,5 - 2,5 рази. Подібні структури і мікротвердість отримували після плазмової обробки ковкого чавуна з кулястим графітом.

3.3.6. Дифузійне хромування ферито-перлітного сірого чавуну оксидом хрому

Теоретичним обґрунтуванням для окиснення компонентів сірого чавуну є каталітична дія поверхні заліза. Враховуючи висновки автора [2], який стверджував, що сталь, яка містить кисень, схильна до сильного поверхневого знеуглецювання при нагріванні без доступу повітря. Активну участь у процесі знеуглецювання проявляє не кисень, розчинений в сталі, а кисень, що входить до складу включень FeO . Як показали проведені дослідження поверхневої енергії заліза вистачає на руйнування молекули оксиду хрому Cr_2O_3 , її дисоціації на поверхні металевої основи сірого чавуну, що забезпечує окиснення вуглецю. Для цього проведено експеримент з порошком чавуну, який змішували з порошком оксиду хрому, суміш засипали в алундовий тигель, нагрівали до $1100^{\circ}C$ і витримували при цій температурі 2, 4, 8 годин. Внаслідок взаємодії чавуну з оксидом хрому часточки чавуну перетворились на сталь з таким хімічним складом [3]:

3.3.7. Обґрунтування процесу окиснення основи ферито-перлітного сірого чавуну оксидом хрому Cr_2O_3 .

Експерименти довели можливість окиснення оксидом хрому вуглецю металевої основи ферито - перлітного сірого чавуну, проте графіт чавуну оксид хрому окиснювати не може.

Можливість дифузійного хромування чавуну оксидами хрому Cr_2O_3 доведена з таких міркувань: оксид хром, окислюючи кремній, зменшує його вміст і так само як закис заліза має сприяти зменшенню фериту в основі сірого чавуну. Вміст хрому від 0,45 % і більше в основі сірого чавуну суттєво зменшує кількість структурно вільного фериту і сприяє отриманню перліту високої дисперсності. Хром в основі чавуну підвищує його твердість і зносостійкість.

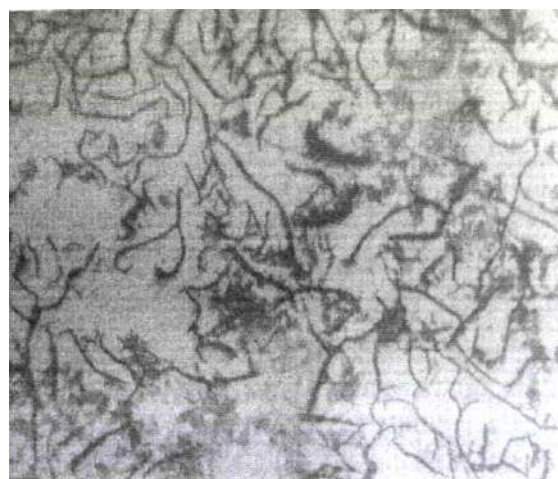
3.3.8. Результати дифузійного хромування ферито-перлітного сірого чавуну оксидом хрому Cr_2O_3

Порошок оксиду хрому отримували розкладанням дихромату амонію $(NH_4)_2Cr_2O_7$ при температурі 200 – 300°C: $(NH_4)_2Cr_2O_7 = Cr_2O_3 + 4H_2O + N_2$

Експерименти проводили на зразках із сірого ферито-перлітного чавуну СЧ20 з структурою металевої основи – ферит, перліт, графіт довжиною 0,03 - 0,06 мм, площа, зайнята графітом, сягала 8 - 12 % (рис.3.13).



а)



б)

Рисунок 3.13- Мікроструктура чавуну СЧ20 (шліф не травлений), х 300



а)



б)

Рисунок 3.14- Мікроструктура чавуну СЧ20 (шліф після травлення), х 300

На рис. 3.14 показана структура металевої основи чавуну після травлення - ферит і перліт пластинчатий з між пластинчатою відстанню від 0,0003 до 0,0008 мм з ділянками фосфідної евтектики, площа, зайнята феритом - от 60 до 90

Для насичення хромом деталь розміщували у відкритому контейнері виробляли при температурах 900 -1100 °С протягом 2, 4 і 8 годин. Зверху оксид хрому присипали шаром глинозему і графіту. Процес відбувався так, що з одного боку деталь окиснювалась оксидом хрому зсередини, а з другого боку – киснем повітря (рис. 3.15).

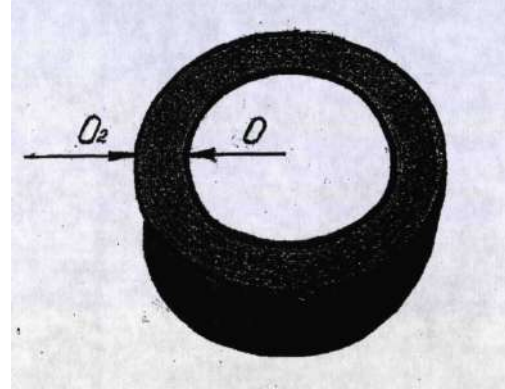
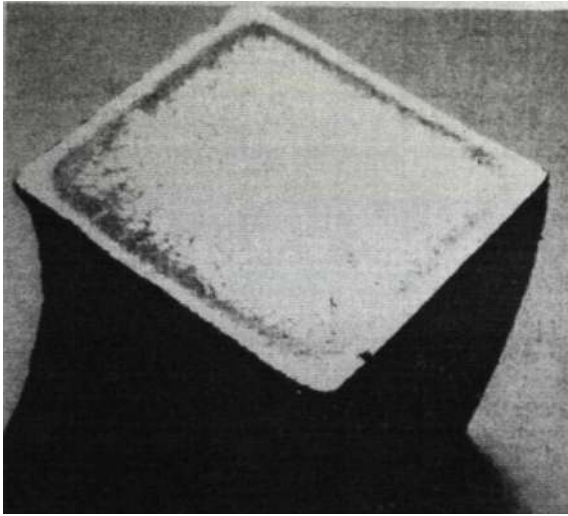
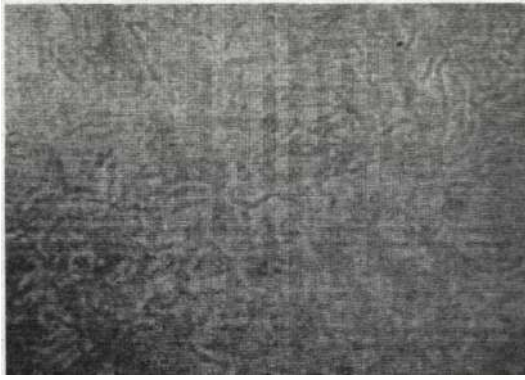


Рисунок 3.15 - Схема окислення деталі із сірого чавуну киснем повітря та оксиду хрому.

Після поверхневого дифузійного окиснення виміряна товщина зміцненої зони, твердість і мікротвердість до та після зміцнення; досліджена мікроструктура на шліфах до травлення та після травлення, визначено відсотковий вміст структурних складових.

а)

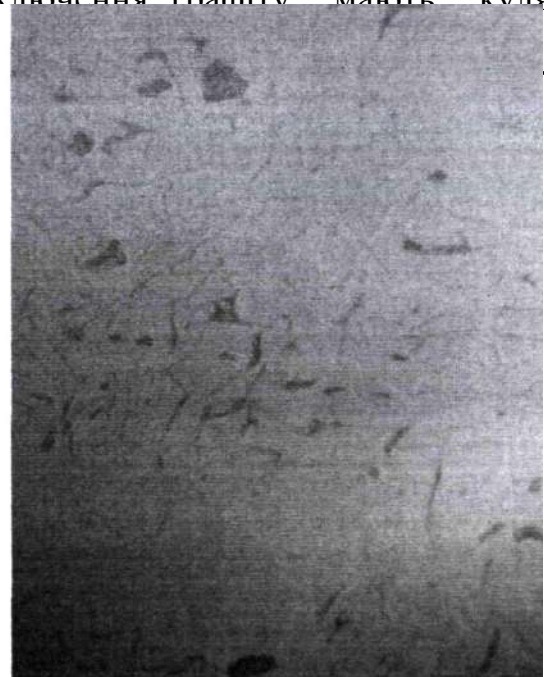
б)



На рис. 3.16– показана мікроструктура шару на нетравленому шліфі. Дифузійна зона досить однородна, ніяких дефектів не виявлено, границя між структурою основи чавуну і дифузійним шаром чітка. Зона термічного впливу не утворилась. Включення графіту мають кулясту



а)



б)

Рисунок -3.17. Дифузійний (окислений шар) на нетравленому шліфі (а) і кулясті включення графіту в цьому шарі (б), х 400.

Після окиснення оксидом хрому і повільного охолодження структура дифузійного шару на травлених шліфах ставала перлітною (рис. 3.18. а).



Рисунок 3.18 – Мікроструктура дифузійного шару після окислення оксидом хрому – (а) та після окислення оксидом хрому і охолодження у воді (б).

Структура дифузійного шару після охолодження з швидкістю $V_{охл} = 200^\circ\text{C}/\text{с}$ перетворювалась на структуру дрібногольчатого мартенситу і залишків графіту. Залишковий аустеніт в структурі відсутній.

Окиснений киснем повітря шар має перлітно - феритну структуру, а після охолодження з швидкістю $V_{охл} = 200^\circ\text{C}/\text{с}$ - тростито – сорбітну .

Структура поверхневого шару, окисленого киснем повітря.

На поверхні деталі утворюється шар фериту - феритна крайка. За ним сформувався дифузійний шар, який має перлітну структуру, що містить хром.

В табл. 3.7 показано розподіл графіту та опис мікроструктури після дифузійного хромування до і після зміцнення.

Таблиця 3.7 Мікроструктура окислених шарів деталі після взаємодії з оксидом хрому та киснем повітря при температурі 1100°C , витримка 8 годин, до та після зміцнення.

Мікроструктура дифузійного шару після хромування оксидом	Мікроструктура чавуну СЧ20	Мікроструктура поверхневого шару, окисленого киснем
--	----------------------------	---

хрому		повітря
До зміцнення		
Кулясті включення графіту. Площа, яку займає графіт - 2 %, перліт - 98%	Пластинчастий графіт з закрученими кінцями . Площа, яку займає графіт - 8 -12 %, ферит – 80%, перліт – 10%	Пластинчастий графіт з закрученими кінцями . Площа, яку займає графіт - 8 %, ферит – 15- 20%, перліт – 65 - 75%.
Після зміцнення		
Кулясті включення графіту. Площа, яку займає графіт - 2 %, основа – мартенсит дрібногольчатий	Пластинчастий графіт з закрученими кінцями . Площа, яку займає графіт - 8 -12 %, сорбіт 90 – 92 %	Пластинчастий графіт з закрученими кінцями . Площа, яку займає графіт - 8 -10 %, троосто –сорбіт – 90 - 92 -%

Процеси, що відбуваються з компонентами металевої основи чавуну та оксиду хрому при 900 -1100 °С можна визначити такими:

- окиснення вуглецю основи і перетворення фериту основи чавуну на перліт високої дисперсності;
- зародження аустеніта;
- дифузія кисню і хрому в феритну крайку;
- зустрічна дифузія вуглецю в феритну крайку із основи сірого чавуну через аустеніт;
- окиснення вуглецю в фериті і дифузія хрому;
- утворення карбіду хрому C_7C_3 ;
- окиснення карбіда хрому в фериті, утворення оксида хрому, окису вуглецю

- та дифузія хрому в аустеніт;
- розчинення графіта в аустеніті;
- перетворення аустеніту на мартенсит.

В таблиці 5.2 показана товщина ферритної кайми і дифузионного слоя в залежності від температури і продовжителюности обробки после предварительных експериментів.

Для пошуку рівняння регресії залежності товщини зміцненого поверхневого шару деталей із сірого чавуну від впливу температури та тривалості дифузійного хромування оксидом хрому проведено двохфакторний експеримент.

Таблиця 3.8 . Товщина ферритної крайки і дифузійного шару в залежності від температури дифузійного хромування і тривалості обробки.

Температура, °C	Час витримки, год.	Товщина шару, мм	
		Феритна крайка	Дифузійний шар
900	2	0,010	0,13
	4	0,022	0,21
	8	0,030	0,26
1000	2	0,024	0,25
	4	0,028	0,48
	8	0,040	0,70
1100	2	0,033	0,61
	4	0,048	0,79
	8	0,080	1,08

3.4. Планування і обробка двохфакторного експерименту при дифузійному хромуванні оксидом хрому деталей із сірого чавуну

Таблиця 3.9. Матриця планування

Рівень	Кодовані значення факторів	Натуральні значення факторів	
		ToC	t, год.
Нижній	-1	900	2
Верхній	+1	1100	8
Основний	0	1000	4
Інтервал варіювання	1	100	2

Експеримент проводили з варіюванням двох факторів:

температури : 900... 1100 °С;

часу витримки: 2...8 часов.

Матриця планування і результатів експерименту представлені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10. Матриця планування

№ досліджу	Черга проведення	X ₀	План		X ₁ · X ₂	Результати дослідів			
			X ₁	X ₂		Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
1	7,12,6	+	-	-	+	0,13	0,12	0,14	0,130
2	2, 9, 11	+	+	-	-	0,51	0,70	0,61	0, 607
3	1, 4, 8	+	-	+	-	0,38	0,34	0,42	0,380
4	3, 10, 5	+	+	+	+	1,04	1,08	1,06	1,060

Рівняння регресії повного факторного експерименту:

$$Y = 0,54 + 0,29X_1 + 0,176X_2 + 0,05 X_1 \cdot X_2$$

Аналіз рівняння показав, що має місце взаємний вплив температури і тривалості витримки на товщину зміцненого шару.

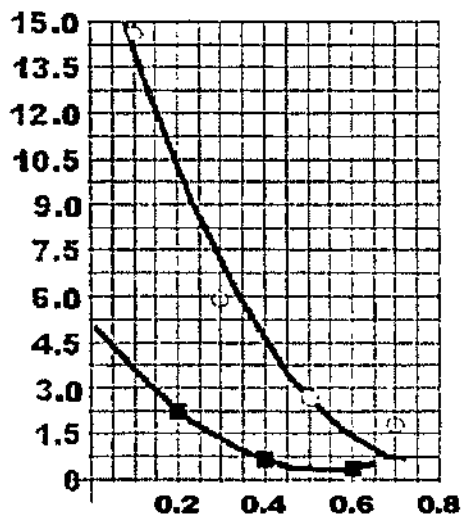
3.5. Хімічний склад хромованого (окисненого) шару.

Хімічний склад дифузійного шару після взаємодії оксида хрому з основою сірого чавуну показано в таблиці 3.11

Таблиця 3.11. Хімічний склад дифузійного шару.

Температура, °C	Окислювач	час, год.	Вміст елементів, %			
			C	Cr	Mn	Si
1000	Оксид хрому	8	0,95	3,44	1,12	2,32
1100	Оксид хрому	4	1,22	2,70	1,20	-
1100	Оксид хрому	8	0,72	4,93	0,90	2,38

Вміст хрому, %



Товщина дифузійного шару, мм

Рисунок 3.19 - Зміна концентрації хрому по товщині дифузійного шару після хромування: о – температура 1100 °С ; п – температура 1000°С.

Хімічний аналіз та мікроскопічні дослідження підтвердили, що механізм утворення дифузійного шару внаслідок взаємодії оксиду хрому з вуглецем чавуну відбувається за адсорбційно-дифузійною моделлю.

Тільки внаслідок дисоціації оксиду хрому на поверхні основи чавуну, наступної дифузії кисню вглиб і дифузії вуглецю в протилежному напрямку, можлива дифузія хрому на глибину до 1 мм. Розчинність хрому в основному металі висока, але його дифузійна рухомість порівнянна з рухомістю атомів розчинника. Оптимальною температурою нагрівання для поверхневого зміцнення є 900 – 1000°С, витримка при цій температурі 20 - 30 хв. Охолодження зразків у воді з витримкою 10 с. Такий режим забезпечує утворення в дифузійному шарі структури голчастого мартенситу. Після зміцнення проводили стабілізуючий відпуск при температурі 180 -200°С.

Механізм запропонованого процесу дифузійного хромування відрізняється від відомих тим, що хром дифундує вглиб тільки тоді, коли кисень окиснить вуглець і карбід хрому і «звільнить» йому дорогу для дифузії.

3.6. Твердість і зносостійкість дифузійного шару.

Твердість дифузійного шару до зміцнення 30-40 HRC, після зміцнення 58-65 HRC. Для порівняння після поверхневого гартування СВЧ твердість високоміцного чавуну з кулястим графітом була 56-63 HRC .

Проведені дослідження показали можливість дифузійного окиснення компонентів металевої основи сірого ферито-перлітного чавуну, внаслідок взаємодії елементів основи чавуну з оксидами заліза (FeO) і хрому (Cr_2O_3) можливе перетворення дифузійного (окисненого) шару поверхні основи чавуну в сталь. Оксиди заліза та хрому окислюють тільки вуглець основи сірого чавуну, а не графіт. Легування дифузійного шару хромом зміцнює ферит і перетворює ферит основи чавуну в дрібнодисперсну перлітну суміш, яка після швидкого охолодження перетворюється на дрібногочастий мартенсит. Окиснення вуглецю і легування чавуну хромом сприяє перетворенню в окисненому шарі фериту на перліт, що підвищує загартовуваність та прогартовуваність дифузійного шару та його твердість і зносостійкість.

3. Товщина дифузійного шару при окисненні чавуну визначається дифузією вуглецю і залежить від температури та тривалості витримки при дифузійному хромуванні оксидом хрому. Дифузійне хромування ферито - перлітного сірого чавуну дозволяє ефективно підвищити твердість дифузійного шару товщиною до 1,0 мм внаслідок зміни структури в зоні окиснення, хромування основи і наступного поверхневого зміцнення

Твердість дифузійного (хромованого) шару після зміцнення і наступного відпуску 58 — 65 HRC і не поступається твердості високоміцного чавуну ВЧ 400 – 15 після лазерної обробки.

Розподіл твердості по товщині дифузійного шару рівномірне. Твердість зростає при збільшенні товщини шару. Дифузійним хромуванням сірого чавуну з наступним зміцненням можливо отримати зміцнений шар в два рази товщий, ніж обробкою лазером.

Таблиця 3.12. Мікротвердість деталі із сірого чавуну після окислення FeO і зміцнення у порівнянні з мікротвердістю такої ж деталі після дифузійного хромування (1100 °C , 8 год.).

Відстань від поверхні, мм	Середня мікротвердість, Н, ГПа	
	Окислення окалиною + зміцнення	Дифузійне хромування (до зміцнення)
0,30	2,19	2,61
0,40	2,62	3,04
0,50	2,54	3,86
0,60	3,04	3,74
0,70	3,50	3,83
0,80	3,64	3,67
0,90	3,84	3,92
1,00	-	4,02

Питома робота абразивного зносу поверхні ферито-перлітного сірого чавуну після дифузійного хромування і зміцнення мало відрізняється від питомої роботи абразивного зносу високо хромистого чавуну.

Присутність включень графіту в умовах зношування підвищує зносостійкість чавуну, так як сприяє адсорбції масла та забезпечує змащування при терті.

Зносостійкість поверхнево зміцнених деталей із сірого ферито-перлітного чавуну після дифузійного хромування збільшилась у 6 -8 разів.

Практична значимість роботи.

1. Розроблена технологія поверхневого зміцнення деталей із сірого чавуну дифузійною обробкою в середовищі оксидів хрому. Розроблений метод дозволяє отримувати товщину дифузійного шару на деталях із сірого чавуну 0,6 – 1,0 мм , в той час як при проведенні традиційних методів дифузійного хромування лише 0,02 - 0,04 мм.

2. Твердість отриманого дифузійного шару HRC 59 -64 не поступається твердості після лазерного гартування.

3. Досліджено абразивний знос зміцненого дифузійним хромуванням чавуну, який не поступається за зносостійкістю хромистому чавуну.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально доведено можливість дифузійного окислення елементів основи ферито-перлітного сірого чавуну при температурах 900 -1100°C оксидом хрому. Після взаємодії елементів основи чавуну з оксидом хрому дефектів в окисленому шарі не виявлено.

2. Доведено, що окислення вуглецю і легування чавуну хромом, сприяє усуненню в окисленому шарі фериту і утворенню перлітної структури. Це сприяє підвищенню загартовуваності і прогартовуваності дифузійного шару, а також його твердості і зносостійкості.

3. Доведено, що товщина дифузійного шару при взаємодії чавуна з оксидом заліза і оксидом хрому в залежності від температури і тривалості окислення адекватні, може досягати 1 мм.

4. Виявлено, що оксиди заліза та хрому окислюють тільки вуглець основи сірого чавуну, а не графіт. Легування дифузійного шару чавуну хромом зміцнює ферит і перетворює ферит основи чавуну в дрібнодисперсну перлітну суміш, яка після швидкого охолодження перетворюється на дрібноголчастий мартенсит.

5. Твердість дифузійного шару після обробки чавуна оксидом хрому (58-65 HRC) майже сягає твердості високоміцного чавуну з кулястим

графітом після поверхневого гартування струмом високої частоти (СВЧ) 56-63 НРС.

6. Дифузійним хромуванням сірого чавуну з наступним зміцненням можливо отримати зміцнений шар у 2 рази товщий, ніж при обробці лазером.

7. Абразивний знос поверхні деталі після взаємодії з окалиною у два рази менший, ніж у вихідного чавуну, а після взаємодії з оксидом хрому зносостійкість сірого чавуну підвищується до рівня хромистого чавуну.

8. Розроблена технологія поверхневого зміцнення деталей із ферито-перлітного сірого чавуну забезпечує високу зносостійкість поверхневого шару деталей.

Література

1. Митрофанов О. С., Проскурін А. Ю. Основи експлуатації, обслуговування та ремонту двигунів внутрішнього згоряння: навч. посіб. Миколаїв : видавець Торубара В.В., 2018. 152 с.

2. Скобло Т. С., Сідашенко О. І., Сайчук О. В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: монографія / Під ред. д.т.н. проф. Скобло Т.С. Х : Діса плюс, 2019. 282 с.

3. W. Dal'Maz Silva, J. Dulcy, J. Ghanbaja, A. Redjaïmia, G. Michel, S. Thibault, T. Belmonte. Carbonitriding of low alloy steels: mechanical and metallurgical responses. Preprint submitted to Materials Science and Engineering A. August 31, 2016. P. 1-11.

4. Основи фізико-технічних та хіміко-термічних процесів для підвищення ресурсу виробів машинобудування. Навчальний посібник з вибіркової компоненти "Основи фізикотехнічних та хіміко-термічних процесів для підвищення ресурсу виробів машинобудування" для студентів галузі знань 13

Механічна інженерія, спеціальностей 131 Прикладна механіка усіх форм навчання. / Уклад. С.П. Гожій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 104 с.

5. Хромування в машинобудуванні. [Електронний ресурс] // URL: <http://pulib.if.ua/referat/view/45788>

6. Матеріали для сервісу та ремонту автомобілів. [Електронний ресурс] // URL: http://posibnyky.vntu.edu.ua/servis_ta_remont_avtom/1.8.html

7. Modern engineering and innovative technologies Issue 27 / Part 2 ISSN 2567-5273 www.moderntechno.de 101
<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit27-02-003> DOI: 10.30890/2567-5273.2023-27-02-003

8. INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE ELECTROLYTIC CHROME PLATING PROCESS ON THE QUALITY OF THE FORMED COATINGS ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ХРОМУВАННЯ НА ЯКІСТЬ УТВОРЕНИХ ПОКРИТТІВ Kryukova E.A. / Крюкова О.А. c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц. ORCID: 0000-0001-8638-3580 Vakulik A.A. / Вакулік А.А. Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Mala Shyianovska, 2, 01011 Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, Мала Шияновська, 2, 2, 01011

9. Kondrashchenko O.V. Koroziya i zakhyst materialiv ta konstruktsiy // Kharkiv: KHNAMH, 2005. – 124 s.

10. Hhromyvannya detalei: vudu pokruttiv I tehnologiy [Chromium plating details: types of coatings and technologies]. Retrieved from:<http://budbud.in.ua/hromuvannya-detalej-vydypokryttiv-i-tehnologiyi.html>. [in Ukrainian]. Хромування деталей: види покриттів і технологій [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://budbud.in.ua/hromuvannya-detalej-vydy-pokryttiv-itehnologiyi.html>

11. Chymak, M.G. (2000). Material ta tehnologiya mashinobydyvannya [Materials and technology of mechanical engineering]. Kyiv [in Ukrainian].
12. Byturina, T.E., Vasulieva, O.O., & Protsenco, V.S. (2004). Elektroosadzennya hromy z rozchuniv trivalentnykh spolyk hromy z dobavkamu vodorozchunnuh suntetuchnuh polielektrolitiv [Electrodeposition of chromium from solutions of trivalent chromium compounds with the addition of water-soluble synthetic polyelectrolytes]. Lviv: Fizuko-himichna mehanika materialiv [in Ukrainian].
Modern engineering and innovative technologies Issue 27 / Part 2 ISSN 2567-5273
www.moderntechno.de 107
13. Kennedy D. M. Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials / D. M. Kennedy, S. J. Hashmi // Journal of Materials Processing Technology – 1998. - №77. – P. 246–253
14. Кузьменко А.Г. Теоретичні основи методу випробувань на абразивний знос за схемою МалишеваВеллінгера-Уетца / А. Г. Кузьменко, О. А. Вишневський // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.– 2011. – №. 55. – С.79–82.
15. ДСТУ ISO 6507-1: 2007). Матеріали металеві . Визначення твердості за Вікерсом. Ч.1.