

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

Пояснювальна записка

ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань **13 Механічна інженерія**

Шифр і назва галузі знань

Напрямок підготовки (спеціальність): **132 «Матеріалознавство.
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»**

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

**на тему: «Розробка та дослідження режиму
цементації для зміцнення деталей автомобіля
відновлених гальванічними покриттями»**

Шифр **MPTAM 24.23616.000 ПЗ**

Виконав: студент 2-го курсу,
група МТВАм-23-1


Підпис

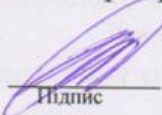
I.M. Немеш
Ініціали, прізвище

Керівник к.т.н., доц. каф ТАМ.


Підпис

O.S. Дробот
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ д.т.н., проф.


Підпис

O. V. Диха
Ініціали, прізвище

18 12 2024 р.

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.

7 жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Немешу Івану Михайловичу

Прізвище, ім.я по батькові

1. Тема проєкту (роботи) : Розробка та дослідження режиму
цементації для зміцнення деталей автомобіля
відновлених гальванічними покриттями

керівник проєкту (роботи) Дробот Ольга Савівна , к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом університету від 28 серпня 2024 р. № 60 (Д28)

2. Строк подання студентом проєкту на кафедру 2 грудня 2024 року

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

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

1. Аналіз конструкції шворня, поворотного кулака , вісі та умови їх експлуатації. Опис матеріалів та методів зміцнення цих деталей. Розробка технології зміцнення. Опис методики експериментальних досліджень. Мікроструктура деталей після проведених режимів відновлювальних і зміцнюючи технологій. Розробка технології підвищення зносостійкості деталей ходової частини автомобіля.

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

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах.

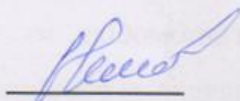
6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

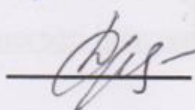
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	<i>Літературний огляд</i>	30.09. 2024	
2	<i>Технологчний розділ</i>	25.10. 2024	
3	<i>Дослідницький розділ</i>	15.11. 2024	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	22.11. 2024	
5	<i>Оформлення презентації магістерської роботи</i>	1.12. 2024	
6	<i>Нормоконтроль магістерської роботи</i>	5.12. 2024	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	5.12. 2024	

Студент



Керівник проекту (роботи)



І.М. Немеш

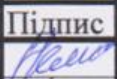
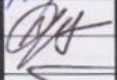

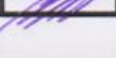
Ініціали, прізвище

О.С. Дробот

Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.	30
1.1. Аналіз умов роботи та основні види пошкоджень деталей ходової частини автомобіля.....	9
1.2. Види зношування деталей ходової частини автомобіля.....	14
1.3.Способи відновлення деталей ходової частини.....	16
1.4. Технологічні можливості підвищення зносостійкості відновлених деталей хіміко-термічною обробкою.....	20
1.5. Дослідження зносу деталей ходової частини автомобілів і обґрунтування методу їх відновлення залізо – хромистими гальванічними покриттями.	26
1.6. Висновки по розділу. Постановка мети та задач досліджень.....	32
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.	
2.1. Особливості отримання електролітичних залізо - хромистих осадів на змінному асиметричному струмі.....	33
2.2. Хіміко - термічна обробка електролітичних залізо – хромистих покриттів	37
2.3. Методи визначення складу, структури, фізико-механічних властивостей гальванічних покриттів.....	40
2.4. Визначення зносостійкості і ударної в'язкості зразків з залізо-хромистими покриттями	42
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	
3.1 Дослідження процесу електроосадження залізо-хромистих покриттів....	46
3.1.1 Особливості електроосадження залізо-хромистих покриттів на асиметричному змінному струмі.....	51

МРТАМ 24.23616.000 ПЗ				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Немеш		
Перевір.		Дробот		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Розробка та дослідження режиму цементації для зміцнення деталей автомобіля відновлених гальванічними покриттями				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		4		
ХНУ МТВАм-23-1				

3.1.2. Вплив умов електроосадження на вміст хрому в гальванічних покриттях.....	
3.1.3 . Структура і властивості залізо-хромистих електролітичних покриттів...	
3. 2. Дослідження цементації залізо-хромистих електролітичних покриттів...	
3.2.1. Карбідоутворення при цементації залізо-хромистих покриттів.....	
3.2.2. Характеристика середовищ для цементації залізо-хромистих електролітичних покриттів.....	
3.2.3. Вплив режимів цементації на структуру дифузійних шарів на залізо-хромистих електролітичних покриттях.....	
3.2.4. Загартовуваність цементованих залізо-хромистих покриттів.....	
3.2.5.Зносостійкість і ударна в'язкість цементованих залізо-хромистих покриттів.....	
3.2.6. Ударна в'язкість цементованих залізо-хромистих покриттів.....	
ВИСНОВКИ.....	
ЛІТЕРАТУРА.....	
ДОДАТКИ.....	

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Автомобільний парк ефективно може працювати при наявності сучасного, технічно оснащеного авторемонтного виробництва. Велика кількість деталей автомобіля має значний ресурс експлуатації і може бути використана повторно після незначних пошкоджень або зносу. Авторемонтні виробництва успішно виконують відновлювальні роботи, які передбачені технологією ремонту для повернення деталей для експлуатації.

Використання зношених деталей в якості заготовок при відновленні скорочує витрати на матеріали і їх обробку, що може складати залежно від конструкції та технологічних особливостей деталей і характеру їх дефектів до 50% від вартості нових деталей. Більшість сучасних машин і механізмів складаються з деталей, які є відновлювальними, отже дефекти, які виникають при експлуатації і перешкоджають нормальній роботі деталей, можуть бути усунені під час ремонту.

Ремонтне виробництво передбачає такі основні стадії робіт – діагностика, розбірно-мийні роботи, відновлювальні роботи; складання; контроль та випробування.

Відновлення деталей – це технологічні заходи, які дозволяють повернути працездатність і технічний ресурс шляхом забезпечення геометричних параметрів, механічних властивостей, які змінились під час експлуатації, механічною, термічною чи хіміко-термічною обробкою і доведення їх до значень, які передбачені нормативними документами. Підвищення надійності автомобільного парку, продовження експлуатаційного ресурсу сучасних дороговартісних автомобілів та їх реновація на основі прогресивних ремонтних технологій є дуже важливою і актуальною проблемою інженерів – технологів.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підвищення якості ремонту автомобілів, зниження витрат на його проведення можливе на основі широкого використання відновлення та зміцнення зношених деталей.

При відновленні деталей витрати на матеріал, виготовлення (лиття, кування, штампування тощо) відсутні, так як об'єктом обробки є готова деталь. Значна кількість деталей, відновлених сучасними способами за показниками працездатності та довговічності не тільки не поступаються відповідним новим деталям, але й перевищують їх у 1,5..2 рази, а іноді і більше. Найбільш перспективним напрямком розвитку процесів відновлення сталевих деталей є нанесення на зношені поверхні захисних покриттів, які при ефективному зміцненні забезпечують відновленим деталям особливі властивості (зносостійкість, утомну міцність, теплостійкість тощо).

Серед відомих процесів нанесення захисних покриттів особливе місце займає електролітичне залізнення, яке відрізняється високою продуктивністю, технологічною простотою та невисокою вартістю.

Електролітичне залізнення – дуже гнучкий процес, який дозволяє отримувати покриття товщиною від сотих часток міліметра до декількох міліметрів; дозволяє в широких межах змінювати властивості покриття та простими засобами осаджувати не тільки чисте залізо, але й сплави на його основі. Однак, електролітичне залізнення має ряд недоліків. Головним з яких є недостатня міцність зчеплення покриття з основою, занижена утомна міцність та недостатня зносостійкість особливо в умовах абразивного зношування.

Докорінно можна підвищити експлуатаційні властивості деталей з залізним покриттям на поверхні методами хіміко - термічної обробки (ХТО), наприклад, цементациєю. Це забезпечить покращення зчеплення покриття з основою, за рахунок інтенсифікації дифузії атомів вуглецю через границю,

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створення на поверхні стискаючих напружень внаслідок науглецювання, а також підвищення твердості та зносостійкості.

Мета роботи дослідження електроосаджування залізо - хромистих покриттів і їх цементації для отримання підвищеної зносостійкості особливо в абразивних середовищах, в яких звичайні гальванічні покриття втрачають працездатність.

Практична значимість роботи. Отримані і досліджені властивості електроосаджених залізо-хромистих покриттів зміцнених цементацією для забезпечення високої зносостійкості деталям ходової частини автомобіля.

Розроблена технологія нанесення гальванічних покриттів та режими цементації і термічної обробки, які дозволяють збільшити зносостійкість деталей при роботі в абразивних середовищах у 2 – 3 рази.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Аналіз стану проблеми. Огляд літературних джерел.

1.1. Аналіз умов роботи та основні види пошкоджень деталей ходової частини автомобіля

Сучасні автомобілі мають досить досконалу конструкцію, а їх виробництво є одним з самих передових в машинобудуванні, тому автомобілі – це досить надійні та довговічні технічні системи. Деталі автомобілів виготовляють із якісних матеріалів з високою точністю і піддають зміцнюючій обробці.

Колінчасті вали автомобільних двигунів, які є найскладнішими деталями автомобіля, виготовляють з поліпшувальних сталей 45, 45А, 45Г2 і 50Г. Колінчасті та розподільчі вали під час сталого режиму роботи двигуна працюють в умовах рідинного тертя. Для підвищення зносостійкості шийки колінчатих валів піддають поверхневому гартуванню струмом високої частоти на твердість HRC 50..62, в залежності від марки двигуна. Глибина поверхневого загартованого шару сягає 3...4 мм.

Поверхнєве гартування не тільки підвищує зносостійкість шийок, але й підвищує утомну міцність валу, завдяки створенню в поверхневих шарах стискаючих залишкових напружень. З метою підвищення утомної міцності проводять полірування шийок валів до високого ступеня чистоти.

Підвищення зносостійкості колінчастих валів хіміко - термічною обробкою (азотуванням, цементацією, нітроцементацією) та хромуванням на автомобільних підприємствах не проводиться внаслідок технологічних труднощів та високої вартості такої обробки.

Розподільчі вали виготовляють із тих же матеріалів, що і колінчасті вали і також піддають гартуванню СВЧ: кулачки до твердості HRC 54..62, поверхні опорних шийок - до HRC 45...52; клапани і штовхачі клапанів

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

газорозподільного механізму автомобільних двигунів працюють недостатнього змащування при знакозмінних навантаженнях. Впускні клапани сучасних двигунів виготовляють із сталей 40X чи 40 ХНМА і піддають гартуванню та відпуску: стрижень і головка - НРС 30...42, торець - НРС 42...56. Впускні клапани, які працюють під впливом розжарених газів, виготовляють із жаростійких високолегованих сталей Х9С2, Х12Н7С, Х10СМ і загартовують до твердості НРС 45...63,

Деякі *впускні клапани* автомобілів мають складну конструкцію - стрижні з поліпшувальних середньовуглецевих сталей (40X, 40ХНМ), а головки з жароміцних. Стрижні таких клапанів піддають гартуванню на твердість НРС 30...42. Штовхачі клапанів виготовляють із сірого чи спеціального чавуну з відбіленою поверхнею і торців до твердості НРС 40..60, чи із сталей 35, 40X, які загартовують на твердість НРС 30. Іноді штовхачі виготовляють із цементованої сталі 15X, піддають цементації і загартовують до твердості НРС 54..62.

Деталі автомобільних двигунів, які мають не складну форму та невеликі розміри - *поршневі пальці, вали масляних насосів, валики приводу розподільників*, виготовляють із звичайних вуглецевих сталей 20, 40, 45, а найбільш відповідальні (поршневі пальці) – із легованих сталей 18ХГТ, 20ХН, 12ХН3А та інших.

Деталі з маловуглецевих сталей піддають цементації чи ціануванню для отримання поверхневої твердості НРС 45..48, а деталі з середньо вуглецевих сталей – поверхневому гартуванню СВЧ на таку ж твердість.

Ступінчасті вали з шліцами чи шестірнями, які працюють в підшипниках кочення (ведучі, ведені і проміжні вали коробок передач, шестірні задніх мостів, вали коробок передач, шестірні задніх мостів, вали редукторів і таке інше) виготовляють із цементованих легованих сталей 18ХГТ, 18ХНМА, 15ХА, 18ХГМ, 20ХНМ, 12ХН3А та з поліпшувальних сталей 40X та 40ХНМА.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При виготовленні *валів* із маловуглецевих сталей їх опорні поверхні, зубці шестерінь і шліци піддають цементації (нітроцементації) на глибину 0,8..1,5 мм з наступним гартуванням на твердість HRC 56...62. При використанні поліпшувальних сталей ці ділянки валів загартовують СВЧ на твердість HRC 48...62. *Напівосі* ведучих мостів і карданні вали з шліцевими кінцями, які передають великі крутні моменти під час руху автомобіля, виготовляють з високоміцних легованих сталей 40X, 35XГС, 40ХН і 40ХНМА. Ці деталі піддають гартуванню і високому відпуску (поліпшенню) на твердість HB300...400. Шліци карданних валів додатково загартовують на твердість HRC 45...55 для підвищення зносостійкості.

Хрестовини карданів і диференціалів, які мають складну конструкцію, виготовляють із легованих цементованих сталей 20X, 18ХГТ, 12ХН3А і 12Х2Н4А і піддають поверхневому зміцненню цементації чи нітроцементації з подальшим гартуванням до HRC 56...64.

Деталі кермового керування автомобілів – *поворотні цапфи і вали сошки руля* мають складну форму з отворами, шліцевих та різбових поверхонь. Ці деталі виконують відповідальні функції, від яких залежить безпека руху автомобіля, тому виготовляють їх з якісних легованих сталей 30X, 40X, 40ХНМА.

Поворотні цапфи піддають об'ємному гартуванню і високому відпуску на твердість HB 210...320. В поворотних цапфах зношуються шийки під підшипники, різьба під гайку, яка регулюється (рис.1.1).

Вали шийок кермових механізмів зміцнюються гартуванням СВЧ на глибину 1,5...2 мм з твердістю HRC 45...58. Вали сошки керма мають пошкодження різьби під гайку кріплення сошки, знос опорних шийок, а також знос шліців.

Шкворні поворотних кулаків є дуже відповідальними деталями (рис.1.2) Їх виготовляють з легованих цементованих сталей 18ХГТ, 20ХН і піддають

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зміцнюючій обробці (цементації, гартуванню та низькому відпуску) для одержання твердості HRC 56...62, твердість серцевини повинна бути HB 260...300. Інші деталі автомобілів виготовляють також дуже ретельно тому вони є досить дорого вартісними, розрахованими на тривалий термін експлуатації.



Рисунок 1.1 – Елементи ходової частини



Рисунок 1.2 – Поворотний кулак

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12



Рисунок 1.3 Кулак з тріщиною

Під час експлуатації автомобілів, а також при їх зберіганні (простої), неперервно відбуваються процеси, які погіршують стан та працездатність деталей, сприяють виникненню відмов агрегатів та автомобіля в цілому.

Дефекти деталей за конструктивними недоліками такими як неправильний матеріал, неправильний вибір посадки, чи за технологічними – незадовільна механічна, термічна обробка, в сучасних автомобілях зустрічаються не часто.

Переважно деталі автомобіля виходять з ладу внаслідок зношування. Процеси зношування визначаються переважно умовами тертя в яких працюють деталі. В спряженнях автомобілів мають місце різні види тертя – сухе, граничне, рідинне. В умовах сухого тертя (без мастила) працюють деталі гальм, диски зчеплення, тарілки та сідла клапанів, деталі підвіски та інші, змащування яких неможливе через їх конструктивні особливості.

Такі деталі як поршні, поршневі кільця, гільзи циліндрів, поршневі пальці, стрижні клапанів, шворні поворотних цапф, вали кермових сошок та багато інших, які змащують розбризкуванням чи консистентним мастилом, працюють в умовах граничного тертя.

Аналіз зношених деталей, які надходь для капітального ремонту, свідчить, що більшість з них (65 %) мають невеликий знос і їх можна відновити тим

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чи іншим способом. Собівартість відновлення деталей значно менша за вартість виготовлення нових.

1.2. Види зношування деталей ходової частини автомобіля

В залежності від характеру тертя, величини та напрямку прикладених зовнішніх сил, середовища, в якому відбувається робота деталей, та матеріалу деталей, зношування може відбуватись за різними механізмами з більшою чи меншою інтенсивністю.

Найбільш інтенсивні види зношування – механічне та молекулярно – механічне.

Механічне зношування відбувається внаслідок впливу на робочі поверхні твердих часточок чи внаслідок тертя по абразивному робочому середовищу.

Молекулярно – механічне зношування відбувається внаслідок дії на поверхні деталей, що піддаються тертю, механічних і молекулярних (атомних) сил. Дія їх проявляється при максимальному наближенні металевих поверхонь при відсутності між ними змащувальної плівки. Підвищена температура, яка виникає під час тертя, сприяє зростанню молекулярних сил. Молекулярно – механічне зношування проявляється в схоплюванні окремих ділянок поверхонь з вириванням з них часточок металу та схоплюванням спряжень. Механічне і молекулярно - механічне зношування належить до катастрофічних видів зношування і є недопустимими для нормальної експлуатації автомобіля.

З меншою інтенсивністю відбувається окислювальне зношування, коли відокремленню часточок зносу з поверхні деталей передують окиснення та зміна структури поверхневих шарів. Під час окиснювального зношування відбувається пластична деформація тонких шарів металу при одночасному впливі на них кисню та інших активних речовин із зовнішнього середовища. Кисень дифундує в сталь, утворює тверді розчини та хімічні сполуки

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(оксиди). На поверхнях тертя внаслідок окиснення і пластичної деформації (наклепу) утворюються окисні плівки і вторинні структури, які мають підвищену твердість, і є об'єктом зносу. На зміну структурного стану поверхневого шару деталі витрачається більша частина енергії тертя, а на його руйнування - значно менше, тому інтенсивність окиснювального зношування відносно невелика.

При конструюванні автомобілів намагаються забезпечити умови для окислювального (менш інтенсивного) зношування деталей, однак за реальних умов експлуатації переважна більшість деталей автомобілів піддається абразивному (механічному) впливу, що суттєво зменшує їх ресурс [67]. Навіть шийки колінчастих і розподільних валів, які працюють в умовах рідинного тертя, піддаються впливу твердих часточок, що знаходяться в моторному мастилі. Такими часточками можуть бути кварц, глинозем, наклепані часточки зносу, які здатні пройти через фільтр очищення мастила.

При недостатньому змащуванні (в разі недостатнього тиску масла) між шийками валів і поверхнями вкладишів (гнізд) інтенсивність зношування суттєво зростає, навіть до заїдання.

Абразивному впливу піддаються поверхні деталей, які працюють в спряженнях, які змащуються періодично консистентним мастилом (деталі ходової частини, кермового керування ті інші). Абразивні часточки попадають в такі спряження внаслідок недосконалості конструкції чи пошкодження захисних пристроїв (сальників, чохлів, ковпачків). Ці часточки не видаляються із зазорів і знаходяться там тривалий час, інтенсивно зношуючи спряжені поверхні.

Умови експлуатації автомобілів мають визначальний вплив на втрату працездатності деталей і виникнення у них різних дефектів. Погані дорожні умови, низька кваліфікація водіїв, несвоєчасне і низькоякісне технічне обслуговування, неякісний ремонт прискорюють вихід з ладу деталей

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автомобіля. На працездатність деталей негативно впливають погане змащування, люфти в спряженнях, недопустимі зазори, відсутність належного кріплення окремих деталей та вузлів, порушення взаємного розташування деталей у вузлі тощо.

1.3.Способи відновлення деталей ходової частини

Вибір способу відновлення кожної конкретної деталі залежить від таких факторів: експлуатаційних (величина зносу і характер дефектів), конструктивних (матеріал, розмір, форма деталі), технологічних (точність виготовлення, вид зміцнюючої обробки, твердості), виробничих спеціалізація, наявність обладнання), економічних (собівартість, дефіцитність матеріалів, фонд заробітної плати тощо).

До способів відновлення зношених деталей належать:

- обробка під ремонтні розміри; використання додаткових деталей (компенсаторів зносу);
- обробка тиском (осаджування, витягування та інші); зварювання і наплавлення різними методами;
- нанесення гальванічних покриттів і покриття полімерами.

Найбільш вживаним способом є спосіб ремонтних розмірів, додаткових деталей та пластичного деформування. Нажаль перші з них мають суттєві недоліки і не є сучасними, не відповідають вимогам ремонтного виробництва. Основним недоліком способу ремонтних розмірів є порушення взаємозамінності деталей та зниження їх міцності внаслідок зменшення перерізу (колінчасті вали, гільзи циліндрів і блоки циліндрів). Крім цього, під час обробки деталі під ремонтний розмір, видаляється поверхневий зміцнений шар метала, що значно зменшує його післяремонтний ресурс.

Спосіб додаткових деталей, які компенсують знос, також використовується досить давно з початку розвитку ремонтного виробництва. Останнім часом його використовують рідко, переважно для відновлення

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гнізд (отворів) під підшипники в корпусних деталях в дрібносерійному чи одиничному виробництві. Цей спосіб не вважають перспективним тому що він є складним, дороговартістним та ненадійним. Різновиди цього способу використовують при відновленні різьбових отворів в корпусних деталях (блоках, головках блоків, картерів коробок передач). У зношений отвір вкручується різьбова втулка збільшеного розміру, всередині якої є отвір з номінальною різьбою. Налагоджено виробництво таких втулок на промисловому рівні.

Більш прогресивними методами відновлення зношених деталей є методи відновлення, які базуються на нанесенні на зношені поверхні різних покриттів, що компенсують зношений метал. Головною перевагою цих методів є можливість отримувати деталі номінальних розмірів і тим самим забезпечувати взаємозамінність деталей, що значно прискорює та здешевлює процес ремонту.

Досить широко в ремонтному виробництві використовують автоматичне та напівавтоматичне наплавлення. Розроблені і впроваджені методи наплавлення під флюсом, в середовищі захисних газів, вібродугове наплавлення, наплавлення порошковим дротом. Наплавлення використовують для відновлення деталей із сталі, чавуна, алюмінієвих сплавів тощо.

Автоматичне наплавлення є високопродуктивним процесом, який найбільш підходить для відновлення деталей великих розмірів та з великим зносом.

Сучасні наплавочні матеріали дозволяють отримувати міцні покриття будь-якої твердості та високої зносостійкості.

Ручне електродугове наплавлення зносостійкими електродами і порошковим дротом використовують для тих самих цілей, що і автоматичне наплавлення, використовують переважно в одиничному чи дрібносерійному виробництві.

Контактне наварювання металевим дротом здійснюють методом

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

імпульсного електроконтактного нагрівання на точкових і роликів машинах. Такий метод також впроваджено у ремонтне виробництво. Він дозволяє відновлювати деталі з величиною зносу 0,3...0,5 мм і може бути застосований для значної номенклатури деталей. Технологія контактної електроімпульсної наварювання маловідходна, екологічно безпечна та легко впроваджується у ремонтне виробництво

Газотермічне напилення - отримання покриттів на поверхні деталі шляхом нанесення дрібних часточок металу високотемпературним газовим струменем. Спосіб досить продуктивний, однак його широке впровадження стримується значною вартістю порошкових матеріалів та недостатньою міцністю зчеплення покриття з основою.

Описані способи відновлення доцільно застосовувати для великогабаритних деталей з відносно великим зносом, для дрібних деталей з невеликим зносом доцільним є гальванічні способи відновлення, які дозволяють отримувати тонкі і тверді покриття.

Гальванічне осадження металів – нанесення металевих покриттів електролізом із водних розчинів солей відповідних металів. Для відновлення деталей автомобілів використовують хромування, залізнення, осадження електролітичних сплавів на основі заліза [1].

Хромування дозволяє отримати дрібнозернисті осади (покриття) з дуже високою твердістю (до 12000 МПа), з низьким коефіцієнтом тертя і гарним зчепленням з основою. Завдяки цим властивостям, а також завдяки хімічній стійкості та жаростійкості, хром забезпечує відновленим деталям високу зносостійкість навіть у дуже важких умовах експлуатації (у 2..5 разів вищою зносостійкості загартованої сталі). Хромування – дорогий процес, малопродуктивний (вихід по струму хромового покриття не перевищує 15%), тому його доцільно використовувати тільки в окремих випадках для відновлення дуже відповідальних малозношених деталей (плунжерів дизельних паливних насосів та інших прецизійних деталей). Хромування

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовують для зміцнення поршневих кілець на потужних і швидкісних двигунах.

Залізнєння, у порівнянні з хромуванням, має більш високу продуктивність по струму (вихід по струму – 85...90 %) і дає можливість отримувати покриття товщиною до 1,5 мм (хромування – до 0,15 мм). Процес залізнєння не потребує дорогих дефіцитних хімічних реактивів і він меш безпечний з впливу на екологію, ніж хромування. Залежно від складу електроліту і режимів електролізу залізнєнням можна отримати гладкі чи пористі покриття з твердістю 3000...7000 МПа. Для осадження залізних покриттів в ремонтному виробництві використовують хлористі чи сульфатні електроліти, а осадження проводять чи в гарячих чи в холодних електролітах (використовуючи асиметричний струм).

Показники ефективності відновлення зношених деталей хромуванням і залізнєнням показані в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 Показники процесу залізнєння

Показник	Хромування	Залізнєння	Співвідношення Cr / Fe
1. Питома трудомісткість, год/м ²	72...192	28...43	1,86
2. Питома електроємність, кВТг/м ²	324	120	2,7
3. Зносостійкість (еталон- загартована сталь 45)	0,64	0,57	1,12
4. Міцність зчеплення покриття з основою, МПа	4,82	232	2,08

Як свідчать дані таблиці, хромові покриття переважають залізні за показниками зносостійкості та міцності зчеплення з основою, але потребують для осадження значно більших трудових витрат та енергії, тому залізнення з економічної точки зору вигідніше для відновлення деталей автомобілів.

1.4. Технологічні можливості підвищення зносостійкості відновлених деталей хіміко-термічною обробкою

Підвищення стійкості гальванічних покриттів проти зношування базується на дослідженнях, які характеризують вплив структури і фазового складу поверхневих шарів сталевих виробів на їх зносостійкість.

Відомо, що найбільш інтенсивним видом зношування, яке дуже швидко виводить з ладу металеві деталі різних машин є абразивне зношування, яке відбувається внаслідок відокремлення часточок металу з поверхні деталі при дії на неї твердих часточок (абразивних тіл).

В літературних джерелах, які присвячені вивченню процесів зношування, є значна кількість посилань [1, 2, 4, 8] на взаємозв'язок зносостійкості з твердістю і характеристиками структури зношуваних матеріалів.

Загальновідомим фактом є те, що найбільшу зносостійкість при абразивному зношуванні будуть мати матеріали з багатофазними структурами, з включеннями твердих і тугоплавких фаз: карбідів, нітридів, боридів тощо. Різниця в зносостійкості таких матеріалів зумовлена типом включень, їх кількістю, формою та розмірами. На зносостійкість гетерофазних структур впливає тип металевої матриці та її властивості, основними є твердість та утомна міцність.

Аналіз впливу структури гетерофазних металевих матеріалів на зносостійкість і ударну в'язкість зроблено в роботі [6,8], де досліджена абразивна зносостійкість та ударна в'язкість наплавлених матеріалів на

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі заліза. Мікроструктури деяких сплавів, розміщені відповідно до збільшення в них вуглецю, представлені в таблиці 1.2.- в таблиці 1.3. Механічні властивості - в таблиці 1.3.

Таблиця 1.2 Структура сплавів

№	Хімічний склад, %	Опис структури
1	C- 0,2 Cr – 5,0	Ферит + перліт
2	C- 0,7 Cr – 5,0	Мартенсит + Азал.
3	C- 1,3 Cr – 5,0	Тростит + карбіди
4	C- 2,4 Cr – 5,0	Твердий розчин + надлишкові карбіди
5	C- 3,0 Cr – 5,0	Ледебуритна евтектика + твердий розчин

Таблиця 1, 3 Механічні властивості сталей різного складу

№ сплаву	Механічні властивості сплавів		
	Твердість HV	Відносна зносостійкість	Ударна в'язкість Дж/см ²
1	383	1,19	24,8
2	561	1,50	4,8
3	685	2,03	0,8
4	700	2,66	1,8
5	652	2,25	1,2

Доевтектоїдні сталі (№1 № 2 в табл. 1.2, 1.3) мають невисоку твердість і невисоку зносостійкість внаслідок відсутності карбідів в структурі, проте ударна в'язкість цих сплавів досить висока, особливо тих, які мають ферито - перлітну структуру. Заевтектоїдні сплави (№3, №5 в табл. 1.2, 1.3) мають підвищену твердість і зносостійкість у порівнянні з першими, але мають низьку ударну в'язкість. Їх крихкість пояснюється особливостями структури ,

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основу якої створює крихка карбідна сітка. Тріщини, що виникають в матеріалі під час ударів, легко рухаються по карбідам, не зустрічають опору в'язких ділянок. Особливим з розглянутих матеріалів є сплав №4 (табл. 1.2, 1.3). Він має найвищу твердість і зносостійкість та ударну в'язкість на задовільному рівні. Таке сприятливе поєднання властивостей зумовлене його особливою структурою, яка складається з окремих карбідних включень, ізольованих одне від одного тонкими прошарками відносно в'язкої матриці, яка забезпечує гальмування поширенню магістральних тріщин та підвищення ударної в'язкості. Отже, як видно, для отримання високої зносостійкості та ударної в'язкості в структурі матеріалу мають бути значна кількість твердих включень, ізольованих один від одного ділянками досить пластичної та в'язкої матриці (правило Шарпі).

При деформуванні відносно пластичних матеріалів з включеннями крихких часточок (карбідів), яке відбувається на поверхні деталі під час тертя, зародок руйнування (відокремлення фрагменту зносу) може виникнути чи в карбідній часточці, внаслідок її розтріскування, чи на міжфазній границі. Таке можливе за умови деякої пластичної деформації матриці.

В багатьох роботах [6,14, 17], присвячених дослідженню руйнування металевих композитів, виявлено, що тріщини і міжфазні пори утворюються переважно в часточках великого розміру. Цьому процесу перешкоджають внутрішні напруження стискання, що виникають в неоднорідних матеріалах при пластичному деформуванні. Відстань між часточками в структурі деформованого тіла також суттєво впливає на здатність його до руйнування. Чим меншою є ця відстань, тобто чим більшою є частка включень в структурі, тим більше напруження потрібно прикласти для пластичного деформування матриці, внаслідок блокування дислокацій в малих проміжках між карбідами, і тим більш міцним (зносостійким) буде композиційний матеріал.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримати зносостійкі структури, які насичені великою кількістю твердих включень, можна не тільки методами наплавлення і порошкової металургії, але й методами хіміко-термічної обробки – азотуванням, цементацією, нітроцементацією, боруванням.

Азотування – насичення поверхні сталі азотом нагріванням деталі в середовищі аміаку при 480 – 580 °С протягом 24 - 48 годин, внаслідок чого на поверхні деталі утворюється твердий зносостійкий шар нітридів заліза та легуючих елементів [6]. Для ремонтного виробництва азотування з технологічних причин майже не впроваджене: проведення азотування потребує дороговартісного обладнання; має малу швидкість насичення азотом сталі, що потребує тривалої витримки виробів в печі; доцільно азотування проводити для складно легованих сталей (з добавками молібдену, алюмінію, хрому); тонкий азотований шар (товщиною 0,2 – 0,4, мм) на поверхні деталі не відповідає вимогам високої зносостійкості та ударної в'язкості, що визначені раніше.

Борування проводять шляхом електролізної обробки сталевих деталей в розплаві бури чи суміші бури з кам'яною сіллю та іншими речовинами . Деталі, які насичують, приєднують до джерела постійного струму як катоди, анодами слугують графітові (вугільні) стрижні. Електролізне борування проводять при високих температурах (980...1000°С) і високих густинах струму (800...2500 А/дм²). Швидкість насичення 0,05 ...0,06 мм/год.

Незважаючи на те, що боридні шари мають дуже високу твердість (10000...15000 МПа), борування не рекомендують для використання в ремонтному виробництві через складну і дорогую технологію та високу крихкість насиченого шару.

Нітроцементація – насичення азотом і вуглецем одночасно з різних середовищ при різних температурах [84-88]. Із багатьох різновидів нітроцементації найбільше для ремонтного виробництва доцільно вибрати

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ціанування – обробку сталевих виробів при досить низьких температурах (600...650°C). Ціанування проводять в розплавах ціанистих солей тому швидкість насичення досить велика. Внаслідок ціанування на поверхні утворюються глибокі шари, які складаються з карбонітридів (у вигляді товстого шару), які так само як нітридні, що отримують при азотуванні, мають підвищену крихкість. Ціанування небезпечне з екологічної точки зору, тому що використовуються дуже токсичні ціанисті солі. Виходячи з цього, ціанування не може бути рекомендоване для зміцнення відновлених деталей автомобіля.

Цементация – найбільш поширений в машинобудуванні спосіб хіміко-термічної обробки сталевих виробів, який використовують для отримання високої поверхневої твердості, зносостійкості, утомної міцності. Цих властивостей досягають збагаченням поверхневого шару низьковуглецевої, нелегованої та легованої сталі вуглецем до евтектоїдної чи, навіть, заевтектоїдної концентрації, з наступною термічною обробкою, яка забезпечує утворення структури мартенситу з певною кількістю карбідів та залишкового аустеніту [2,3].

Глибина цементованого шару в межах 0,5 – 2,5 мм. Цементацию сталевих виробів проводять в твердих, газових та рідких карбюраторах, нагріванням до 880 -950°C, з витримкою, яка залежить від потрібної товщини насиченого шару .

Найбільш поширеним видом цементации є цементация в твердому карбюраторі, який складається з деревного вугілля, вуглевісних матеріалів та різних активуючих добавок (карбонати барію та натрію тощо).

Цементация в твердих карбюраторах дозволяє отримувати більш високе науглецювання , ніж цементация в газовому середовищі. Як пишуть в роботі [69-70] прискорити процес науглецювання в твердому карбюраторі можна

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пропускаючи через цементацийний контейнер світильний газ, який містить CH_4 і аміак одночасно.

На деяких виробництвах проводять цементацію в пастоподібних карбюраторах. До складу таких паст входять сажа чи деревновугільний пил, прискорюючи добавки (сода, поташ, вуглекислий барій тощо). Рідкими складовими цементуючих паст є мінеральне масло. Цементация в пастах у порівнянні з цементацією у твердому карбюраторі відбувається в декілька разів швидше.

При використанні пастоподібних карбюраторів на різних легованих сталях є можливість отримати дифузійні шари з високим вмістом вуглецю (до 2,5%) за відносно нетривалої витримки. Отримати зносостійку структуру, насичену значною кількістю твердих включень (карбідів), можна проведенням цементації хромистих сталей у високоактивних пастоподібних карбюраторах. На поверхні утворюються досить глибокі дифузійні шари, які насичені дрібними карбідами цементитного типу (рис.1.4)



Рисунок 1.4. Мікроструктура дифузійного шару сталі 30X3Г2Ф x 200 (цементация при 900°C, 8 годин), вміст карбідної фази більше 80%.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зносостійкість в кварцевому абразиві більше 100 [4].

Змінюючи склад сталі, головним чином, вміст хрому та режим цементації, можна досягти оптимального вмісту карбідної фази та розмірів карбідів, що забезпечують високу зносостійкість дифузійних шарів.

Розчинність вуглецю в Fe-γ при температурі цементації (950°C) сягає 2 %. Якщо насичуюче середовище забезпечить надходження вуглецю вище за цей ліміт, то надлишковий вуглець утворює карбіди Fe_3C , Fe_2C . В легованих сталях, крім визначених карбідів заліза можуть утворюватись змішані карбіди типу $Me_{23}C$, MC (фази укорінення) Me_6C . Карбідотвірні легуючі елементи сприяють прискоренню цього процесу, а хром - єдиний карбідотвірний елемент, який сприяє утворенню карбідів в *зернистій формі*. Утворення карбідних фаз, які мають більш високу твердість, ніж залізо, є головною перевагою цементації у порівнянні з іншими видами хіміко-термічної обробки.

Після цементації потрібна додаткова термічна обробка виробів - гартування та відпуск для отримання структури мартенситу в насиченому шарі.

Внаслідок структурних перетворень в цьому шарі виникають стискаючі напруження і підвищується твердість, що також є зміцнюючим фактором цього виду обробки.

1.5. Дослідження зносу деталей ходової частини автомобілів і обґрунтування методу їх відновлення залізо – хромистими гальванічними покриттями.

Деталі ходової частини автомобілів, такі як шворні поворотних кулаків, вісі гальмівних колодок, розтискні кулаки пневматичних гальм, а також вали сошки керма працюють в умовах тертя ковзання з граничним змащуванням (а іноді без змащування) і є досить відповідальними деталями, від стану яких залежить безпека руху. Умови роботи цих деталей дуже важкі – високі навантаження, забруднене середовище, яке сприяє попаданню

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

абразивних часточок в зону тертя, зумовлюють інтенсивний знос цих деталей.

Під час ремонту автомобілів зношені деталі вибраковують. Однак ці деталі можуть бути відновлені та зміцнені, що дозволить підвищити їх експлуатаційні властивості до рівня нових.

Предметом досліджень вибрано вантажні автомобілі, які переважно використовують при виконанні сільськогосподарських робіт, і які потребують капітального ремонту.

Дослідження зносу проведене методом мікрометрирування: вимірювали знос деталей вузлів і агрегатів, розібраних під час ремонту. Термін експлуатації деталей встановити не можливо.

На капітальний ремонт автомобілі надходять у непрацездатному стані та без документації про профілактичні ремонти, заміну деталей чи агрегатів.

Результати вимірювань обробляли статистичними методами [14]. Побудовані статистичні ряди, визначене математичне очікування (середня величина зносу), середнє квадратичне відхилення і побудовані диференціальні та інтегральні криві дослідного розподілу зносу як випадкових величин. Така обробка даних масових вимірювань дозволила зробити обґрунтовані висновки про доцільність відновлення обраних деталей запропонованим методом.

При визначенні зносу конкретної деталі за початковий розмір приймали її номінальний розмір згідно креслення. Розмір досліджених деталей, зазори в спряженнях, де працюють ці деталі показані в таблиці 1.4.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.4. Розміри досліджених деталей.

Назва деталі	Розмір		Зазор в спряженні	
	За робочим кресленням	Допустимий без ремонту	За робочим кресленням	Допустимий
Шворінь поворотного кулака – шийка під втулку	<u>38,00</u> 37,983	37,975	<u>+0,025</u> +0,077	<u>+0,025</u> +0,085
Кулак поворотний (цапфа) – діаметр отвору у втулці під шворінь	<u>38,025</u> 38,060	38,060		
Вісь гальмівних колодок – шийка під отвір в диску	<u>21,975</u> 21,915	21,870	<u>+0,025</u> +0,130	<u>+0,025</u> +0,214
Диск кріплення колодок гальм – отвір під вісь колодки	<u>22,000</u> 22,045	22,084		
Вісь гальмівних колодок – шийка під отвір в колодці	<u>27,940</u> 27,870	27,790	<u>+0,060</u> +0,175	<u>+0,060</u> +0,294
Колодка гальмівна – отвір під вісь	<u>28,000</u> 28,045	28,084		
Кулак розтискний гальмівний - шийка під отвір в кронштейні	<u>37,968</u> 37,900	37,750	<u>+0,057</u> +0,160	<u>+0,057</u> +0,350
Кронштейн гальмівний камери - отвір під розтискний кулак	<u>38,025</u> 38,060	38,100		
Вал сошки кермового управління – шийка під отвір в картері	<u>41,975</u> 41,950	41,936	<u>+0,025</u> +0,077	<u>+0,025</u> +0,103
Картер механізму кермового управління – діаметр отвору втулки	<u>42,000</u> 42,027	42,039		

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Середні значення зносу шийок під кермовий кулак шворня відносно невеликий, однак після розсіювання можливого зносу досить велике. Це свідчить про незадовільне обслуговування автомобілів. Допустимий без ремонту знос, відповідно до Технічних умов мають 69% деталей, 31 % потребує відновлення.

Деталі, які працюють в рухомих спряженнях типу «вал – підшипник ковзання», мають середнє значення зносу, який не перевищує 0,121мм. Максимальне значення зносу не перевищує 0,3 мм, тому всі зношені деталі можна відновити залізними гальванічними покриттями.

Значна кількість деталей може бути використана вдруге без відновлення.

Однак, враховуючи нерівномірність зносу опорних шийок, особливо біля осей колодок і осей поворотних кулаків, доцільно проводити відновлення і таких деталей. При цьому буде відновлена їх початкова форма і початкові зазори в спряженнях відремонтованих машин і агрегатів.

Зміцнююча обробка відновлених деталей дозволяє суттєво підвищити ресурс і тим підвищити довговічність відремонтованих автомобілів (табл.1.1).

Недоліками гальванічних осадів є їх шаруватість, наявність пор та інших дефектів, що притаманні процесу електроосадження. Це значно погіршує фізико-механічні та експлуатаційні властивості покриттів та обмежує використання їх для відновлення важко навантажених деталей.

Таблиця 1.5 Ефективність відновлення деталей

Назва показника	Хромування	Залізнення	Співвідношення Cr/Fe
Питома трудомісткість год/м ²	72...192	28...43	1,86
Питома енергоємність КВт год/м ²	342	120	2,7
Зносостійкість (еталон сталь 45 загартована)	0,64	0,57	1,12
Міцність зчеплення покриття з основою	482	232	2,08

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Докорінно можна покращити властивості залізних осадів хіміко-термічною обробкою. Головна вимога, яку висувають до зміцнюючих покриттів на поверхні деталі – підвищена зносостійкість.

Найбільшою зносостійкістю володіють металеві матеріали з високою твердістю і з гетерогенною структурою, яка містить тверді і тугоплавкі фази – карбіди, бориди, нітриди тощо.

Крім того, на зносостійкість гетерофазних структур впливають тип металевої матриці і її властивості, переважно твердість і утомна міцність.

Отримати зносостійку структуру, насичену значною кількістю твердих включень, можна різними методами: наплавленням, напиленням порошків і хіміко-термічною обробкою. Хіміко-термічна обробка є самим економічним і самим зручним з технологічної точки зору методом. Хіміко-термічній обробці можна піддавати деталі різноманітної форми та розмірів, виготовлених з різних матеріалів, в тому числі і з гальванічними покриттями на поверхні.

Аналізуючи структури дифузійних шарів, отриманих різними методами (цементациєю, азотуванням, боруванням тощо), з'ясовано, що ні один з них в традиційному вигляді не може забезпечити отримання структури, яка відповідає вимогам найвищої зносостійкості, а саме зносостійкості абразивної.

Глибокі абразивні шари (декілька міліметрів), які насичені дрібнодисперсними глобулярними карбідами цементитного типу, можна одержати тільки в хромистих сталях при насиченні їх вуглецем із високоактивних середовищ. Такі шари ефективно чинять опір дії абразивних часточок і дозволяють підвищити абразивну зносостійкість зміцнених таким чином деталей в десятки разів.

Знос автомобільних деталей, згідно проведеній мікрометрії, не перевищує 0,1...0,3 мм, тому доцільно їх не відбраковувати, а відновлювати.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Собівартість відновлення нижча за вартість виготовлення нових деталей, тому відновлення вигідне з економічної точки зору. При використанні сучасних ефективних методів відновлення і зміцнення, можна отримати деталі, які за працездатністю та довговічністю не поступаються відповідним новим деталям, або навіть перевершують їх.

Дослідження зносу деталей ходової частини автомобіля, які є одними із самих навантажених і відповідальних деталей в автомобілі, показало, що величина зносу в середньому сягає 0,12 мм (максимально 0,3 мм). Вибрані деталі можуть успішно відновлені гальванічним залізненням з наступною зміцнюючою цементацією. Для більшої ефективності зміцнення на зношені поверхні деталей необхідно осаджувати не чисте залізо, а залізо – хромистий сплав, а цементацію проводити у середовищі високоактивного карбюратора для створення в дифузійних шарах заевтектоїдної концентрації вуглецю, зв'язаного в карбіді.

Напрямки досліджень

1. Деталі сучасних автомобілів виготовляють переважно з високоякісних вуглецевих і легованих сталей і піддають складній механічній і зміцнюючій обробці, тому вони є досить дорогими виробами.

2. Аналіз дефектів деталей автомобілів, які надходять на капітальний ремонт, свідчить, що більша частина деталей втрачає працездатність під час експлуатації внаслідок зносу, і основним видом зношування є абразивне.

3. Вибір способу відновлення зношених деталей залежить від їх розмірів, форми та матеріалу. Для величин зносу до 0,3...0,5 мм при відновленні деталей доцільно використовувати гальванічні методи. Ці методи широко використовують в машинобудуванні та ремонтному виробництві. Їх використовують для компенсації зносу деталей, для підвищення їх зносостійкості, для захисту від корозії, в декоративних цілях тощо. З усіх гальванічних методів частіше використовують залізнення та хромування. Залізнення в ремонтному виробництві останнім часом використовують частіше, так як воно вигідно відрізняється від процесу хромування більш

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високою продуктивністю (вихід за струмом електролітичного заліза – 85%, а електролітичного хрому – 12%), значно меншими витратами електроенергії, меншою вартістю вихідних солей, а також меншою екологічною безпекою.

Електролітичне залізнення дозволяє отримувати покриття значної товщини – до 3 мм, що у 10 разів більше, ніж хромування.

1.6. Висновки по розділу. Постановка мети та задач досліджень

Мета роботи.

На основі проведеного аналізу окреслена мета роботи та основні задачі досліджень.

- 1. Вибрати найбільш раціональний спосіб відновлення та зміцнення деталей ходової частини автомобіля.*
- 2. Розробити технологію зміцнення нанесеного гальванічного залізо хромистого покриття для забезпечення значного підвищення рівня експлуатаційних властивостей вибраних деталей.*

Задачі досліджень:

1. Розробити склад електроліту для осадження залізних осадів, легованих хромом, виявити закономірності впливу складу електроліту і режимів електролізу на вміст хрому в гальванічних осадах та на швидкість їх осадження.
2. Визначити умови отримання осадів з заданим вмістом хрому при максимальній швидкості осадження покриття високої якості (достатнім зчепленням з основою та відсутністю великих дефектів).
3. Дослідити та виявити закономірності формування структури і фазового складу дифузійних шарів на залізохромистих покриттях.
4. Дослідити вплив режимів цементації і термічної обробки на структуру і фазовий склад поверхневих шарів деталей, відновлених гальванічними

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залізними покриттями з різним вмістом хрому, виявити закономірності впливу структури на їх основні експлуатаційні характеристики.

5. Дослідити властивості цементованих покриттів в залежності від їх структури та фазового складу.

6. На основі проведених досліджень розробити технологічні рекомендації з відновлення і поверхневого зміцнення деталей ходової частини вантажних автомобілів.

РОЗДІЛ 2. Методика проведення експериментальних досліджень електроосадженням і цементациєю залізо - хромистих покриттів.

2.1. Особливості отримання електролітичних залізо - хромистих осадів на змінному асиметричному струмі.

Електроосадження залізо хромистих покриттів проведене з використанням сірчанокислового електроліту, який має склад (кг/м²): сірчанокисле залізо FeSO₄ - 250 – 400, нітрат хрому – 5 – 20, Cr(NO₃)₃ сульфат натрію Na₂SO₄ - 20-40. Електроліт отримано поєднання водних розчинів сірчанокислового заліза і нітрату хрому. Для стабілізації електроліту і попередження утворення тривалентного заліза в розчин додавали сульфат натрію. Для проведення експериментів електроліт готували з реактивів марок «ХЧ» та «ХЧА», для їх розчинення використовували дистильовану воду. Кислотність електроліту контролювали з допомогою приладу рН - 340. Налаштування і перевірку приладу виконували за стандартними буферними розчинами. Рівень електроліту підтримували періодичним додаванням підкисленої (H₂SO₄) дистильованої води. Концентрація заліза підтримувалась за рахунок розчинення анодів, виготовлених із мало вуглецевої сталі, а концентрація решти елементів – за рахунок періодичного додавання до електроліту відповідних солей. Для попередження забруднення електроліту

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

анодним шламом, аноди захищали чохлами з кислотостійкої тканини. Для кожного досліджу використовували свіже приготований електроліт.

Масу осадженого металу зважували на аналітичних терезах ВЛА 200М з точністю до 0,1 мг. Електроосаджування залізо-хромистих покриттів виконували з використанням асиметричного змінного струму. Для отримання такого струму використана схема з двома назустріч увімкненими вентилями (рис.2.1)

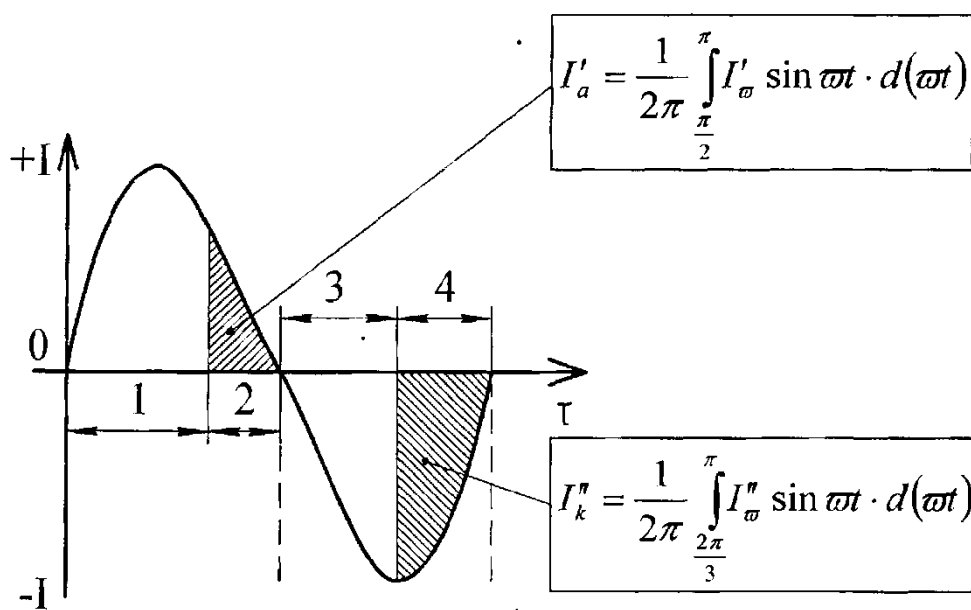


Рисунок 2.1 – Форма електролізного струму: 1,3 – без струменеві паузи; 2, 4 – тривалість анодної і катодної складових.

Кількість металу, що осаджена на поверхні катоду, тобто швидкість осадження покриття, пропорційна середньому за катодний півперіод значенню струму.

										Арк.
										34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Середнє значення струму при однопівперіодному випрямлянні дорівнює

$$I_c = 1/T \int i(t) dt, \quad (2.1)$$

де T – період змінного струму;

t – час;

I_c – максимальне значення катодного струму за півперіод.

При синусоїдному змінному струмі кількість металу, що осаджується на катоді, може бути підраховане за формулою: 2.2

$$I_c = I_k / \pi \quad (2.2)$$

де I_{kmax} – максимальне значення струму анодного півперіоду.

Якщо $I_k > I_a$ то металу на катоді осаджується більше ніж розчиняється і товщина покриття на катоді зростає.

Швидкість нарощування покриття буде пропорційна різниці середніх значень катодного і анодного струмів. Ця величина є важливою характеристикою асиметричного струму, оскільки показує яка частина струму, що підводиться до електролізної ванни, бере участь в осадженні металу (його називають ефективним струмом). Величина цього струму характеризується спеціальним параметром - показником асиметрії (β).

$$\beta = I_k / I_a \quad (2.3)$$

При коефіцієнті асиметрії $\beta = 1$ катодний і анодний струми однакові між електродами у ванні відбувається симетричний змінний струм, і осадження металу на катоді не відбувається. При $\beta > 1$ струм стає асиметричним і при високих значеннях β наближається до постійного.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Правильний вибір величини коефіцієнту асиметрії β тобто вибір співвідношення кількості струму катодного і анодного півперіодів, дозволяє збільшити швидкість осадження (за рахунок використання більш високих густин катодного струму у порівнянні із стаціонарним режимом) і значно покращити якість покриття. Це пояснюється тим, що під час анодного півперіоду відбувається переважно розчинення мікровиступів на поверхні катоду, де зосереджуються внутрішні напруження і дефекти. Покриття формується щільним, гладеньким і, іноді, блискучим (рис.2.2).

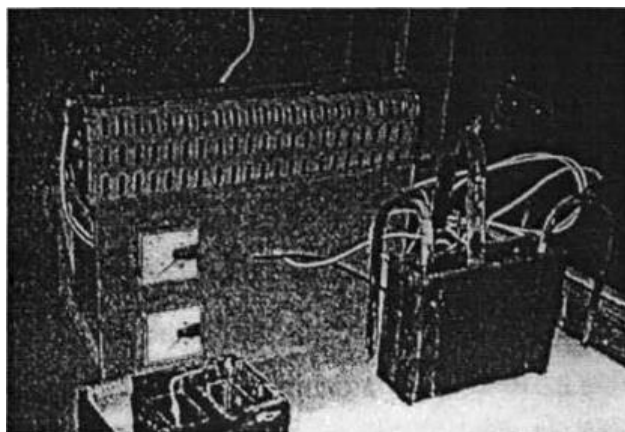


Рисунок 2.2 - Лабораторна установка для отримання електролітичних покриттів на асиметричному струмі.

Електроосадження залізних покриттів з додаванням хрому проводили за стандартною технологією [17].

В роботі використані зразки двох видів – плоскі та циліндричні; зразки спеціальної форми використані для випробувань на знос (рис.2.3).

Знежирення зразків виконували віденським вапном, яким ретельно протирали ділянки, на які передбачалось наносити покриття, після цього зразки промивали холодною водою. Якість знежирення оцінювали візуально: якщо вода рівномірно

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розтікалась по поверхні, а не збиралась в окремі краплі знежирення вважалось якісним.

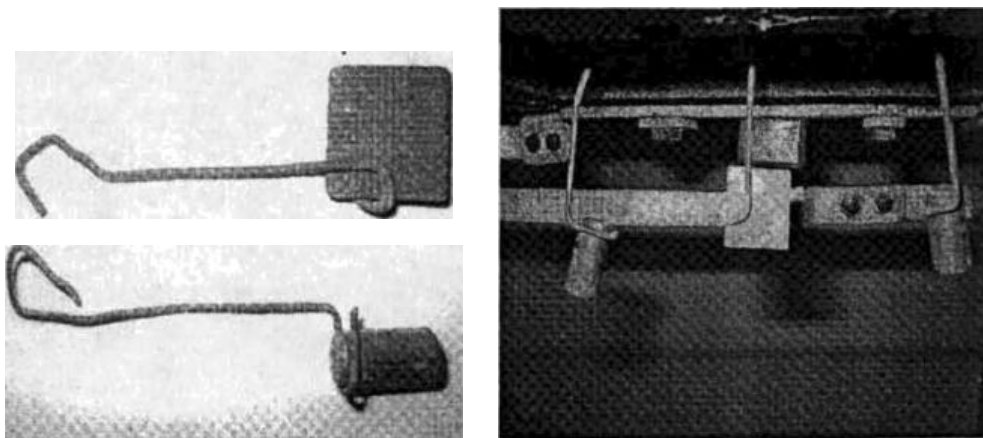


Рисунок 2.3– Зразки для нанесення залізо-хромистих покриттів: а) – плоский і циліндричний зразки; б) – зразки у пристосуванні

2.2. Хіміко - термічна обробка електролітичних залізо – хромистих покриттів

Хіміко – термічну обробку зразків (цементацию) з залізо-хромистими гальванічними покриттями проводили в пастоподібних карбюризаторах на основі дрібнодисперсної сажі з різними прискорюючими добавками. Для цементациї зразків використовували шахтну електропіч типу СШОЛ – 12 – МЗ –Ц4, потужністю 2,2 кВт з розмірами робочого простору: діаметр 1,15 мм, глибина -250 мм. В піч вставляли зварну реторту з кришкою, яка герметично закривалась завдяки пісочному затвору. В реторту вставляли перфорований сталевий контейнер, в якому розміщували зразки з нанесеними і висушеними цементуючими покриттями, або підвішували зразки без контейнера.

Під час цементациї в піч подавали рідкий карбюризатор (синтин), який розкладаючись при високій температурі забезпечував в середині реторти вуглецевмісну атмосферу, що підсилювало навуглецювання (рис 2.4).

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

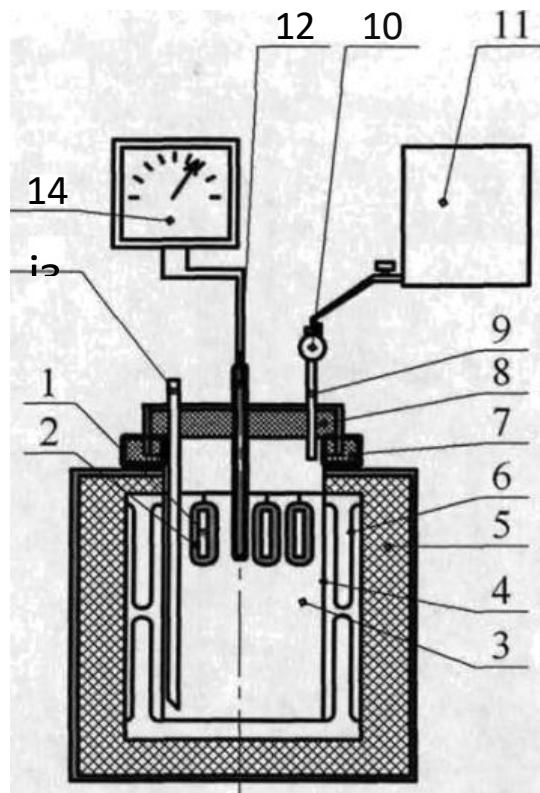


Рисунок 2.4 - Схема лабораторної цементаційної печі: 1 – зразки; 2 – карбонатно-сажовий карбюризатор; 3 – газова атмосфера; 4 – реторта печі; 5 – футеровка; 6 – нагрівачі; 7 – піщаний затвор; 8- кришка; 9 – трубка для подачі карбюризатора; 10 – капельниця; 11 – бачок з рідким карбюризатором; 12 – термопара; 13 – трубка для виходу газу; 14 - потенціометр

Зразки піддавали цементації також з використанням обмазки і твердого наповнювача, для цього використовували циліндричні сталеві контейнери (товщина стінки 3 мм) з кришками.

Перед використанням контейнери піддавали цементації, щоб запобігти витрати вуглецю з карбюризатора на насичення стінок контейнера. Для цього в контейнер насипали деревинно-вугільний карбюризатор і витримували в печі при температурі 900°C протягом 10 годин. Зразки з нанесеною висушеною обмазкою вкладали у підготовлений контейнер, проміжки між

										Арк.
										38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

зразками засипали порошковим наповнювачем (чавунною стружкою або відпрацьованим карбюрізатором) і закривали кришкою. Герметизацію кришки здійснювали сумішшю кварцового піску з вогнетривкою глиною. Контейнер з упакованими зразками завантажували в піч, яка нагріта до заданої температури.

Загальний вигляд установки для хіміко-термічної обробки зразків з гальванічними покриттями показано на рис.2.5.

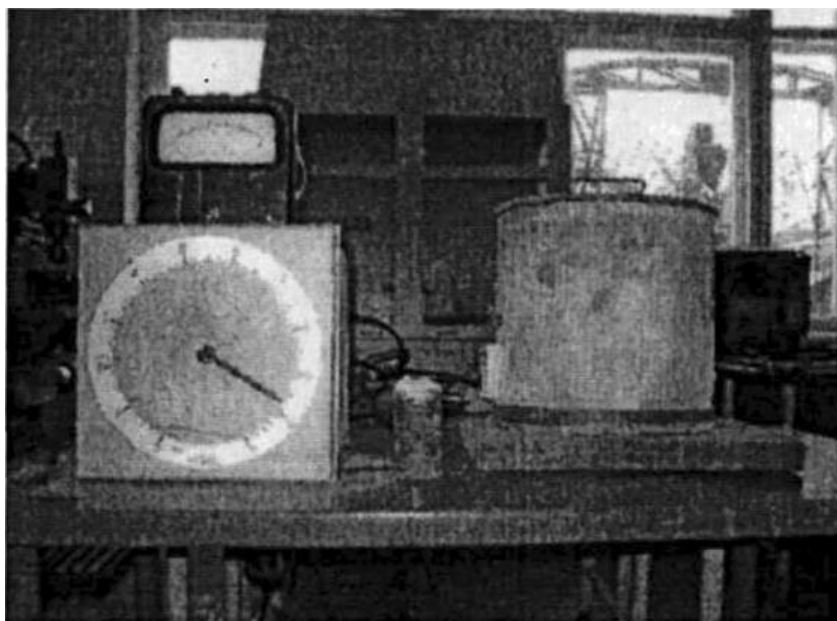


Рисунок 2.5 - Загальний вигляд установки для хіміко-термічної обробки залізо – хромистих покриттів

Охолодження зразків після цементації проводили в контейнерах до температури 400 °С, після чого зразки висипали на решітку, де вони охолоджувались до кімнатної температури. Наповнювач та частина обмаски просипались через решітку в ящик для відпрацьованого карбюрізатора.

Зразки, які піддавали цементації без контейнерів, використовували для гартування з цементаційного нагрівання. Гартування цементованих зразків

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проводили після їх очищення від залишків нанесеної пасти нагріванням в муфельній печі ТП-2. Для охолодження при гартуванні використовували мінеральне масло та воду. Відпуск зразків після гартування проводили в тій самій печі, що і гартування.

2.3 Методи визначення складу, структури, фізико-механічних властивостей гальванічних покриттів.

Хімічний аналіз використано для визначення складу гальванічних залізо-хромистих покриттів після їх нанесення на підшар та після хіміко-термічної обробки. Використано спектральний експрес аналізатор з точністю $\pm 0,01\%$. Твердість зразків з залізо-хромистими покриттями вимірювали також після нанесення покриття та після зміцнюючої обробки методом Роквелла на твердомірі ТР-5006. Мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженнях 0,49 – 1, 96 Н.

Мікроструктурний аналіз проводили для дослідження структури нанесених залізо – хромистих покриттів та після цементації і термічної обробки. Використано металографічний мікроскоп МИМ-8.

Мікрошліфи готували методом електрополірування в оцтово-хлористому електроліті, травлення зразків виконували 4% розчином азотної кислоти в спирті.

Рентгеноструктурний аналіз використовували для визначення фазового складу цементованих шарів і результатів термічної обробки на рентгенівському дифрактометрі ДРОН -3 з використанням хромового та кобальтового випромінювання.

Для випробувань на зчеплення використана методика [103], згідно якої міцність зчеплення визначали по зусиллю відриву торця штифта від покриття, нанесеного на спеціальне пристосування (рис.2.6)

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

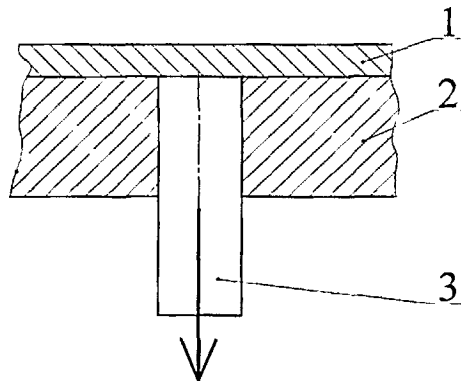


Рисунок 2.6 – Пристосування для випробування на зчеплення: 1 – електролітичне покриття; 2 – корпус; 3 - штифт

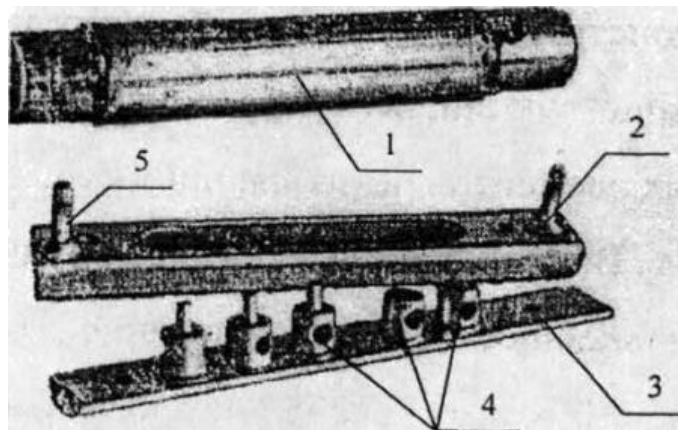


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд блоку для визначення міцності зчеплення: 1 – блок після електролізу; 2 – корпус блоку; 3 – кришка блоку; 4 – штифти; 5 - гвинт

Випробування на відрив проводили на розривній машині Р-5.

Міцність зчеплення електролітичного покриття з торцем штифта розраховували за формулою :

$$\sigma = 4P / \pi D^2 \quad (2.4)$$

Де P – зусилля відриву;

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Д – діаметр штифта

2.4. Визначення зносостійкості і ударної в'язкості зразків з залізо-хромистими покриттями.

Для визначення зносостійкості цементованих шарів електролітичних залізо-хромистих покриттів проведені дослідження по визначенню зношування цих шарів напів- закріпленим кварцевим абразивом, а також зношування гальванічних покриттів при терті по сталевому контртілі з мастилом та без мастила (рис. 2.8). На поверхні ролика нанесене карбування для кращого підбирання абразивних часточок. Для зменшення нагрівання зразка ролик обертається з невеликою швидкістю.

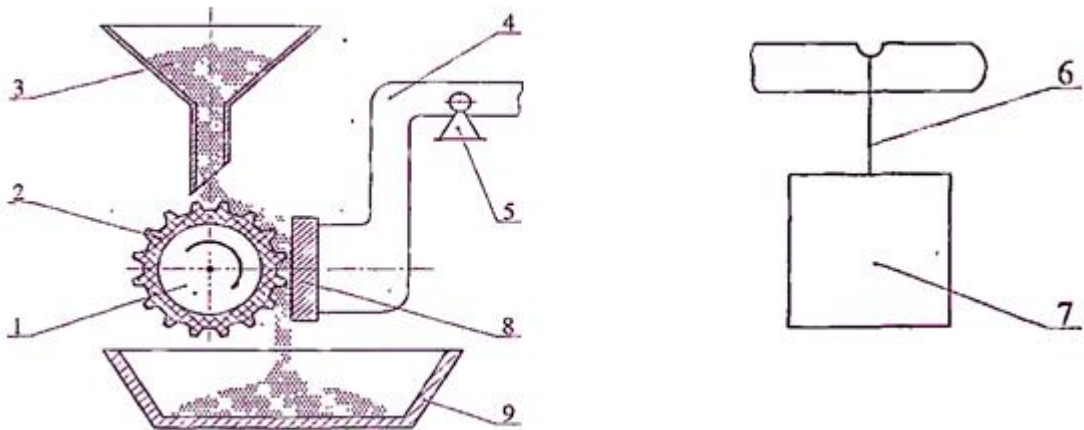


Рисунок 2.8– Схема випробувань цементованих зразків на абразивну зносостійкість: 1 – сталевий ролик; 2 – гумове покриття з карбуванням; 3 – бункер з абразивним матеріалом (піском); 4 – коромисло; 5 – шарнірне кріплення коромисла; 6 – підвіска; 7 – вантаж; 8 – зразок; 9 – піддон для відпрацьованого абразиву.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Знос визначали як різницю маси зразків до і після випробувань зважуванням на лабораторних терезах ВЛА 200М з точністю 0,0001 г.

Відносну зносостійкість визначали як відношення зносу еталону (маловуглецевої сталі 20 після відпалу) до зносу зразка. Випробування еталону проводили після кожного випробування зразка.

Для експериментального дослідження зносостійкості електролітичних покриттів використовували зразки із сталі 20 розміром 30x10x5 мм, на які наносили електролітичне залізо-хромисте покриття товщиною 0,5 мм. Тертю піддавали бокову поверхню зразка по поверхні зразка з нанесеним шаром гуми. Установка змонтована на токарному верстаті.

Зносостійкість гальванічних покриттів досліджували на машині тертя СМЦ-2 (рис.2.9), за схемою «ролик – колодка» (рис.2.10) .

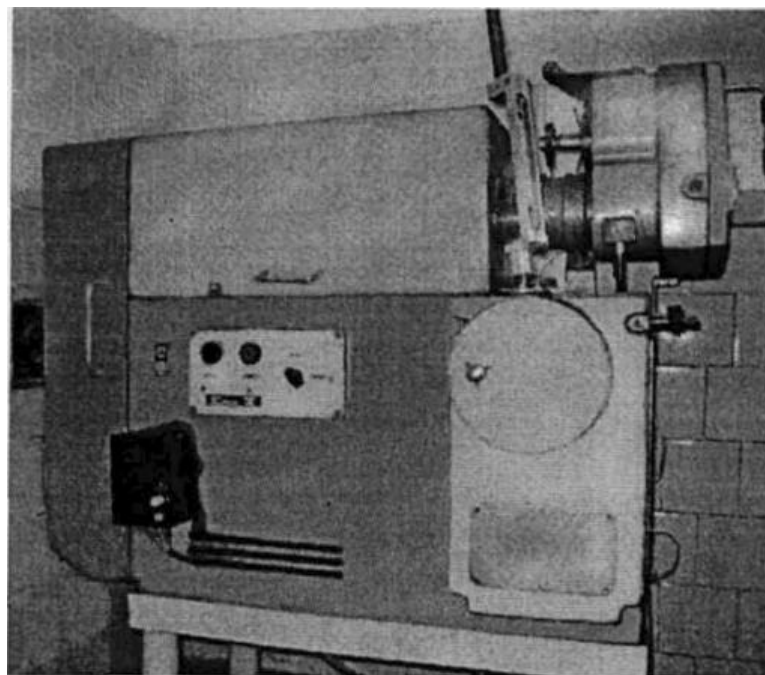


Рисунок 2.10 – Машина тертя СМЦ - 2 для дослідження зносостійкості цементованих зразків

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

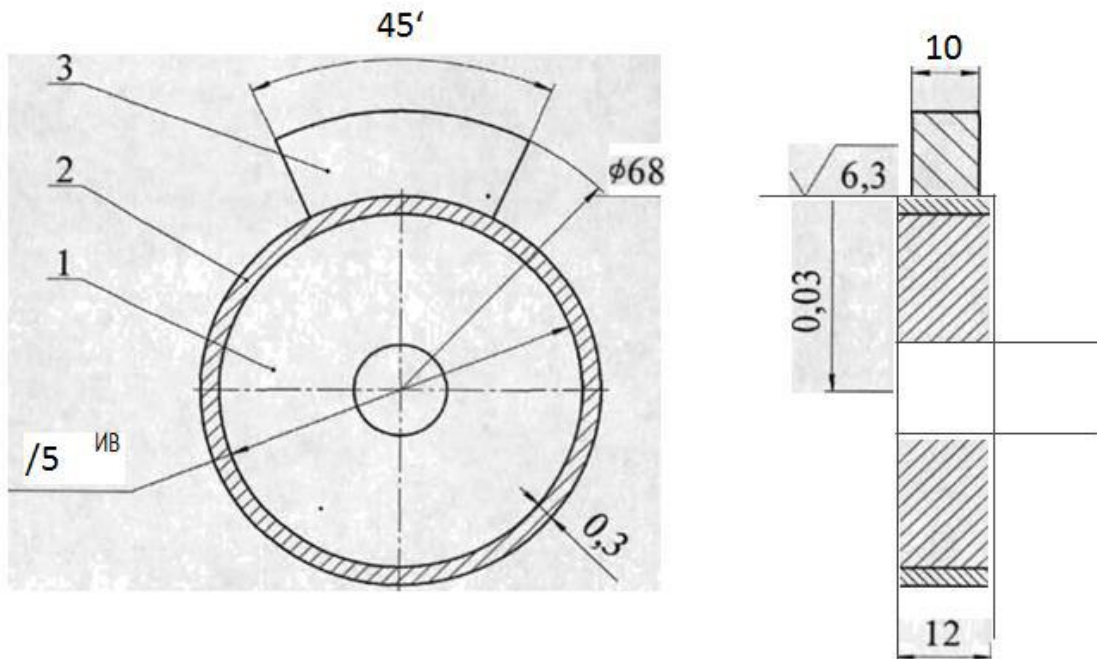


Рисунок 2.11 – Схема зношування зразків на машині тертя - «ролик - колодка»: 1 – ролик; 2 – гальванічне покриття; 3 – колодка (контр тіло – сталь 45, HRC 48...50)

Частота обертання ролика 1000 об/хв. В зону тертя краплями подавали мінеральне масло. Знос визначали ваговим методом.

Стійкість цементованих зразків до схоплювання та заїдання визначали при терті без змащування. Робочі поверхні зразка і контр тіла перед початком випробувань знежирювали ацетоном та етиловим спиртом. Запускали машину і поступово збільшували тиск на колодку до початку схоплювання. На полірованій поверхні зразка з'являлись стрічки задирок. (рис.2.12).

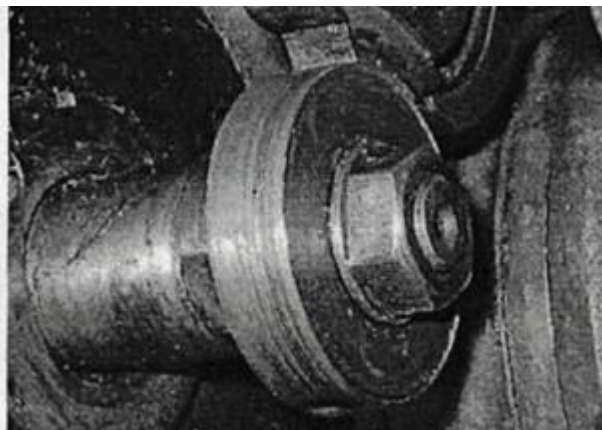


Рисунок 2.12 – Сліди схоплювання на цементованому ролику

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Ударну в'язкість цементованих гальванічних покриттів визначали на зразках малого перерізу за методикою [20]. Для випробувань виготовляли спеціальні зразки із низьковуглецевого дроту діаметром 2 мм, на поверхню яких наносили залізо-хромисте покриття товщиною 0,3 мм на кожний бік з вмістом хрому 1,5 %. Зразки піддавали цементації за різними режимами для отримання різного вмісту карбідів в структурі.

Випробування проводили на маятниковому копрі (рис.2 13- 2.15)

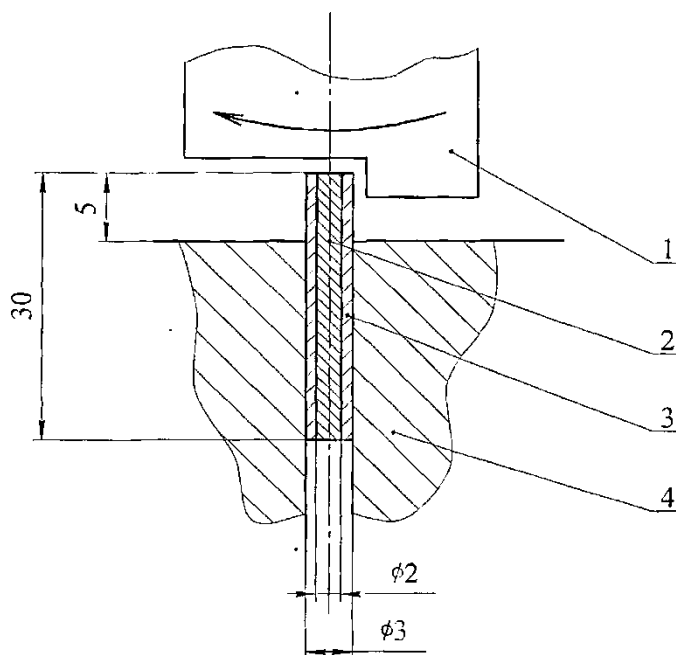


Рисунок 2.13- Схема визначення в'язкості цементованих зразків з залізо-хромистими покриттями: 1 – ніж маятника; 2 – стрижень; 3 – гальванічне покриття; 4 – лещата;

Ударна в'язкість визначається як робота, яку витрачають на злом зразка, віднесена до вихідної площі поперечного перерізу:

$$a = A / F, \quad (2.7)$$

де - F - площа поперечного перерізу зразка

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Дослідження процесу електроосаджування залізо-хромистих покриттів

3.1.1 Особливості електроосаджування залізо-хромистих покриттів на асиметричному змінному струмі.

Хром в чистому вигляді досить легко осаджується на поверхні сталевих виробів із водних електролітів [15]. Електролітичний хром володіє високою твердістю (5000...10000 МПа) низьким коефіцієнтом тертя досить високою теплостійкістю і корозійною стійкістю.

Нажаль, процес осадження чистого хрому має низьку продуктивність, а в хромових осадах виникають значні напруження розтягу (вищі ніж у залізних осадах), що значно зменшує межу витривалості хромованих виробів. Враховуючи це, було запропоновано осаджувати не чистий хром, а хром одночасно з залізом для одержання залізо-хромистих осадів з підвищеними фізико-механічними властивостями, які поєднують позитивні якості хрому та заліза (високу твердість в поєднанні з низькими напруженнями розтягу). Позитивна роль хрому в залізних електролітичних покриттях проявляється після проведення їх зміцнюючої обробки (цементації, нітроцементації), яка забезпечує утворенню в дифузійних шарах значної кількості твердих карбідних включень, що в декілька разів підвищує їх зносостійкість.

Електроосадження залізних покриттів і деяких багатоконпонентних сплавів на основі заліза здійснюють із хлоридних електролітів (на основі хлориду заліза), які дозволяють проводити процес з підвищеною швидкістю. В літературі є інформація про одержання хлоридних електролітичних покриттів, легованих марганцем, нікелем, кобальтом та іншими елементами, які забезпечують цим покриттям підвищені фізико-механічні та експлуатаційні властивості.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримати залізо-хромисті покриття шляхом уведення в хлоридний електроліт хрому (хромового ангидриду) не забезпечує покриттям потрібної якості. При проведенні процесу на великих струмах (на жорсткому режимі) покриття формується дефектним з великою кількістю тріщин і недостатнім зчепленням з основою. Якщо режими електролізу пом'якшити, то залізо-хромисті покриття осаджуються з дуже малою швидкістю і мають низьку твердість.

В роботі пропонується використати для отримання залізо-хромистого покриття електроліт (сірчаноокислий) на основі сірчаноокислого заліза (FeSO_4), який дозволить отримати покриття з більш високою якістю, ніж хлоридні.

Недоліком сірчаноокислих електролітів є невисока швидкість осадження металу, але для компенсації цього недоліку використано замість постійного струму – асиметричний.

Електроліт має такий склад - кг/м³: сірчаноокисле залізо FeSO_4 - 250...400 ; нітрат хрому - $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ – 5...20; сульфат натрію - Na_2SO_4 - 20...40.

Для отримання гальванічних покриттів у виробничих умовах найбільш вигідним є асиметричний змінний струм промислової частоти. Для якого потрібно досить просте електротехнічне обладнання. Використання асиметричного струму для одержання залізних покриттів збільшило швидкість осадження та покращило якість покриття.

При використанні для електроосадження залізо-хромистих покриттів асиметричного струму на продуктивність процесу і якість покриттів суттєвого впливає не тільки густина струму (як і при постійному струмі), але й коефіцієнт асиметрії. Цей коефіцієнт (чи показник) показує співвідношення катодного і анодного півперіодів асиметричного струму:

$$\beta = J_k / J_a$$

де β - показник асиметрії;

J_k – струм катодного півперіоду;

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

J_a – струм анодного півперіоду

При $\beta = 1$ катодний і анодний струми однакові ($J_k = J_a$) і між електродами у ванні тече змінний струм, а електроосадження не відбувається.

При $\beta > 1$ струм стає асиметричним ($J_k > J_a$) і на катоді осаджується більше металу ніж розчиняється. За правильного вибору співвідношення кількості струму катодного і анодного півперіодів (при правильному виборі коефіцієнта асиметрії β) швидкість осадження металевого покриття може бути отримана значно вищою, ніж при стаціонарному (на постійному струмі) режимі.

Асиметричний струм сприяє формуванню покриттів підвищеної якості. Під час анодного півперіоду відбувається розчинення мікровиступів на поверхні катоду (на поверхні покриття), що сприяє формуванню гладеньких і щільних (з малою кількістю дефектів) покриттів.

Покриття, які отримують з використанням струму змінної полярності, відрізняються від покриттів, які одержують на постійному струмі, мікроструктурою та фізико-механічними властивостями.

Проведені дослідження по впливу коефіцієнту асиметрії електролізного струму на продуктивність процесу осадження залізо-хромистих покриттів.

Електроосаджування здійснювали в електроліті такого складу: 250 кг/м³ сірчаноокислого заліза, 10 кг/м³, 20 кг/м³ сульфату натрію; густина струму 20 А/дм². Під час експерименту змінювали показник асиметрії, і зважуванням осадженого металу, визначали вихід сплаву за струмом, тобто продуктивність процесу електроосаджування. Результати експерименту представлені на рис. 3.1

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

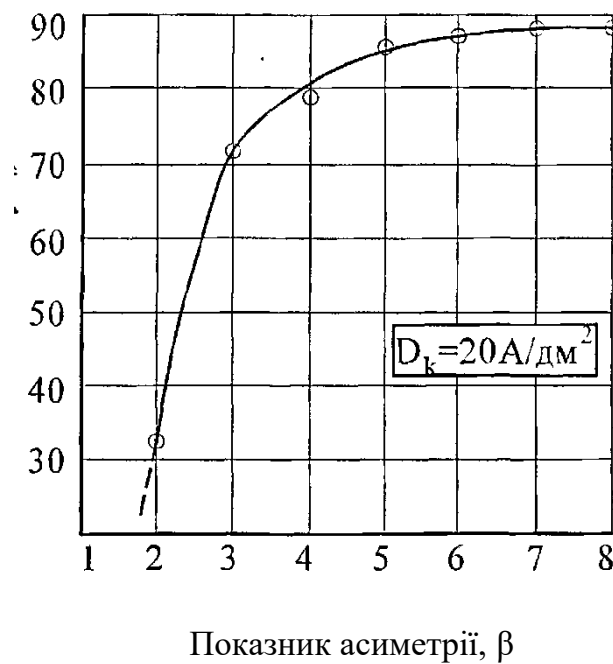


Рисунок 3.1 – Вплив показника асиметрії електролізного струму на вихід за струмом залізо-хромистого гальванічного осаду.

З графіку видно, що збільшення коефіцієнту на початку інтенсивно збільшує вихід сплаву за струмом, а потім практично на цей показник не впливає.

При значеннях коефіцієнту асиметрії $\beta = 3$ вихід за струмом незначний, нижчий ніж у сплаву, осадженого на постійному струмі.

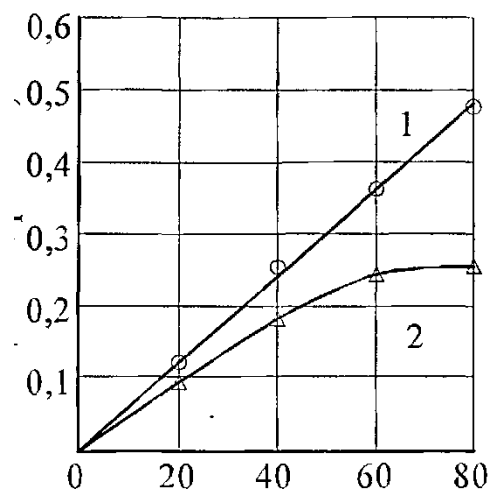
При збільшені показника асиметрії β до 5...6, вихід за струмом досягає значень, які притаманні постійному струму, після чого залишається постійним і високим (85 ...88%). Асиметричний струм при проходженні через електроліт, викликає його значне нагрівання (до 60...70 °C). Це знижує вихід за струмом залізо-хромистого покриття (на 5...8%) і зменшує жорсткість умов електролізу.

Продуктивність процесу електроосаджування визначається не тільки значенням показника асиметрії, але головним чином, густиною катодного струму (відношенням середньої величини струму катодного півперіоду до площі поверхні катоду).

Досліджено вплив густини катодного струму при оптимальному значенні коефіцієнту асиметрії $\beta = 6$) на товщину гальванічного залізо-хромистого покриття (основа – сталь 08).

Досліджено вплив катодного струму на продуктивність електроосаджування при підвищених показниках асиметрії, тобто за умов, які наближені до стаціонарних.

Результати експерименту показані на рис. 3.2



Густина катодного струму A/dm^2

Рисунок 3.2 - Залежність товщини гальванічного залізо-хромистого покриття від густини струму при різних показниках асиметрії: 1 – $\beta=6$; 2 – $\beta=10$.

Тривалість електролізу 30 хв.

Проведені дослідження дозволили з'ясувати, що існує якась межа збільшення показника асиметрії вище якого продуктивність процесу електроосаджування зменшується.

Для коефіцієнту асиметрії $\beta = 6$ швидкість осадження сплаву майже прямо пропорційна величині катодного струму. При $\beta = 10$ густина струму може бути збільшена до $80 A/dm^2$ і за 30 хвилин електролізу можна отримати залізо-хромисте покриття товщиною 0,45 мм (рис.2.9 -1). При $\beta = 10$ максимальна товщина

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

покриття за той самий проміжок часу дорівнювала 023 мм при густині струму $60\text{A}/\text{дм}^2$, подальше збільшення густини струму не сприяє збільшенню товщини покриття, навпаки, товщина покриття при збільшенні густини струму (за $60\text{A}/\text{дм}^2$) знижує швидкість осадження залізо-хромистого покриття (рис.2.9.-2)

Величина коефіцієнту асиметрії і густини катодного струму суттєво впливають не тільки на швидкість осадження, але й на якість покриття: колір, шорсткість, наявність тріщин тощо .

Коефіцієнт асиметрії необхідно вибирати в межах ($\beta = 3 \dots 6$, густина струму може бути $30\text{A}/\text{дм}^2$). Чим менший коефіцієнт асиметрії, тим вищою може бути густина струму.

Інтенсивність росту покриття і його якість суттєво залежать від розмірів деталі (кривизни її поверхні) – чим більший діаметр деталі, тим більша допустима товщина якісного покриття. Так, для деталі діаметром 80 мм можливо отримати залізо-хромисте покриття товщиною 3 мм. Отримати таку товщину на зразках меншого діаметра не вдається із – за тріщин, які виникають в покриттях при подальшому збільшенні їх товщини.

На постійному струмі не вдається отримати покриття значної товщини навіть на деталях великих розмірів. Тому нарощування поверхневих шарів на деталях з великим зносом можливе тільки з використанням струму змінної полярності, вибирати при цьому менші значення коефіцієнту асиметрії і густини катодного струму. Потрібну товщину покриття регулювати тривалістю процесу.

3.1.2. Вплив умов електроосаджування на вміст хрому в гальванічних покриттях.

Досліджено вплив концентраційних змін в електроліті і режимів електролізу (густина струму, коефіцієнту асиметрії і температури) на склад, швидкість осадження і структуру залізо-хромистих покриттів
Для дослідження впливу співвідношення сірчаноокислого заліза і азотноокислого хрому в електроліті на вміст хрому в гальванічному осаді

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проведено дослід з використанням математичного планування експерименту.

В якості критеріїв вибрано два параметри - вміст хрому в гальванічному осаді (Y_0) і швидкість осадження покриття (Y_1). Вміст хрому в залізо - хромистому покритті визначали спектральним експрес – аналізом з точністю до 0,01%, швидкість осадження визначали замірами товщини покриття на циліндричних зразках. Змінними факторами, які впливають на критерії оптимізації, вибирали вміст сірчаноокислого заліза ($FeSO_4$) $Cr(NO_3)_3$ в електроліті.

Концентрацію сірчаноокислого заліза змінювали від 250 до 400 кг/м³, а азотноокислого хрому – від 5 до 20 кг/м³. Електроліз в усіх дослідках проводили за однаковими режимами: густина катодного струму - $I_k = 30$ А/дм; коефіцієнт асиметрії $\beta = 5$; температура електроліту $t = 20^\circ C$; тривалість процесу $\tau = 30$ хв.

За результатами проведеного експерименту отримано два адекватних рівняння регресії, які описують вплив складу електроліту на вміст в гальванічному осаді хрому і на швидкість осадження залізо-хромистого покриття.

Ці рівняння (математичні моделі) мають такий вигляд:

1) для вмісту хрому в гальванічному залізо-хромистому осаді

$$Y_1 = 3,55 - 0,59x_1 + 1,58x_2^2 - 1,22x_1x_2 + -0,55x_2^2 \quad (3.2)$$

$$Y_2 = 0,58 + 0,13x_1 - 0,12x_2 - 0,05x_2^2 \quad (3.3)$$

Y_2 – швидкість осадження залізо-хромистих покриттів, мм/год.

X_1 і X_2 – відповідно вміст в електроліті сірчаноокислого заліза.

Отриманих даних можна зробити наступні висновки.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Складові електроліту мають значний вплив на вміст хрому в електролітичному сплаві (рівняння 3.2). Нітрат хрому інтенсивно впливає позитивно (хг), а сірчаноокисле залізо (хі) – негативно впливає, хоча його дія набагато слабша.

Підвищення вмісту хрому в електроліті сприяє збільшенню швидкості осадження залізо-хромистого сплаву (рівняння 3.3).

Азотнокислий хром практично не впливає на швидкість осадження залізо-хромистого покриття. Підвищення концентрації сірчаноокислого заліза в електроліті сприяє зниженню вмісту хрому в гальванічному осаді, незалежно від концентрації нітрату хрому. Підвищення концентрації сульфату заліза в електроліті підвищує швидкість осадження хромистого сплаву.

Збільшення концентрації азотнокислого хрому в електроліті сприяє підвищенню вмісту хрому в гальванічному осаді. На швидкість осадження залізо-хромистого сплаву нітрат хрому майже не впливає.

Найбільш раціонально використовувати електроліт, який забезпечує максимальну швидкість осадження, отже електроліт в якому концентрація сульфату заліза FeSO_4 сягає 400 кг/м^3 . Заданий вміст хрому в гальванічному покритті доцільно отримувати змінюючи концентрацію в електроліті нітрату хрому $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$. Концентрацію сірчаноокислого заліза в електроліті не потрібно збільшувати за 400 кг/м^3 , тому що це погіршує якість покриття – на поверхні осаду утворюється сітка глибоких тріщин та утворюється дендритна структура.

Досліджено вплив режимів електролізу (густини струму, коефіцієнту асиметрії та температури електроліту) на якість покриття. Склад електроліту - 400 кг/м^3 сірчаноокислого заліза та 12 кг/м^3 азотнокислого хрому. Густина струму $I_k = 20 \text{ А/дм}^2$. Експериментальні дані показали, що зміна густини струму на склад покриття впливає не суттєво, а збільшення густини струму з 10 до 25 А/дм^2 підвищує вміст хрому у покритті на 0,5% (з 2,5 до 3,0%).

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт асиметрії електролізного струму більш активно впливає на склад покриття. Збільшення коефіцієнту асиметрії з β до $\beta_{ох}$ сприяє підвищенню хрому в покритті з 1 до 3%. Подальше збільшення коефіцієнту асиметрії не впливає на вміст хрому в покритті.

При температурах електроліту нижче за $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вміст хрому в покритті зменшується, а при температурах вищих за $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ вміст хрому в покритті зростає.

Отримані результати дозволяють рекомендувати оптимальні режими електроосадження залізо-хромистих покриттів: густина катодного струму $I_k = 40 \dots 50\text{ А/дм}^2$, коефіцієнт асиметрії $\beta = 6$, температура електроліту $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для підтримання заданої температури електроліту потрібно в електролізній ванні передбачити пристрої для охолодження електроліту (використовувати ванни з подвійними водо охолоджувальними стінками, розміщувати в ванні змієвик з холодною водою тощо).

Вплив режимів електролізу на товщину залізо-хромистого осаду, отриманого із електроліту визначеного нами оптимального складу, показано на рис. 3.10.

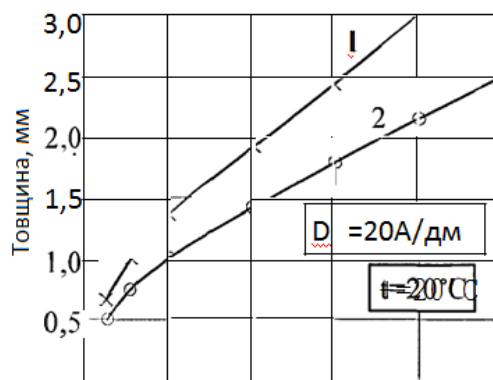


Рисунок 3.3 – Залежність товщини залізо-хромистого покриття від тривалості електролізу ($I_k = 20\text{ А/дм}^2$, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) з різними значеннями коефіцієнту асиметрії: 1 – $\beta = 6$; 2 – $\beta = 4$

Дослідження впливу режимів електролізу на товщину залізо-хромистого осаду , отриманого з електроліту оптимального складу, показало, що за досить короткий проміжок часу (за одну робочу зміну) є можливість нанесення залізо-хромистих покриттів на відновлених деталях товщиною 2...2,5 мм з високою якістю та вмістом хрому 3%.

3.1.3 . Структура і властивості залізо-хромистих електролітичних покриттів

Поверхнєве зміцнення деталей , яке здійснюється комплексним способом, тобто наноситься покриття з заданим вмістом хрому і потім проводиться хіміко-термічна обробка цього покриття, то мета операції електроосадження має забезпечити достатньо високу швидкість отримання гальванічного покриття.

Однак, пріоритетним має бути якість покриття, яка визначає задані властивості деталі. Залізо-хромисте покриття не повинне мати на поверхні тріщин та інших дефектів, має бути щільним з високими показниками величини зчеплення з основним металом.

Проведені експерименти показали, що умови електролізу впливають на вміст хрому в залізо – хромистих осадах, а також на структуру і властивості цих осадів.

Досліджено мікроструктуру осадів, отриманих електролізом з електроліту з концентрацією FeSO_4 (400 кг/м³, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ 12 кг/м³), коефіцієнтом асиметрії $\beta = 6$, при температурі електроліту $t = 20^\circ\text{C}$.

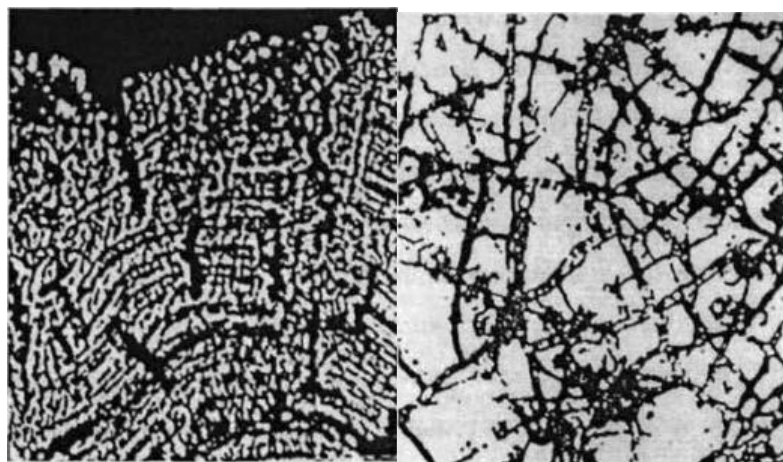
Під час експерименту густину катодного струму I_k змінювали від 10 до 40 А/дм², тривалість осадження -30 хв., матеріал катоду – сталь 80.

Після нанесення покриття зразки ретельно промивали і висушували.

Мікрошліфи вирізали в поперечному напрямку, піддавали

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електрополіруванню, для виявлення мікроструктури вибрано 4% розчин азотної кислоти в спирті. Мікроструктура зразків представлена на рис. 3.4.



а)

б)

Рисунок 3.4– Мікроструктура поверхневого шару залізо-хромистого покриття, отриманого при підвищеній густині струму (40 А/дм^2) – а); поверхня цього покриття з сіткою тріщин (б)

Експериментальні дані показують, що залізо-хромисті покриття, отримані на асиметричному струмі, мають шарувату будову, незалежно від режиму його отримання. Чим більшою є густина катодного струму, тим більш чіткою є границя між шарами, які орієнтовані паралельно підложки. При зростанні густини струму виявляються тріщини, які навіть виходять на поверхню та утворюють характерну сітку (рис. 3.4 – б).

Механізм утворення шарів покриття при осадженні електролітичних покриттів на основі заліза наразі досліджено недостатньо. Шаруватість покриття погіршує однорідність нанесеного металу, зменшує його щільність.

Гальванічні покриття на основі заліза [12] мають меншу щільність, ніж залізо, отримане металургійним способом. Електролітичне залізо має високий ступінь хімічної чистоти, тому менша щільність осаду зумовлена наявністю в ньому

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значної кількості дефектів структури (вакансій, дислокацій, границь блоків).

Густину електроосаженого залізо-хромистого сплаву визначали експериментально, зважуванням зразків на аналітичних терезах до та після осадження. Об'єм осадженого металу визначали зануренням зразка у циліндричний мірний стакан з етиловим спиртом. Залежність густини електролітичного залізо-хромистого осаду від густини катодного струму і коефіцієнту асиметрії показана на рис. 3.5 – 3.6.

Наведені дані свідчать, що режими електролізу суттєво впливають на густину електролітичного осаду (коефіцієнт асиметрії впливає активніше, ніж густина струму).

Збільшення густини катодного струму до 20 А/дм^2 знижує густину залізо-хромистого осаду майже до $7,2 \text{ г/см}^3$ (густина металургійного заліза $7,8 \text{ г/см}^3$), подальше підвищення сили катодного струму зменшує густину осаду не суттєво. Збільшення струму з 20 до 40 А/дм^2 сприяє подальшому зменшенню густини залізо-хромистого сплаву з $7,2$ до $7,1 \text{ г/см}^3$ (рис.3.12).

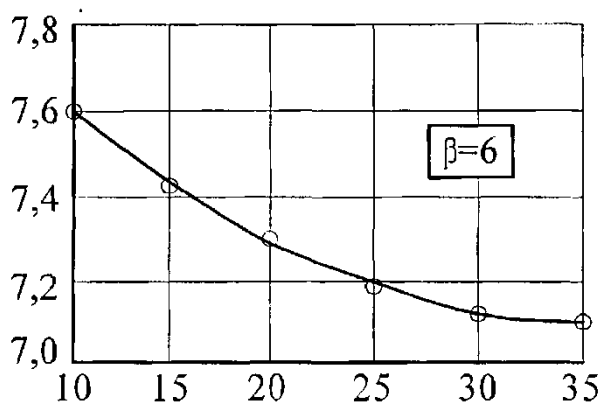
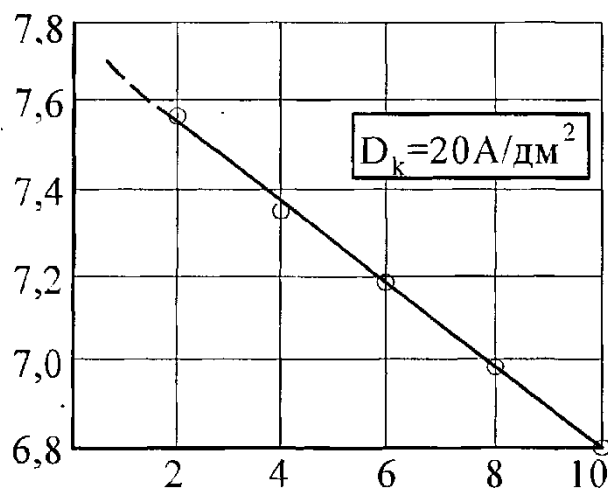


Рисунок 3.5. Залежність густини електроосаженого залізо-хромистого сплаву від густини катодного струму (I_k), коефіцієнт асиметрії $\beta = 6$

Збільшення коефіцієнту асиметрії струму в електролізній ванні сприяє зниженню густини електролітичного осаду майже прямолінійно (рис. 3.6)

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Густина осаду, г/см³



Коефіцієнт асиметрії

Рисунок 3.6 – Залежність густини електроосажденного залізо хромистого сплаву від коефіцієнту асиметрії (густина катодного струму $I_d = 20 \text{ А/дм}^2$)

Допускають, що причиною зменшення густини електролітичного осаду, яке виявлене при жорстких режимах електролізу (при збільшенні густини катодного струму та коефіцієнту асиметрії) є збільшення щільності дислокацій та інших дефектів в структурі осаду, яке супроводжується подрібненням зерна та блоків мозаїки. При досягненні блоками мозаїки певної величини (250...300 А) мінімальної межі відбувається руйнування осаду з утворенням сітки мікротріщин [22]. Утворенню дефектів (зниженню густини осаду) сприяє потужний струмінь водню, що виділяється на катоді одночасно з іонами металу .

Збільшення температури електроліту не сприяє вирішенню задач, поставлених в роботі так як підвищення температури електроліту зменшує вміст хрому в осаді. Висока температура електроліту погіршує технологічні умови ведення процесу і викликає екологічні проблеми.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Очевидним є факт, що міцність зчеплення покриття з основою є одним з основних факторів, які визначають його якість. Міцність зчеплення покриття з основним металом визначається силами взаємодії між атомами основного металу та покриття.

Міцність зчеплення електролітичних осадів з основним металом залежить від багатьох факторів: фізико-механічних властивостей металів (основного та осаджуваного); від складу електроліту; режимів електролізу та інших.

Особливу увагу слід приділяти якісній підготовці поверхні основи перед осаджуванням. Отримати осади, які мають високу міцність зчеплення з основним металом, можливо за умови повного видалення з поверхні катоду (основного металу) окисних плівок, які завжди є на поверхні металів та збереження чистоти поверхні до початку процесу електролізу.

Найбільш надійним способом підготовки робочої поверхні є формування на ній тонкої пасивної плівки, яка суттєво змінює механізм осадження.

Поверхня зразка в звичайному стані (без підключення до джерела струму) має будову окремих ділянок, які суттєво відрізняються між собою за ступенем активності, тобто здатності адсорбувати атоми з оточуючого середовища. Під час електролізу метал кристалізується на більш активних ділянках поверхні і далі відбувається переважно ріст уже утворених кристалів.

Осадження на менш активних місцях катоду, ще не покритих електричним осадом, ще більше утруднюється тим, що утворення нових зародків на катоді потребує більшого підводу енергії, ніж ріст кристалів на вже готових зародках. Не покриті ділянки катоду інтенсивно окислюються при контакті з електролітом і ще більше втрачають активність, кристали, які ростуть постійно оновлюють поверхню і зберігають свою активність.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пасивована поверхня катоду покрита тонкою (декілька атомних шарів) оксидною плівкою і активність поверхні катоду вирівнюється, так як на більш активних ділянках плівка окисла товща, а на менш активних – тонша. При включенні напруги пасивна окисна плівка починає відновлюватись до металу атомарним воднем, який виділяється. Так як на менш активних ділянках катоду плівка буде тоншою, то вона може відновитись раніше, і ці ділянки раніше вкриються осадженим металом. У подальшому відновлюється більш товста плівка на більш активних ділянках вихідного металу і ці ділянки покриваються осадженим металом. В такій послідовності створюється суцільний, відносно рівномірний, шар покриття [14].

При великих значеннях шорсткості відбувається екранування глибоких впадин поверхні. Підвищенню міцності зчеплення сприяє оптимальна шорсткість поверхні основного металу. Висота нерівностей не повинна перевищувати 10...20 мкм хні катоду (густина струму у впадинах менша, ніж на височинах, що зменшує контактну поверхню покриття на деталі, внаслідок чого міцність зчеплення зменшується.

Отримання міцного зчеплення електролітичного осаду зумовлене процесами, які відбуваються на початку електроосаджування, коли створюються можливості для виникнення максимальних сил взаємодії осаду, що росте з металом підложки (основи).

Отже, для підвищення зчеплення електролітичного покриття з основним металом потрібно виконувати такі умови:

- 1) перед нанесенням на поверхню очищеного та знежиреного катоду (деталі) електролітичного покриття, на ній потрібно створити тимчасову пасивну плівку;
- 2) плівку потрібно відновити в робочому електроліті;
- 3) перші шари металу потрібно осаджувати на м'яких режимах електролізу для забезпечення максимально можливої відповідності параметрів кристалічних ґраток осаду та основного металу.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконання цих умов забезпечується певною послідовністю технологічних операцій, які передують осадженню. Ці операції полягають в анодному травленні поверхні деталі, короткочасній витримці деталі в робочому електроліті без струму та поступовому підвищенні густини струму і показника асиметрії до значень робочого режиму.

Найбільшого зчеплення можна досягти, якщо кристалічна решітка покриття буде когерентним продовженням кристалічної решітки основи. Вважають, що задовільне відтворення структури основного металу можливе в тому випадку, коли параметри решітки основного металу і металопокриття відрізняються не більше ніж на 10...15%. При більшій різниці параметрів решітки металу катоду і металу, що осаджується міцність невисока.

Міцність зчеплення осаду і основи залежить також від однорідності структури основного металу, яка визначається способом одержання сталі, способом отримання заготовки, проведеною механічною та термічною обробкою.

Виробничий досвід свідчить, що сталі з високим вмістом вуглецю та високолеговані значно важче, ніж низьколеговані та низько вуглецеві.

Попередньо проведена термічна чи хіміко-термічна обробка деталей також ускладнює процес покриття їх електролітичним металом.

Навіть короткочасне перебування чистого металу на повітрі викликає утворення на його поверхні окисних плівок, товщина яких залежить від природи металу, складу атмосфери, температури оточуючого середовища тощо.

В атмосфері сухого повітря при кімнатній температурі на сталі утворюються окисли Fe_2O_3 товщиною до 20 А (2 нм). Ці плівки перешкоджають металевому контакту (виникненню металевого типу зв'язку) осаду з основою.

Пасивні плівки підвищують рівномірність осадження покриття і відіграють позитивну роль у підвищенні зчеплення покриття з основою. В цьому випадку основною умовою забезпечення високої міцності зчеплення є забезпечення можливості відновлення окисних плівок в перші моменти електролізу.

З іншого боку, пасивні плівки підвищують рівномірність осадження покриття і відіграють позитивну роль у підвищенні зчеплення осаду з основою. Для цього

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потрібно створити умови для відновлення окисних плівок у перші моменти електролізу.

Відновлення окислів забезпечується активним воднем, який у великих кількостях виділяється на поверхні катоду



Водень виділяється на катоді при значно меншому перенапруженні, ніж метал, тому початок процесу потрібно проводити при мінімальних значеннях катодного струму, коли водень вже виділяється, а метал ще не може осаджуватись.

Після відновлення окисної плівки (протягом декількох хвилин) параметри електролізу (густина катодного струму та коефіцієнт асиметрії) можна поступово доводити до робочих значень і таким чином забезпечити високу міцність зчеплення і високу швидкість осадження металу.

Використання асиметричного змінного струму створює більш сприятливі умови для отримання міцного зчеплення осаду з основним металом, ніж при стаціонарному режимі. Наявність зворотнього імпульсу струму під час осадження металу сприяє зниженню вмісту гідроксидів заліза і хрому у при катодному проміжку і розчиненню найбільш напружених ділянок осаду, внаслідок чого відбувається зниження напружень в покритті і підвищується ступінь відповідності решіток осаду та підложки.

Для дослідження впливу умов електролізу на міцність зчеплення залізо-хромистих покриттів в роботі використано якісний та кількісний методи.

Якісний метод: зразок у вигляді пластинки (80x10x1 мм) із сталі 08 покривали електролітичним залізо-хромистим сплавом за вибраним режимом товщиною 0,2 мм, після чого його затискали в ляцата та згинали в обидва боки (на 90°C) до руйнування. Міцність зчеплення оцінювали за відшаровуванням покриття в місті згину. Якщо відшаровування покриття при руйнуванні зразка не

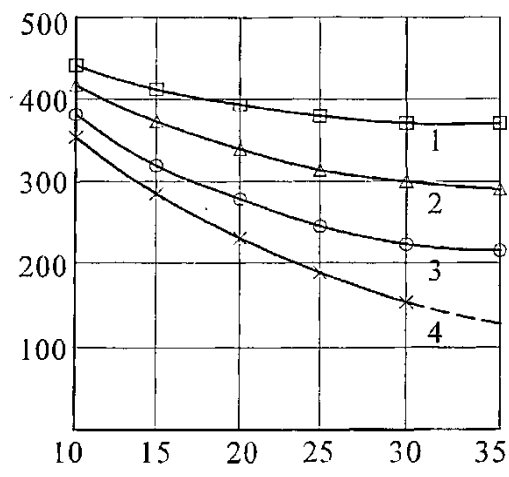
					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбувається, то міцність зчеплення висока (відповідає міцності покриття, або й вища).

Кількісні показники міцності зчеплення залізо-хромистого покриття визначали за методом Олларда і Мелкова. За цим методом міцність зчеплення визначали по зусиллю відриву торця штифта від покриття, нанесеного на спеціальне пристосування.

Осадження залізо-хромистого покриття проводили із електроліту оптимального складу ($400 \text{ кг/м}^3 \text{ FeSO}_4$ та $12 \text{ кг/м}^3 \text{ Cr(NO}_3)_3$), в експерименті змінювали густину катодного струму і коефіцієнт асиметрії. Результати показані на рис.3.7.

Міцність зчеплення, МПа



Густина катодного струму А/дм²

Рисунок 3.7 – Залежність міцності зчеплення електролітичного залізо-хромистого осаду від густини катодного струму при різних значеннях показника асиметрії: 1 – $\beta = 2$; 2 - $\beta = 4$; 3 – $\beta = 6$; 4 – $\beta = 8$;

Підвищення густини струму та збільшення коефіцієнту асиметрії сприяє зниженню міцності зчеплення осаду з основою. Тому для забезпечення високої міцності зчеплення з основою покриттів, що осаджують на асиметричному

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струмі , потрібно передбачати «розгінний цикл» , коли густина катодного струму і коефіцієнт асиметрії плавно підвищується з мінімальних значень до робочого рівня. В такому випадку шари покриття осаджуються в умовах, які забезпечують максимальну міцність зчеплення осаду з основою.

При нанесенні двокомпонентних покриттів можливі три варіанти розгону. При першому варіанті електроліз починають при малому значенні густини струму з оптимальним показником асиметрії. При другому варіанті електроліз починають при низькому показнику асиметрії та заданій густині струму. Третій варіант передбачає у початковий період електроліз проводиться при низьких значеннях струму і коефіцієнту асиметрії, потім ці параметри доводять до робочих значень., які забезпечують найвищу швидкість осадження сплаву. Цей варіант забезпечує максимальну міцність зчеплення, яка для залізо-хромистих покриттів сягає 300МПа і навіть вище.

Мікроструктурні дослідження показали, що незважаючи на дуже ретельну підготовку поверхні і плавний розгінний режим, в усіх випадках існує чітка границя між основним металом та гальванічним покриттям (рис.3.8). Існування такої границі є дефектом, який притаманний методу електроосадження, усунути який можна додатковою обробкою.

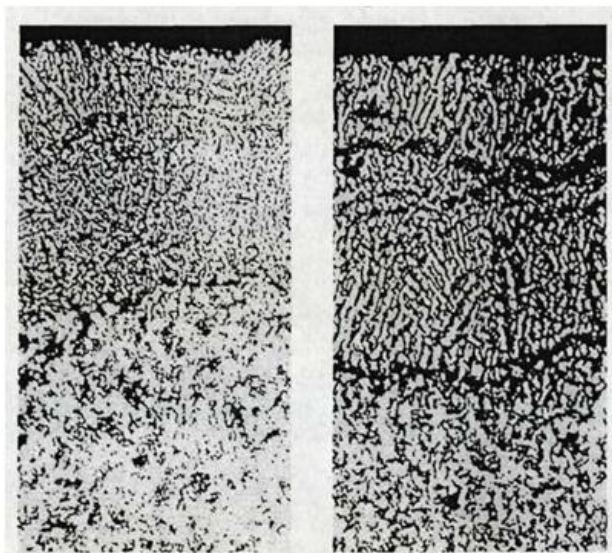


Рисунок 3.8- Мікроструктура залізо-хромистого покриття, отриманого за різними режимами електролізу:

а) - густина струму 20 А/дм²; б) – густина струму 40 А/дм²

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведені дослідження показали, що для забезпечення високої міцності зчеплення залізо-хромистого покриття з основою можливо рекомендувати наступну послідовність підготовки поверхні деталей і початку осадження:

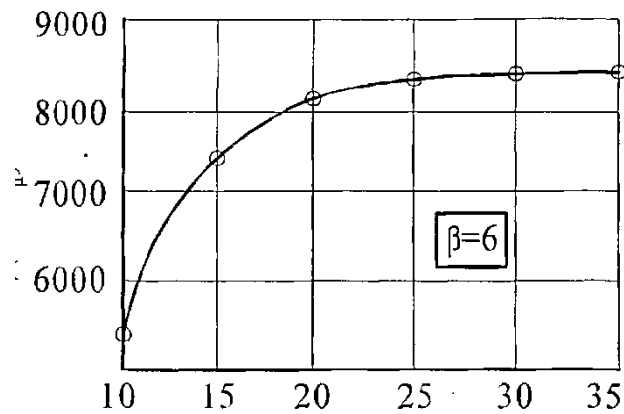
- знежирення з використанням лугів;
- промивання в гарячій воді, а потім у холодній;
- анодне травлення в 30% розчині сірчаної кислоти;
- промивання в холодній воді;
- завішування у ванну для осадження залізо-хромистого сплаву і витримка без струму 30...60 с;
- початок електролізу – густина струму $I_k = 10 \text{ А/дм}^2$ коефіцієнт асиметрії
- ($\beta = 1,5..2$) плавний протягом 10хв.
- підйом режимів електролізу до $I_k = 25 \text{ А/дм}^2$.

На міцність зчеплення електролітичного залізо-хромистого сплаву з основою суттєво впливає кислотність електроліту. Оптимальна кислотність електроліту, яка забезпечує максимальну міцність зчеплення, знаходиться в межах $\text{pH} = 0,8 \dots 1,0$. При зменшені, та при збільшені кислотності електроліту міцність зчеплення осаду з основою зменшується, незважаючи на нормальний режим розгону, тому при проведенні процесу на промислових підприємствах потрібно слідкувати і за цим параметром електролізної ванни.

Важливою характеристикою електролітичних покриттів є мікротвердість, яка визначає їх зносостійкість і корелює з іншими механічними характеристиками. Досліджено вплив режимів електролізу в електроліті оптимального складу на мікротвердість покриття (рис.3.9– 3.12).

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікротвердість



Густина катодного струму I_к А/дм

Рисунок 3.9 – Залежність мікротвердості залізо-хромистого покриття від густини катодного струму (коефіцієнт асиметрії $\beta = 6$)

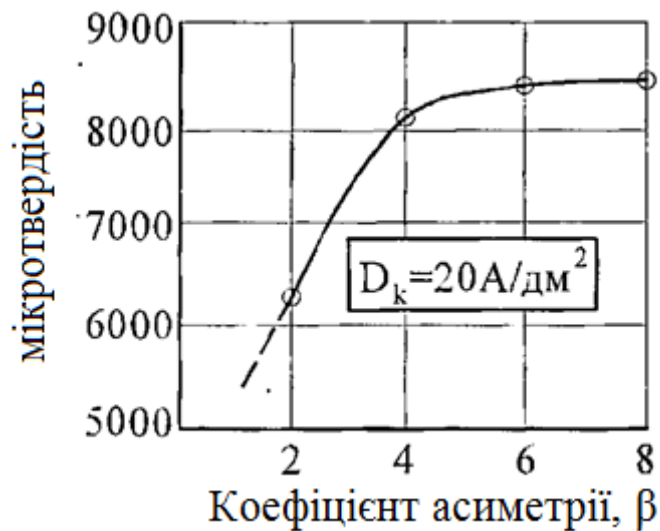


Рисунок 3.10 – Залежність мікротвердості залізо-хромистого покриття від величини коефіцієнту асиметрії електролітичного струму. Густина катодного струму I_к = 20 А/дм²

При підвищенні густини катодного струму під час осадження залізо-хромистих покриттів мікротвердість спочатку зростає, досягає максимуму при

$I_k = 25 \text{ А/дм}^2$, при подальшому підвищенні густини катодного струму мікротвердість осаду майже не зростає. Пояснити це можна збільшенням кількості дефектів в покритті, які суттєво погіршують механічні властивості осажденного металу.

Збільшення коефіцієнту асиметрії сприяє підвищенню мікротвердості до максимальних значень при $\beta=4$. Збільшення коефіцієнту асиметрії до $\beta=8$ не підвищує мікротвердість осаду. Отже, збільшення коефіцієнту асиметрії та густини струму в електролізній ванні сприяє зміцненню залізо-хромистого осаду тільки до певних меж, що пояснюється фізичною природою осаджуваного сплаву.

Низькі значення показника асиметрії і величини катодного струму (м'які умови електролізу) сприяють утворенню грубозернистої структури залізо-хромистого осаду, яка має невисоку мікротвердість $H = 3500 \text{ МПа}$. Грубокристалічна будова металу створює сприятливі умови для руху дислокацій в кристалічній решітці, чим зумовлює занижену твердість металевого осаду.

Жорсткі умови електролізу – високі значення коефіцієнту асиметрії і густини катодного струму, сприяють осадженню дрібнозернистого покриття, яке має високу мікротвердість $H = 6000 \text{ МПа}$ (як у загартованої сталі). Однак, в гальванічному покритті відсутній вуглець і пояснити таку високу твердість на основі класичних положень про мартенситну природу твердості, на разі неможливо.

Автори [1, 17, 12] пояснюють високу твердість електролітичних осадів значним викривленням кристалічної решітки заліза або наявністю в структурі осаду оксидів і гідрооксидів заліза і легуючих елементів, чи впливом розчиненого в залізі водню та зернограничним зміцненням осадів та інше.

Рентгенографічний аналіз показав, що викривлення кристалічної решітки є незначними. Ступінь викривлення решітки α -Fe в електролітичних осадах (з вмістом хрому 0,72%) значно менший, ніж в мартенситі загартованої сталі, що має таке ж значення твердості (рис.3.11).

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

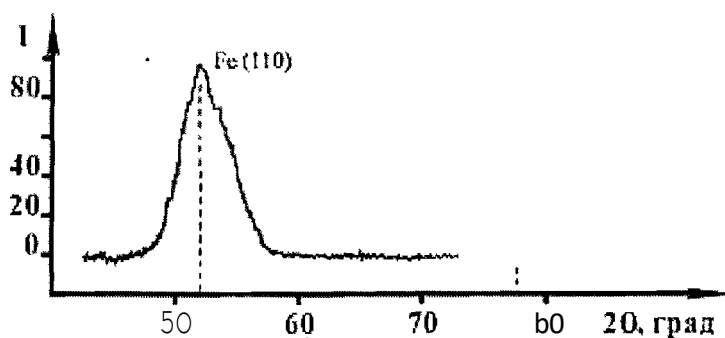
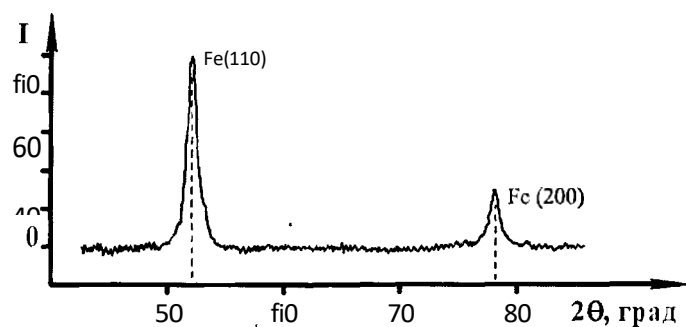


Рисунок 3.11 – Дифрактограми залізо-хромистого покриття (а) і мартенситу сталі 30 (б), які знімали в кобальтовому випромінюванні.

Розширення дифракційних піків на рентгенограмі, знятій із зразка загартованої сталі, викликане тетрагональністю решітки α – Fe набагато більше, ніж на рентгенограмі, яку знято із електроосадженого заліза, що свідчить про незначне викривлення кристалічної решітки заліза.

Значна кількість рентгеноструктурних досліджень залізних осадів, отриманих за різних режимів електролізу, не виявили в них присутності оксидів, гідроксидів чи інших фаз, які б могли сприяти забезпеченню високої твердості електроосадженого заліза чи гальванічних сплавів на його основі. Більш доречним до залізних осадів є механізм зернограничного зміцнення.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Експерименти показують, що при подрібненні в гальванічних осадах заліза їх твердість інтенсивно зростає (рис.3.12).

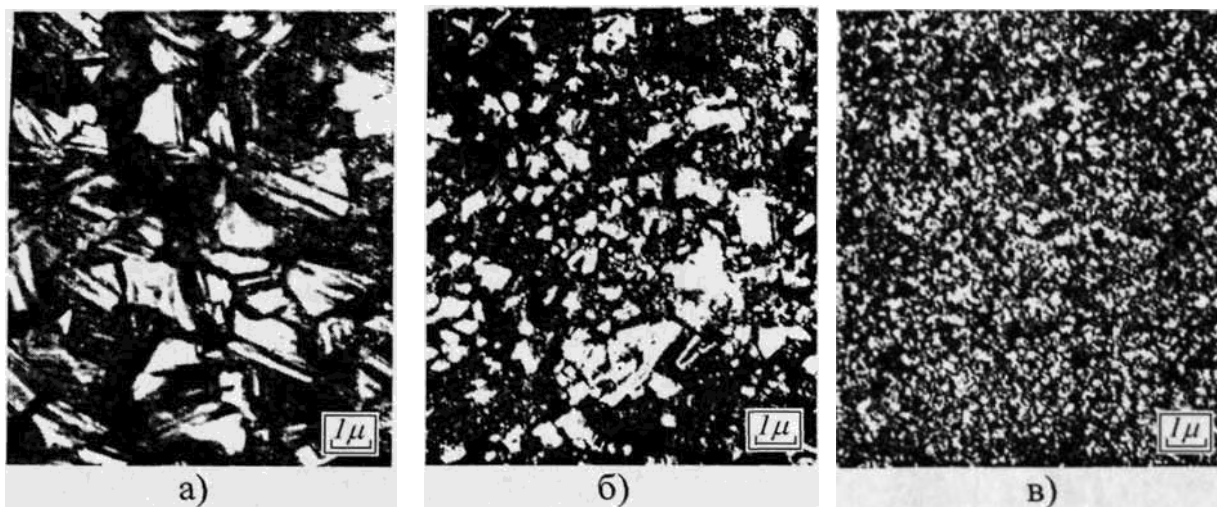


Рисунок 3.12- Мікроструктура гальванічних залізо-хромистих осадів, які отримані за різних умов електролізу і мають різну величину зерен та різну твердість:

а) $d = 500\text{Å}$, $H = 4000\text{МПа}$; б) $d = 350\text{Å}$, $H = 5200\text{МПа}$;

в) $d = 250\text{Å}$, $H = 6550\text{МПа}$ (x5000).

Границі між зернами (субзернами) залізного осаду є перешкодами на шляху ковзання дислокацій. Збільшення твердості осаду можливе при подрібненні його структури, за умови, що покриття якісне, без мікротріщин.

Виникнення внутрішніх напружень є невід’ємним супутником процесів гальванічного осадження. Під дією цих напружень змінюється не тільки твердість покриттів, але й знижується утомна міцність, відбувається розтріскування та відшаровування осадженого металу та інші негативні явища.

Існують різні пояснення механізму виникнення внутрішніх напружень в електролітичних осадах. Найбільш поширена - воднева. Вона пояснює виникнення внутрішніх напружень в електролітичних осадах дією розчиненого в металі водню. Водень, який в значній кількості виділяється на поверхні покриття,

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реагує з осадженим металом, утворюючи гідриди, які є нестійкими сполуками і тому швидко розпадаються у під поверхневих зонах, де водень має меншу активність, ніж на поверхні. Розпад гідриду супроводжується усадкою металу, що створює напруження розтягу. Чим більш жорсткі умови електролізу, тим більше покриття насичується воднем і тим вищі в ньому внутрішні напруження розтягу.

Воднева теорія співпадає з експериментальними даними - при високих густинах катодного струму напруження в покриттях стають такими високими (вище межі міцності металу), що відбувається його розтріскування. Позитивним є використання асиметричного струму для осадження залізних покриттів, що суттєво зменшує внутрішні напруження в електролітичних осадах. Залишкові напруження в гальванічних покриттях завжди мають додатній знак, отже є розтягуючими.

Наявність напружень розтягу в гальванічних покриттях на поверхні відновлених деталей є головним недоліком цього методу відновлення.

В роботі поставлена задача вирішити проблему з напруженнями розтягу та підвищити надійність відновлених чи зміцнених деталей.

3. 2. Дослідження цементації залізо-хромистих електролітичних покриттів

3.2.1. Карбідоутворення при цементації залізо-хромистих покриттів

В двокомпонентній металевій системі (залізо - вуглець) при її науглецюванні під час цементації в активному карбюризаторі, надлишковий цементит виділяється на поверхні сталі у вигляді суцільного шару. Процес цементації фактично зупиняється, так як внаслідок сталого складу цементиту, дифузія вуглецю в ньому не відбувається. Цементитний

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шар не пропускає атоми вуглецю в глиб виробу. Незначне науглецювання металу під шаром цементиту можливе тільки за рахунок розчинення його внутрішньої границі (рис.3.13). Суттєво збільшити глибину цементації можна за умови, що надлишкова карбідна фаза утворюється у вигляді ізольованих включень в матриці, по ділянкам якої буде можлива відносно вільна дифузія вуглецю в глиб металу (рис.3.13 - б). Відомо [11, 13], що утворенню цементиту в зернистій формі під час науглецювання, сприяє наявність в цій сталі такого легуючого елементу як хром. Він значно зменшує вільну енергію карбідо – аустенітної суміші (сильніше за всі інші легуючі елементи) і таким чином сприяє легкому виділенню карбідів із пересиченого вуглецем легованого аустеніту.



Рисунок 3.13 - Обладнання для цементації

Утворення зародків нової фази (карбідів) при розпаді пересиченого аустеніту в хромистих сталях відбувається в місцях найбільшої концентрації атомів хрому. Такими місцями є границі зерен і субзерен, дислокації в середині субзерен і флуктуації складу (мікрооб’єми збагачені хромом) в твердому розчині. В початковий момент в місцях, збагачених хромом, утворюються критичні зародки змішаного складу $(Cr,Fe)_{7}C_{3}$, які є центрами росту часточок цементиту. Внаслідок розшарування розчинів Cr – Fe на дві фази, яке підсилюється дислокаціями, то утворення зернистого цементиту на

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дислокаціях під час науглецювання можливе при невисокому загальному вмісті хрому в цементованій сталі (менше 3%). Утворені зародки цементиту при подальшому науглецюванні сталі ростуть в аустенітній матриці і в дифузійному шарі утворюється двохфазна аустенітно - карбідна структура, де вміст карбідів визначається тривалістю процесу науглецювання.

Допускається, що відповідно до класичної теорії перетворень в металах і сплавах [9,11], швидкість росту новоутворених карбідних часточок в аустеніті при температурі цементації (900°C), обмежується процесами на міжфазній границі (між карбідом і аустенітом). В подальшому при збільшенні часточок карбідної фази, швидкість її росту визначається швидкістю підводу до неї вуглецю, який дифундує із зовнішнього середовища через аустеніт і перетворюється в карбід заліза на існуючому зародку. Карбідна часточка росте із швидкістю, з якою відбувається дифузія вуглецю.

Для опису росту часточок цементиту застосовують рівняння [4], яке знаходять із першого і другого законів Фіка.

Початкова концентрація вуглецю в пересиченому γ - твердому розчині забезпечується надходженням вуглецю із насичуючої атмосфери і залежить від вуглецевого потенціалу (активності) цієї атмосфери, а також від температури процесу.

При утворенні карбідної часточки в аустеніті, що прилеглий до цієї часточки, концентрація вуглецю в твердому розчині змінюється від початкової на деякій відстані від цієї часточки до рівноважної на межі фаз. Рівноважна концентрація є сталюю і відповідає діаграмі стану залізо-цементит.

Концентрація вуглецю в твердому розчині на межі з цементитом значно нижча, ніж за вихідну початкову концентрацію., так як активний вуглець витрачається на ріст карбідної фази, хімічно взаємодіє з залізом і хромом і втрачає свою активність - здатність до переміщення. Отже, карбідні

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часточки є свого роду «стоками» активного вуглецю. Різниця концентрацій між $C_{\gamma}^{поч.}$ та $C_{\gamma}^{рівн} = \Delta C_{\gamma}$ є рушійною силою дифузії вуглецю із твердого розчину до карбиду і ця різниця (градієнт) визначає швидкість росту карбідної часточки. Величина градієнту концентрацій в зоні меж залежить від ступеня легованості сталі хромом, так як хром, який входить до складу карбиду, змінює вміст вуглецю в карбіді та змінює рівноважну концентрацію вуглецю в аустеніті на границі з карбідом. (рис.3.14.).

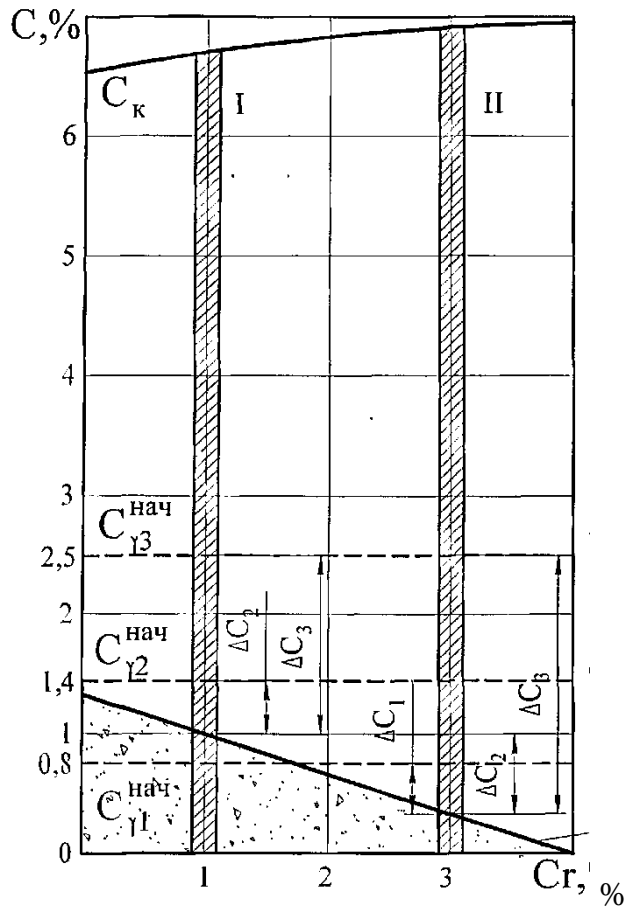


Рисунок 3.14– Вплив вмісту хрому в залізо-хромистому електролітичному сплаві на градієнт концентрацій в прикордонній зоні при цементації. При цементації в різних карбюризаторах: сажовому, деревновугільному та газовому.

Видно, що підвищення концентрації хрому в сплаві сприяє підвищенню рівноважної концентрації вуглецю на межі з карбідом, і тому підвищує градієнт концентрацій в перехідній зоні, а отже і швидкість росту карбідного включення. Для забезпечення високої швидкості росту карбідів необхідно, щоб насичуюче середовище при цементації мало високу активність.

									Арк.
									73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРТАМ 24.23616.000 ПЗ				

Досліджено, що отримати карбідовмісні шари в мало хромистих осадах при цементації в газовому карбюризаторі неможливо, тому що концентрація вуглецю в аустеніті C_{γ} є меншою, ніж рівноважна концентрація вуглецю на границі з карбідом $C_{\gamma}^{рівн}$.

Підвищення активності карбюризатора передбачає можливість росту карбідів в пересиченому у порівнянні з рівноважною концентрацією вуглецю в аустеніті. Найбільша швидкість росту карбідів досягається при використанні пастоподібного карбюризатора на основі сажі.

В цьому випадку утворення карбідів відбувається з достатньою швидкістю в сплавах з різним вмістом хрому (рис.3.15). Розмір прилеглої зони з меншим вмістом вуглецю проти $C_{\gamma}^{рівн}$ біля цементитної часточки не перевершує 3 мкм, тобто розмір майже дорівнює розміру самого цементитного включення. При підвищенні вмісту хрому в аустеніті більше за 3% уповільнюється ріст карбідів, так як зменшується коефіцієнт дифузії в хромистому твердому розчині, зменшується довжина дифузійної ділянки і ступінь пересичення твердого розчину вуглецем. Отримані результати свідчать, що доки відстань між сусідніми карбідними частинками перевищує подвійну довжину дифузійної зони (6 мкм), вплив цих часточок на кінетику росту незначний. Вплив карбідних часточок на їх ріст зростає, якщо дифузійні поля сусідніх часточок перекриваються і виникає конкуренція карбідів, що ростуть, за вуглець в пересиченому аустеніті. Цей взаємний вплив карбідних зерен сприяє поступовому зменшенню швидкості їх росту майже до повної витрати надлишкового вуглецю в аустенітній матриці. Вміст карбідів в поверхні дифузійного шару може досягти 90% і цементація призупиниться, незважаючи на витримку в насичуючому середовищі.

Форма карбідних часточок, які виділяються із твердого розчину при цементації сталі, радикально впливає на результати цементації. Якщо карбіди виділяються у вигляді сітки по границям зерен, вони перекривають

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шляхи дифузії вуглецю в глиб виробу і швидкість цементації різко зменшується. Якщо карбіди мають сферичну форму і рівномірно розміщені в металевій матриці, вуглець з поверхні відносно легко по ділянкам твердого розчину може дифундувати між карбідами і проникати на достатню глибину.

Механічні властивості структури з грубою карбідною (цементитною) сіткою невисокі, Структура з дрібнодисперсними округлими включеннями карбідів в пластичній матриці має досить високі механічні властивості і високу зносостійкість.

Хром суттєво впливає на форму цементитних часточок [1,18]. Розчиняючись в цементиті, хром підвищує коефіцієнт поверхневого натягу границь кристалу, який росте, викривляє міжфазну границю. Хром не змінює пружності решітки аустеніту, тому часточки цементиту набувають сферичної форми.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

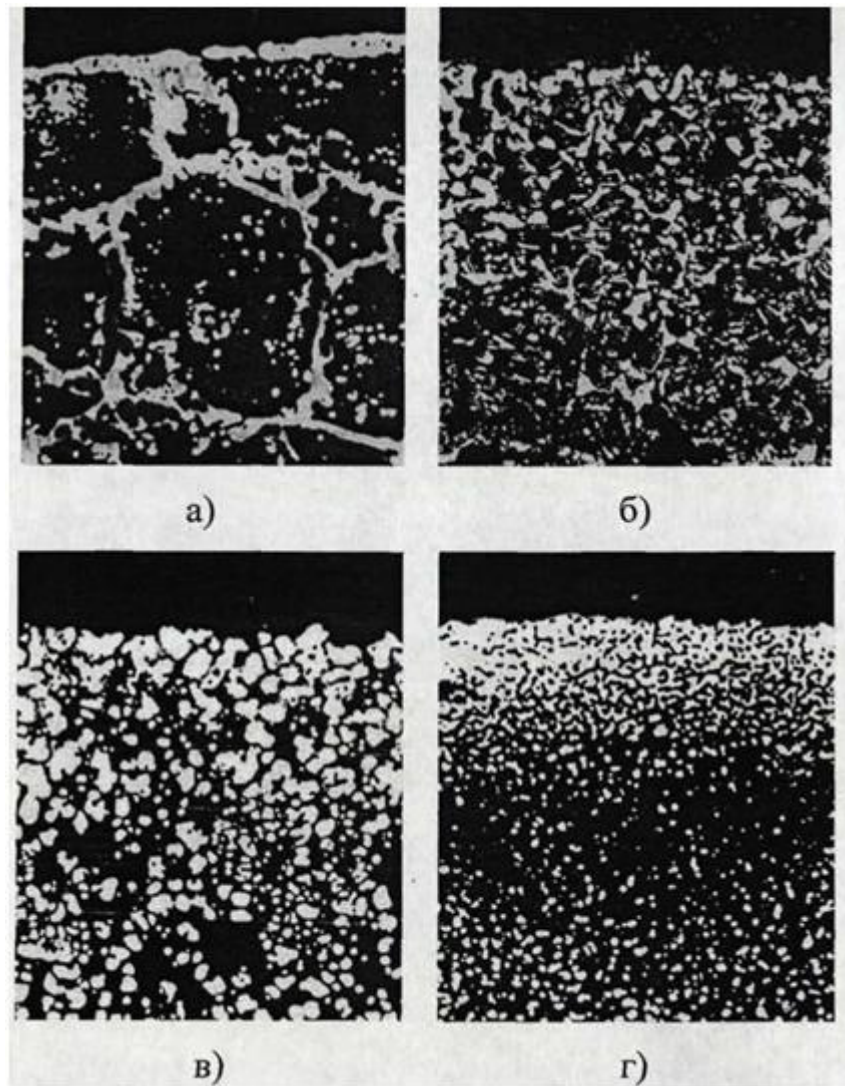


Рисунок 3.15 – Мікроструктура цементованих гальванічних залізо-хромистих покриттів з різним вмістом хрому (x300):

а) 0,44% Cr ; б) 1,71% Cr ; в) 2,48 % Cr; г) 5,71% Cr

В сплаві, який містить 0, 44% Cr, карбідні включення утворились у вигляді сітки по границям зерен і шкірки на поверхні. Зразок , з вмістом хрому 1,71% Cr, має перехідну зону. У зразка з вмістом хрому 2,48 % Cr карбідні включення мають форму ізольованих сферичних включень.

Рентгеноструктурний аналіз показав, що карбідна фаза в цементованих шарах є тільки карбідом заліза (цементитом). Карбідів іншого типу не виявлено.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, хром, який присутній в сталі, значно впливає на форму карбідних включень, що утворюються. Розчиняючись в цементиті, хром підвищує коефіцієнт поверхневого натягу карбідного зародка, що росте, викривляє між фазну границю і сприяє росту карбіду у вигляді рівноосного ізольованого включення. Критична концентрація хрому, коли можливе утворення сферичних карбідних часточок в цементованих шарах, сягає 2,1%. При меншій концентрації хрому карбідні включення утворюються у вигляді тонких прошарків по границям зерен і поверхневої корки.

Вміст хрому в цементованій сталі впливає не тільки на форму цементитних часточок, але і на їх розмір та кількість. При збільшенні вмісту хрому в сталі можливо створюються умови для утворення значної кількості зародків, на яких ростуть дрібні карбідні часточки. При концентрації хрому в сталі більше 3% на поверхні дифузійного шару утворюється щільний шар карбідів (рис.4.5 -г), який перешкоджає доступу вуглецю в глиб металу.

Тому для забезпечення утворення глибоких дифузійних шарів на гальванічних залізо-хромистих покриттях вміст хрому в них має бути в межах 3...3,5%.

3.2.2. Характеристика середовищ для цементації залізо-хромистих електролітичних покриттів.

Аналіз складу та насичуючої здатності карбюризаторів, які використовують для цементації конструкційних сталей, показав, що вуглецевий потенціал їх недостатній для науглецювання низьколегованих сталей до складу чавунів, близьких до евтектичних, коли можливе утворення в дифузійних шарах карбідів. Середовище для насичення сталі карбідами повинне поєднувати переваги газових і твердих карбюризаторів: технологічність в масовому та індивідуальному виробництві (характерне для газової цементації), забезпечувати більш високий вуглецевий потенціал і рівномірність науглецювання виробів складної форми (характерне для

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цементациї в твердому карбюризаторі). Щоб відповідати цим вимогам, насичуюче середовище має бути комбінованим, а саме – містити тверду фазу у вигляді покриття із порошкоподібної суміші вуглецевого матеріалу та активуючу добавку (CaCO_3) на поверхні виробів, які підлягають цементациї, де мають відбуватись реакції генерування та дисоціації CO, а вільний робочий простір печі має бути заповненим газовим середовищем, яке надходить в піч як і при звичайній цементациї, із газового генератора чи у вигляді крапель рідких карбюризаторів – вуглеводнів. Якщо газовий карбюризатор для забезпечення рівномірності цементациї потребує інтенсивної примусової циркуляції, то несене на поверхню деталей тверде вуглевмісне покриття з активатором не тільки забезпечує рівномірність, але суттєво збільшує швидкість науглецювання. Отже, інтенсивна циркуляція газового середовища не потрібна, а швидкість її подачі в піч може бути значно меншою.

Рекомендовано для приготування пасти сажу. Сажистий вуглець має відновлювальну здатність в декілька разів вищу, ніж кокс, графіт, деревне вугілля. Переваги науглецюючого середовища, яке містить дисперсну карбонатно - сажову суміш на поверхні цементованих деталей полягає в тім, що реакція генерування окису вуглецю, яка відбувається в покритті, максимально наближена до поверхні сталі, завдяки чому швидкість і рівномірність науглецювання різко підвищується у порівнянні з цементациєю в інших карбюризаторах. Густина сажі $1600 \dots 2000 \text{ кг/м}^3$, густина графіту - 2265 кг/м^3 . Проміжки повітря між агрегатами сажових частинок та між окремими часточками зменшують густину сажі на порядок. Значне прискорення цементациї в пастоподібному сажовому карбюризаторі пояснюється не тільки високою реакційною здатністю сажі, але й витисненням повітря із проміжків між сажовими часточками зв'язуючою рідиною, оскільки повітря перешкоджає генеруванню активної суміші вуглецю.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При нагріванні паста перетворюється в щільну карбонатно-сажову масу, в яку проникають CO_2 і CO через мікроканали (мікропори), які утворені рідиною, що випаровується при нагріванні.

При цементації в пастоподібному сажовому карбюризаторі не потрібно транспортувати газ CO_2 до поверхні сажових часточок (як це потрібно для реакції $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ в середині пор у деревному вугіллі, коксі), оскільки в дисперсній суміші дисоціація BaCO_3 відбувається безпосередньо при контакті з поверхнею сажових часточок. В карбонатно-сажовій суміші існує більш короткий рух газів: до поверхні

- 1) – дифузія CO до поверхні сталі по каналам (порам), що утворені парогазовою фазою при випаровуванні рідкої складової;
- 2) – десорбція CO_2 - дифузія від поверхні сталі по тим самим каналам (потік CO_2 може знову вступати в реакцію утворення CO з поверхнею сажових часточок).

Активуючу дію вуглекислої солі BaCO_3 пояснюють її дисоціацією на BaO та CO_2 та наступною реакцією CO_2 з вуглецем. В роботах [96 97] визначено, що доданий в карбюризатор окисел BaO замість карбонату BaCO_3 має такий самий активуючий вплив на цементацію, як і карбонат. Допускають, що BaO постачає кисень, який потрібний для утворення окису вуглецю і зв'язує надлишкову вуглекислоту, що утворюється при охолодженні від температури цементації.

Недоліком пастоподібних карбюризаторів є нерівномірність науглецювання.

Причиною є використання в їх складі рідкої складової – мінерального масла. Під час нагрівання деталей, що вкриті пастою, відбувається не тільки випаровування, але й піроліз масла з утворенням нейтральної сажі. Свіжа сажа (продукт піролізу масла) забиває канали, по яким видаляється парогазова фаза масла, яке випаровується. Таким чином гальмується процес цементації, що зумовлює нерівномірність н пастоподібних карбюризаторах.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для запобігання цього недоліку, потрібно використовувати в пастоподібних сажових карбюраторах зв'язуючі рідини, які не схильні до виділення сажі при нагріванні. В таких карбюраторах може бути використана підвищена реакційна здатність сажі, а утворення доступних для CO і CO₂ пор в ущільненій порошковій суміші сажі з карбонатом BaCO₃ забезпечить перехід процесу науглецювання сталі із зовнішньо дифузійного в кінетичний режим. Таким чином, може бути забезпечена не тільки висока швидкість, але й рівномірність цементації сталі.

Для вибору оптимального складу середовища для науглецювання, експериментально досліджено вплив складу пастоподібного покриття на вміст карбідів в цементованому шарі залізо-хромистого покриття і глибину цементації.

Цементацію зразків проводили в лабораторній вертикальній електропечі, куди протягом усього часу цементації подавали рідкий карбюратор (синтин), дозуванням 20 крап./хв. Перед завантаженням в піч зразки покривали шаром (товщиною 2-3 мм) пастоподібним карбюратором і висушували, склад наведено в таблиці 3.1 .

Висушені зразки завантажували у вертикальний циліндричний контейнер (реторту) , закривали герметичною кришкою і завантажували у піч, нагріту до температури цементації. В реторту подавали із бачка через капельницю рідкий карбюратор (синтин) по 20 крапель на хвилину протягом усього часу цементації. Охолодження зразків після цементації відбувалось в не розпакованому контейнері на спокійному повітрі.

Результати цементації оцінювали за результатами мікроструктурного аналізу на спеціально підготовлених мікрошліфах. Травником вибрано 4% розчин азотної кислоти в етиловому спирті. Кількісний мікроструктурний аналіз (підрахунок вмісту карбідної фази в насиченому шарі) проводили на мікроскопі МИМ- 8 з використанням окуляра – мікрометра. Вміст

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структурних складових в цементованих шарах підраховували точковим методом Глаголева. Результати показали, що науглецювання зразків суттєво залежить від складу пасти.

Мінеральне масло (веретенне), яке використане як зв'язуюче для пасти, не забезпечує рівномірне науглецювання поверхні. Заміна масла водорозчинними зв'язуючими значно прискорює процес цементації і забезпечує рівномірність науглецювання всієї поверхні зразків.

Водорозчинні зв'язуючі – крохмальний клейстер чи синтетичний клей на основі водної полівінілацетатної емульсії забезпечує однаковий результат цементації. Важливо, що ці два зв'язуючі після висихання не розчиняються у воді тому на поверхні, які підлягають цементації можна пасту наносити багато разів для забезпечення потрібної товщини обмазки.

Карбюризатор з термічною сажею (в табл.3.1 №4) показав найменшу здатність науглецювання у порівнянні з карбюризаторами на основі газової сажі (№,№ 2,3, табл.3.1), що пояснюється, можливо, меншою дисперсністю термічної сажі у порівнянні з газовою.

Експерименти показали, що найкращі результати науглецювання залізо-хромистого покриття по глибині і вмісту карбідів забезпечує цементація в пастоподібних карбюризаторах, які складаються з газової сажі, вуглекислого барію і полівінілацетатного клею. Зміна співвідношення сажі і вуглекислого барію в межах від 60:10 до 40:30 (% по масі) суттєвого впливу на здатність до науглецювання пастоподібного карбюризатора не має.

Подібні результати одержані при заміні газової атмосфери в цементаційній печі на вуглецевмісним твердим наповнювачем (відпрацьованим деревновугільним карбюризатором, деревним попелом чи чавунною стружкою). Зразки з висушеним цементуючим покриттям завантажували впритул один до одного в контейнер, проміжки засипають наповнювачем.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контейнер закривають кришкою з піщаним затвором і завантажують в піч для цементації.

Таблиця 3.1. Вплив складу паст на їх здатність до науглецювання

(режим цементації: 900°C, 6 годин) № пасти	Склад карбюризатора		Вміст карбідів на відстані 0,1 мм від поверхні, % поля шліфа	Загальна глибина зони з карбідами	Примітка
	Складові	Вміст % ваг			
1	Сажа газова (питома поверхня 90 - 110м ² /г)	20	20 - 55	0,15 - 0,30	Науглецювання нерівномірне
	ВаСО ₃	10			
	Масло веретенне	70			
2	Сажа газова	40	55	0,35	150 г картопляного крохмалю, 100 мм холодної води, розмішати, додати ¼ л окропу
	ВаСО ₃	20			
	Крохмальний клейстер	40			
3	Сажа газова	40	55	0,40	На основі водної полівінілацетатної дисперсії з сухим залишком -30%
	ВаСО ₃	20			
	Клей ПВА	40			
4	Сажа термічна (питома поверхня 12 - 16 м ² /г)	40	35	0,30	
	ВаСО ₃	20			
	Клей ПВА	40			

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2.3. Вплив режимів цементації на структуру дифузійних шарів на залізо-хромистих електролітичних покриттях.

Для дослідження впливу температури і тривалості цементації на глибину дифузійних шарів і вміст в них карбідної фази використано карбюризатор №3 (табл.3.1). Цементації піддавали зразки з залізо-хромистими покриттями з вмістом хрому 0,95%, 1,51%, і 2, 48%.. Товщина гальванічного покриття на основі із мало вуглецевої сталі 20 сягала 0,8...1,0 мм. Цементацію зразків проведено в лабораторній печі з рідким карбюризатором. В робочий простір подавали синтин з швидкістю 20 крап./хв. Перед завантаженням в піч на зразки наносили шар пастоподібного карбюризатора та висушували. Під час експерименту змінювали температуру цементації в інтервалі 840 до 920°C, тривалість цементації від 0,5 до 10 годин.

Після цементації на металографічних шліфах вимірювали максимальну кількість карбідної фази в шарі на глибині 0,05 мм від поверхні. Результати експерименту показані на рис.3.16 ...3.19.

Найбільш високий вміст карбідної фази виявлено на поверхні осадів з високим вмістом хрому – 2, 48%, однак глибина карбідовмісних зон – мінімальна (рис.3.16).

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

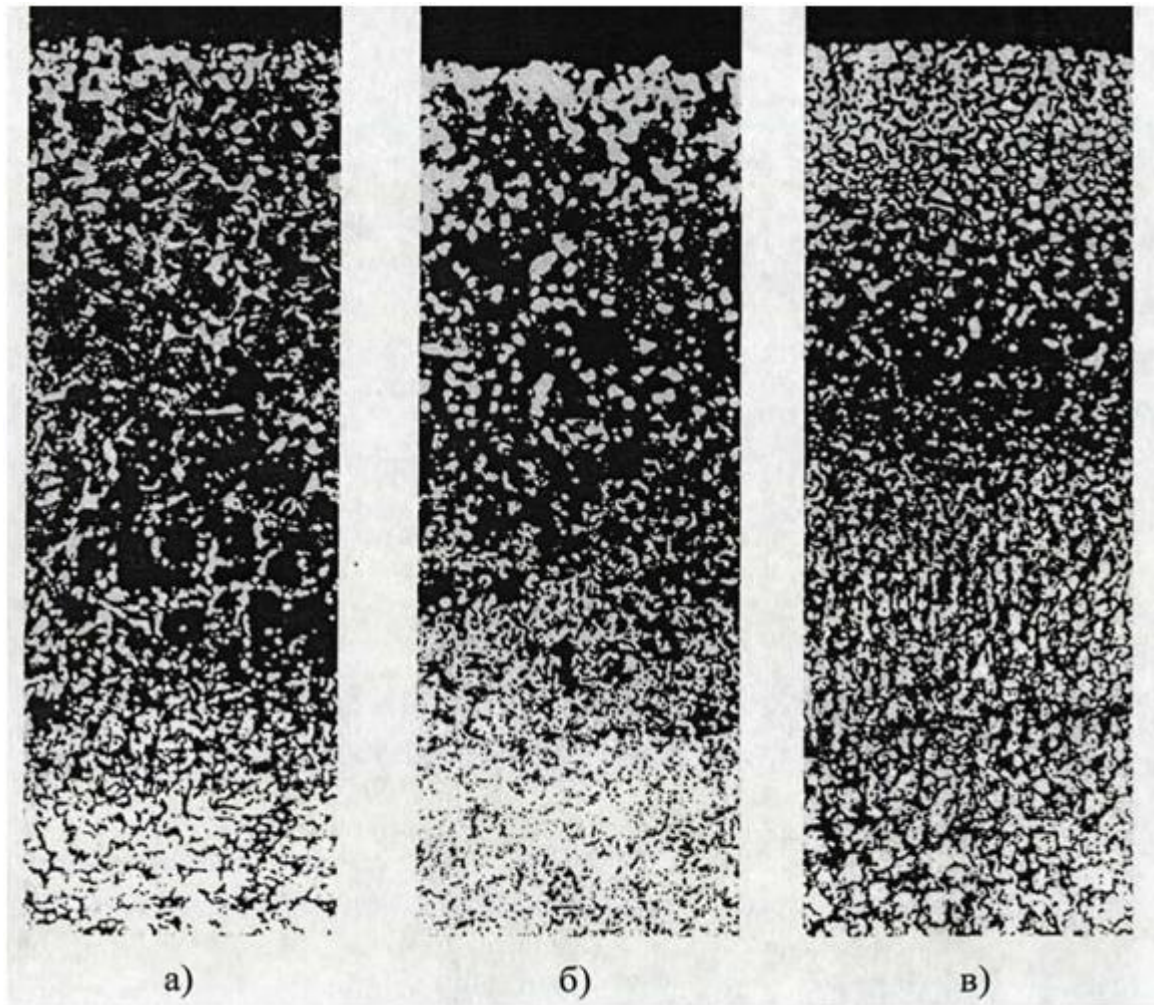
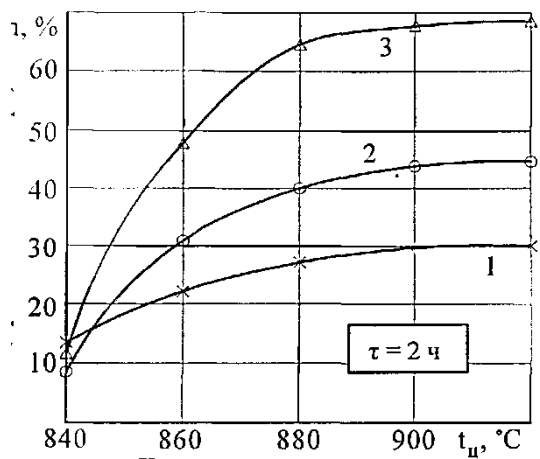
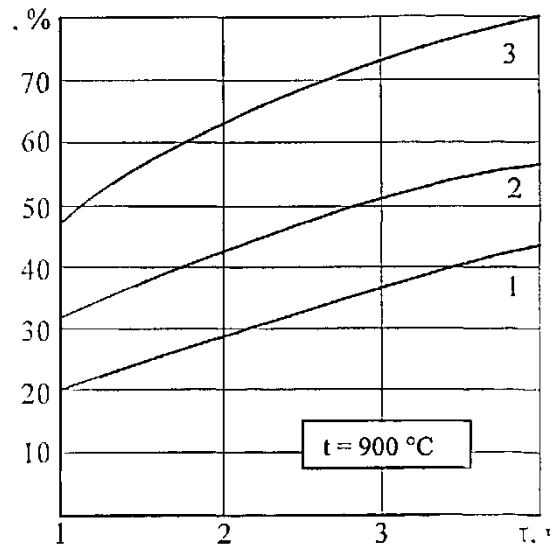


Рисунок 3.16 - Мікроструктура дифузійних шарів цементованих залізо-хромистих покриттів (при 880°C, 6 годин) з різним вмістом хрому: а) - 0,95% Cr ; б) - 1,51% Cr; в) - 3,07% Cr (x200)

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Температура



Тривалість цементациї, год

Рисунок 3.17 – Залежність вмісту карбідної фази в дифузійних шарах залізо-хромистих електролітичних покриттів від температури (а) та тривалості цементациї (б): 1 – 0,95% Cr; 2 – 1,51% Cr; 3 – 3,07% Cr.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

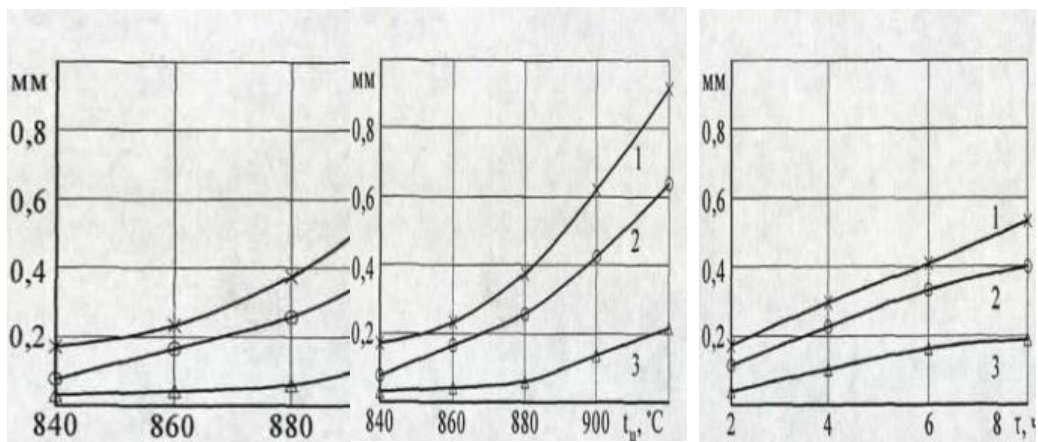


Рисунок 3.18 – Мікроструктура дифузійних шарів залізо-хромистого гальванічного покриття (1,51% Cr), цементованого при температурі 880°C (x300), витримка:

а) – 2 г; б) - 4 г; в) - 8 г

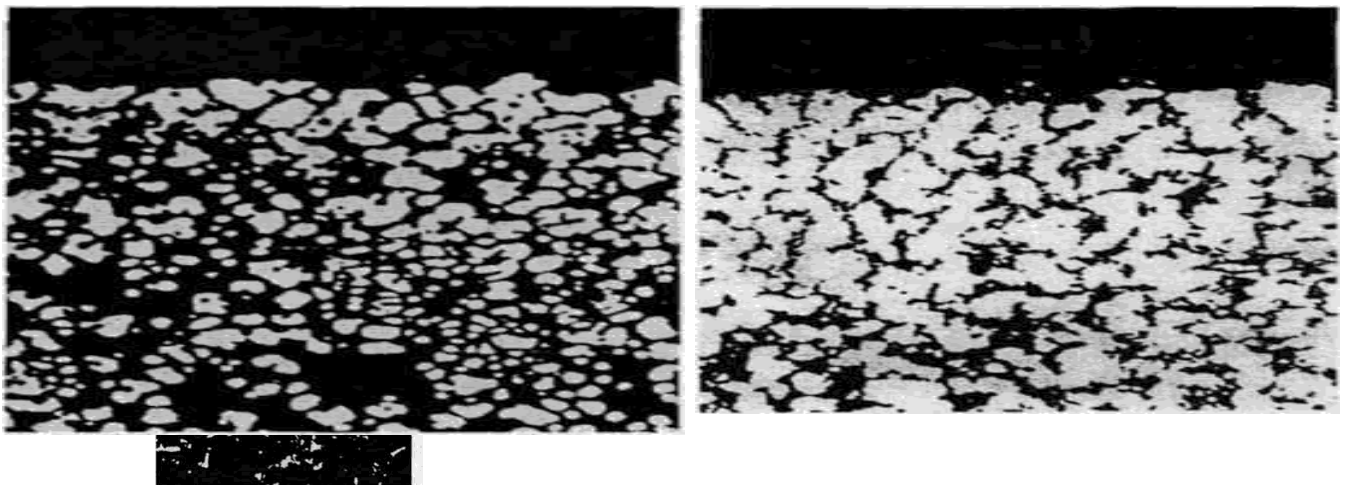


Рисунок 3.19 – Залежність глибини заевтектоїдної зони в дифузійних шарах цементованих залізо-хромистих електролітичних покриттях від температури (а) та тривалості цементації (б): 1 – 0,95% Cr; 2 – 1,51% Cr; 3 – 3,07% Cr.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

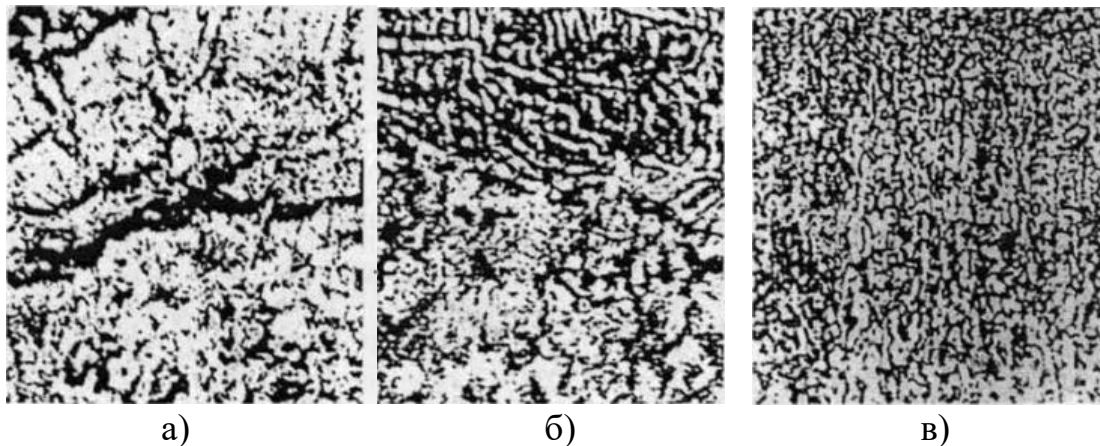


Рисунок 3.20 – Мікроструктура перехідних зон цементованих залізо-хромистих покриттів (x500): а) без цементації; б) цементація при 900°С , 1,5 години; в) цементація при 900°С , 3години

У вихідному стані залізо-хромисті покриття мають чітку границю з основою, яка добре протравлюється і має вигляд темної стрічки. Збільшення тривалості витримки при цементації границя звужується, а при витримці біля 3 годин, стає майже невидимою.

Міцність зчеплення залізо-хромистих покриттів з основним металом в залежності від режимів цементації показані в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 Міцність зчеплення залізо-хромистих покриттів з основою (сталь30).

Режим цементації °С / годин	Без цементації	900 1г	900 2г	900 3г	σ_v , МПа основи
Міцність зчеплення, МПа	233	287	317	478	480

За результатами випробувань видно, що цементація збільшує міцність зчеплення покриття з основою. На початку науглецювання після витримки

1 година міцність зчеплення покриття збільшується на 20%, а після витримки 3 години вже дорівнює міцності основи.

Для покриттів товщиною 0,2-0,3 мм цементацийний шар утворюється не тільки в покритті, але проходить глибше в основу, однак карбіди утворюються тільки в залізо-хромистому покритті, а в основному металі не утворюються.

3.2.4. Загартовуваність цементованих залізо-хромистих покриттів

Цементовані деталі для формування заданих властивостей обов'язково піддають гартуванню та низькому відпуску.

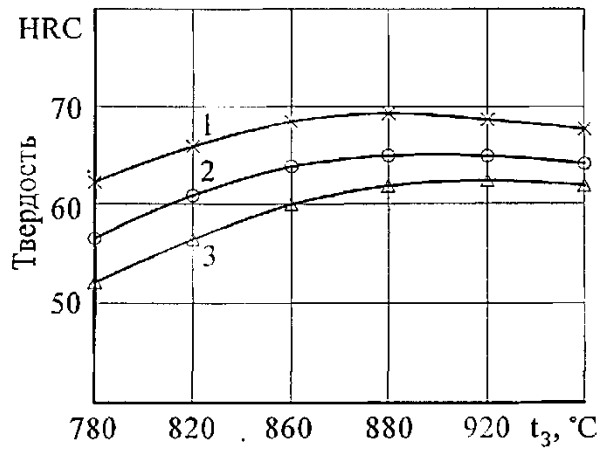
Для вибору температурних режимів проведення цих операцій експериментально досліджено результати гартування виробів з карбидовмісними дифузійними шарами вибрані широкі інтервали нагрівання зразків для гартування та відпуску

Нагрівання цементованих зразків для гартування здійснювали в лабораторній муфельній печі в середовищі повітря, температури вибрано від 780 до 1000°C. Охолодження при гартуванні проводили в маслі.

Відпуск проводили при температурах від 150 до 600°C. Охолодження після відпуску – на повітрі.

Для дослідження вибрані зразки з вмістом хрому в залізо-хромистому покритті - 0,95 і 1, 48% Cr. Температура цементації -900°C, витримка 6 годин. Результати експерименту показані на рис.3.21.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Температура нагрівання для гартування

Рисунок 3.21 – Залежність твердості цементованого залізо-хромистого електролітичного покриття з 1,48% Cr від температури нагрівання для гартування при різних температурах відпуску: 1 – без відпуску; 2 – 150°C; 3 – 200°C

Високий вміст вуглецю в цементованих шарах електролітичних залізо-хромистих покриттів, де він зв'язаний у тверді карбідні включення, зумовлює високу твердість цих покриттів після гартування та низького відпуску при 150 °C, твердість цементованого покриття сягає HRC 64...66.

Підвищення температури відпуску з 150 до 200 °C знижує твердість на 4..5 HRC.

Пошаровий рентгеноструктурний аналіз цих зразків показав, що на їх поверхні, де максимальна концентрація карбідів, металева матриця є феритом. На деякій відстані від поверхні, де концентрація карбідів сягала 40...50%, рентгенограми свідчать про збільшення ортогональності кристалічної решітки матриці. Рентгенограма структури, яка знаходиться за карбідною зоною, відповідає мартенситу. Рентгеноструктурний аналіз показав, що матриця в карбидовмісних зонах дифузійних шарів цементованих залізо-хромистих покриттів практично не загартовується, гартування сприймає лише шар, розміщений під карбідною зоною, насичений вуглецем до евтектоїдної концентрації зі значним вмістом хрому (рис.3.22).

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

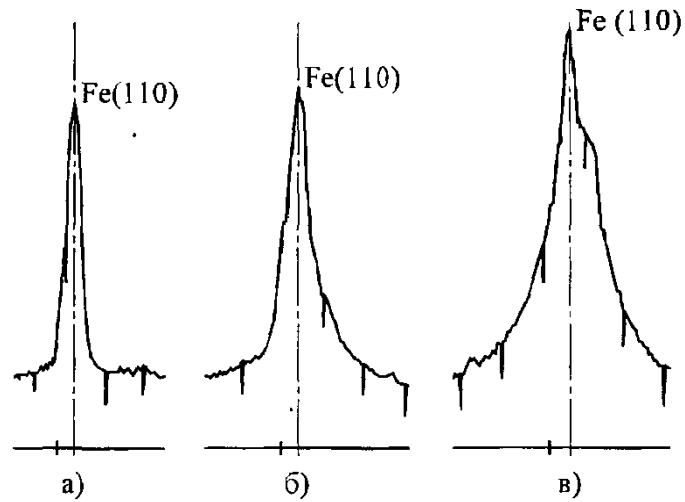
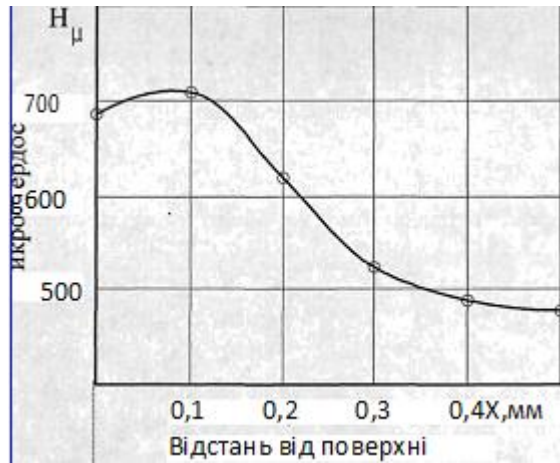


Рисунок 3.22- Рентгенограми цементованого шару залізо-хромистого гальванічного покриття (1,48% Cr) після гартування від 850°C в маслі і відпуску при 180 °C: а) – поверхня; б) 0,2 мм від поверхні; в) 0,4 мм від поверхні

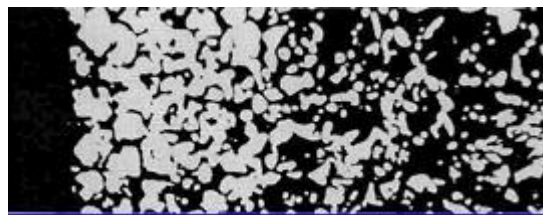
Розподіл мікротвердості по глибині цементованих шарів має складний характер. Максимум твердості знаходиться на деякій відстані від поверхні зразка (0,05...0,10 мм), за межами цього шару мікротвердість інтенсивно зменшується і набуває сталого значення на глибині 0,4...0,5 мм.

Максимум твердості співпадає з максимальним вмістом карбідної фази в структурі цементованого шару, зниження твердості зразка відповідає поступовому зменшенню карбідів, твердість серцевини визначається твердістю загартованої матриці (мартенситу). Низька твердість дуже тонкого поверхневого шару (до 0,05 мм) спричинена, можливо, окисненням поверхневого шару залізо-хромистих покриттів, яке виникає при цементації.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 3.23 – Розподіл мікротвердості по перерізу нанесеного покриття з вмістом хрому 1,48%, цементованого при 900°C протягом 6 годин та гартування в маслі від температури 850°C – а) ; - мікроструктура цього покриття x500 – б)

Практична відсутність вуглецю в металевій матриці між карбідними включеннями в карбідовмісних цементованих шарах є причиною того, що ця матриця не зміцнюється під час гартування. Ці ділянки матриці мають занижену прогартуваність тому, що легуючі елементи (хром) під час цементації переходить із твердого розчину в карбіди. Таким чином, в карбідовмісному шарі металева матриця (ділянки матриці між карбідами) очевидно має структуру фериту, як до гартування, так і після гартування. Твердість цього шару визначається кількістю карбідних включень.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Гартування цементованих шарів, які лежать нижче карбідовмісної зони, відбувається по бездифузійному мартенситному механізму з утворенням мартенситу в проміжках між рідко розміщеними карбідами, а також в більш глибокій зоні – евтектоїдній.

В гальванічних покриттях у вихідному стані виникають значні залишкові напруження. Величина цих напружень може сягати 300 МПа. Напруження розтягу збільшуються при збільшенні густини струму, тобто при підвищенні швидкості осадження. Залишкові напруження розтягу негативно впливають на утомну міцність. Цементация дозволяє змінити напруження розтягу на напруження стискання і тим самим змінити негативний вплив напружень на позитивний. Саме цементация більш активно впливає на зміну знаку залишкових напружень у порівнянні з іншими видами ХТО.

Проведені дослідження по впливу глибини цементации на рівень залишкових напружень в поверхневих шарах залізо-хромистих гальванічних покриттів. Цементацию проведено при 850 та 950°C (для отримання різної кількості карбідів в дифузійних шарах). Гартування проведено від температури 880°C в маслі, відпуск при 180°C з витримкою 2 години.

Результати показали, що на рівень стискаючих напружень в досліджуваних покриттях, значно впливає концентрація в них карбідної фази.

При вмісті в шарі карбідів майже 40% стискаючі напруження дорівнюють 300МПа, при вмісті карбідів 70%, менше – 200МПа. Отже, в карбідовмісних шарах, металева матриця визначає рівень стискаючих напружень.

При досить великому об'ємі матриці в структурі цементованого шару, тобто при досить великих проміжках між карбідними включеннями, мартенсит, що утворюється при гартуванні матриці, «розштовхує» між карбідні проміжки, забезпечуючи формування стискаючих напружень в покритті.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При зменшенні між карбідних проміжків в структурі, за рахунок значної кількості карбідів, здатність матриці сприймати гартування зменшується і об'єм матриці також. Тому зменшується об'єм мартенситу в карбідовмісній структурі та зменшується рівень стискаючих напружень в дифузійних шарах.

Найбільш високі напруження стиску виникають в дифузійних шарах залізо-хромистих покриттів при невеликій глибині цементації. При збільшенні глибини цементації рівень стискаючих напружень в шарі зменшується.

Критична глибина цементації, коли стискаючі напруження переходять в напруження розтягу, сягає 0,1 від розмірів перерізу деталі.

Межа витривалості сталевих деталей майже пропорційно залежить від величини стискаючих напружень на їх поверхні., що потрібно враховувати при призначенні режимів зміцнюючої обробки.

Для деталей, які працюють при знакозмінних навантаженнях, цементацію потрібно проводити на невелику глибину і формувати шари з відносно невеликим вмістом карбідної фази (40...50%).

3.2.5.Зносостійкість і ударна в'язкість цементованих залізо-хромистих покриттів

Режими цементації та гартування з відпуском визначають експлуатаційні властивості відновлених деталей – зносостійкість та ударну в'язкість.

Досліджено зносостійкість при абразивному зношуванні та ударну в'язкість зразків із сталі 45 з гальванічним покриттям товщиною 0,5 мм з вмістом хрому 1,5%. Зразки піддавали цементації при температурах 850...950°C, з витримкою від 1 до 6 годин. Температуру нагрівання для гартування змінювали від 780 до 900°C, охолодження в маслі температуру відпуску - від 150 до 450°C, охолодження на повітрі.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати показані на рис. 3.24...3.25.

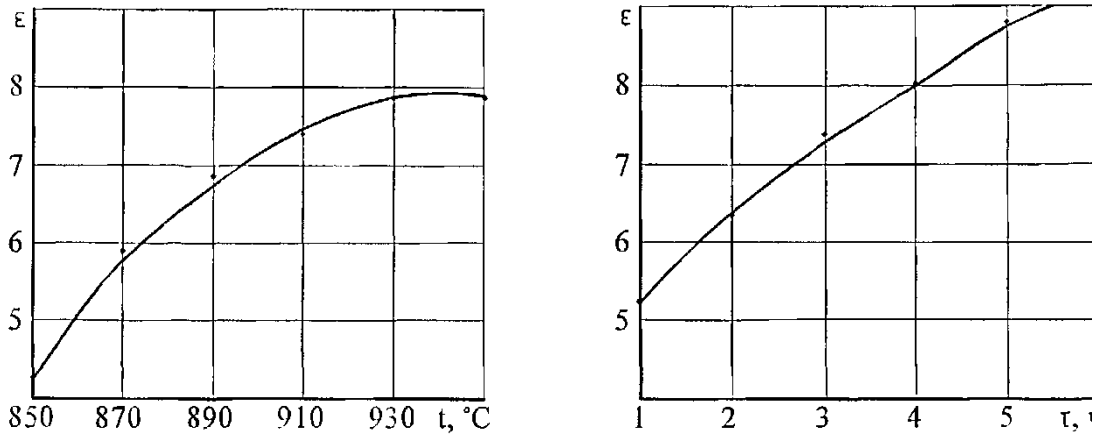


Рисунок 3.24 – Залежність відносної зносостійкості дифузійних шарів залізо-хромистих покриттів від температури і тривалості цементації. Температура гартування 880°C, температура відпуску - 185°C.

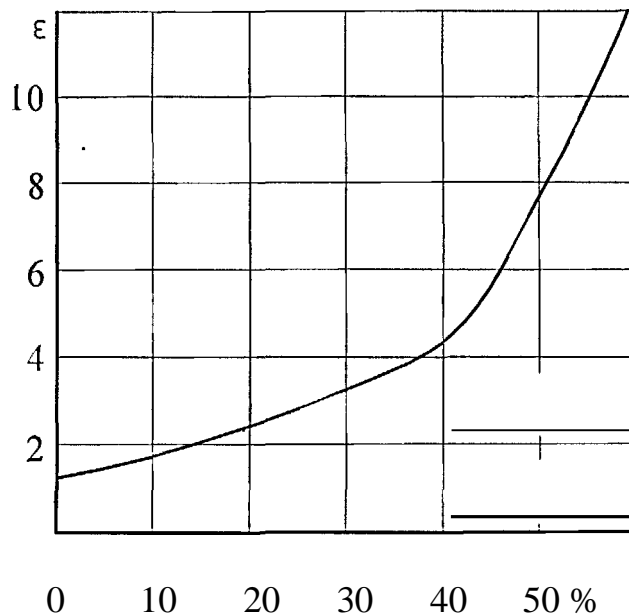
Високий вміст вуглецю, який частково зв'язаний в карбіди в поверхневих шарах цементованих зразків, зумовлює особливості експлуатаційних властивостей зміцнених деталей. Деякі особливості виникають внаслідок того, що у вихідних гальванічних покриттях вуглець відсутній.

Експерименти показали, що при підвищених температурах цементації (до 920°C), зносостійкість залізо-хромистих покриттів збільшується, а при подальшому підвищенні температури підвищення зносостійкості не спостерігається (рис.3.24).

Збільшення тривалості цементації сприяє монотонному збільшенню зносостійкості залізо-хромистих покриттів. Такий вплив температури та тривалості цементації на зносостійкість гальванічних покриттів відповідає впливу цих факторів на кількість цементиту, який утворюється в дифузійних

шарах під час науглецювання. Залежність відносної зносостійкості цементованого покриття від вмісту в ньому карбідів (рис.3.25).

Зносостійкість інтенсивно зростає при збільшенні об'єму карбідної фази.



Вміст карбідної фази

Рисунок 3.25 – Залежність відносної зносостійкості цементованого залізо-хромистого покриття від вмісту карбідної фази в структурі

$$T_{\text{гарт}} = 850 \text{ }^{\circ}\text{C}, T_{\text{відп.}} = 150^{\circ}\text{C}$$

За умови невеликого вмісту карбідів зносостійкість прямо пропорційна кількості карбідів в структурі, однак при вмісті карбідів більше 50%, зносостійкість карбидовмісного матеріалу значно зростає, що свідчить про якісні зміни механізму зношування.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження впливу цементації на зносостійкість гальванічних покриттів проведене в умовах тертя ковзання з обмеженим змащуванням проведене на машині СМЦ -2 за схемою «ролик - колодка».

Результати випробувань наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Залежність зносу цементованих залізо-хромистих гальванічних покриттів від температури цементації при граничному терті.

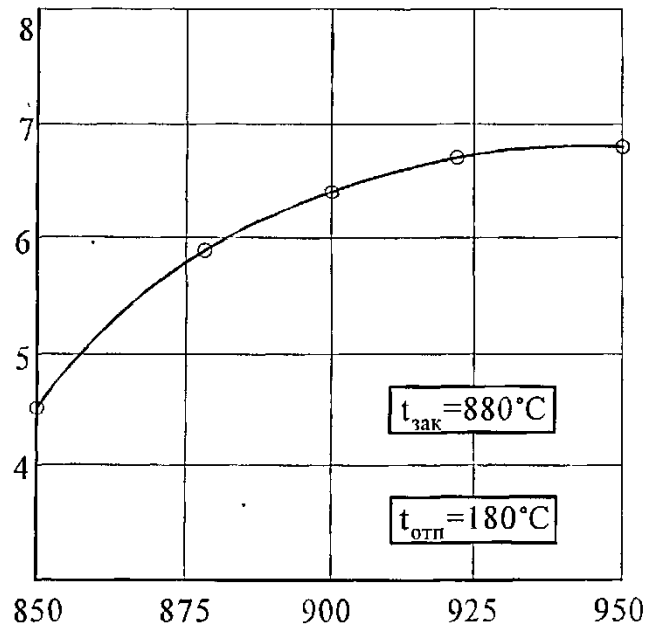
Матеріал	Час, г	Температура випробувань, °С				
		850	880	900	920	950
Гальванічне залізо-хромисте покриття з 1,54 % Cr	2	3	25	22	8	10
	4	35	-	24	9	9
	6	37	-	28	-	-

З таблиці видно, що знос цементованих зразків в умовах тертя ковзання з мастилом зростає при збільшенні тривалості випробувань. Інтенсивність зношування нанесеного покриття при зниженні температури цементації (до 850°С) збільшується.

Високу зносостійкість цементованих зразків (особливо при 920...950°С) пояснюють наявністю на поверхнях тертя майже суцільного шару карбідів, які мають високу твердість і низький коефіцієнт тертя. При зниженні температури цементації кількість карбідів в дифузійних шарах зменшується, що і знижує зносостійкість. Цементация підвищує стійкість поверхневих залізо – хромистих шарів до задирок і захоплювання.

Підвищення температури цементації, яке сприяє утворенню значної кількості карбідів на поверхні, підвищує навантаження, яке може витримувати покриття до появи задирок та захоплювання (рис.3.26).

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Температура цементации

Рисунок 3.26 – Залежність питомих навантажень, за яких відбувається захоплювання цементованої поверхні при сухому терті, від температури цементации залізо-хромистих покриттів

Підвищення температури цементации, яке сприяє утворенню в поверхневому шарі значної кількості карбідів, збільшує навантаження, яке витримує покриття без заїдання. Чим більшим є вміст карбідів в дифузійному шарі залізо-хромистого покриття і чим більшою є товщина цього шару, тим вищою є стійкість проти задирок і захоплювання.

Висока зносостійкість карбидовмісних шарів та стійкість проти захоплювання та абразивного зношування дозволяють рекомендувати нанесення залізо-хромистих гальванічних покриттів з наступною цементацией для відновлення і зміцнення деталей, які працюють в складних умовах тертя.

3.2.6. Ударна в'язкість цементованих залізо-хромистих покриттів

Результати досліджень ударної в'язкості цементованих зразків показали, що вона залежить головним чином від температури цементациї та вмісту карбідної фази в дифузійних шарах (рис.3.27 – 3.28).

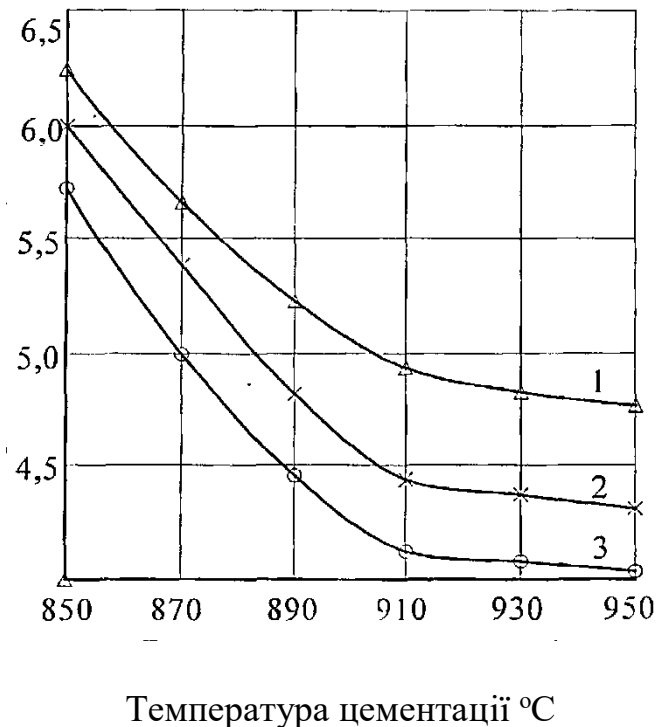
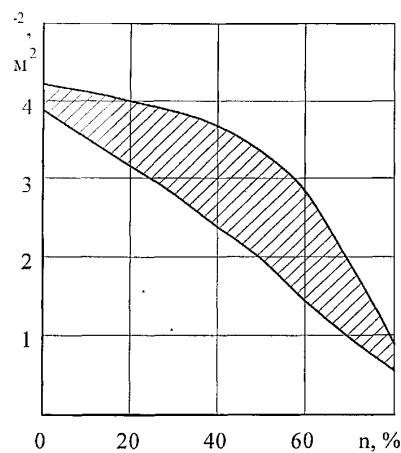


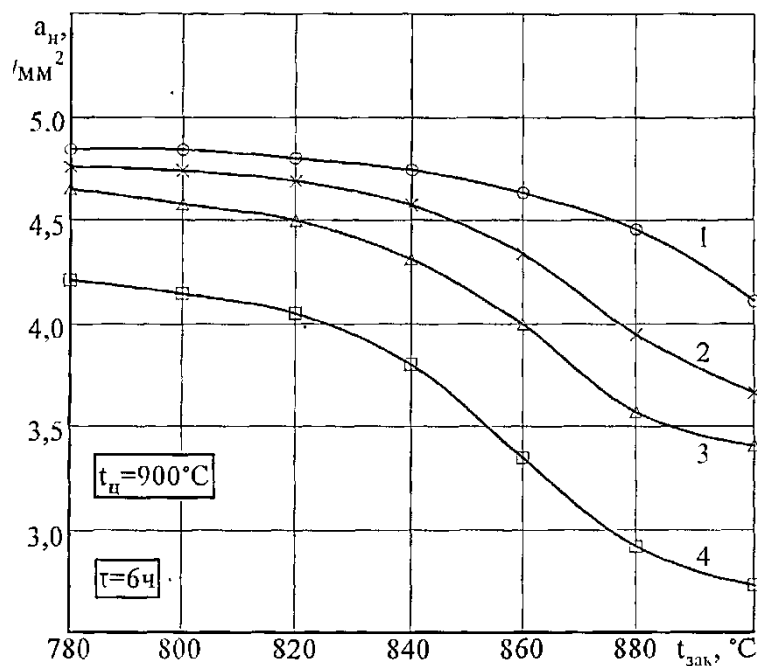
Рисунок 3.27 – Залежність ударної в'язкості цементованих покриттів від температури цементациї та тривалості витримки:

1 – 2 год. ; 2 – 4 – год. ; 3 – 6 год.



Вміст карбідної фази

Рисунок 3.28 – Залежність ударної в'язкості цементованих залізо-хромистих покриттів від вмісту в них карбідної фази



Температура нагрівання для гартування, °C

Рисунок 3.29 – Залежність ударної в'язкості цементованих залізо-хромистих покриттів від температури нагрівання для гартування при різних температурах відпуску: 1 – 400°C 1 – 300°C 1 – 200°C 1 – 150°C

При збільшенні кількості цементиту в структурі від 0 до 50% ударна в'язкість зменшується з 400 до 300 кДж/м². При 50% карбідів в структурі цементованих шарів виникають різкі зміни – навіть незначне збільшення карбідної фази викликає значне зниження ударної в'язкості.

При вмісті карбідної фази біля 70% ударна в'язкість знижується до нуля. Зразок руйнується крихко, очевидно матриця при великому вмісті карбідів втрачає здатність до пластичної деформації.

Значним є вплив на ударну в'язкість температури нагрівання для гартування. Найменше значення ударної в'язкості отримане для зразків, загартованих від температур вищих за 860...880°C, які після гартування мають крихкий шар мартенситну під карбідною зоною, що не сприяє підвищенню ударної в'язкості.

Відпуск сприяє підвищенню ударної в'язкості незалежно від температури нагрівання для гартування. Під час відпуску утворюються феритно – цементитні структури, які мають підвищену в'язкість. Дисперсність ферито - цементитної суміші залежить від режиму цементації і утворення первинних карбідів.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження по визначенню оптимальних режимів електролізу і цементації, дослідження структури, твердості, зносостійкості і ударної в'язкості залізо-хромистих покриттів, дозволили розробити технологічний процес відновлення і поверхневого зміцнення деталей машин.

2. Експерименти свідчать, що високий рівень зносостійкості цементованих залізо-хромистих покриттів поєднується з невисокою в'язкістю.

3. Режими зміцнюючої обробки необхідно призначати з урахуванням умов експлуатації деталей.

- Для деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування без ударних навантажень, можна вибирати режими обробки з підвищеними температурами цементації і гартування (900, 920, 950 °С) та низьку температуру відпуску (до 200 °С), що забезпечить максимальну зносостійкість.

- Для деталей, які працюють в умовах ударних навантажень, режими обробки повинні забезпечувати і зносостійкість і достатню ударну в'язкість. Рекомендований режим обробки: температура цементації 880°С, температура нагрівання для гартування 850°С, температура відпуску – 300°С.

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. - 89 с
2. Мак-Мак Наталя Євгенівна. Дисертація. Створення метастабільних станів та зміцнення конструкційних сталей способами термічної та хіміко-термічної обробки. Спеціальність 05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів Маріуполь – 2019
3. Тарельник В.Б., Гапонова О.П., Кирик Г.В., Коноплянченко Е.В., Тарельник Н.В., Микулина М.О. «Цементация стальных деталей электроискровым легированием». МЕТАЛЛОФИЗИКА И НОВЕШИЕ ТЕХНОЛОГИИ 42, вып. 5 (20 июля 2020 г.): 655–67. <http://dx.doi.org/10.15407/mfint.42.05.0655>.
4. Коноплянченко, Є. В. «ВИСОКОПРОДУКТИВНИЙ МЕТОД ЦЕМЕНТАЦІЇ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ». Вестник Сумского национального аграрного университета. Серия: Механизация и автоматизация производственных процессов , вып. 2 (44) (5 мая 2022 г.): 17–20. <http://dx.doi.org/10.32845/msnau.2021.2.4>.
5. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М.А. Сологуб, І.О. Рожнецький, О.І. Некоз та ін.; За ред М.А. Сологуба. – К.: Вища шк., 2016. – 300 с. 2. Сушко О.В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2015. – 232
6. Заявка № и 2019 05937 Україна МПК С 23 С 14/48 Рутковський А.В., Прихожа Д.В., Антонюк В.С., Спосіб контролю процесу йонно-плазмового азотування // 30.05.2019 р., Опубл. . .2019, бюл. № /2019.
7. Антонюк В.С., Прихожа Д.В., Максименко М.М., Назаркевич Ю.А. , магістрант, Полонський Л.Г. Визначення параметрів фрагментованості зносостійкого покриття – Зб. Науково-технічні конференції молодих вчених

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і студентів Житомир // // Зб.Тез Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. – Житомир : ЖДТУ, 2019. – С.– 185.

8. Вестник ХНАДУ, вып. 54, 2011 73 УДК 669.14.018.8:621.785.52/53 ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СТАЛІ 04X18Ч-ГР У ПРОЦЕСІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ В.Г. Міщенко, професор, д.т.н., О.І. Меняйло, аспірант, А.І. Маказан, інженер, П.Ю. Долгорукий, викладач, Запорізький національний університет с 73 -77.

9. Будник, А.Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць: навчальний посібник /А.Ф. Будник. – Суми: Видво СумДУ, 2008. 212 с.

10. Бодрова Л.Г. Б-75 Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розділ Матеріалознавство: Навчальний посібник / Л.Г. Бодрова, Г.М. Крамар, Я.О. Ковальчук, І.В. Коваль – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 157 с.

11. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. К.: Либідь, 2002. — 328с. — ISBN 966-06-0247-2

12. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина І: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. - 51 с

13. Кондращенко О.В. Корозія і захист матеріалів та конструкцій. – Харків: ХНАМГ, 2005. – 124 с.

14 П. М. Сопрунюк, В. М. Юзевич. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів. — Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, вид-во «СПОЛОМ». — 2005. — 292 с.

15. І. І. Білик, С. О. Руденький ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістр за освітньо-професійною програмою «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів» спеціальності 132

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матеріалознавство Електронне мережне навчальне видання Видання друге, перероблене і доповнене Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2023

16. О.М. Дубовий, А.М. Степанчук Технологія напилювання покриттів: Підручник. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.

17. Нанесення покриття: Навч. посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко; за ред. К.А. Ющенка. – Київ : Арістей, 2005. – 204 с.

18. Газотермічні покриття із порошкових матеріалів: Довідник / Ю.С. Борисів, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.П. Ардатовська. – Київ : Наук. думка, 1987. – 544 с.

19. ДСТУ 2491-94. Покриття металеві та неметалеві. Терміни та визначення // Стандарти України: покажчик. – Київ : Держстандарт України, 2003. – 178 с.

20. Петрик Е. А. Особливості електролітичного хромування та їх відображення в технологічному процесі [Електронний ресурс] / Е. А. Петрик, Ю. В. Борисенко // Технології та дизайн. - 2020. - № 1 (34). - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2020_1_17.

21. Дробот О.С., Яворська Н.М, Підгайчук С.Я. Вплив дифузійного відпалу на склад і структуру КЕП на основі нікелю - "Наукові нотатки" ЛНТУ. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки», №49, Луцьк, 2015, – С.201-205.

22. Яворська Н.М. Розробка складу та технології отримання композиційних електрохімічних покриттів з добавкою нанопорошків. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Луцьк - 2013. 20 с.

23. ISO 6508-1: Metallic materials — Rockwell hardness test — Part 1: Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

24. ASTM E18 : Standard methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						104
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					МРТАМ 24.23616.000 ПЗ	Арк.
						105
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		