

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: «Дослідження покриттів на основі
електролітичного заліза при відновленні металевих
виробів»

Шифр МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
група МТВАМ-22-1


Підпис

В. О. Шімар
Інженер, промисло

Керівник к.т.н., доц. каф ТАМ.


Підпис

С. Ф. Посонський
Інженер, промисло

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


Підпис

О. В. Лиса
Інженер, промисло

16 12 2023 р.

Хмельницький, 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспортної та архітектури
Кафедра турбомашин, автомобілів та матеріалознавства

Освітній рівень магістр

Спеціальність 132 «Матеріалознавство»,

Спеціалізація «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


Диха О.В.
16 жовтня 2023 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Цімару Валерію Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Дослідження покриттів на основі електролітичного заліза при відновленні металевих виробів.*

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце зв'язку

Затверджено наказом університету від 15.08.2023 р. № 28 (Д 30)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів та переддипломної практики.*

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

1) Аналіз зміни технічного стану силових агрегатів у процесі експлуатації.

2) Методичні питання експериментального дослідження.

3) Результати досліджень фізико-хімічних процесів формування

металопокриттів.

4) Висновки, рекомендації

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк звільнення етапів проекту (роботи)	Проміжок
1	Аналіз зміни технічного стану силових агрегатів у процесі експлуатації.	30.10.23	вик
2	Методичні питання експериментального дослідження.	15.11.23	вик
3	Результати досліджень фізико-хімічних процесів формування металопокриттів.	23.11.23	вик
4	Висновки, рекомендації	4.12.23	вик
5	Оформлення пояснювальної записки	6.12.23	вик
6	Допуск до захисту	12.12.23	вик
7	Захист дипломної роботи	23.12.23	

Студент


Підпис

Цімар В. О.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Посонський С. Ф.
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-22-1 Цімар Валерій Олександрович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему *«Дослідження покриттів на основі електролітичного заліза при відновленні металевих виробів»* складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 24 найменування, розміщених на 2 сторінках, та 2 додатків розміщених на __ сторінках. Роботу викладено на 102 сторінках, з них 95 сторінок основного тексту, на яких розміщено 44 рисунки і 3 таблиць.

Довговічність автомобілів та їх елементів зумовлена процесами, що відбуваються у сполучених поверхнях. Аналіз експлуатаційних дефектів елементів двигунів, що вийшли з ладу, вказує на важливу можливість підвищення експлуатаційних характеристик силових агрегатів за рахунок використання сучасних відновлювальних та зміцнювальних технологій.

До однієї з таких технологій відносять електролітичне осадження заліза з утворенням покриття. Всі фактори, що сприяють насиченню воднем покриттів, призводять до тріщиноутворення, що супроводжується розвантаженням опадів і зняттям залишкових напружень. Структура покриттів, отриманих в умовах розрідження над дзеркалом електроліту, відрізняється відсутністю шаруватості в покритті і меншою кількістю тріщин, що свідчить про монолітне покриття, з меншим вмістом гідроксиду і більш високою міцністю самого осаду.



Виконані дослідження дозволяють запропонувати для відновлення зношених деталей двигунів автомобілів новий варіант початкового періоду формування електротехнічного заліза на поверхні залізвуглецевих сплавів, можливість практичного здійснення якого ґрунтується на застосуванні розрідженого простору над рівнем електроліту.

Мета роботи полягає у дослідженні фізико-хімічних процесів формування металопокриттів при відновленні деталей двигунів.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОЛІТИЧНЕ ОСАДЖЕННЯ; ШАР ЗАЛІЗА; РОЗРІДЖЕННЯ НАД ДЗЕРКАЛОМ ЕЛЕКТРОЛІТУ; ГАЗОНАПОВНЕННЯ; ПОКРИТТЯ; ВОДЕНЬ; СТРУКТУРА; АДГЕЗІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ АГРЕГАТІВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.	10
1.1 Зміни технічного стану силових агрегатів.	10
1.2 Зношування деталей силових агрегатів.	13
1.3 Зміна геометричної форми елементів силових агрегатів автомобілів у процесі експлуатації.	29
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ПИТАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.	32
2.1 Програма та загальна методика дослідження.	32
2.2 Методика електрохімічних досліджень.	34
2.3 Методика дослідження структурних перетворень в електролітичному залізі.	36
2.4 Методика дослідження адгезійного зв'язку покриттів електролітичного заліза з основою.	38
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛОПОКРИТТІВ.	42
3.1 Формування метало покриттів електролітичного заліза за умов контрольованої розрідженої атмосфери.	42
3.1.1 Формування структури електролітичного заліза.	42
3.1.2 Вибір умов для початкового періоду осадження заліза за умов розрідженої атмосфери.	50
3.2 Дослідження електрохімічного стану осаджуваної поверхні деталі при початковій катодній поляризації в умовах розрідженої атмосфери	57

МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Цімар		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Дослідження покриттів на основи електролітичного заліза при відновленні металевих виробів.			Літера	Аркуш
			4	102
ХНУ МТВАм-22-1				

3.3 Дослідження структурних перетворень в електролітичному залізі.	60
3.4 Дослідження адгезійного зв'язку покриттів заліза з відновлюваною поверхнею деталі	64
3.5 Вплив елементів режиму залізнення на точність формоутворених заготовок, при відновленні зношених деталей.	67
3.6 Дослідження рівномірності розподілу покриттів електролітичного заліза в залежності від щільності струму та ступеня розрідженості простору над рівнем електроліту.	72
3.6.1 Умови формування рівномірних електролітичних покриттів заліза.	73
3.6.2 Вплив газових бульбашок водню на дефекти і рівномірність електролітичного шару заліза, обложеного на поверхню залізвуглецевих сплавів.	78
3.6.3 Вплив газових бульбашок на розподіл струму на катоді	83
3.6.4 Вплив розрідження над дзеркалом електроліту на точність розмірів, форми та якість поверхневого шару заготовок.	85
ВИСНОВКИ	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99
ДОДАТКИ	102

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						5
Зви.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Дослідження структурних перетворень в електролітичному залізі.	60
3.4 Дослідження адгезійного зв'язку покриттів заліза з відновлюваною поверхнею деталі	64
3.5 Вплив елементів режиму залізнення на точність формоутворюваних заготовок, при відновленні зношених деталей.	67
3.6 Дослідження рівномірності розподілу покриттів електролітичного заліза в залежності від щільності струму та ступеня розрідженості простору над рівнем електроліту.	72
3.6.1 Умови формування рівномірних електролітичних покриттів заліза.	73
3.6.2 Вплив газових бульбашок водню на дефекти і рівномірність електролітичного шару заліза, обложеного на поверхню залізвуглецевих сплавів.	78
3.6.3 Вплив газових бульбашок на розподіл струму на катоді	83
3.6.4 Вплив розрідження над дзеркалом електроліту на точність розмірів, форми та якість поверхневого шару заготовок.	85
ВИСНОВКИ	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99
ДОДАТКИ	102

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Одним із найважливіших показників конкурентоспроможності автомобілів, відповідно до стандартів ISO 9000, є співвідношення витрат на забезпечення працездатності за весь термін експлуатації до витрат на виготовлення. У розвинених європейських країнах, в Америці це співвідношення становить у середньому 120 %.

Система забезпечення працездатності силових агрегатів автомобілів ґрунтується на закономірностях зміни їхнього технічного стану в процесі експлуатації. Ці закономірності залежить від груп чинників [1] (рис. 1.1).

Як видно із схеми, основними елементами, що визначають ефективність технічної експлуатації автомобілів (ТЕА), є конструктивно-технологічні фактори, які значною мірою впливають на якість агрегатів і автомобіля в цілому. Загально визнана існуюча гостра проблема якості в автомобілі.

Близько 60% усіх рекламаций у гарантійний період обумовлено недосконалістю конструкторсько-технологічної розробки та процесу виробництва. Тому, для забезпечення надійності автомобіля, завдання, пов'язані з якістю виробу, необхідно вирішувати в процесі проектування та виготовлення виробу, а виявлятися воно буде у процесі експлуатації автомобіля [1].

Досягнення високих показників за екологічними нормами дизелів, показниками функціонування та довговічності нерозривно пов'язано з підвищенням якості виготовлення деталей, відновлення їх під час ремонту, застосуванням нових технологій та матеріалів.

Одним з основних елементів автомобіля, від якого багато в чому залежить його ефективність є силовий агрегат (двигун). Надійність автомобіля є одним з основних комплексних показників, що характеризують зміни його якості у процесі напрацювання.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Аналіз розподілу відмов за елементами двигуна дозволяє виявити найменш надійні елементи автомобіля з метою їх подальшого конструктивно-технологічного вдосконалення, обґрунтувати витрати запасних частин у конкретних умовах експлуатації, встановити раціональні нормативи технічного обслуговування та ремонту (рис. 1.2).

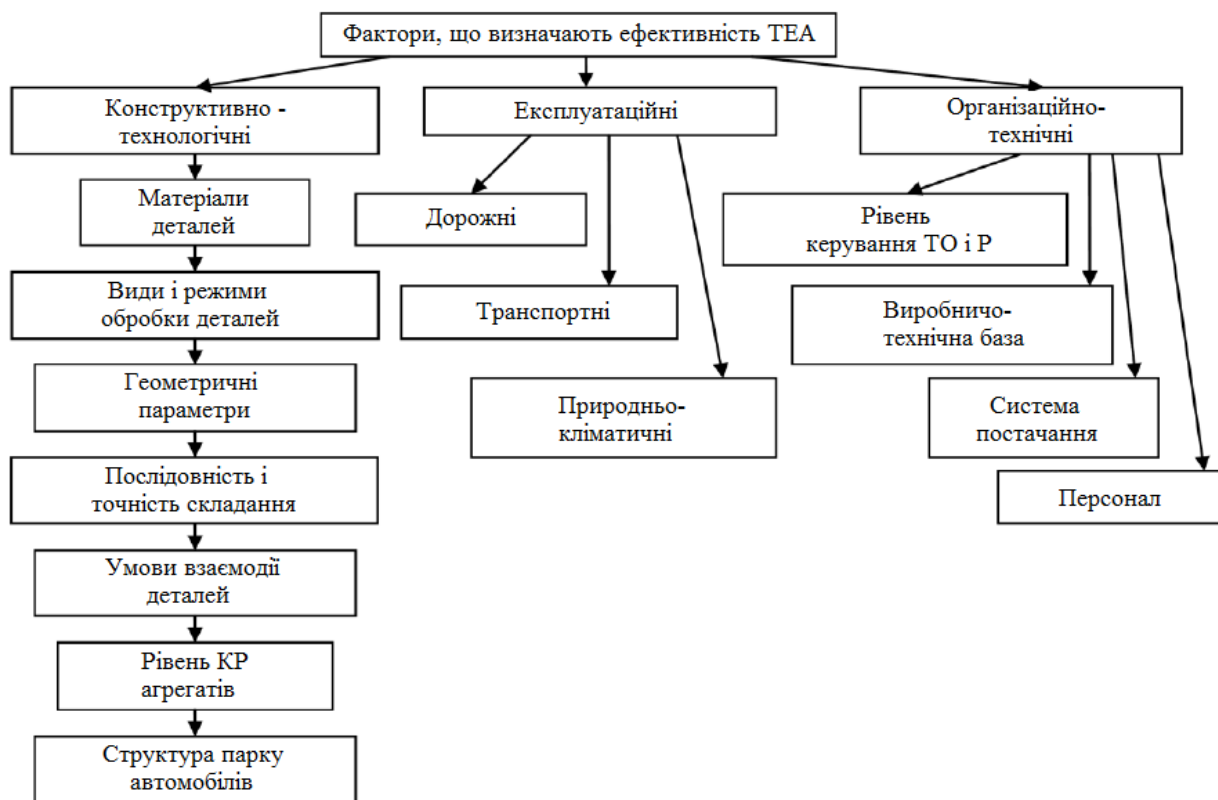


Рисунок 1.1 – Схема факторів, що визначають ефективність технічної експлуатації автомобілів

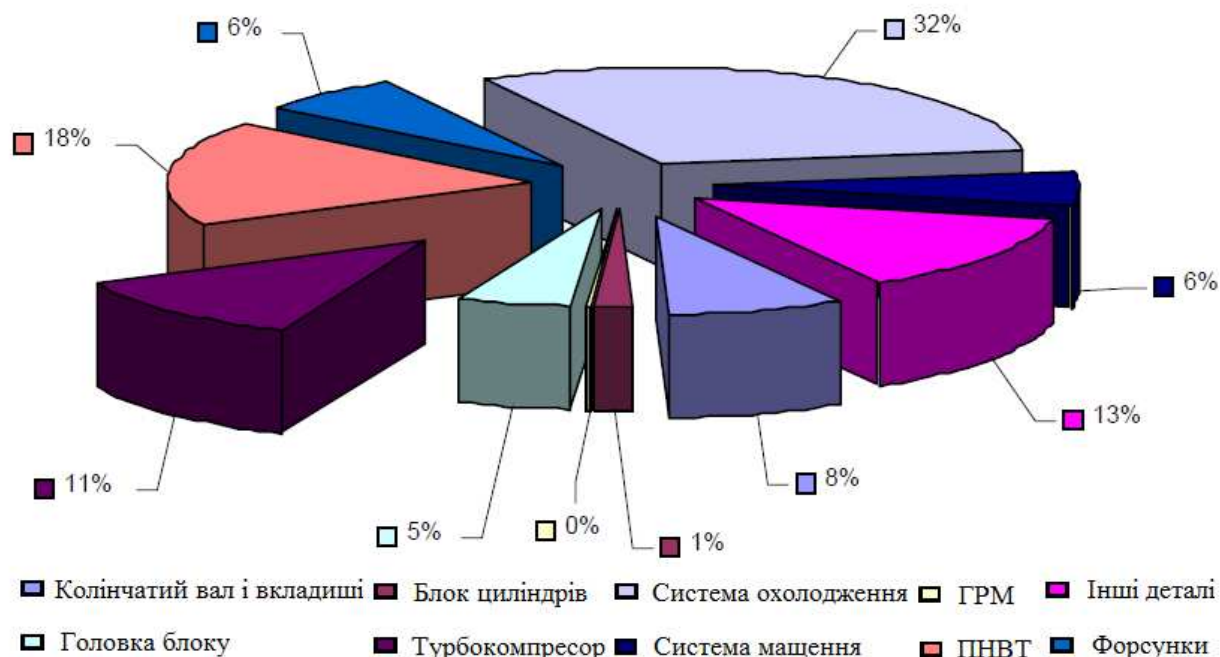


Рисунок 1.2 – Умовний розподіл відмов за елементами двигуна

Якість автомобіля характеризується не тільки здатністю виконувати задані функції, а й, головним чином, рівнем надійності, властивістю довго зберігати і, якщо необхідно, відновлювати свою працездатність за мінімальних витрат праці та коштів. Таким чином, довговічність є характеристикою якості, віднесеною до часу. Якщо в процесі експлуатації агрегату відбувається часткова або повна втрата його властивостей, що призводять до неможливості виконання агрегатом певних функцій, це призводить до часткового або повного виходу автомобіля з ладу.

Зниження довговічності елементів, агрегатів тощо. обумовлено кількома факторами:

1) помилки, допущені при конструюванні, виготовленні та монтажі, зазвичай виявляються в ранній період експлуатації;

2) поступове втрачання елементом, агрегатом низки функціональних властивостей, тобто знос. Цей процес закономірний і зі збільшенням часу експлуатації автомобіля знос у робочих поєднаннях зростає. Проте сам результат закономірних змін проявляється раптово. У зв'язку з цим процес

зношування відбувається під впливом постійно діючих факторів, що мають і випадковий, і детермінований характер. У цьому полягає вплив умов експлуатації. Однак природне завершення процесу зношування має випадковий характер;

3) впливу фізичного характеру, що призводять до раптових відмов елемента, агрегату, навіть за відсутності елемента, агрегату видимих погіршень функціональних властивостей.

Усі види відмов та види причин, що їх викликали, поєднує одну загальну ознаку: випадковість виникнення навіть за поступового накопичення фізичних змін.

Мета роботи полягає у дослідженні фізико-хімічних процесів формування металопокриттів при відновленні деталей двигунів.

Завдання:

1. Аналіз методів отримання контактного шару заліза без тріщин.
2. Дослідження міцності зчеплення електролітичного заліза із поверхнею деталі.
3. Дослідження процесу отримання рівномірних та гладких осадів заліза.
4. Дослідження впливу розрідження над дзеркалом електроліту на якість поверхневого шару металевих виробів.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ АГРЕГАТИВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.

1.1 Зміни технічного стану силових агрегатів.

Від початку експлуатації до списання автомобіль виконує великий обсяг корисної роботи при безперервному впливі на нього несприятливих зовнішніх і внутрішніх факторів, тому його технічний стан неминуче погіршується.

Оптимізувати зміну технічного стану силових агрегатів у процесі експлуатації можна при обґрунтуванні залежностей зміни технічного стану двигунів від пробігу автомобіля з початку експлуатації та критерію граничного стану основних пар двигуна, які дозволять визначити оптимальний пробіг автомобіля до поточного, капітального ремонту. Дані залежності дозволяють прогнозувати зміна технічного стану двигунів. Так як ці зміни є наслідком процесів зношування пар, необхідно визначити залежність зносу основних деталей двигунів від пробігу автомобіля [4].

Як вже визначили, основними причинами зміни технічного стану силових агрегатів є зношування, втомні, теплові та корозійні руйнування [4], які залежать від інтенсивності зміни розмірів, геометричної форми деталей та їхнього взаємного розташування.

Зношування відбувається під впливом трьох груп факторів: конструктивних - залежать від конструкції двигуна, технологічних - від технології виготовлення деталей і експлуатаційних - якості застосовуваних палив і масел, умов експлуатації. Знаючи частку зносів, викликаних різними умовами експлуатації двигуна у загальному зносі, можна визначити фактори, що мають основний вплив на знос деталей. Це дозволяє виявити найбільш ефективні шляхи підвищення довговічності двигунів за малої витрати часу та коштів, а також прогнозувати ресурс двигунів до капітального ремонту в залежності від умов експлуатації. Тому робота щодо підвищення

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зносостійкості може дати максимальний техніко-економічний ефект у тому випадку, якщо конструктивні розробки будуть в першу чергу спрямовані на усунення факторів, що викликають максимальне зношування.

Різні експлуатаційні фактори, що впливають на знос деталей двигуна та його працездатність, у процесі експлуатації прийнято ділити на три групи [5]:

1. Навантажувальні та швидкісні режими роботи двигунів, які в основному визначають величину молекулярно-механічного (адгезійного) зношування.

2. Тепловий режим роботи двигуна, включаючи періоди пуску та прогріву, які визначають величину корозійно-механічного та молекулярно-механічного зношування.

3. Запиленість повітря та захист двигуна, його окремих деталей від механічних частинок забруднень, що визначають величину абразивно-механічного зношування.

Наведений поділ до певної міри умовний, оскільки знос майже кожної деталі двигуна є сумою впливу всіх трьох факторів. Разом про те кожен із наведених розділів відповідає цілком певному комплексу конструктивних заходів, вкладених у підвищення зносостійкості деталей двигуна, і відбиває основні тенденції, що склалися на даний час щодо і зношування деталей [5].

В залежності від умов експлуатації середнє тягове зусилля автомобіля змінюється у широких межах. Це призводить до пропорційного збільшення навантаження на двигун. З форсуванням двигунів, підвищенням крутного моменту, зростає навантаження на його елементи, що призводить до зближення поверхонь тертя деталей і підвищує ймовірність контакту їх мікрорівнів.

Це підтверджується дослідженнями впливу навантажувального режиму двигуна на знос деталей [2].

Швидкісний режим роботи двигуна залежить від інтенсивності руху, стану дорожнього покриття та рельєфу місцевості. Зі збільшенням

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкісного режиму зростає температура деталей двигуна, що погіршує умови мастила та підвищує інтенсивність зношування. Однак підвищення швидкості обертання колінчастого валу двигуна супроводжується зниженням шляху тертя, який характеризується кількістю обертів колінчастого валу на одиницю шляху автомобіля. Тому з підвищенням швидкісного режиму двигуна скорочується шлях тертя і за постійного температурного режиму повинна зменшуватися інтенсивність зношування.

Інтенсивність зношування деталей двигуна більше також і на швидкісних режимах, що не встановилися, ніж при постійній швидкості обертання колінчастого валу. Причому зі збільшенням прискорення темпи зростання інтенсивності зношування знижується.

Тепловий режим роботи двигуна, який оцінюється за температурою охолоджувальної рідини та мастила, залежить як від температури навколишнього повітря, швидкості та напрямку вітру, умов охолодження, так і від навантажувального та швидкісного режимів. Він дуже впливає на знос не тільки через корозійно-механічне зношування, але головним чином через забруднення при зниженому тепловому режимі, утворення відкладень на деталях. При низьких теплових режимах вода, що проникла в масло і сконденсувалася, викликає інтенсивну коагуляцію домішок і гідроліз присадок з утворенням опадів - шламів. Останні призводять до швидкого виходу з ладу масляних фільтрів, забруднення сітки маслоприймачів насосів та масляних каналів, що може різко знизити безвідмовність роботи двигуна та викликати підвищене зношування деталей. до аварійного. При високих теплових режимах роботи двигуна інтенсифікуються процеси окиснення олії, що призводять до погіршення його властивостей, спрацьовування присадок, особливо лужних.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Зношування деталей силових агрегатів.

Довговічність автомобілів та їх елементів зумовлена процесами, що відбуваються у сполучених поверхнях.

З метою обґрунтування та розвитку залежностей показників технічного стану, основних деталей форсованих двигунів від напрацювання необхідно дослідити зміну розмірів та форми деталей двигунів у процесі експлуатації.

Зношування поверхонь тертя деталей автомобілів, багато дослідників представляють у вигляді класичної кривої зносу (рис.1.3).

В даний час немає практично прийнятних безрозбірних методів вимірювання величини зношування деталей і швидкості їх зношування на різних ділянках напрацювання [5-7].

В умовах експлуатації швидкість зношування деталей, а отже, і її знос залежать не стільки від напрацювання, скільки від великої кількості факторів, що змінюються в часі експлуатації, особливо таких, як силовий і тепловий режими роботи двигуна, кількість і тривалість його пускових періодів, кліматичні умови його роботи, якість експлуатації та технічного обслуговування, тощо.

Кожен із перерахованих факторів може вплинути на швидкість зношування деталей, але так як періодичність і тривалість їх прояви носять випадковий характер, контролювати і враховувати ці фактори практично неможливо. У зв'язку з цим очевидно, що швидкість зношування деталі різна і може мати значне розсіювання різних ділянках напрацювання агрегату в процесі його експлуатації. Крім того, граничні зношування (зазори), що зумовлюють граничний стан деталей (сполучень), також розсіюються в порівняно широких межах. Тому крива зносу (рис.1.3) лише приблизно описує фактичний процес зношування та її доцільніше назвати умовною, а не класичною.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

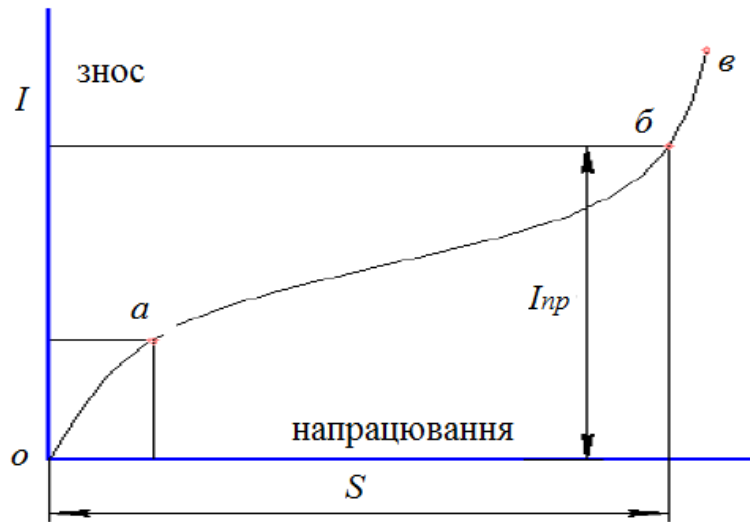


Рисунок 1.3 – Крива зносу деталі:

oa - зона припрацювання; аб - зона нормальної експлуатації; бв - зона форсованого зносу

Зміна технічного стану автомобілів дослідники описують різними формами кривих зношування.

Зазвичай зміна технічного стану автомобіля представлена у вигляді полінома третього ступеня:

$$S = a_0 + a_1 l + a_2 l^2 + a_3 l^3, \quad (1.1)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 ($a_2 > 0$) – параметри, що визначаються за експериментальними даним; S – знос деталей; l – напрацювання (пробіг) автомобіля.

Ця залежність показує період напрацювання деталей та період виникнення, що прогресує зношування сполучних поверхонь елементів силового агрегату та автомобіля загалом, тобто, автор дану залежність призводить до всіх поєднань. У такому вираженні залежність не відображає сутність процесів, що відбуваються при контактні сполучень та зносах.

У роботах інших дослідників [8, 9] залежність зносу елементів силового агрегату, автомобіля від напрацювання описується статичним залежністю:

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S = S_0 + \omega l^n, \quad (1.2)$$

де S_0 – знос елементів в кінці припрацювання, приведений до початку експлуатації; ω – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність зношування; n – показник ступеня (при $n > 1$ – інтенсивність зношування зростає в процесі експлуатації, при $n < 1$ - знижується, при $n = 1$ постійна).

Даний тип залежності відображає змінну швидкість зношування елементів автомобіля в процесі експлуатації, але так само, як і попередня залежність (1.1), не описує процеси зношування, що відбуваються сполученнях.

Залежності зносу елементів автомобіля та інтенсивності їх зношування у процесі експлуатації, описані в роботі [10], найбільш повно відображають сутність процесів, що відбуваються у сполученнях при зміні технічного стану елементів агрегатів та автомобіля в цілому. Основні елементи сполучень автомобіля їм розділені на кілька видів, це – динамічно навантажені сполучення, саморозвантажувальні сполучення та сполучення з незмінним тиском у зоні контакту при зміні розмірів та форми деталей, внаслідок зношування.

Отримано пропорційну залежність від зносу ΔS і обґрунтував, що загальне зношування елементів агрегатів автомобіля в процесі експлуатації зростає за експоненційною залежністю:

$$S = S_0 e^{bl}, \quad (1.3)$$

та інтенсивність зношування зростає також за експоненційною залежністю:

$$\alpha = \alpha_0 e^{bl}, \quad (1.4)$$

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де α_0, S_0 – відповідно інтенсивність зношування та зношування в кінці припрацювання, наведені до початку експлуатації ($l = 0$); b – зміна інтенсивності зношування на одиницю зношування деталей.

В динамічно навантажених сполученнях, на відміну від «класичної» кривої зношування, після припрацювання інтенсивність зношування не залишається постійною, а зростає лінійно від зносу (рис.1.4, а) та експоненційно від напрацювання (рис.1.2, б). Зношування деталей залежно від напрацювання зростає по експоненційній залежності (рис.1.2, в). Для сполучень, що саморозвантажуються, також отримані експоненціальні залежності відповідно (рис.1.4) [6].

Залежність інтенсивності зношування та зносу елементів автомобіля від напрацювання [7]:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-bl}, \quad (1.5)$$

$$S = S_0 + S_0(1 - e^{-\alpha_0 l}), \quad (1.6)$$

де S_0 - знос; α_0 – інтенсивність зношування в кінці приробітку, наведені на початок експлуатації (рис. 1.4).

Що стосується поєднання з незмінним тиском у зоні контакту при зміні розмірів та форми деталей, внаслідок зношування ним запропоновані наступні залежності:

$$\alpha = \alpha_0 = \text{const}, \quad (1.7)$$

$$S = S_0 + \alpha l. \quad (1.8)$$

Недоліком описаних залежностей є те, що вони прийнятні для незмінних умов процесів, що протікають у поєднаннях, а у процесі роботи ці умови

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

постійно змінюються (температура, тиск, швидкість, тощо), у зв'язку з цим розглянуті залежності носять стохастичний характер.

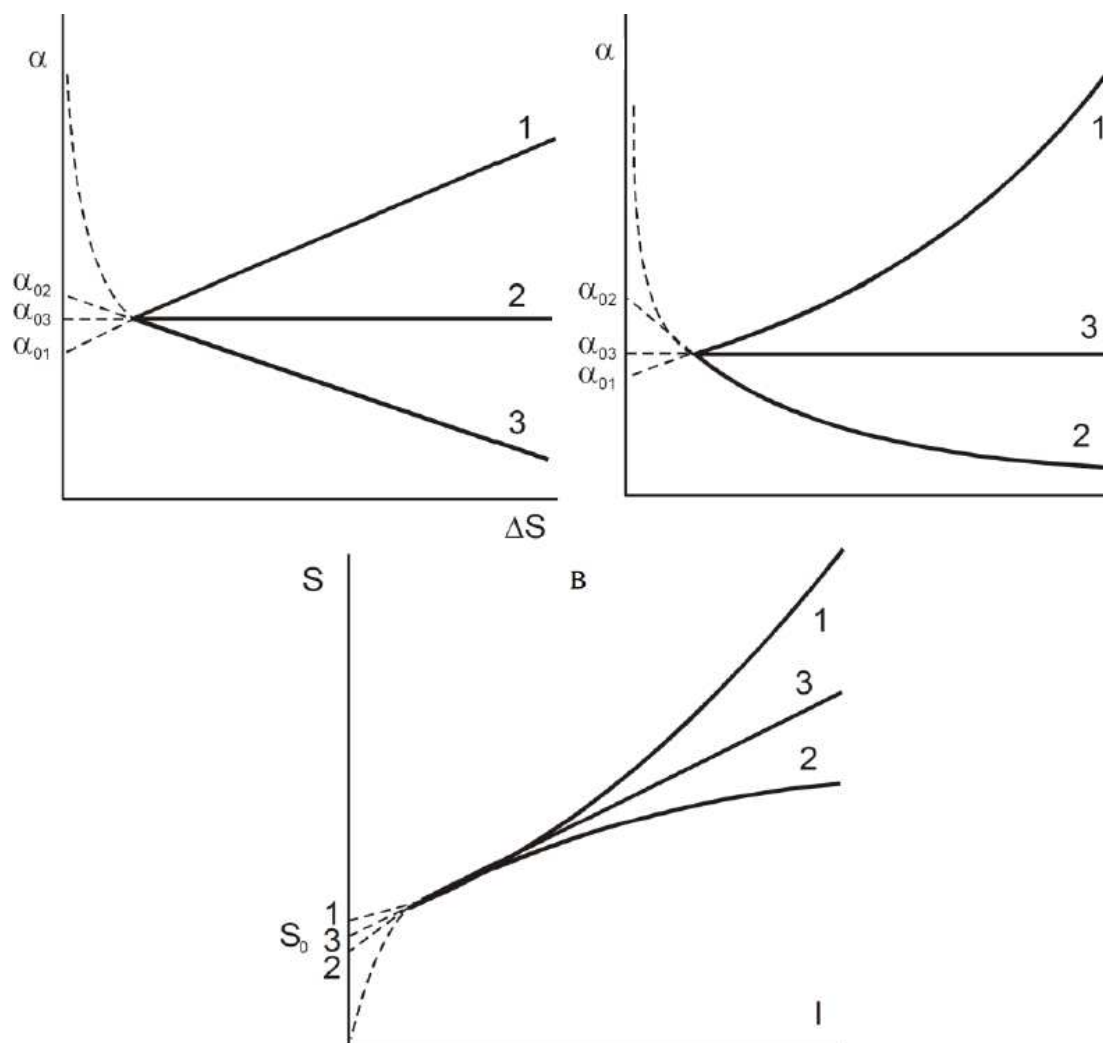


Рисунок 1.4 – Залежність інтенсивності зношування і загального зносу S від зносу ΔS після приробітку (а) та напрацювання l (б, в) для різних типів сполучення:

1 – динамічно навантажені; 2 – саморозвантажувальні; 3 – з незмінним у процесі зношування тиском у зоні тертя

Залежність тиску мастила від пробігу [6]:

$$P = \frac{a}{S_0^m e^{mb_l}} = P_0 e^{-b_p l}, \quad (1.9)$$

де $P_0 = a/S_0^m$ – тиск у кінці припрацювання, наведений до початку експлуатації; $b_p = m \cdot b$ – експериментальний параметр; a – конструктивний та режимний параметр.

Для наочності значення параметрів p_0 і b_p показано на рис.1.5. При невеликих оборотах обертання колінчастого валу, режимі холостого ходу, тиск мастила в системі мащення знижується, при номінальній частоті обертання колінчастого валу тиск піднімається, але обмежується роботою редуційного клапана, а при підвищених зазорах у сполученнях, насамперед підшипниках колінчастого і розподільного валів, тиск мастила в системі знижується і не забезпечує умов гідродимічного мащення в поєднаннях ресурсовизначальних елементів.

Зі збільшенням зазорів у сполученнях, внаслідок їхнього зносу, відбувається зниження тиску олії в системі мастила (рис.1.6), що може призвести до граничних умов мащення у підшипниках ковзання, це свідчить про недостатню продуктивність масляного насоса двигуна.

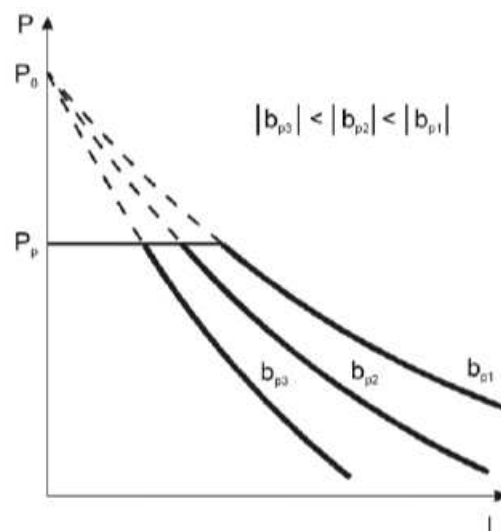


Рисунок 1.5 – До поняття сенсу параметрів p_0 та b_p :

P_p – тиск, обмежений редуційним клапаном

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

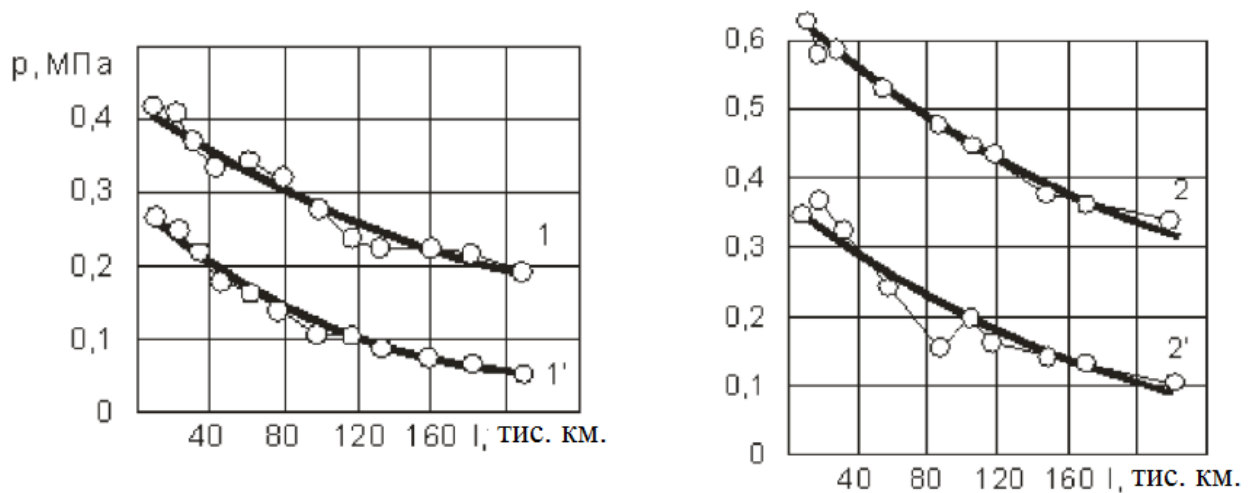


Рисунок 1.6 – Залежність тиску в системі мастила від напрацювання двигунів:
 1 – MAN D2066; 2 – Renault Magnum DXi (без штриха – нормальний режим, зі штрихом – режим холостого ходу)

Аналіз проведених досліджень [12] показує, що товщина мастильного шару (ТМШ) залежно від пробігу автомобіля зменшується по експонентційній залежності:

$$h = h_0 e^{-bl}, \quad (1.10)$$

де h_0 - ТМШ в кінці приробітку, наведена до початку експлуатації; b – параметр, що враховує вплив зносу на інтенсивність зміни технічного стану підшипника.

Проведені дослідження та обробка отриманих результатів дозволяють визначити параметри цієї залежності для силових агрегатів MAN D2066:

$$h = 50e^{-0.008l} \quad (r = 0,95). \quad (1.11)$$

Графічно залежність товщини масляного шару від напрацювання двигунів MAN (1.11) представлено на рис.1.5.

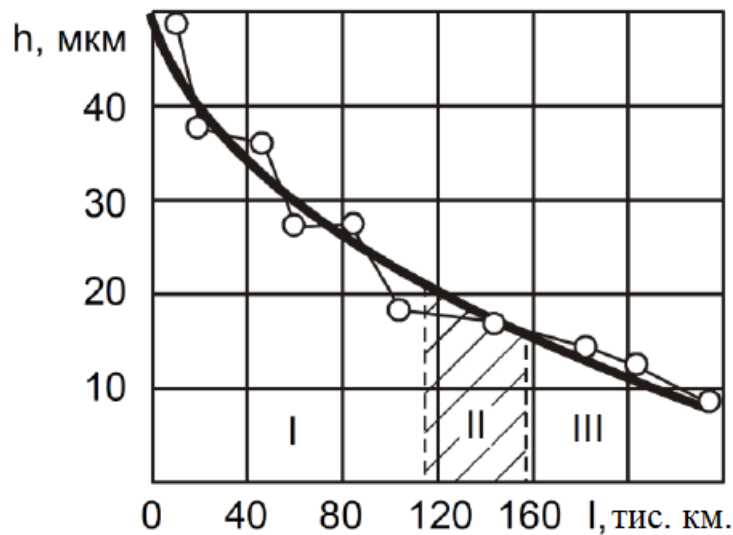


Рисунок 1.5 – Залежність ТМШ від напрацювання двигунів MAN D2066:

I – область рідинного тертя; II – переходу в напіврідинне тертя; III – напіврідинного тертя

При дослідженні зміни технічного стану саморозвантажування сполучень у роботах запропоновано використовувати залежність:

$$y = y_0 + y_1(1 - e^{-bl}). \quad (1.12)$$

Апроксимуючи рівняння (1.12) поліномом другого ступеня, отримаємо:

$$y = y_0 + al - bl^2, \quad (1.13)$$

де y_0 , a , b – параметри, визначені методом найменших квадратів. Експериментальні дослідження, частково представлені на рис.1.6, показують справедливості описаних залежностей.

Зі наведеного слідує, що зношування елементів автомобіля в процесі експлуатації призводить до зміни процесів, що протікають у сполученнях поверхонь, що труться, і до появи ушкоджень, при яких неможлива подальша експлуатація автомобіля (перегрів, задираки, схоплювання та інші), тому

доцільно контролювати та попереджати дані процеси під час проведення технічного обслуговування та ремонту автомобіля.

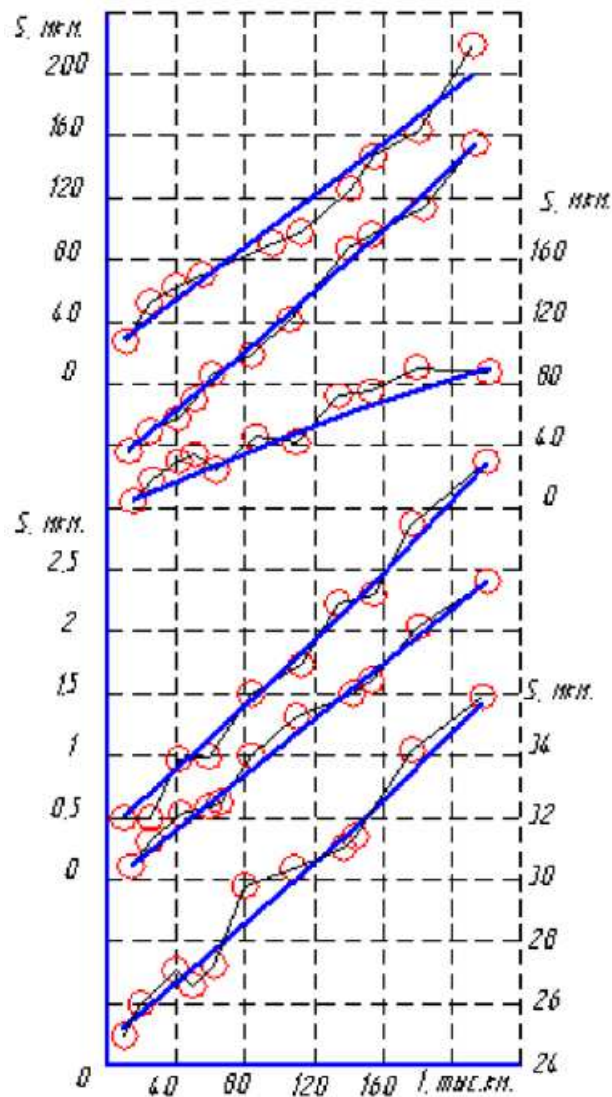


Рисунок 1.6 – Залежність показників технічного стану циліндропоршневої групи двигунів від напрацювання.

Зміна технічного стану сполучення є наслідком зміни розмірів та форми деталей. Зміна розмірів та форми ресурсо-визначальних елементів у процесі експлуатації зумовлено нерівномірністю зношування сполучних поверхонь та залишковими деформаціями елементів.

Процес зношування можна умовно розділити на три основні етапи – початковий, що встановився та катастрофічний. Початковий знос

характеризується мікрогеометричним і макрогеометричним припрацюванням поверхонь тертя. Зношування характеризує термін служби силового агрегату. При катастрофічному зносі подальша експлуатація двигуна без капітального ремонту неможлива.

Інтенсивність руйнування залежить від сукупності дії трьох груп факторів: фізико-хімічних властивостей матеріалу поверхневого шару, фізико-хімічних властивостей середовища та умов навантаження (головним чином тиску в зоні тертя і швидкості відносного переміщення). Останнє істотно впливає використання закладеного ресурсу двигуна. Навантаження, що викликають напруження, які перевищують межу пружності, призводять до залишкової деформації та утворення тріщин, прояву явищ повзучості, що призводить до зміни геометричної форми і розмірів деталей [12].

Дефекти двигунів, знятих у капітальний ремонт, фіксуються в статистиці автотранспортних організацій. У табл. 1.1 представлено розподіл пробігу автомобілів MAN D2066 до капітального ремонту двигунів та їх дефектам. Результати обробки наведено у табл. 1.2 та на рис. 1.7. [12]

Аналіз результатів досліджень [12, 13] (табл. 1.1, 1.2) показує, що у доремонтний період у капітальний ремонт надходить 44,36 % силових агрегатів, у міжремонтний період 31,51 %. При цьому коефіцієнт варіації пробігу до капітального ремонту за дефектами, що розглядається, незначний, а закон розподілу напрацювання до капітального ремонту близький до нормального.

Аналіз досліджуваних дефектів (табл. 1.1), що призводять до виходу силового агрегату з ладу показує, що з їхньої причини частка двигунів у 1,62 рази більша у міжремонтному періоді, ніж у доремонтному.

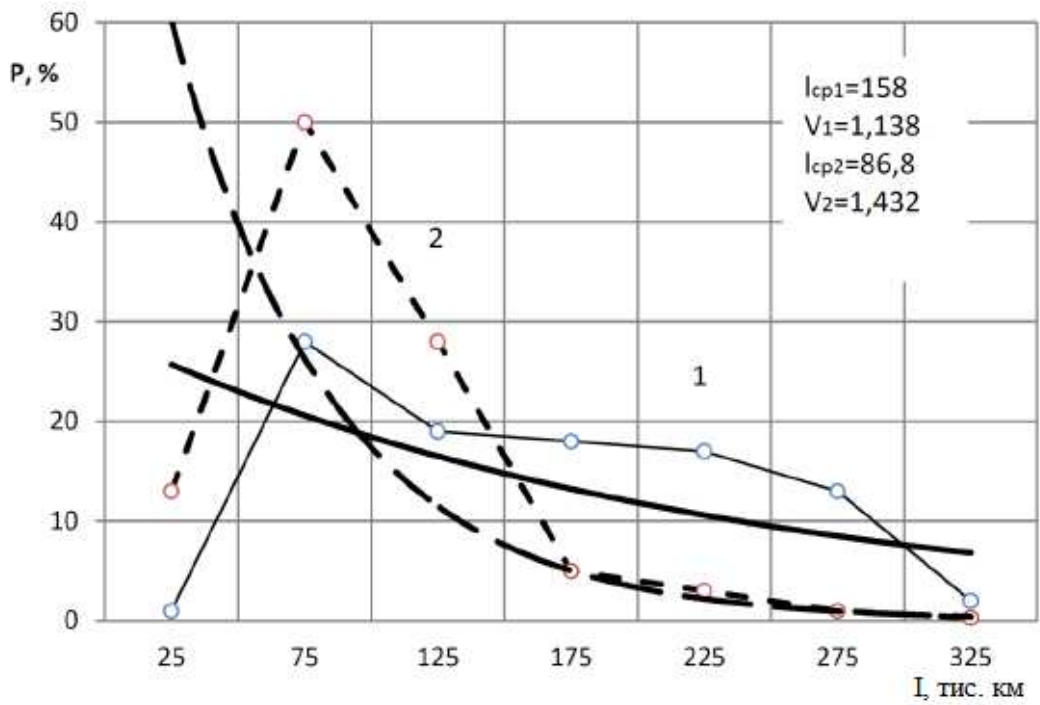
Загалом, аналізуючи велику кількість аварійних відмов силових агрегатів можна бачити суттєву варіацію напрацювання до капітального ремонту двигуна, це відповідає експонентційному закону розподілу, що більшою мірою проявляється при аварійних відмовах. Характерним прикладом

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

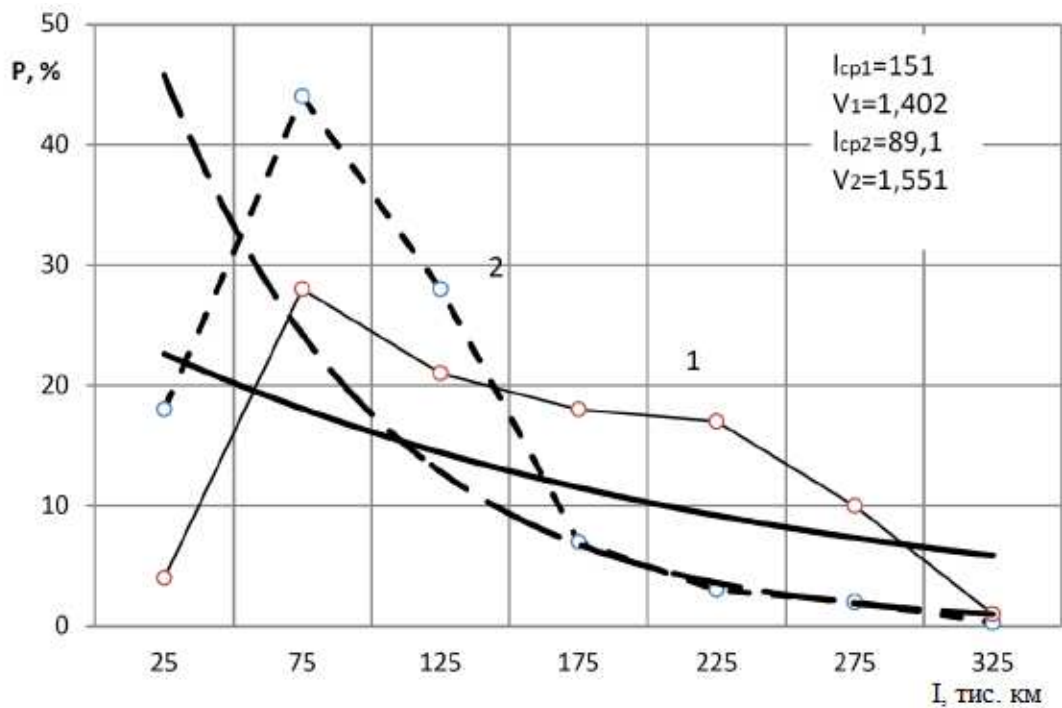
є дефекти, пов'язані з поломкою шатуна, колінчастого валу, провертанням вкладишів як у нижній головці шатунів, так і в опорах блоку циліндрів рис.1.7.

Таблиця 1.1 – Розподіл пробігу автомобілів MAN D2066 до капітального ремонту двигунів та їх дефекти.

Найменування дефектів	Період	Інтервали пробігу, тисяч км.								Двигуни з дефектами	
		0-30	30-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	> 350	Разом	ПР ПА
1. Природний знос ЦПГ і КШМ	Н		0,92	0,61	14,24	21,05	20,74	36,22	6,19	44,36	
	Р	0,78	17,32	15,74	22,04	13,38	30,70	-	-	31,51	-
2. Абразивний знос ЦПГ і КШМ	Н	-	18,94	14,73	34,73	28,42	3,15	-	-	13,04	0,27
	Р	1,92	51,92	26,92	11,53	5,76	1,92	-	-	12,90	-
3. Знос ЦПГ внаслідок перегріву ДВЗ	Н	-	33,34	22,22	22,22	22,22	-	-	-	1,23	-
	Р	10,00	40,00	20,00	20,00	10,00	-	-	-	2,48	-
4. Провертання корінних і шатунних вкладишів	Н	1,03	27,83	19,58	18,55	17,52	13,40	2,06	-	13,32	5,08
	Р	13,41	50,00	28,04	4,87	2,43	1,21		-	20,34	9,42
5. Вдлам шатуна, болтів, поршня	Н	4,50	27,02	20,72	18,01	17,11	9,90	0,90	1,80	15,24	9,06
	Р	18,64	43,37	27,11	6,77	3,38	1,69	-	-	14,64	7,94
6. Руйнування колінчастого валу	Н	-	28,57	14,28	28,57	14,28	14,28	-	-	0,96	0,41
	Р	9,09	54,54	27,27	9,09	-	-	-	-	2,72	0,99
7. Тріщина блоку циліндрів	Н	-	18,57	14,28	17,14	20,00	20,00	7,14	2,85	9,61	0,54
	Р	13,04	43,47	23,91	8,69	4,34	4,34	2,17	-	11,41	0,24
8. Дефекти масляного насосу	Н	-	-	50,00	25,00	25,00	-	-	-	0,54	-
	Р	33,33	33,33	33,34	-	-	-	-	-	0,74	-
9. Інше	Н	8,33	25,00	25,00	25,00	8,33	8,34	-	-	1,64	-
	Р	23,07	38,46	15,38	7,69	7,69	7,69	-	-	3,22	-
Разом	Н	0,96	13,59	10,43	18,81	20,60	15,10	17,17	3,29	100,00	15,38
	Р	8,93	37,46	22,82	12,40	6,94	11,16	0,24	-	100,00	18,61



а)



б)

Рисунок 1.7 – Розподіл напрацювання двигуна MAN D2066 до капітального ремонту з причин:

а – провертання корінних та шатунних вкладишів; б - урвища шатуна, шатунних болтів; 1 – у доремонтному періоді, 2 – у міжремонтному періоді

Про якість капітального ремонту двигуна можна судити за величиною напрацювання на відмову та співвідношення розсіювання пробігу до ремонту силового агрегату табл.1.3. Порушення правил експлуатації автомобіля, зокрема порушення регулювання паливного насоса високого тиску, призводить до підвищення коефіцієнта варіації пробігу до ремонту табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Параметри розподілу напрацювання до першого КР (Н) і поміж КР (Р) двигунів [12].

Найменування дефектів	Період	Параметри			доля ДВЗ з розпломбованим ПНВТ
		середнє знач. тис. км.	середньо квадрат. відхил., тис. км.	коеф. варіації	
1. Природне зношування ЦПГ і КШМ	Н	271,3	149,9	0,552	
	Р	184,1	157,7	0,857	-
2. Пилове (абраз.) зношування ЦПГ і КШМ	Н	163,6	116,9	0,714	2,07
	Р	106,1	127,3	1,200	-
3. Зношування ЦПГ внаслідок перегіву	Н	138,3	106,7	0,772	-
	Р	110,0	130,6	1,188	-
4. Провертання корінних і шатунних вклад.	Н	158,0	179,7	1,138	38,13
	Р	86,8	123,5	1,423	46,31
5. Руйнування шатуна поршня, шатун. болтів	Н	151,0	211,7	1,402	59,44
	Р	89,1	138,2	1,551	54,23
6. Руйнування колінчастого валу	Н	158,0	140,9	0,892	45,05
	Р	86,8	84,3	0,971	36,39
7. Тріщина блоку циліндрів	Н	193,8	205,4	1,059	5,61
	Р	104,5	182,9	1,751	2,10
8. Дефекти масляного насосу	Н	162,5	64,0	0,394	-
	Р	68,3	65,0	0,958	-
9. Інше	Н	134,0	160,6	1,198	-
	Р	99,7	176,5	1,769	-
10. Разом	Н	211,0	225,0	1,067	15,38
	Р	122,9	173,8	1,414	18,61

Низький ресурс двигунів після капітального ремонту та зокрема його елементів табл. 1.3, обумовлений кількома факторами:

- не забезпеченням умов рідинного тертя в підшипниках ковзання, внаслідок зниження тиску в мастильній системі;
- втратою співвісності поверхонь базових елементів, внаслідок їх напружено-деформованого стану;
- накопичення втомних напружень навантажених елементах двигуна (тріщини) на колінчастих валах, опорах блоків циліндрів, шатунах і т.д. Велика неоднорідність складових при капітальному ремонті призводить до зниження вторинного ресурсу елементів двигуна, що видно за коефіцієнтами варіації, у ремонтованих двигунів він у 1,08-2,43 (в середньому у 1,32) рази вищий, ніж у неремontованих.

Таблиця 1.3 – Співвідношення параметрів довговічності ДВЗ в міжремонтному і доремонтному періоду експлуатації [12].

Найменування дефекту	$\frac{L_p}{L_H}$	$\frac{V_p}{V_H}$
1. Природне зношування ЦПГ і КШМ	0,67	1,55
2. Пилове (абразивне) зношування ЦПГ і КШМ	0,64	1,68
3. Зношування ЦПГ внаслідок перегріву ДВЗ	0,79	1,53
4. Провертання корінних і шатунних вкладишів	0,54	1,25
5. Руйнування шатуна, болтів, поршня	0,58	1,10
6. Руйнування колінчастого валу	0,55	1,08
7. Тріщина в блоці циліндрів	0,53	1,65
8. Дефекти масляного насосу	0,42	2,43
9. Інше	0,74	1,47
10. Разом	0,58	1,32

У капітальний ремонт (КР) через природне зношування деталей надходить 44,36 % неремонтованих і 31,51 % відремонтованих двигунів. Аварійні ушкодження основних деталей обумовлені порушенням правил експлуатації (розпломбування ПНВТ).

Доремонтний ресурс двигуна (агрегата) вичерпується з появою першої ресурсної відмови, у якому двигун (агрегат) іде у ремонт. Отже, доремонтний ресурс двигуна (агрегату) дорівнює ресурсу тієї чи іншої деталі, тієї чи іншої пари або іншого елемента, відмова яких відноситься до категорії ресурсних.

В основному показники надійності двигуна визначаються технічним станом таких ресурсовизначальних елементів, як підшипники колінчастого валу, циліндропоршнева група, блок двигуна, турбо-компресор, на які припадають 37 % відмов і 62 % витрат на ремонт [12].

При першому ремонті замінюють всі елементи, у яких залишковий ресурс менше встановленої величини міжремонтного ресурсу двигуна (агрегату). Це сприяє підвищенню якості та рівня довговічності силового агрегату. Однак цей відновний рівень надійності двигуна буде завжди меншим за початковий рівень на величину використаного ресурсу деталей, сполучень та інших елементів, залишених без ремонту до роботи.

Міжремонтний ресурс відремонтованого двигуна (агрегату) також вичерпується ресурсом найменш довговічної деталі чи іншого елемента.

Ресурс цих елементів, навіть якщо при ремонті були встановлені нові або відновлені, до початкового розміру деталі, будуть завжди меншими, ніж на новому двигуні (агрегаті), внаслідок збільшення швидкості їх зношування через спотворення розмірних і кінематичних зв'язків тих, що були в експлуатації вузлів та агрегатів, у яких зношені або пошкоджені деталі (у допустимих межах). Це стосується таких ресурсовизначальних деталей силового агрегату, як:

– блок циліндрів двигуна – ліжка блоку, поверхні під вкладиші корінних шийок колінчастого валу, які при проведенні ремонту агрегату необхідно не

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тільки перевіряти на відповідність розмірів та форми, а й перевіряти співвісність ліжок блоку;

– корпус коробки передач - посадкові місця під підшипники;

– шатун – поверхня сполучення нижньої головки шатуна з вкладишем, а також сполучення у верхній головці шатуна з втулкою, паралельність нижнього та верхнього отворів шатуна, деформації корпусу шатуна;

– колінчастий вал - розміри і форма шийок, наявність тріщин на них, прогин валу;

– турбокомпресор – зміна співвісності посадкових отворів підшипників турбокомпресора, внаслідок високих температур нагріву корпусу.

Тому в роботі акцент зроблений на підвищення довговічності саме цих елементів двигуна (блок циліндрів, шатун, колінчастий вал, турбокомпресор), досить дорогих як за вартістю, так і в послугах на ремонт (їх заміну).

Крім того, міжремонтний ресурс обумовлений також якістю проведеного ремонту. Вторинний ресурс становить близько 58 % первинного, і зумовлено це втомними напруженнями в елементах двигунів, утворенням тріщин та їх розвитком, зміною співвісності опорних поверхонь блоку циліндрів, що призводить до поломок колінчастого валу, утворень тріщин у блоці, тощо.

Для підвищення довговічності двигунів необхідно контролювати зміни технічного стану їх ресурсовизначальних елементів під час проведення ремонтних робіт, удосконалювати технологію та якість ремонту.

Аналіз експлуатаційних дефектів елементів двигунів, що вийшли з ладу, вказує на важливу можливість підвищення експлуатаційних характеристик силових агрегатів за рахунок використання сучасних відновлювальних та зміцнювальних технологій.

За кордоном приділяють велику увагу питанням технології та організації відновлення деталей. У високорозвинених країнах – США, Англії, Німеччини, Японії – відновлення переважно здійснюється на підприємствах-виробниках автомобілів. Відновлюють дорогі, металомісткі деталі: блоки циліндрів,

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

колінчасті вали, корпуси коробок передач, головки блоку і т.д., причому собівартість відновлення для більшості деталей не перевищує 20-30 % вартості нових [14-17].

1.3 Зміна геометричної форми елементів силових агрегатів автомобілів у процесі експлуатації.

Розмір та форма робочих поверхонь деталей значною мірою впливають на технічний стан сполучень, зміна яких у процесі експлуатації призводить до підвищення інтенсивності зношування ресурсовизначальних елементів. Експериментальні дані [14-17], частково наведені на рис. 1.8, підтверджують отримані залежності зміни розмірів та форми деталей силового агрегату від напрацювання.

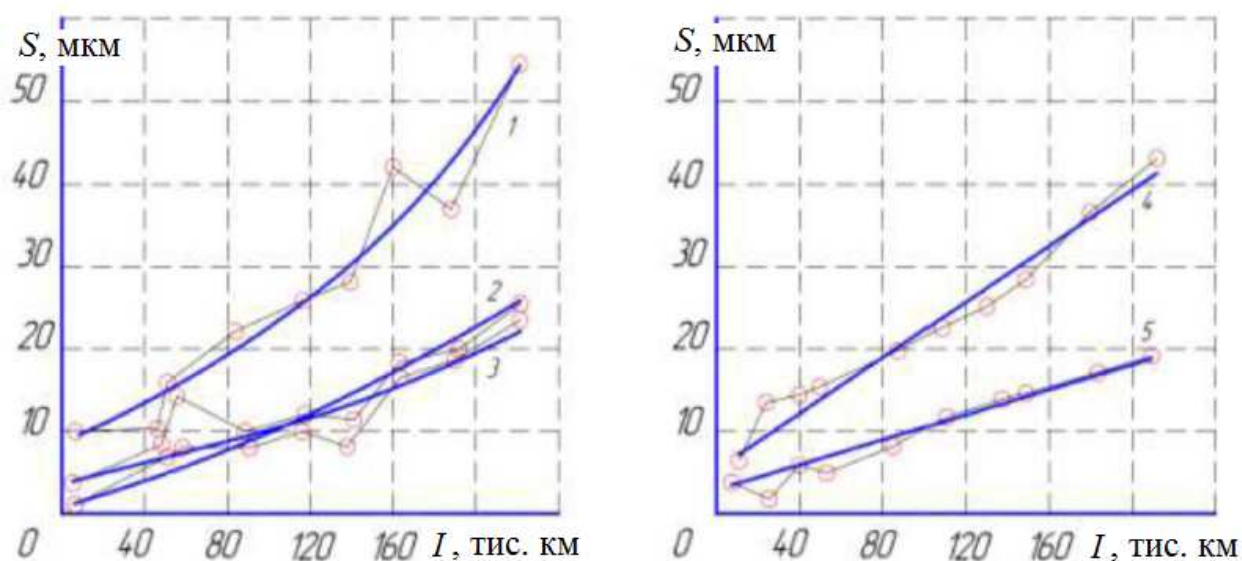


Рисунок 1.8 – Залежність прогину колінчастого валу – 1, овальності корінних – 2, шатунних – 3 шийок, гільз циліндрів у зношеному – 4, та не зношеному – 5 поясах від напрацювання двигуна MAN D2066

Прогин колінчастого валу в процесі експлуатації проявляється внаслідок дії газових та інерційних сил. Внаслідок того, що зазори в поєднанні вкладиш -

шийка колінчастого валу зростають, внаслідок зносу, і збільшуються за експонентційною залежністю, то й геометричні зміни колінчастого валу, прогин валу, зростає за такою ж залежністю:

$$J = J_0 e^{b} , \quad (1.14)$$

де J_0 - прогин у кінці приробітку; b – параметр, що враховує вплив зазору на інтенсивність деформації валу (параметр « b » в даному випадку менше за величиною, ніж залежно зазору від напрацювання, так як не враховується прогин нового валу і значна жорсткість колінчастого валу).

Нерівномірність зношування шийок колінчастого валу (овальність, конусність) обумовлена ймовірністю виникнення контакту між мікроставпками поверхонь, що сполучаються, внаслідок змінної товщини масляного шару в поєднанні вкладиш - шийка колінчастого валу і залежить від умов мастила в ньому та сприйманих навантажень. Знос на поверхні шатунних шийок більшою мірою проявляється у площині дії газових сил. Розташування зон найбільшого та найменшого зносу у корінних шийок також залежить від напрямку прикладеного навантаження, але в значною мірою на знос у поєднанні підшипників ковзання відіграють умови забезпечення рідинного мастила.

Враховуючи нерівномірність зношування поверхнею тертя, залежність виникнення овальності робочої поверхні від напрацювання [5]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{b} , \quad (1.15)$$

де ε_0 - овальність робочої поверхні в кінці приробітку.

Аналогічний механізм виникнення овальності внаслідок дії газових та інерційних сил, спостерігається в корінних опорах блоку циліндрів і у нижній головці шатуна. Крім цього, у нерухомому з'єднанні (вкладиш та опора блоку

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

циліндрів або нижня головка шатуна) зміна розмірів і форми поверхонь, що сполучаються відбувається внаслідок фреттинг-зношування.

Наведені дані свідчать про закономірну зміну в процесі експлуатації розмірів та геометричної форми деталей силового агрегату, що скорочує ресурс сполучення та агрегату загалом. У зв'язку з цим, зміна технічного стану елементів автомобілів доцільно попереджати, використовуючи методи діагностування та відновлення розмірів та форми елементів агрегатів за їх технічним станом.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ПИТАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.

2.1 Програма та загальна методика дослідження.

Відповідно до поставленої мети та сформульованих завдань роботи розроблено схему програми та загальної методики дослідження, яка наведена на рис. 2.1 Вона включає в себе аналіз стану проблеми, при цьому звернено увагу на проблемну ситуацію не тільки за літературним оглядом, а й на особливості реального стану проблеми, що вивчається в автотранспортних підприємствах (АТП). На підставі цього сформульовано завдання дослідження, в яких аналітична частина представлена зміною технічного стану основних елементів двигуна, розглянуто кінетику передвідмовного стану ресурсовизначальних деталей, а також досліджено фізику процесів формування металопокриттів при відновленні деталей. Експериментальна частина роботи представлена методикою збору та обробки даних щодо технічного стану елементів двигуна в процесі експлуатації, розробкою методик та засобів вимірювання параметрів, технічного стану елементів двигуна внутрішнього згорання, а також методикою визначення параметрів поверхневого шару металопокриттів при відновленні деталей. Аналіз результатів експериментальних досліджень представлений аналізом параметрів технічного стану деталей від напрацювання, а також розробкою методів та засобів діагностування та вдосконалення технологічних процесів відновлення ресурсовизначальних деталей та формуванням структури ЕРЦ двигуна. Результатом є практичні рекомендації та техніко-економічна оцінка досліджень.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

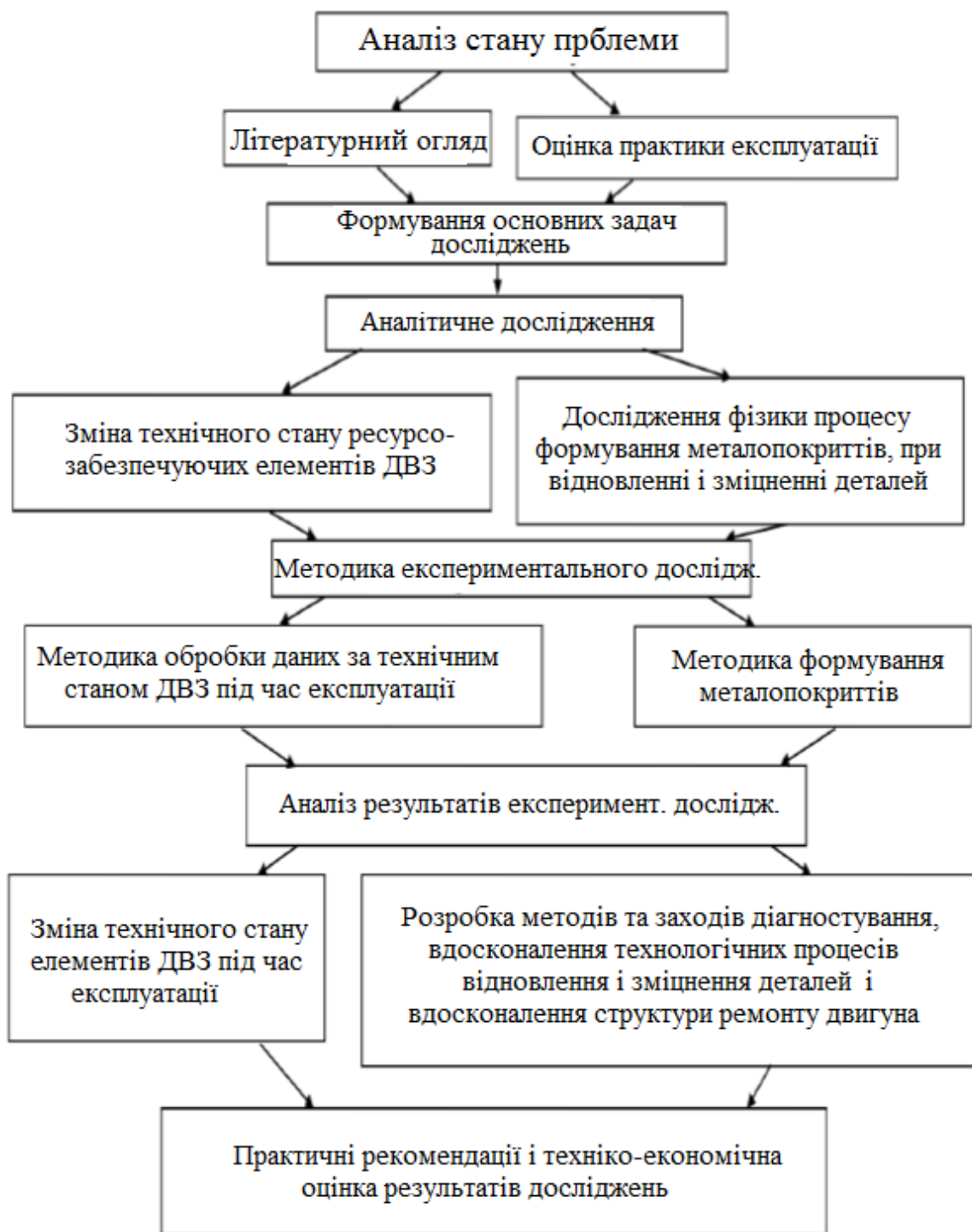


Рисунок 2.1 – Схема програми і методики досліджень.

2.2 Методика електрохімічних досліджень.

Мета досліджень: визначити умови формування електролітичних залізних покриттів з високими адгезійними властивостями покриття з основою та з рівномірним розподілом фізико-механічних властивостей та товщини покриття по поверхні, що відновлюється; визначити умови формування на шийках колінчастих валів електролітичних мідних покриттів, що відіграють роль твердого мастила, що запобігають процесам схоплювання при граничних умовах тертя в поєднанні шийка-вкладиш.

Для оцінки електрохімічного стану поверхні зразка, впливу температури та розрідженого середовища на кінетику електроосадження заліза у початковий період катодної поляризації використано метод поляризаційних вимірювань [13].

Схема установки представлена на рис. 2.2. Дослідження проводяться у скляному герметизованому електрохімічному осередку ЯСЕ-2 (ТУ 2550). Як електрод порівняння використовується насичений хлорсрібний електрод ЕВЛ-1МЗ, як матеріал допоміжного електрода використовується сталь 3 (ДСТУ 2651:2005). Зразки (робочий електрод) виготовляються із сталі 45 (ДСТУ 7749:2015). Конструкція електрода, що досліджується, відповідає загальноприйнятим вимогам. Площа досліджуваної поверхні $0,5 \text{ дм}^2$ (відносна похибка виміру 1 %). Досліджувана поверхня робочого електрода розташовується вертикально. Поляризація робочого електрода здійснюється за допомогою потенціостату П-5827М у гальваностатичному режимі. Реєстрація потенціалу як функції струму $\psi = f(I)$ здійснюється планшетним двокоординатним потенціометром ПДП-4. Швидкість розгортки потенціалу $4 \times 10^{-3} \text{ В/с}$. Щільність струму катодної поляризації (Дк) А/дм^2 : 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5 (відносна похибка виміру 5 %). Величина щільності струму обумовлена дослідженням катодного процесу в початковий період електролізу, що починається з поступового, ступінчастого виходу на режим.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Електрохімічні дослідження проводилися за температури (°С): 20; 55; 80. Постійне значення температури підтримувалося за допомогою термостата Вобзера через водяну сорочку електрохімічної комірки. Похибка встановлення температури в термостаті визначалася за допомогою контактного термометра $\pm 0,2$ °С, температура в комірці вимірювалася ртутним термометром ТЛ-2 з точністю $\pm 0,1$ °С. Герметичність осередку забезпечувалася шліфованими сполуками з вакуумним мастилом. Розрідження у комірці створювалося вакуумним насосом через редуктор-балон (рис. 2.2). Ступінь розрідження контролювалася вакуумметром. Величина розрідження встановлювалася: за температури 20 °С – $2,5 \times 10^3$ Па, за 55 °С – $1,5 \times 10^4$ Па, за 80 °С – $4,7 \times 10^4$ Па. При вибраних значеннях величини ступеня розрідження тиск над електролітом не досягає значення тиску насиченої пари, тобто. Спостерігається кипіння електроліту.

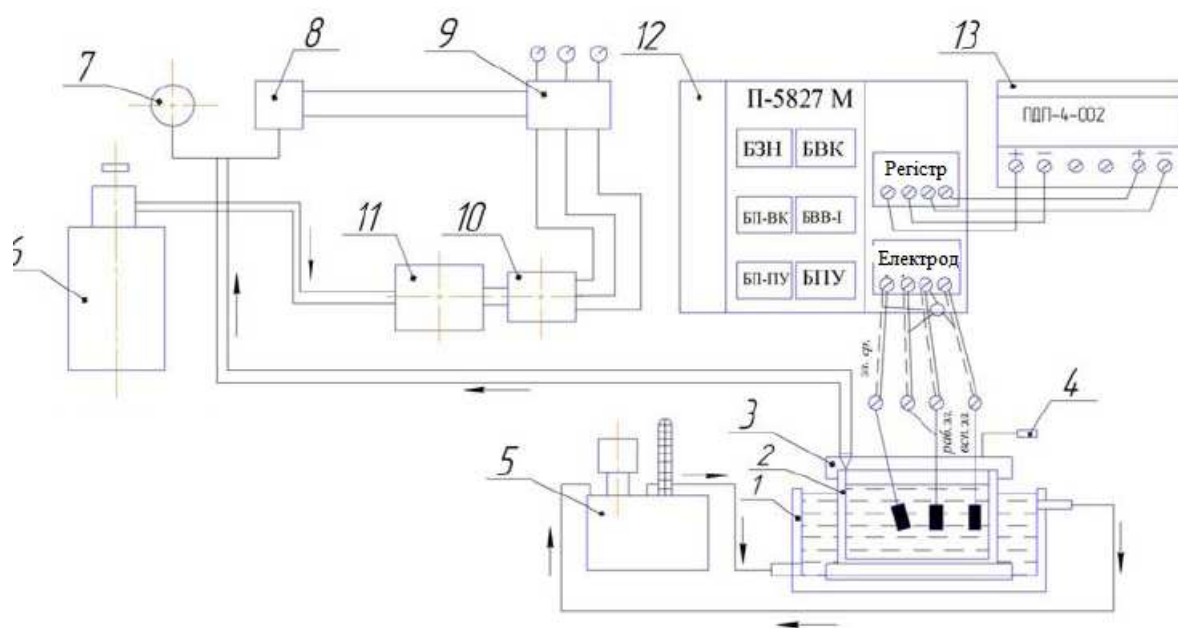


Рисунок 2.2 – Схема установки дослідження електрохімічного стану поверхні зразка:

1 – зовнішня ванна; 2 – електрохімічна комірка; 3 – кришка; 4 – клапан; 5 – термостат; 6 – балон; 7 – вакуумметр; 8 – вакуумне реле; 9 – магнітний пускач; 10 – електродвигун; 11 – вакуумний насос; 12 – потенціостат; 13 – потенціометр.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Для дослідження використовувався електроліт складу: хлористе залізо ($\text{FeCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$) – 350 ± 1 г/л; кислота соляна - $1,5 \pm 1$ г/л.

Для приготування електроліту використовувалися реактиви марки «ч», хлористе залізо ГОСТ 4149 – 65, соляна кислота ДСТУ 2904-94 та дистильована вода. Досліджувана поверхня зразка шліфується та полірується до дзеркального блиску пастою ГОІ, потім знежирюється суспензією «віденського вапна», ретельно промивається проточною водою. Підготовлений зразок анодно тріється в 30% розчині сірчаної кислоти (ДСТУ 2904-94) при температурі 20 ± 2 °С, щільності струму 60 А/дм^2 , час обробки 60 секунд.

Анодно оброблений зразок промивається проточною водою, сушиться фільтрувальним папером і поміщається в комірку. Після досягнення рівно вагового потенціалу в досліджуваному розчині подається струм поляризації.

Подача струму на комірку та реєстрація зміни потенціалу в залежності від струму проводяться відповідно до інструкції з експлуатації потенціостату П-5827М.

2.3 Методика дослідження структурних перетворень в електролітичному залізі.

Нанесення електролітичних покриттів на зразки проводилося на спеціальній установці (рис. 2.3) [13].

Зразки виготовлялися зі сталі 45. Поверхня зразків, на яку наносилося електролітичне залізне покриття, дорівнює $0,05 \text{ см}^2$. Умови та технології нанесення покриттів заліза на зразки:

Режим залізнення зразків:

- Щільність струму - 2, 4, 6, 8, 10 А/дм^2 ;
- Температура електроліту – 53 °С;
- Ступінь розрідження в осередках - 75 ... 80 %.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Початковий період електролізу проводився за щільності струму $D_k - 0,36 \text{ А/дм}^2$ протягом 10...12 секунд. Потім щільність струму одразу збільшувалася до необхідного значення. На кожному режимі залізнилось 3 зразки.

Вихід заліза струмом визначався ваговим методом шляхом зважування зразків до і після залізнення. Зважування зразків проводилося на аналітичних вагах АДВ-200 з похибкою $\pm 0,0001$. Значення виходу заліза за струмом підраховувалися за формулою:

$$\eta = Q_f / Q_T - (G_1 - G_2 / C \times I \times \tau), \quad (2.1)$$

де G_1 – середня вага зразка, який визначається за результатами трьох дослідів до залізнення, г; G_2 – вага зразка після залізнення, г; C – електролітичний еквівалент заліза, г/А год; I – сила струму, А; τ – тривалість, год.



Рисунок 2.3 – Установка для нанесення електролітичних покриттів заліза.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Для вивчення структури та вимірів мікротвердості опадів заліза виготовлялися поперечні шліфи. Перед безпосереднім фотографуванням структури шліфи протравлювалися в 5 % розчині азотної кислоти. Вивчення мікроструктури проводилося з допомогою мікроскопа МІМ – 6 зі збільшенням $\times 500$.

Заміри мікротвердості покриттів заліза здійснювалися приладі ПМП – 3 при навантаженні 50 гр. На кожному зразку виконувалось по п'ять вимірів.

2.4 Методика дослідження адгезійного зв'язку покриттів електролітичного заліза з основою.

Початковий період процесу електролізу проводився за щільності струму $0,5 \text{ А/дм}^2$ протягом 8...12 секунд. Потім густина струму відразу збільшувалася до відповідного значення.

Залізнення зразків проводилося при значеннях щільності струму 2, 4, 6, 8 і 10 А/дм^2 , а тривалість початкового періоду, відповідно, дорівнювала 24, 12, 8, 6, 5 хвилин. Після закінчення початкового періоду щільність струму поступово збільшували протягом 5 хвилин до значення 30 А/дм^2 . Загальна тривалість процесу залізнення кожного зразка становила 150 хвилин. Температура електроліту дорівнювала $55 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, а ступінь розрідженості в електролітичному осередку підтримувалася в межах 70–75 %. На кожному режимі залізнилось 3 зразки.

Зсув покриття заліза здійснювався проштовхуванням зразка через матрицю на гідравлічному пресі. Посилення зсуву (зрізу) фіксувалося динамометром преса з похибкою – 0,1 Н. 2.5 Методика дослідження рівномірності розподілу товщини електролітичного залізного покриття

Зразки для досліджень виготовлялися із сталі 45. Діаметр зовнішньої циліндричної поверхні зразка дорівнює 12 мм, загальна довжина 120 мм, робоча довжина, на яку наносилося електричне залізо, дорівнює 100 мм, що

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідає величині поверхні $1,2 \text{ дм}^2$. Шорсткість поверхні відповідала 7-му класу (0,63) [13].

З обох кінців зразка на внутрішній поверхні було просвердлено отвори, зроблено центрові фаски. В отворах нарізалося різьблення М5, за допомогою якого зразок закріплювався на підвісному пристосуванні, а з іншого кінця загвинчувався ебонітовий болт, закриваючи торець зразка. Після залізнення товщина осаду вимірювалася спеціальному пристосуванні. Схеми вимірів зразків та пристосування для вимірювання зображені на рис. 2.4 та 2.5. Зразок встановлювався в центрах, згідно зі схемою (рис. 2.4), проводилися вимірювання за допомогою індикатора годинного типу, який налаштовувався поверхнею нанесеного електролітичного заліза, що є вимірювальною базою.

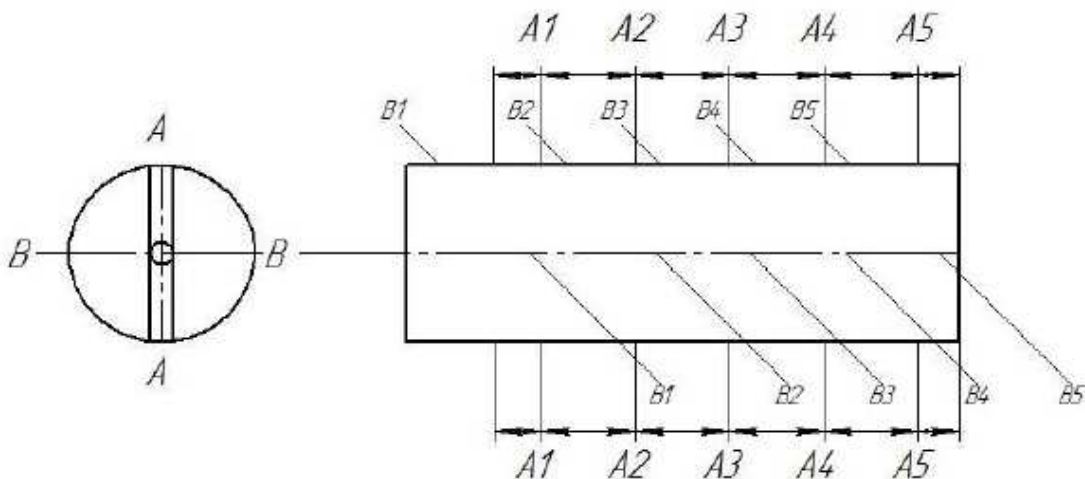


Рисунок 2.4 – Схема вимірювань.

Технологія нанесення покриттів на зразки:

1. Монтаж зразка у дах комірки.
2. Знежирення зразка віденським вапном.
3. Промивання зразка холодною водою.
4. Анодна обробка поверхні зразка в 10% електроліті HCl

Режим обробки:

– Температура електроліту + 20-25 °C;

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

- Щільність струму $T_{ак} = 10 \text{ А/дм}^2$;
- Тривалість $\tau = 60 \text{ с}$.
- 5. Промивання холодною водою.
- 6. Анодна обробка в 30% розчині $\text{H}_2 \text{SO}_4$.

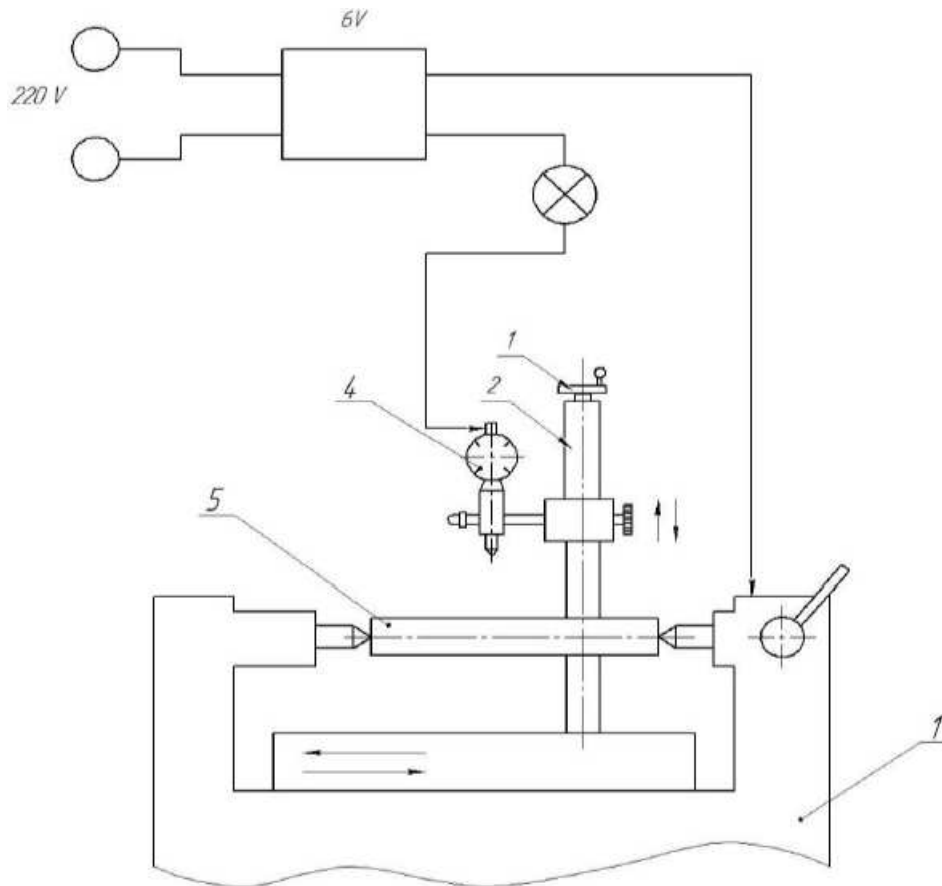


Рисунок 2.5 – Пристрій для вимірювання товщини залізного електролітичного покриття: 1 – гвинт; 2 – стійка; 3 – стіл із центрами; 4 – індикатор годинного типу; 5 – зразок

Режим обробки:

- температура електроліту трохи більше $25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Щільність струму $T_{ак} = 70 \text{ А/дм}^2$;
- Тривалість $\tau = 6-7 \text{ с}$.
- 7. Промивання зразка у теплій воді $t = 40-60 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 8. Залізнення зразка.

Склад електроліту залізнення:

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

- хлористе залізо $\text{FeCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ – 300 – 350 г/л;
- соляна кислота HCl – 2 – 3 г/л;
- матеріал анодів – армко-залізо.

Режим залізнення зразків:

- Щільність струму 20 А/дм²;
- Температура електроліту - 60, 65, 70 °С;
- ступінь розрідженості відповідно 60–65 %; 50-55 %; 40-45 %.

Початковий період осадження заліза на зразки проводився за щільності струму $D_k = 4 \text{ А/дм}^2$ протягом 10 хв. Потім густина струму протягом 10 хв збільшувалася до робочої густини. На кожному режимі залізнилося три зразки без розрідження над дзеркалом електроліту та зі створенням розрідження, що відповідають даній температурі.

При дослідженні впливу щільності струму на рівномірність залізного електролітичного покриття експеримент проводився при щільності струму 10, 20, 30 А/дм² :

- Температура електроліту - 65 °С;
- Ступінь розрідженості - 50-55 %.

9. Промивання зразка холодною водою.

10. Демонтаж зразка з підвісного пристрою.

11. Зняття вимірів.

3 Дослідження фізико-хімічних процесів формування металопокриттів під час відновлення деталей двигунів

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛОПОКРИТТІВ.

3.1 Формування метало покриттів електролітичного заліза за умов контрольованої розрідженої атмосфери.

3.1.1 Формування структури електролітичного заліза.

Осадження металу на катоді розглядається як процес, що протікає у дві стадії: утворення центрів кристалізації (зародків) і зростання центрів, що утворилися кристалізації [18].

Величина кристалів, що утворилися, визначається співвідношенням швидкостей зазначених стадій, а також середнім часом утворення кристала, що протікає з моменту утворення зародка до припинення зростання кристала [13, 18].

При електрокристалізації величина кристалів виходить тим менше, чим менше концентрація, нижча температура і більше в'язкість електроліту - фактори, що визначають дифузію [13]. Дослідження явищ шароутворень на гранях кристалів при електроосадженні заліза призвело до ряду важливих висновків [13, 18]:

- мікроскопічно видимі шари періодично поширюються по грані, виникаючи найчастіше в одного і того ж краю грані;
- товщина шарів змінюється за зміни умов зростання кристалів від значень, що становлять малу частку мікрона, до кількох мікрон (рис. 3.1);
- швидкість поширення шару по грані також змінюється у відповідності з його товщиною;
- нерідко ще не завершеному шарі виникають нові шари, зростання грані у своїй здійснюється шляхом одночасного поширення кількох шарів;

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

– зі збільшенням розмірів грані товщина шару, виміряна вздовж його граней, виявляється неоднаковою.

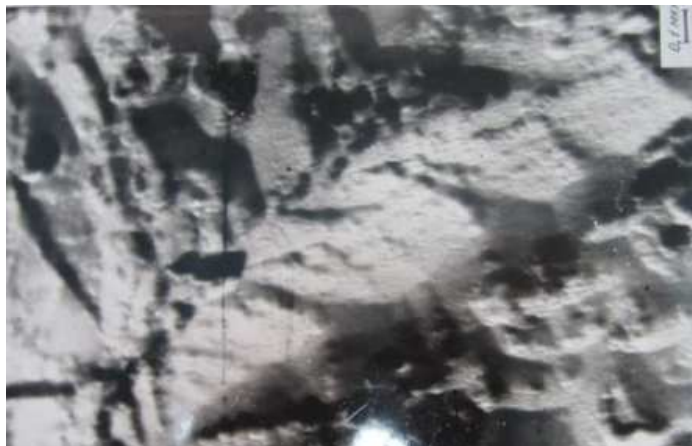


Рисунок 3.1 – Тривимірні шаблі (пакети) зростання твердого електролітичного залізного покриття.

Ці висновки можуть бути використані за допомогою уявлень про відмінність у швидкостях утворення та зростання кристалів на основі явища пасивації. Пояснення локалізації та періодичності виникнення «зародків» товстих шарів полягає в концентраційних явищах при русі електроліту. Рух електроліту в дифузному шарі під час зростання кристалів грає фундаментальну роль, оскільки споживання іонів відбувається локалізовано – біля фронту зростання товстого шару, періодично поширюється межі кристалів. Своєрідне споживання іонів у напрямку, паралельному до поверхні катода, викликає виникнення тангенціального градієнта концентрації. Цей градієнт концентрації проявляється у безпосередній близькості катода, до поверхні, тобто. у тій області прикордонного шару, у якій за відповідних умов може виникнути дифузний шар, характерний для розглянутих явищ [18].

Примусове рух електроліту вздовж зростаючої грані кристала викликає спрямоване усунення фронту зростання шару електролітичного заліза відповідно до напрямом його руху [18]. Такі спрямовані зміщення можуть бути використані тільки з точки зору поліпшення живлення "фронту

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зростання" іонами металу, що прибувають туди разом з механічно зміщеними шарами електроліту.

При реальних процесах електрокристалізації усунення, що випробовується «фронтом зростання», в десятки і сотні разів менше лінійних розмірів дифузійного простору, з якого витягуються іони для послідовного побудови нових ділянок товстого шару. Збіднення розчину електроліту у «фронту зростання» повинно призводити до виникнення спрямованого вгору потоку питомої, легшої рідини, що призводить до виникнення тангенційно спрямованих конвекційних потоків, в результаті яких дифузійний режим переносу іонів повинен змінитися.

Дослідження з електроосадження заліза показали [19, 20], що формування покриттів електролітичного заліза слід пов'язувати з тими концентраційними змінами при катодному шарі, які виникають в результаті спільного виділення заліза з воднем. Відрив бульбашок водню від поверхні відбувається після того, як вони досягнуть значних розмірів.

Бульбашки водню перешкоджають тангенціальному підведенню електроліту, що призводить навіть при невеликих густинах струму до утворення порошкоподібних опадів.

Особливістю при електроосадженні заліза є те, що різкою межею, що розділяє області темних і світлих покриттів при високих щільності струму, служить температура електроліту, що дорівнює 70 ... 72 ° С, при якій візуально важко спостерігати зростання і відрив бульбашок водню від поверхні катода.

Важливою обставиною, пов'язаною з виділенням водню, є те, що частина атомів водню залишаються на поверхні катода в адсорбованому стані і відбувається наводнення металу. Внаслідок включення водню змінюються фізико-механічні властивості металу, що призводить до розтріскування, а іноді й відшаровування окремих частин покриття від основного металу.

Дослідження [20], показали, що погіршення механічних властивостей електролітичних опадів заліза, головним чином, пов'язане з включенням до

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

них молекулярного водню, а атомарний водень, перебуваючи в твердому розчині з α -залізом, спотворює кристалічну решітку і тим самим покращує механічні властивості покриттів. міцність, твердість, зносостійкість. Характерно, що кількість атомарного водню, що у покритті, незначно змінюється залежно та умовами електролізу. Це відбувається внаслідок обмеженого розчинення водню в α -залізі.

При адсорбції водню на металах групи заліза об'ємне та мольне співвідношення адсорбованих атомів водню до атомів металу становлять 1:24 та 1:1000 відповідно. Можна приблизно оцінити кількість водню, включеного до цих металів.

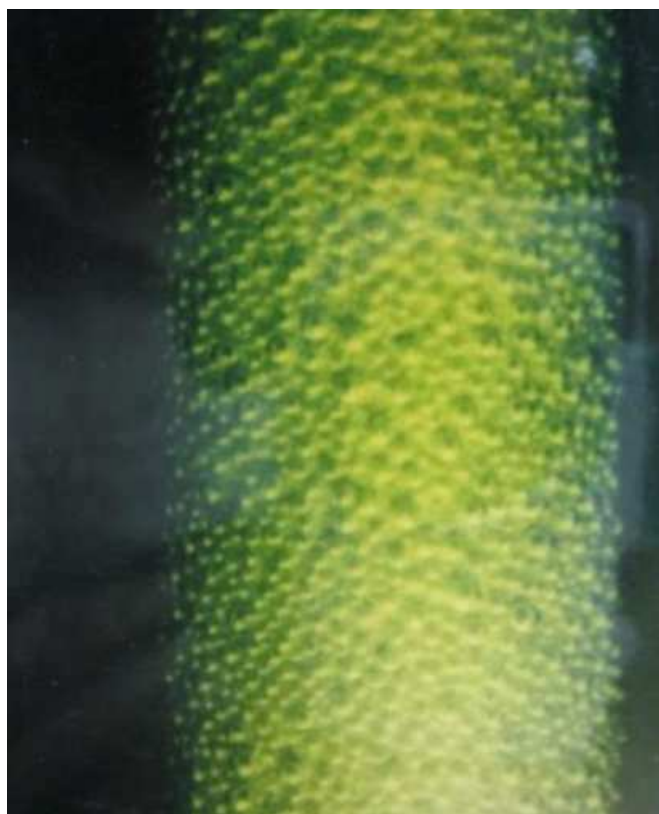


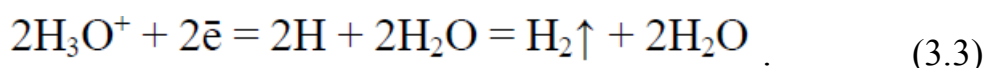
Рисунок 3.2 – Адсорбція бульбашок.

Якщо врахувати, що осадження заліза відбувається шарами завтовшки 10 – 1000 атомів, то обсяг водню, поглиненого одним 1 см^3 заліза, становитиме приблизно $0,4 \text{ см}^3$, у своїй мольна частка водню становитиме 0,1 %. За даними

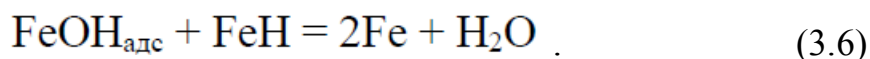
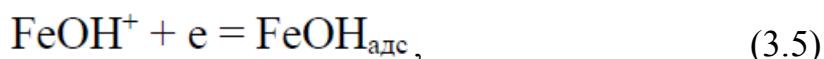
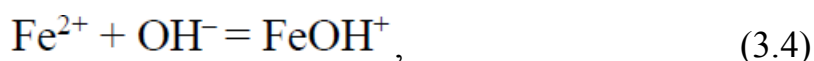
					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

вчених, кількість водню, що включає електролітичні опади заліза, коливається від 0,5 до 2 см³/гр. Дослідження науковців показали, що для осадження заліза з хлористих електролітів при катодній щільності струму 20 А/дм² і вище краще застосовувати вищу концентрацію солі заліза (450-550 г/л), вміст кислоти в електроліті підтримувати до 2-3 г/л, збільшенням кислотності електроліту опади заліза стають м'якшими та гнучкими, подовження при випробуванні на розрив збільшується, а опір розриву зменшується.

Широкі дослідження процесу залізнення [18-22], показали, що можливо формувати процес залізнення при забезпеченні необхідних фізико-механічних властивостей покриттів заліза, якщо в початковий період електроосадження заліза температура електроліту буде не нижче 60 °С, рН електроліту не вище 2, а початкова катодна щільність струму перевищуватиме 2...4 А/дм². За цих умов електролізу покриття заліза мають сріблясто-білий колір і мають невисоку твердість. Очевидно, на катоді протікають при цьому переважно такі процеси:



При посиленні режимів електролізу виникають сприятливі умови для можливого розряду заліза за такою схемою:



					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відновлення водневого іона із кислого розчину відбувається у дві стадії. Перша стадія відновлення є розрядом катіонів. Атом водню, що утворюється при цьому, має велику хімічну активність, повинен адсорбуватися поверхнею електрода, утворюючи гідрид складу FeH. Друга стадія полягає в утворенні молекул H₂ та адсорбованих атомів (рекомбінація). Молекули водню значно менш схильні до адсорбції, ніж атоми. Тому вони залишають поверхню, частково переходячи в розчин і переважно утворюючи бульбашки газу.

Поруч дослідників було припущено, що відбувається так звана електрохімічна десорбція [18-22]. Цей шлях видалення водню у тому, що розряд чергового іону водню відбувається у точці, зайнятої адсорбованим атомом. При цьому відразу утворюється молекула, що залишає поверхню електрода:



У цій стадії поєднані розряд катіону і взаємодія отриманого атома з атомом, що вже є на електроді, що знаходиться в адсорбованому стані. Тому цей процес в окремих випадках має важливе значення. Дослідження покриттів заліза, одержаних у проточному електроліті, показали [18], що незалежно від умов електролізу покриття заліза мають яскраво виражену дендритну структуру. Волокна витягнуті по одній із кристалографічних осей, розташовані перпендикулярно поверхні, що покривається залізом (рис. 3.3).

При великій кількості одночасно зростаючих дендритів зростання окремого дендриту має, безсумнівно, обмежуватися сусідніми дендритами, а тому сприятливим напрямом росту і повинна бути нормаль до поверхні реакції.

Іншою характерною особливістю структури покриттів заліза, отриманих при порівняно більш жорстких режимах електролізу, є наявність тріщин, які, у свою чергу, також розташовані по нормалі поверхні реакції. Така орієнтація

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

волокон і тріщини визначається, ймовірно, характером утворення текстури покриття заліза. Поява тріщини у покриттях заліза (рис. 3.4) вказує на виникнення в них великої внутрішньої напруги, що перевищує межу міцності електролітичного заліза.



Рисунок 3.3 – Структура покриття електролітичного заліза, одержаного в проточному електроліті.



Рисунок 3.4 – Поява тріщин у покриттях заліза

При підвищенні температури електроліту кількість тріщин у залізних покриттях зменшується. У покриттях заліза є темні включення. Частина цих

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

включень розташовуються безладно, вони мають невизначену округлу форму. Тому можна припускати, що вони є неметалевими включеннями, випадково внесеними в покриття при електролізі. Інша частина включень вже має цілком певну орієнтацію: вони розташовуються вздовж волокон чи голок (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Неметалічні включення, що випадково внесені в покриття при електролізі.

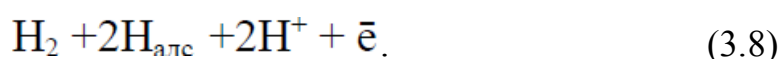
Присутність цих включень спостерігається за рахунок концентраційних змін, що відбуваються в шарі прикатодного електроліту, і взаємодії поверхні зростаючого осаду з вторинними продуктами ($\text{FeO} \cdot \text{H}_2\text{O}$) електрохімічної реакції, що протікає при електролізі заліза.

Проведені дослідження показують, що найбільш різко виражені дендрит подібна структура і шаруватість покриттів заліза утворюються при більш жорстких режимах електролізу, тобто в тому випадку, коли є найбільша ймовірність випадання в шарі прикатодному основних солей заліза і включення їх в осад.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.1.2 Вибір умов для початкового періоду осадження заліза за умов розрідженої атмосфери.

Перед нанесенням електролітичних покриттів заліза на поверхні залізовуглецевих сплавів виконується витримка в кислих водних електролітах без струму протягом кількох десятків секунд (20...60 °С). Очевидно, на поверхні, що стикається з електролітом, встановлюється складна рівновага:



Газ водень перебуває у рівновазі з атомами, адсорбованими поверхні (Надс), а останні – з іонами водню у розчині. Зважаючи на малу швидкість другої стадії, рівновага легко порушується, оскільки при зміні умов вона не може швидко встановитися. Навпаки, рівновага першої стадії постійно зберігається, оскільки швидке перебіг процесу $\text{H}^+ = \text{Надс}$ забезпечує встановлення рівноваги за зміни умов.

Після закінчення декількох секунд на поверхні, що осаджується, виникає стаціонарна рівновага, при якому шар металу починає розчинятися. Передбачається, що його розчинення та відновлення водню можуть відбуватися на будь-яких точках поверхні. Поверхня деталі грає у разі роль просторово поєднаних катодів і анодів [18]. І тут на катоді відбувається відновлення водню $\text{H}_2 = \text{Надс}$.

Поверхнева концентрація адсорбованих атомів зростає і приймає значення $(\text{Надс})_2$. Розмір $(\text{Надс})_2$ залежить від поляризації, тобто від швидкості катодного процесу. Збільшення $(\text{Надс})_2$ має порушити рівновагу та викликати хімічну рекомбінацію $2\text{Надс} = \text{H}_2\uparrow$. Швидкість її може бути описана рівнянням бімолекулярної реакції:

$$I_{\text{к}} = K(\text{H}_{\text{адс}})_2, \quad (3.9)$$

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де I_k - Швидкість, виражена через щільність струму.

Металевий електрод перебуває у рівновазі з розчином катіонів водню лише за певного потенціалу, що залежить від концентрації катіонів водню та парціального тиску газу водню над розчином. Відхилення потенціалу від стаціонарного значення в негативний бік, порушуючи рівність $\phi_k = \phi_a = \phi_{\text{рівн}}$, призводять до нерівності $\phi_k > \phi_{\text{рівн}}$. Це означає, що в такому випадку відбуватиметься постійне відновлення катіонів водню $2H^+ + 2e = H_2$. Відхилення ж потенціалу у бік позитивних значень викликає постійне окиснення водню $H_2 = 2H^+ + 2e$. Вираз потенціалу водневого електроду залежно від $[H_2]$ і $[H^+]$ має вигляд:

$$\phi = 0,059 \lg \frac{[H^+]}{P_{H_2}^{1/2}}, \quad (3.10)$$

де $P_{H_2}^{1/2}$ – парціальний тиск водню.

Зменшення активності іонів водню робить потенціал більш негативним. Також впливає збільшення парціального тиску газу водню. Зваживши на те, що $-\lg[H^+] = \text{pH}$, рівняння (3.10), то при $P_{H_2} = 1$ атм. Це рівняння можна представити у вигляді:

$$\phi = -0,059 \text{pH}. \quad (3.11)$$

З виразу (3.11) випливає, що потенціал водневого електроду є лінійною функцією від pH . При цьому парціальний тиск водню, що проходить пухирцями крізь розчин, має бути рівним 0,1 МПа.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зв'язок між рівноважним потенціалом і парціальним тиском H_2 (при незмінній активності іонів H^+) показує, що якщо змінюватиметься потенціал водневого електрода, то змінюватиметься у відомих межах і парціальний тиск газу. Повідомляючи електроду, що зростає в негативну сторону потенціал, тим самим викликається збільшення P . Якщо розчин знаходиться під атмосферним тиском, то доти, поки $P_{H_2} < 0,1$ МПа, газ не зможе утворити бульбашки, - атмосферний тиск цьому перешкоджатиме. Подальший зсув потенціалу негативний бік не може викликати наростання тиску, оскільки газ видаляється з поверхні електрода як бульбашок. За практичної відсутності газу водню в розчині найменша катодна поляризація викликає відновлення водневих іонів. Але газ, що утворився внаслідок цього, не зможе зібратися в бульбашку, а залишиться на поверхні електрода в адсорбованому стані. Якби ніщо не заважало наростанню концентрації адсорбованого водню, яка відповідає рівноважному потенціалу, то надалі електродний процес припинився б. Водень, адсорбований електродом, не перебуватиме в рівновазі з розчином, так як у розчині газу водню практично немає. Тому разом із відновленням та адсорбцією водню має відбуватися десорбція водню.

Десорбція та розчинення газу забезпечують на поверхні електрода тиск водню, дещо нижчий, ніж рівноважний, що відповідає даній поляризації. Якщо збільшити поляризацію, то тиск газу зросте і встановиться нове значення потенціалу, що теж лише трохи відрізняється від рівноважного. При вищому тиску водню десорбція і дифузія газу розчин розчиняються дещо швидше, як і зумовлює деяке зростання щільності струму.

Таким чином, збільшення поляризації до тих пір, поки тиск водню не стане рівним 0,1 МПа, змушує поверхню проходити ряд станів, дуже близьких до рівноважного, чому процес і не може протікати з більшою швидкістю. Але коли досягнуто такого потенціалу, який при даній величині рН відповідає тиску водню 0,1 МПа, подальша можливість зростання P_{H_2} припиняється. Тепер водень може утворювати бульбашки газу і в цьому виді залишати

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

поверхню. Внаслідок цього подальше збільшення поляризації катода призводить до більшого відключення потенціалу від рівноважного та обумовлює значне зростання густини струму.

Розглядаючи поляризаційну діаграму мимовільного окиснення металу, подану на рис. 3.6, можна побачити, що швидкість окиснення металу, виражена в щільності струму (i_a), повинна залежати від різниці потенціалів ($\Delta\phi$) між рівноважним потенціалом водню (ϕ_{H_2}) і потенціалом металу, що окислюється ($\phi_{\text{равн}}^{\text{Me}}$).

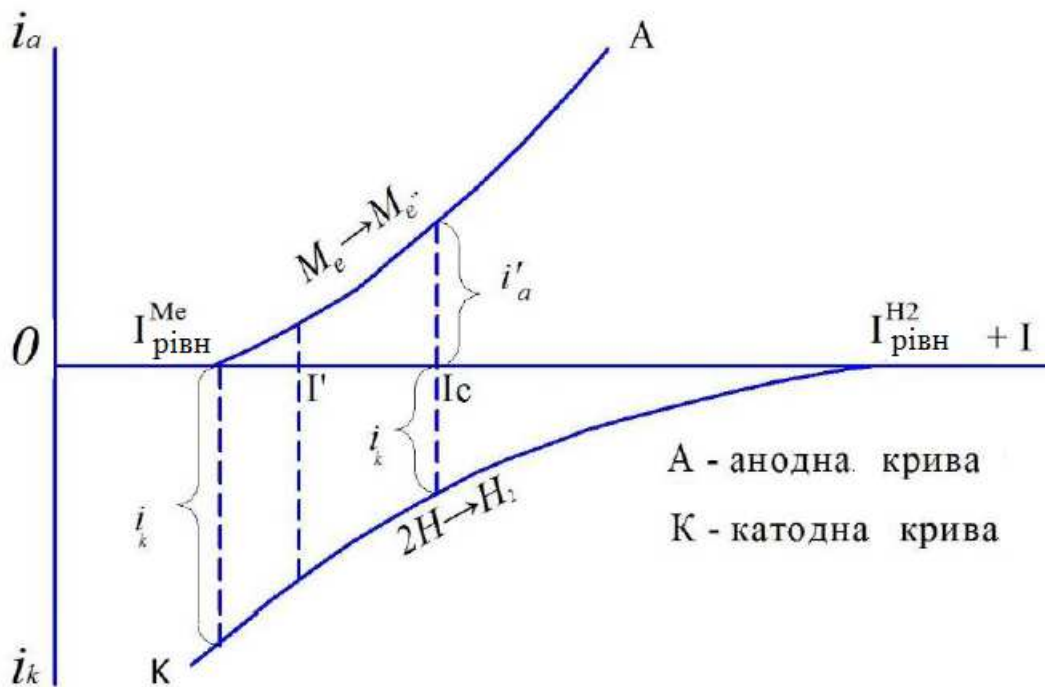


Рисунок 3.6 – Поляризаційна діаграма окиснення металу.

Неможливість поєднати на одній поверхні дві рівноваги, вимагають два різних потенціали, призводить до встановлення стаціонарного компромісного потенціалу (ϕ_c), що зумовлює перебіг окиснення металу та поєднаного з ним відновлення окислювача (H^+). При цьому на анодних ділянках поверхні утворюються покриття із солі металу або основи ($Me(OH)_2$). Таким чином, можна вважати, що витримка без струму залізовуглецевих сплавів у кислому

електроліті при залізненні повинна бути виключена з технологічного процесу з погляду забезпечення міцності зчеплення їх з електролітичним залізом, тому що наявність на поверхні сплаву солі або основи зменшує молекулярні взаємодії між ними.

Очевидно, спочатку необхідно залізовуглецеві сплави піддати відразу катодної поляризації при значенні потенціалу, трохи меншому $\varphi_{\text{рівн}}^{\text{Fe}}$. При цьому на поверхні сплаву повинен відбуватися лише катодний процес відновлення водню.

Осадження електролітичного заліза складає тонкий окисний шар, який завжди залишається після обробки в 30 % розчині сірчаної кислоти та промивання в холодній воді. Атомарний водень є енергійним відновником окисних з'єднань заліза. Тому в початковий момент при осадженні заліза необхідно створити сприятливі умови для рясного виділення водню. Це досягається зазвичай за рахунок або зменшення рН електроліту, або збільшення катодної щільності струму та температури електроліту.

Значення величини рН електроліту залізнення можуть змінюватися в порівняно вузьких межах через настання гідролізу солей заліза або різкого падіння значень виходу заліза по струму навіть за високих щільностей струму. Випадання осаду гідроксиду заліза ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) починається при $\text{pH}=2,2\dots 2,7$, а гідрозакису заліза ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) – при $\text{pH}=6,2\dots 6,5$. Помітне падіння виходу заліза струмом починається при $\text{pH}=1$, якщо електроліз заліза проводиться навіть за щільності струму 20...30 А/дм.

Враховуючи, що із збільшенням щільності струму відбувається залужування прикатодного шару електроліту, середнє значення величини рН електроліту необхідно підтримувати у межах від 1,5 до 1,8. При зануренні зразка із залізовуглецевого сплаву в електроліт залізнення необхідно встановити таке значення катодної щільності струму, щоб він не розчинявся, а відбувався процес виділення водню на його поверхні, це можливо здійснити, якщо на поверхні створити потенціал $\varphi_{\text{рівн}}$, тобто, при $i_a = i_k = 0$ (рис. 3.6).

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

У кислому електроліті залізнення процес саморозчинення заліза буде протікати переважно з водневою деполяризацією. Складний процес розчинення заліза може бути поставлений у пряму залежність від двох основних, більш доступних для спостереження та вивчення факторів: кінетики анодного та кінетики катодного процесів.

З погляду електрохімічного механізму, весь матеріальний ефект розчинення металу є результатом анодного процесу складної багато електродної системи, тобто, кількість розчиненого металу пропорційно величині струму розчинення [18]:

$$Q = K \cdot I_p \quad (3.12)$$

де $K = \frac{\tau A}{Fn}$, τ – час розчинення, с; A – атомна вага металу, г; F – число Фарадея; n – валентність; I_p – Струм розчинення.

Отже, питання можливості аналітичного розрахунку швидкості розчинення металу зводиться до можливого розрахунку струму розчинення. Так як реальний сплав металу є системою короткозамкнених електродів, то визначення величини швидкості розчинення є практично-нерозв'язним завданням. Тому швидкість розчинення сплаву характеризується зазвичай ваговим показником процесу розчинення, який кожного конкретного випадку має цілком певні значення.

Ваговий показник процесу розчинення – зміна ваги металу внаслідок розчинення, віднесене до одиниці поверхні металу. Або

$$K'_{\text{вес}} = \frac{q_0 - q_1}{S\tau}, \quad (3.13)$$

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де q_0 - Початковий вага металу, г; q_1 – вага металу після розчинення та видалення продуктів травлення, г; S – поверхня металу, см^2 ; τ – час процесу розчинення, год.

Тоді, очевидно, між струмовим та ваговим показниками процесу розчинення сплаву існує такий зв'язок:

$$I_{\text{ж}} = \frac{D_{\text{к}} K'_{\text{вес}}}{C_{\text{к}}}, \quad (3.14)$$

де $D_{\text{к}}$ - катодна щільність струму, А/дм; $C_{\text{к}}$ - електрохімічний еквівалент заліза, г/А.ч.

На підставі рівняння (3.14) і маючи експериментальні значеннями вагових показників розчинення залізовуглецевих сплавів, залежить від температури і рН електроліту, можна визначити значення катодної щільності, при якому на поверхні відбуватиметься тільки один процес виділення водню.

При проходженні струму через електроліт з часом відбувається збіднення іонів водню поблизу катодної поверхні та відповідний зростання потенціалу. При зверненні нанівець концентрації іонів водню потенціал поверхні необмежено зростає, і стає можливим розряд іонів заліза. З теорії конвективної дифузії випливає, що час, протягом якого концентрація іонів, що розряджаються, у катодної поверхні звертається в нуль, виявляється збільшеним через конвекцію [18]. Швидкість руху електроліту вздовж катодної поверхні наближається до значення швидкості підйому бульбашок водню. Швидкість руху газових бульбашок діаметром 0,2...1,5 мм майже залежить від діаметра і дорівнює приблизно 28 – 30 см/с.

В даний час немає кількісних значень часу настання граничного струму іонів водню. Ці дані можуть бути отримані шляхом зняття катодних поляризаційних кривих при значеннях густини струму, визначених за рівнянням (3.14). Проведені дослідження показали, що, створюючи

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

розріджений простір над електролітом, нагрітим до 55 °С, можна забезпечити отримання покриттів заліза, що мають ідентичні показники за твердістю, мікроструктурою та міцності зчеплення із залізовуглецевими сплавами з покриттями, отриманими в електроліті, нагрітому до 80 °С. З при звичайному тиску (750...760 мм рт. ст.).

Необхідний ступінь розрідженості простору над електролітом може встановлюватися в залежності від значень насиченої пари води і при температурі електроліту, що дорівнює 55 °С, повинна становити 75...85 %.

Відповідно до рівняння (3.10), зі збільшенням ступеня розрідженості простору над електролітом значення потенціалу розряду іонів водню має зрушуватися на позитивну сторону, а значення потенціалу розряду іонів заліза – залишатися незмінним.

Звідси випливає можливість довільного регулювання співвідношення між частками спільно виділяється водню і заліза в межах від 0 до 0,9, що є особливо важливим при виборі умов формування початкових шарів заліза на поверхні залізовуглецевих сплавів.

3.2 Дослідження електрохімічного стану осаджуваної поверхні деталі при початковій катодній поляризації в умовах розрідженої атмосфери.

На рис. 3.7 представлені катодні поляризаційні криві початкового періоду осадження. Аналіз отриманих кривих показує, що підвищення температури значно знижує (~ на 200 - 300 мВ) перенапругу виділення водню, що цілком узгоджується із загальноприйнятими уявленнями [18]. Однією з причин зниження перенапруги виділення водню при підвищенні температури є зменшення адсорбції на катоді поверхнево-активних речовин, у тому числі і водню, що виділяється. Це важливо для практичних цілей: значно покращується якість електролітичного покриття як на рівні мікроструктури (зменшення шаруватості, мікротріщин), так і за рахунок зниження піттингу на

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

поверхні. Таким чином, технологічні прийоми, ведучі до збільшення десорбції водню з поверхні катода повинні сприяти підвищенню якості покриття, що, власне, і підтверджують дослідження осадження електролітичного заліза в розрідженій атмосфері.

Як видно (рис. 3.7, 3.8, 3.9), вплив розрідження на величину перенапруження виділення водню більш значно, ніж вплив температури. При 20 °С величина зниження перенапруги становить 250...300 мВ, при 55 °С ця величина вже досягає 300...400 мВ і приблизно відповідає перенапрузі при температурі 80 °С (див. рис. 3.7, криві 2, 3)

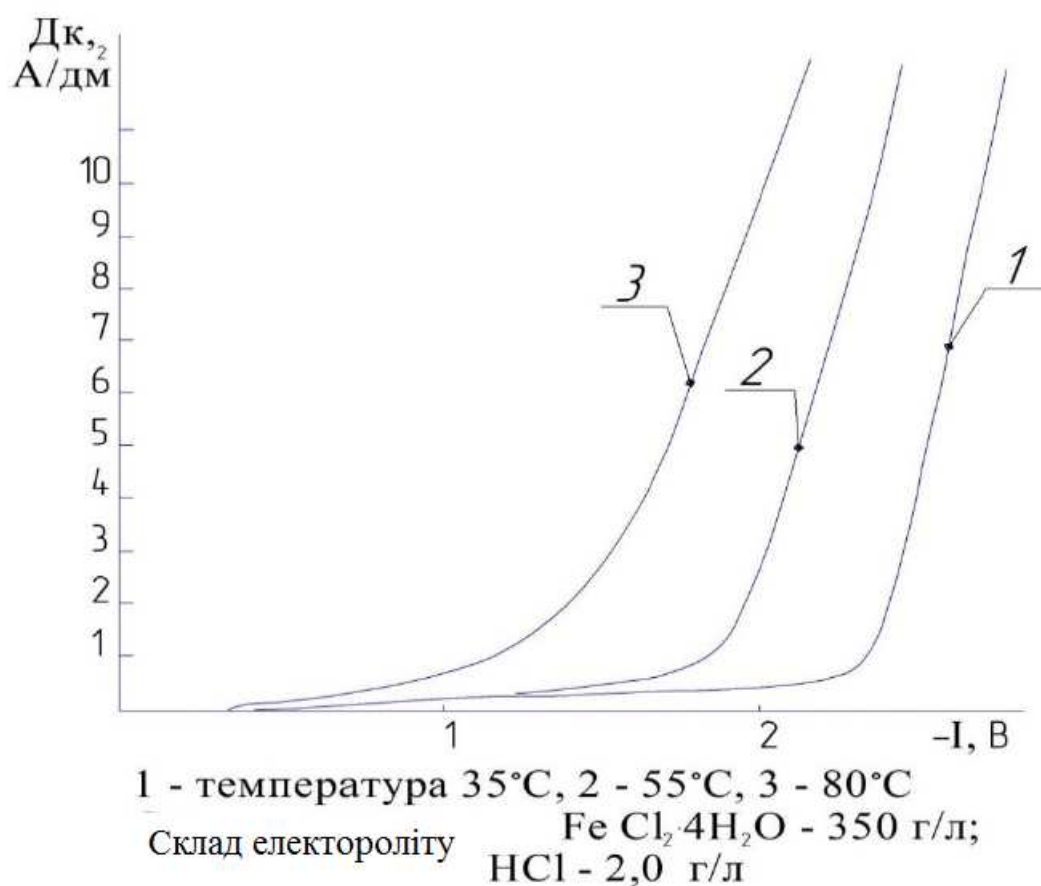


Рисунок 3.7 – Поляризаційні криві відновлення водню із хлористого електроліту залізнення.

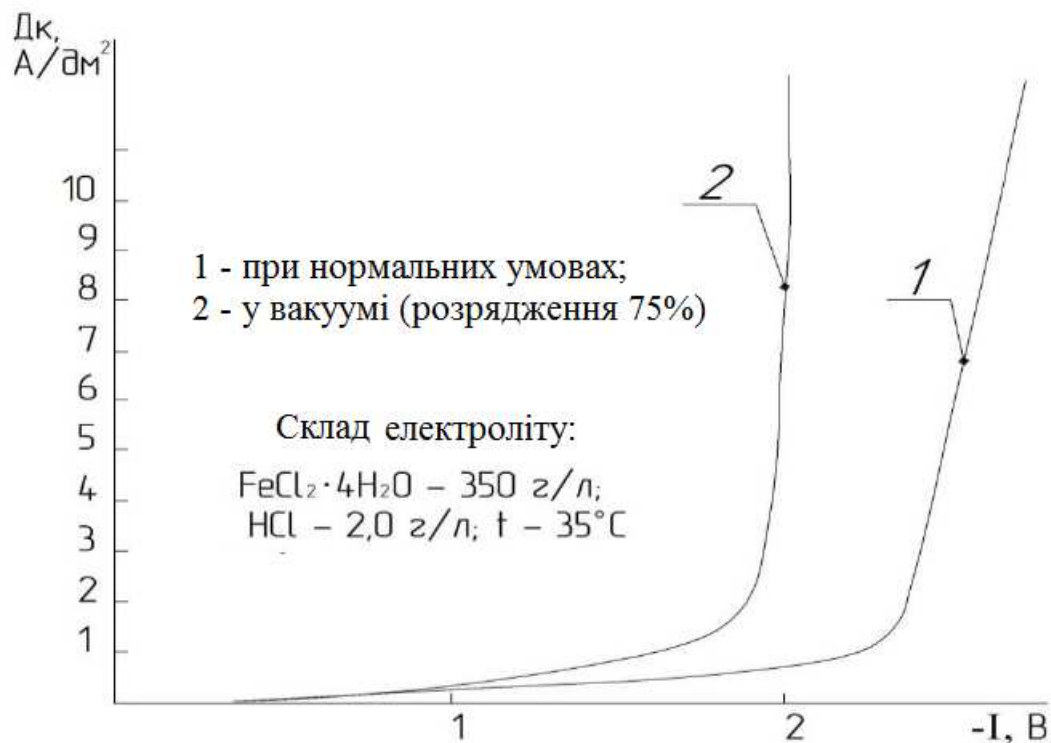


Рисунок 3.8 – Вплив розрідженого середовища на поляризаційні криві відновлення водню із хлористого електроліту залізнєння

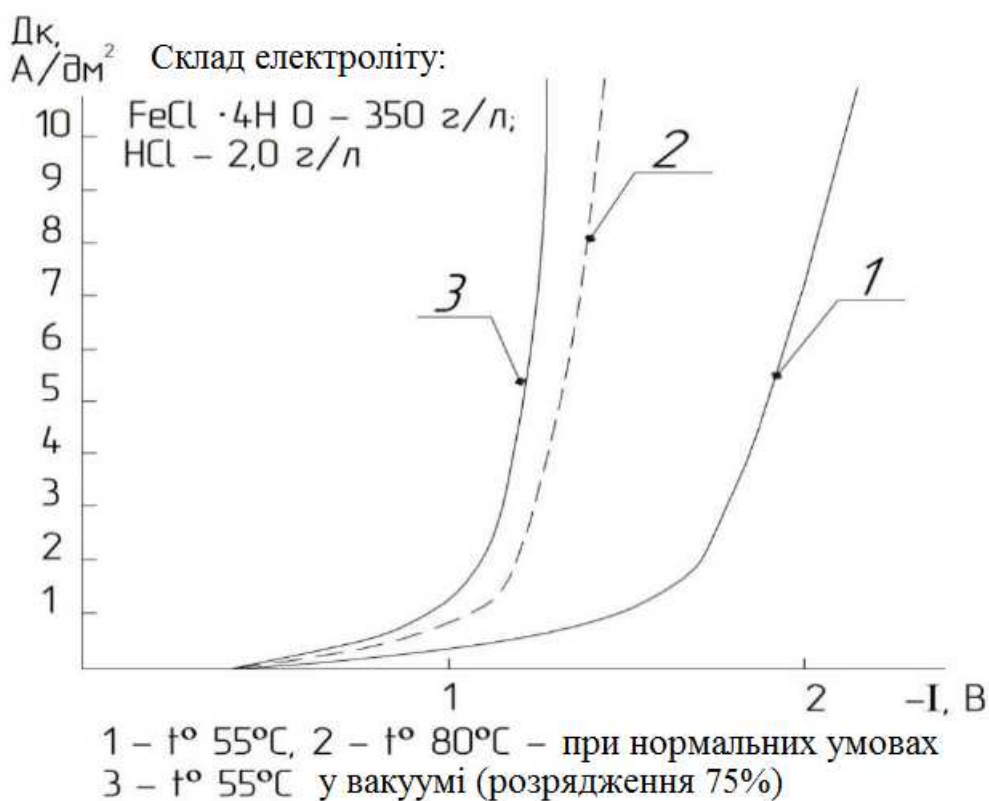


Рисунок 3.9 – Вплив розрідженого середовища на поляризаційні криві відновлення водню із хлористого електроліту залізнєння

Виходячи з останнього, можна припустити, що зменшення тиску над електролітом дозволить при температурі 50...55 °С формувати покриття, за властивостями аналогічні покриттям, отриманим за температури 80 °С за нормальних умов.

Значний вплив зниження перенапруги виділення водню в розрідженому середовищі пояснюється, ймовірно, наступним. Зниження тиску над поверхнею електроліту спричиняє зниження парціального тиску водню, у результаті значно полегшується десорбція водню з поверхні катода. У цих умовах, природно, полегшується швидкість розряду іонів водню на поверхні катода, тому що значно знижується енергія активації проникнення їх через адсорбційний шар. Мабуть, дифузійні обмеження у разі менш впливають перебіг поляризаційної кривою.

Значне зниження перенапруги водню має викликати, відповідно до існуючих уявлень, збільшення виходу струму водню, особливо при малих щільності струму в початковий період осадження. Це підтверджується проведеними дослідженнями: на зразках, що використовуються для зняття поляризаційних кривих, при щільності струму, що використовуються від 0,5 до 6 А/дм² в розрідженій атмосфері осаду електролітичного заліза візуально не виявлено, на відміну від зразків, отриманих за нормальних умов і аналогічних режимах поляризації.

3.3 Дослідження структурних перетворень в електролітичному залізі.

У типовому технологічному процесі передбачається початок осадження заліза на поверхню деталі тоді, коли вона буде попередньо нагріта до температури основної маси електроліту шляхом витримки її без струму. Дослідження структури залізних покриттів, виконані науковцями, показали, що у початкових шарах заліза товщиною від 8 до 1500 нм спостерігається підвищений вміст гідроокисних сполук заліза, оксидів заліза, карбідних

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

карбонільних сполук заліза, вуглецю та кисню. Експериментально показана можливість додаткового включення гідроксиду в шари за рахунок залужування прикатодного шару в момент включення катодного струму (рис. 3.10) через збіднення його іонами водню, обумовленого нестационарною дифузією, а також корозійними процесами, що протікають на поверхні сталі при витримці без струму в електроліті залізнення.

Створення розрідженої атмосфери над рівнем електроліту дозволяє, як показано раніше, істотно змінити умови формування залізного покриття шляхом формування процесу виділення водню.

У цьому дослідженні вирішується перше завдання можливості придушення корозійних процесів лежить на поверхні шляхом катодної поляризації її невеликим струмом, у якому вихід водню струмом становить близько 100 %. У цей період атомарний водень сприятиме відновленню окисних плівок, які утворилися на поверхні зразка при анодному травленні в 30%-ному розчині сірчаної кислоти з подальшим промиванням в проточній воді для видалення з нього продуктів травлення, що утворюються при інших операціях. Молекулярний водень, що виділяється у вигляді конвективної дифузії [18], сприяє збільшенню часу встановлення стаціонарного режиму протікання електроосадження та інтенсивного нагрівання поверхні.



Рисунок 3.10 – Включення гідроксиду в шари за рахунок залужування прикатодного шару

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Вирішення другої задачі полягає у встановленні максимальних значень початкової катодної щільності струму, коли в покриттях заліза ще не спостерігається утворення тріщин і помітного включення гідроокисних сполук.

При підвищенні катодної щільності струму вихід заліза струмом зростає (рис. 3.11). Однак відносна частка процесів розряду іонів заліза в діапазоні значень густини струму від 2 до 6 А/дм² не перевищує 17,2 %. Досить різке збільшення виходу заліза струмом починає спостерігатися при значеннях щільності струму з 8 до 10 А/ дм². Такий характер зміни виходу заліза по струму пов'язаний із процесом розряду іонів водню. Загальновідомо, що перенапряга виділення водню на металах групи заліза невелика, тому в першу чергу поверхні розряджаються іони водню, мають більш позитивний потенціал для свого розряду. Зважаючи на те, що залізо виявляє велику схильність до адсорбції атомарного водню, поверхня катода частково екранується, енергія активації для розряду іонів водню зменшується, а енергія активації іонів заліза збільшується. При значеннях щільності струму 8...10 А/дм² в шарі прикатодного електроліту встановлюється стаціонарний стан, що відповідає настанню граничного струму водню. Подальше підвищення катодної щільності струму буде призводити до залужування прикатодного шару електроліту і утворення гідроокисних сполук заліза, які, включаючись в осад, збільшують дисперсність його структури. З рис. 3.12 слід, що мікротвердість заліза збільшується з підвищенням катодної густини струму. Більше інтенсивне підвищення твердості заліза спостерігається при щільності струму більше 8 А/дм².

На фотографіях мікроструктури електролітичного заліза спостерігається стовпчаста дендритоподібна структура (рис. 3.13), при щільності струму 8 ... 10 А/дм² залізо має характерну волокнисту структуру з волокнами, розташованими перпендикулярно поверхні покриття.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

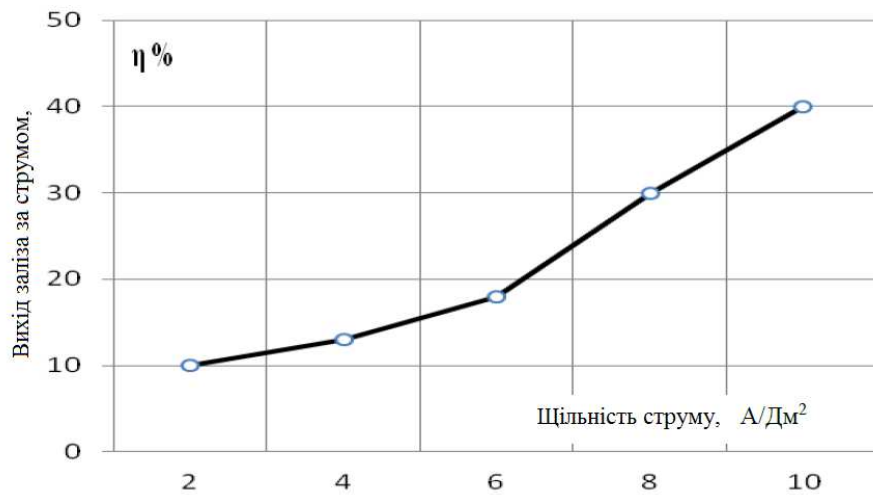


Рисунок 3.11 – Зміна виходу заліза струмом залежно від катодної щільності струму.

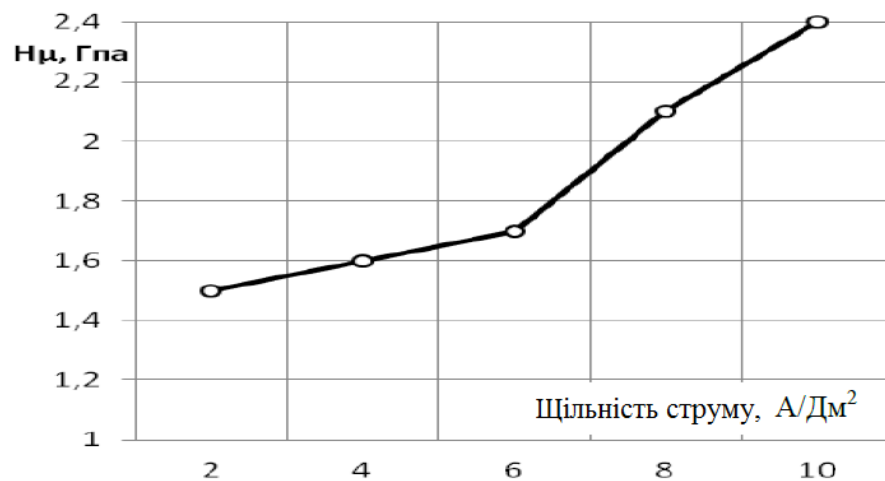


Рисунок 3.12 – Зміна мікротвердості заліза залежно від катодної густини струму



Рисунок 3.13 – Мікроструктури електролітичного заліза, отриманого при щільності струму 8...10 А/дм²

При густині понад 10 A/дм^2 у залізі спостерігаються тріщини (рис. 3.14).



Рисунок 3.14 – Тріщини у покритті електролітичного заліза

З результатів досліджень випливає, що формування первісних шарів електролітичного заліза на залізовуглецевих сплавах в умовах розрідженої атмосфери при температурі електроліту, що дорівнює $55 \text{ }^\circ\text{C}$, слід проводити при значеннях катодної щільності струму в інтервалі $6...8 \text{ A/дм}^2$.

3.4 Дослідження адгезійного зв'язку покриттів заліза з відновлюваною поверхнею деталі.

При анодній обробці поверхні відновлюваної деталі в 30% розчині сірчаної кислоти не видаляються з його поверхні фазові оксиди компонентів, що позначається на адгезійних властивостях покриття з основою. Дана задача вирішується при подвійній анодній обробці поверхні сплаву, заключна анодна обробка виконується протягом декількох секунд у 30% розчині сірчаної кислоти. Очевидно, і в цьому випадку на поверхні сплаву повинні утворитися знову фазові окисли його компонентів, які бажано видалити з неї перед формуванням шару заліза. Попереднє встановлення фазових оксидів компонентів сплаву атомарним воднем, коли на поверхні не встановиться

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

потенціал для розряду іонів заліза, сприятиме посиленню адгезійного зв'язку початкового шару заліза на поверхні.

Дослідження адгезійного зв'язку покриттів електролітичного заліза з поверхнею деталей, що відновлюються, показали задовільні результати по міцності їх зчеплення. У зв'язку з розвивається концепцією надійності отриманих результатів по міцності зчеплення покриттів заліза з поверхнями реальних деталей, розміри яких багато разів перевищують лабораторні зразки, виникає необхідність розширення діапазону значень початкової щільності струму.

Результати випробувань наведені в табл. 3.1 показують, що напруження зсуву покриттів заліза з поверхні зразка залежать від значень початкової щільності струму і змінюються від 20,77 до 66 МПа. Найменші значення напружень зсуву шару заліза із зразка відповідає значенням густини струму 2...4 А/дм².

При таких значеннях щільності струму вихід заліза струмом не перевищує 12,5 % (рис. 3.11). Очевидно, при цьому створюються сприятливі умови для збільшення швидкості зростання кристалів заліза, але не збільшення швидкості зародження центрів кристалізації, у яких і утворюються саме адгезійні зв'язки між електролітичним залізом і поверхнею сплаву. Зі збільшенням щільності струму катодна поляризація та вихід заліза по струму також збільшуються. У цих випадках створюються сприятливі умови для збільшення швидкості зародження центрів кристалізації та посилення адгезійних зв'язків між електролітичним залізом та основою.

У діапазоні значень щільності струму від 5 до 8 А/дм² значення напруги зсуву покриттів заліза залишаються майже постійними, рівними 61...65 МПа.

Покриття заліза зсуваються з поверхні зразка у вигляді суцільного кільця. Покриття заліза, отримані при значенні щільності струму 10А/дм², зсуваються при нижчих значеннях зсуву напруги.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Таблиця 3.1 – Результати випробувань міцності зчеплення електролітичного заліза із зразком.

№ п/п	Катодна щільність струму А/дм ²	Температура електроліту, °С	Ступінь розрядження в комірці, %	Напруження зрізу покриття зі зразка, Мпа
1	2	55	70 – 75	20,7
2	-	-	-	23,2
3	-	-	-	21,4
4	-	-	-	25,0
5	-	-	-	23,0
6	-	-	-	25,1
7	6	-	-	61,3
8	-	-	-	65,4
9	-	-	-	61,4
10	8	-	-	66,0
11	-	-	-	61,2
12	-	-	-	64,3
13	10	-	-	58,8
14	-	-	-	50,1
15	-	-	-	56,1

Такі покриття формуються, коли настає граничний струм воднем і створюються сприятливі умови для залужування прикатодного шару електроліту та утворення гідроксидів заліза, що перешкоджають адгезії заліза з основою.

Таким чином, можна вважати встановленим, що оптимальні значення початкової щільності струму знаходяться в межах від 5 до 8 А/дм² при осадженні заліза в електроліті, нагрітому до 55 °С в умовах розрідженої атмосфери.

Можливість розширення діапазону значень початкової щільності струму завжди має велике практичне значення для забезпечення надійного зчеплення гальванічного покриття з поверхнями великогабаритних деталей [18-22].

3.5 Вплив елементів режиму залізнення на точність формо утворюваних заготовок, при відновленні зношених деталей.

У раніше проведених дослідженнях [22] було показано, що на рівномірність розподілу силових ліній і металу по поверхні, що формується, значною мірою впливають умови процесу електролізу та його режими.

У результаті досліджень впливу умов електролізу на точність розмірів та форми заготовок отримано ряд математичних моделей, що адекватно описують область дослідженого факторного простору та забезпечують достатню точність наближення розрахункових даних до експериментальним точкам, тобто дотримувалася умова, за якої $F_{роз} \leq F_{табл}$.

Рівняння, що показують залежність досліджуваних функцій від частих параметрів електролізу, мають такий вигляд:

для поясу 1.

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & 41,094 - 0,103T - 1,229D_k - 34,712\tau - 0,005TD_k + 0,148D_k\tau + \\ & + 0,002T^2 + 0,273D_k^2 + 12,4963\tau^2; \\ F_{рас} = & 0,857 < F_{табл} = 3,630, \end{aligned} \quad (3.15)$$

Для поясу 2.

$$\begin{aligned} \sigma_2 = & 23,417 + 0,144T - 0,646 D_k - 23,966\tau - 0,002 TD_k - 0,048 D_k\tau - \\ & - 0,001T^2 + 0,014 D_k^2 + 8,279\tau^2; \\ F_{рас} = & 1,785 < F_{табл} = 4,490, \end{aligned} \quad (3.16)$$

Для поясу 3.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

$$\begin{aligned} \sigma_3 = & 190,66 - 3,757T - 1,915 D_k - 48,323\tau + 0,004 T D_k + 0,086 D_k \tau + \\ & + 0,025T^2 + 0,028 D_k^2 + 18,358\tau^2; \\ F_{\text{рас}} = & 1,739 < F_{\text{табл}} = 2,740, \end{aligned} \quad (3.17)$$

Відхилення профілю повздожнього перерізу:

$$\begin{aligned} \rho_1 = & 88,829 + 2,021T + 1,798 D_k + 65,908\tau + 0,004 T D_k + 0,153 D_k \tau + \\ & 0,016T^2 - 0,052 D_k^2 - 23,731\tau^2; \\ F_{\text{рас}} = & 2,171 < F_{\text{табл}} = 3,630. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Згідно з отриманими математичними моделями, середньоквадратичне відхилення діаметра заготівлі, як міра його розсіювання, що визначає точність для всіх трьох поясів виміру, залежить від усіх трьох досліджуваних режимів електролізу: температури електроліту (Т), катодної щільності струму (Дк) та тривалості електролізу (τ), збільшуючись за сукупним впливом елементів лінійної та нелінійної частин полінома за їх збільшення. Залежність їх неоднозначна і різко зростає у ряду названих елементів режиму електролізу для першого та третього поясів виміру. Критичним за довжиною заготівлі місцем, що визначає величину припуску на обробку різанням є третій пояс вимірів. Для нього в найбільшій мірі проявляється встановлена сукупна дія елементів режиму електролізу на досліджуваний параметр (σ). Поверхня від кліка в досліджуваному факторному просторі режиму (Дк) та (τ) та температури електроліту (Т), що дорівнює 70 °С, для першого, другого та третього поясів виміру представлена на рис. 3.15, 3.17, 3.19 відповідно. На рис. 3.16, 3.18, 3.20 показані лінії рівного рівня значень середньоквадратичного відхилення (σ) діаметра заготовки для поясів 1, 2, 3 відповідно, залежно від тривалості електролізу (τ) та щільності струму (Дк) при фіксованому значенні температури електролізу (Т), що дорівнює 70 °С. Звідки слідує що області

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значень досліджуваних елементів режиму електролізу, що забезпечують найменше значення середньоквадратичного відхилення діаметра заготовки, для поясу 3, найгіршого, рівні для щільності струму 20...30 А/дм² та тривалості електролізу 1,25...1,45 години. Відхилення профілю поздовжнього перерізу заготовки (ρ_l) визначається співвідношенням значень діаметрів її по поясах вимірів 2 і 3. Його величина теж залежить від усіх трьох елементів режиму електролізу із суттєво домінуючим впливом тривалості електролізу. Результати досліджень у приватних значеннях корелюють з результатами, отриманими раніше в роботах.

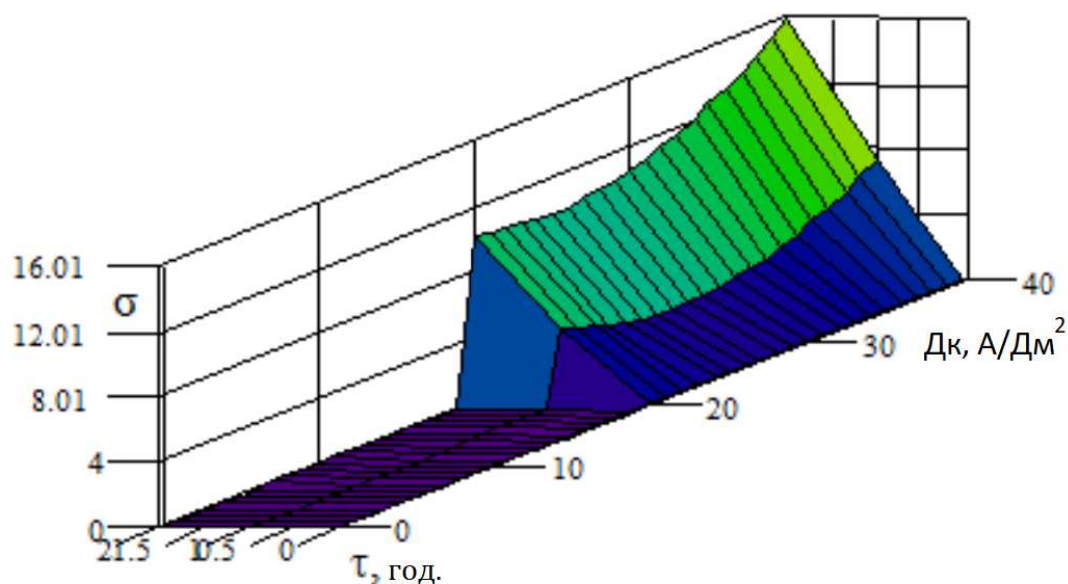


Рисунок 3.15 – Поверхня відгуку (для I поясу) в досліджуваному факторному просторі в залежності від середньоквадратичного відхилення (σ) від тривалості електролізу (τ) та щільності струму (Дк), при фіксованому значенні температури електроліту $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$

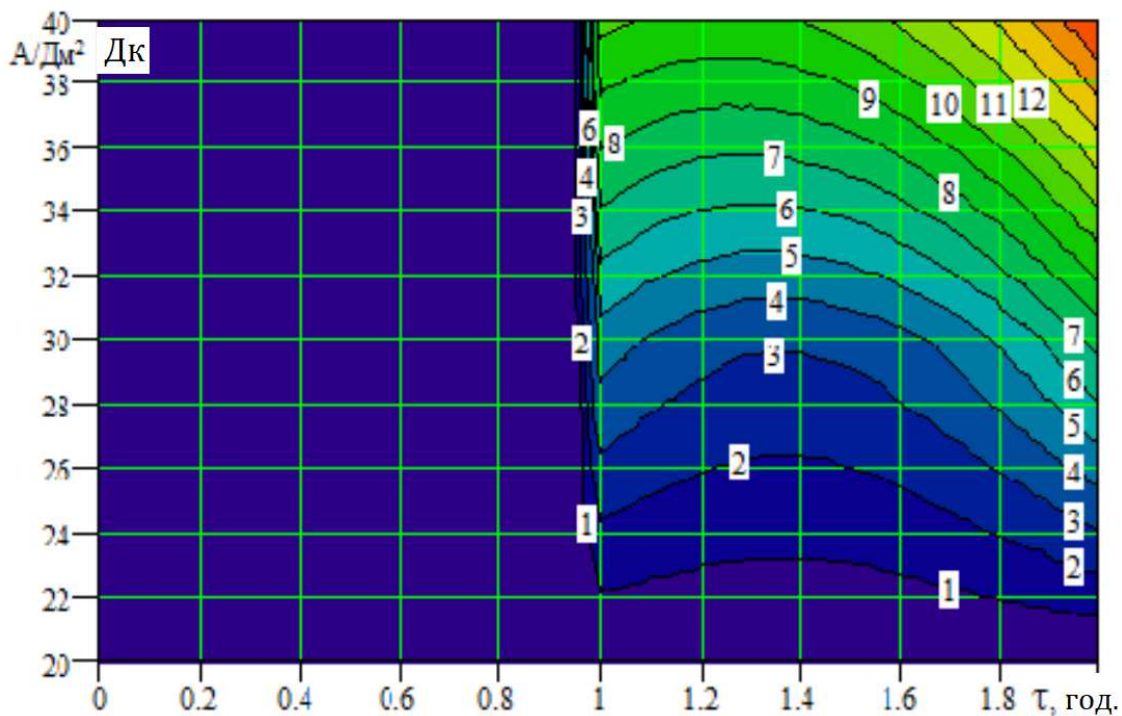


Рисунок 3.16 – Лінії рівного рівня значень (для I поясу)
 середньоквадратичного відхилення (σ) від тривалості електролізу(τ) та
 щільності струму (D_k) при фіксованому значенні температури електроліту
 $T=70\text{ }^\circ\text{C}$

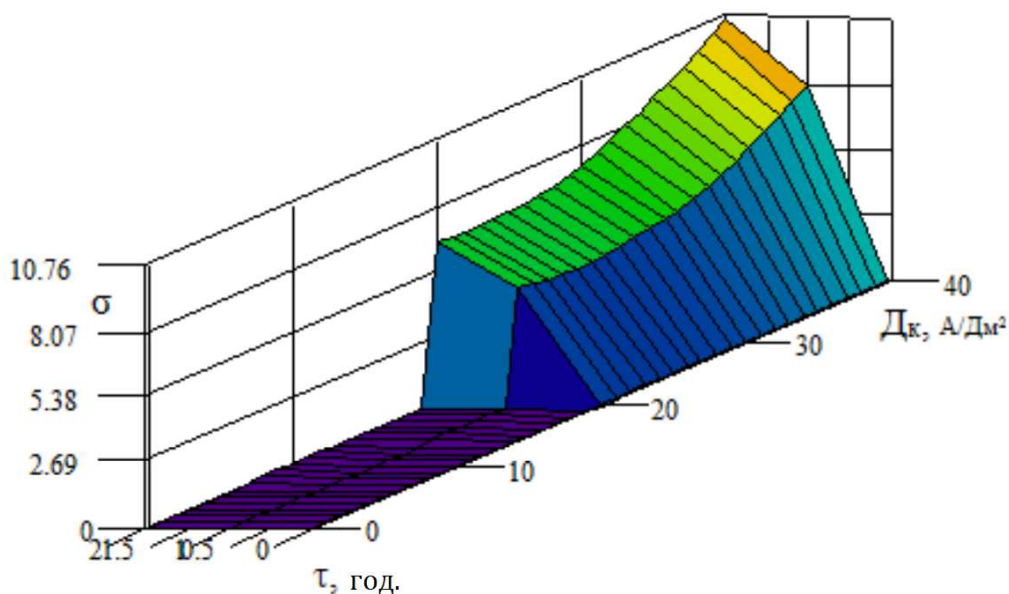


Рисунок 3.17 – Поверхня відгуку (для II поясу) в досліджуваному факторному
 просторі залежно від середньоквадратичного відхилення (σ) від тривалості
 електролізу (τ) та щільності струму (D_k), при фіксованому значенні
 температури електроліту $T=70\text{ }^\circ\text{C}$

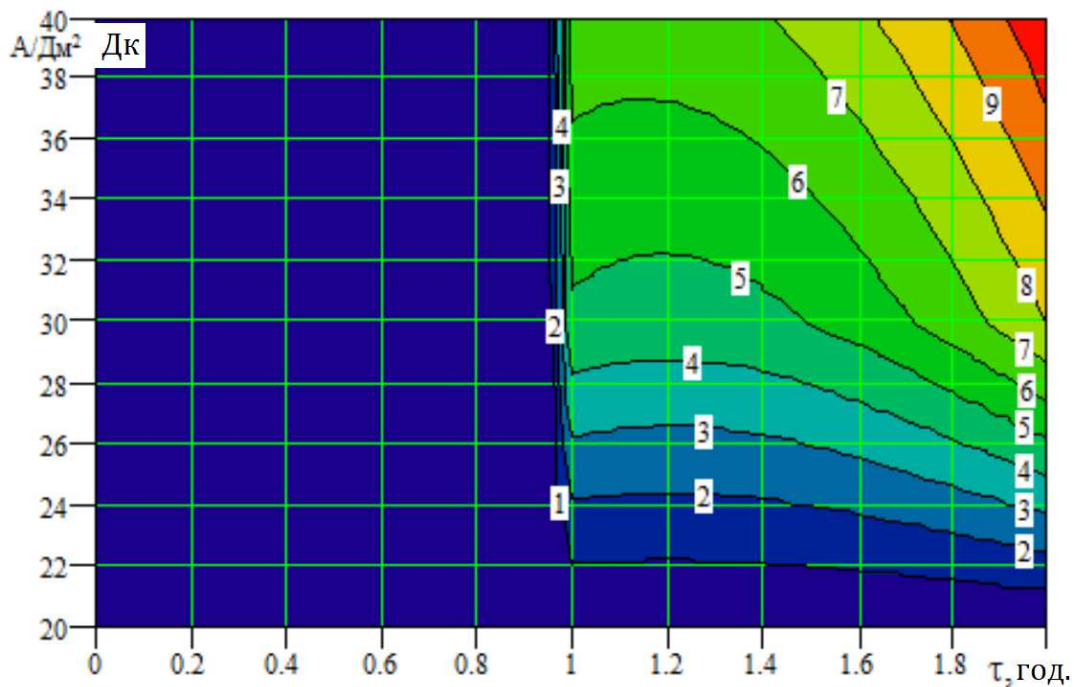


Рисунок 3.18 – Лінії рівного рівня значень (для II поясу) середньоквадратичного відхилення (σ) від тривалості електролізу (τ) та щільності струму (Дк) при фіксованому значенні температури електроліту $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$

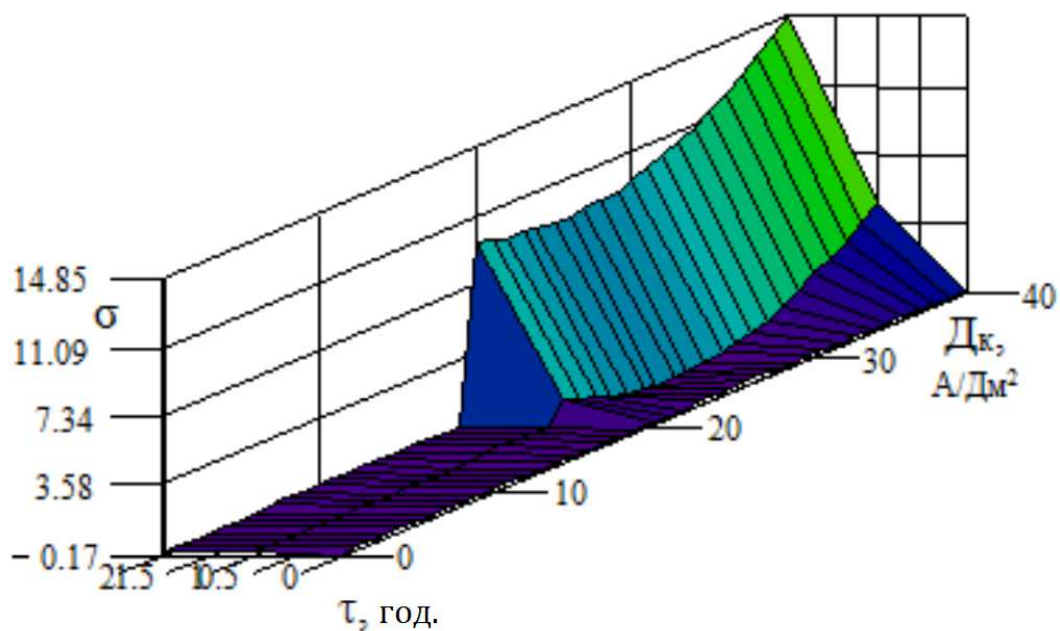


Рисунок 3.19 – Поверхня відгуку (для III поясу) в досліджуваному факторному просторі залежно від середньоквадратичного відхилення (σ) від тривалості електролізу (τ) та щільності струму (Дк), при фіксованому значенні температури електроліту $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$

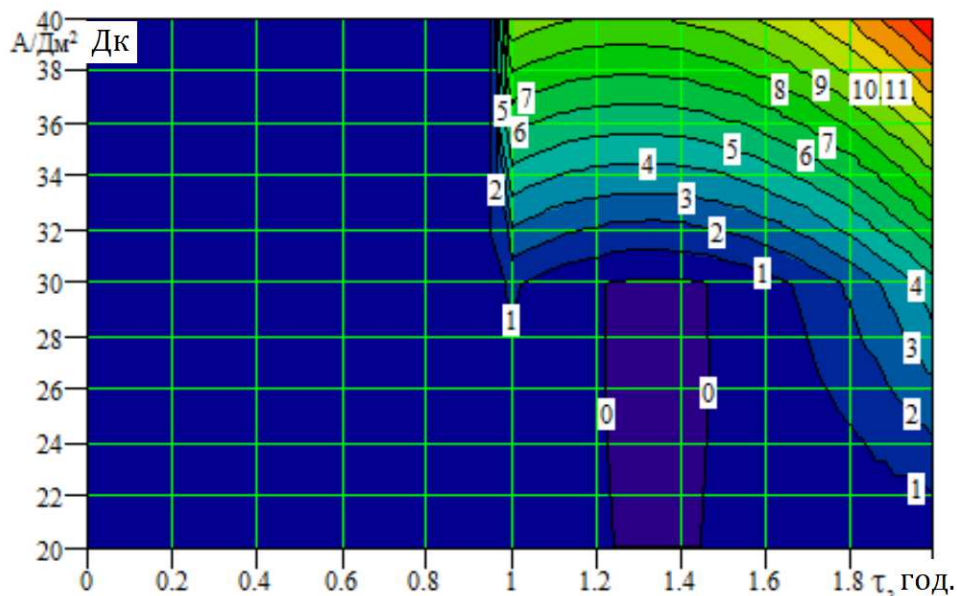


Рисунок 3.20 – Лінії рівного рівня значень (для III поясу) середньоквадратичного відхилення (σ) від тривалості електролізу (τ) та щільності струму (Дк) при фіксованому значенні температури електроліту $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Отримані математичні залежності (моделі) дозволяють при заданих у галузі дослідженого факторного простору елементів режиму електролізу визначити шукані показники точності заготовок, формоутворюваних електролітичним залізним покриттям з метою науково обґрунтувати розрахунок припусків на чорнову їх обробку різанням та число ступенів обробки.

3.6 Дослідження рівномірності розподілу покриттів електролітичного заліза в залежності від щільності струму та ступеня розрідженості простору над рівнем електроліту.

Основною метою дослідження є визначення кількісних значень щільності струму, що забезпечують отримання рівномірних та гладких покриттів заліза завтовшки 0,4-0,8 мм в умовах розрідженої атмосфери.

Рівномірність покриттів заліза і глибина пір у них визначалися на підставі мікрометражу зразків за допомогою спеціального пристосування та вимірювальної індикаторної головки.

Як критерій рівномірності покриттів заліза вибрано ставлення мінімального значення товщини покриттів заліза до максимального. Наявність дендритів на зразках визначалося візуально.

На підставі результатів досліджень розподілу рівномірності покриттів електролітичного заліза по відновлюваній поверхні розроблено рекомендації щодо режимів електролізу для технологічних процесів відновлення поверхонь великогабаритних деталей

3.6.1 Умови формування рівномірних електролітичних покриттів заліза.

Кількість металу, що осідає на поверхню деталі, залежить від кількості електрики, що пройшла через електроліт, а отже, від сили струму та часу електролізу. Якщо щільність струму однакова на всіх ділянках поверхні деталі, то й товщина покриттів буде рівномірною. Залежність сили струму від опору шару електроліту не дозволяє забезпечувати однакову густину струму на поверхні деталі. Це призводить до нерівномірної товщини гальванічного покриття та розсіювання його фізико-механічних властивостей.

Радикальним параметром процесу електролізу, що сприяє зменшенню часу затримки на поверхні та розмірів бульбашок водню, є створення над рівнем електроліту розрідженого простору.

З електрохімічної точки зору, падіння потенціалу складається з омичного падіння потенціалу в розчині, концентраційного перенапруження та хімічного перенапруження, пов'язаного з енергією активації катодного та анодного процесів. Перші доданки характеризують падіння потенціалу обсягом електроліту. Концентраційне падіння потенціалу виникає внаслідок зміни концентрації

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обсягом електроліту. Останній доданок є падіння потенціалу на самій поверхні електрода, точніше – у подвійному шарі на цій поверхні.

Електрорушійна сила, прикладена між електродами, визначається виразом:

$$V = \Delta\phi_{\text{рівн}} + \Delta\phi_{\text{ом}} + \eta_{\text{кінц}} + \eta_{\text{хім}}, \quad (3.19)$$

де $\Delta\phi_{\text{рівн}}$ – рівноважний потенціал щодо обраного електрода порівняння; $\Delta\phi_{\text{ом}}$ – омичне падіння потенціалу; $\eta_{\text{кінц}}$ – концентраційне перенапруга; $\eta_{\text{хім}}$ – "хімічна" перенапруга, що пов'язана з прийомом та віддачею електронів.

Для порівняння ролі кожного з них розглянемо ефективний опір кожного з процесів. Повний ефективний опір елементів ланцюга (без урахування анодної поляризації) W визначається формулою:

$$W = W_0 + W_1 + W_2. \quad (3.20)$$

Весь ланцюг можна уявити, як послідовне включення лінійного та двох нелінійних елементів. Лінійним елементом є розчин з постійною концентрацією, нелінійними елементами служать розчин зі змінною концентрацією та область електрохімічної реакції.

Розподіл потенціалу в електроліті визначається найбільшим з трьох доданків. Зазвичай в повному обсязі вони мають однаковий порядок величин.

Омичний опір W_0 порівняно великий в електролізерах великих розмірів. Він визначається виключно геометричними розмірами та формою електролізера, а також електропровідністю електроліту з постійною концентрацією.

Як впливає з теорій конвективної дифузії, якщо поточний струм через електролізер, малий у порівнянні з граничним дифузійним струмом, то зміною концентрації струмопровідних іонів у ньому можна знехтувати та вважати, що

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прикладена до електролізера електрорушійна сила (е.р.с.) дорівнює сумі омичного падіння потенціалу та хімічної перенапруги. Весь розчин можна характеризувати постійною електропровідністю, а розподіл струму в розчині шукати з вирішення суто електричної задачі. В тому випадку якщо струм в електролізері порівняний з граничним дифузійним струмом, то концентраційна перенапруга різко збільшується і набуває провідну роль в процесі електролізу. При цьому вплив електричних та хімічних факторів на сумарну швидкість процесу виявляється другорядним і величина струму, що йде через електролізер, буде визначатися швидкістю доставки іонів до поверхні катода. Останнє визначається практично зазвичай гідродинамічним режимом розмішування електроліту.

За відсутності концентраційної напруги, коли розміри катода досить малі, розподіл щільності струму на поверхні визначається ходом електрохімічної реакції. Оскільки для ходу всі точки катода рівноправні, густина струму виявляється постійною на поверхні. У протилежному випадку, що має місце при дуже великих лінійних розмірах електрода, розподіл щільності струму на катоді не залежить від стадії електрохімічної реакції.

Щільність катодного струму D_k може бути виражена через наступне рівняння дифузійної кінетики:

$$D_k = \frac{ZF\bar{D}}{\sigma(C_0 - C)}, \quad (3.21)$$

де Z - Заряд іона; F – число Фарадея; \bar{D} – коефіцієнт дифузії; σ – товщина дифузійного шару; C_0 – концентрація іонів обсягом електроліту; C – концентрація іонів у прикатодному шарі електроліту.

$$D_k = \frac{ZF\bar{D}}{\sigma C_0}. \quad (3.22)$$

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Зростання різниці $C_0 - C$ за постійного значення σ призводить до збільшення дифузійного струму. Якщо швидкість електродної реакції велика, то C прагне до нуля (кожен іон, що наближається до електрода, негайно вступає у реакцію). У цьому випадку D_k приймає найбільш можливе при даній величині σ значення:

У нерухомому електроліті товщина дифузійного шару буде постійно зростати, і поступово цей шар поширюється на всю товщину електроліту. Однак забезпечити нерухомість електроліту неможливо. Електродний процес, що призводить до зміни концентрації електроліту біля електрода, є причиною, що викликає рух електроліту. При відновленні катіонів металу з утворенням осаду змінюється щільність електроліту, що викликає зміну характеру дифузійного шару та конвекційний потік електроліту.

Характер зміни дифузійного шару залежить від розташування катода. Якщо катод розташований горизонтально, то щільніші шари електроліту, що знаходяться вище, прямують вниз, зменшуючи цим товщину σ , а менш щільний розчин біля поверхні катода спливатиме. При вертикальному розташуванні катода теж виникає конвекційний потік. При горизонтальному розташуванні катода менш щільний дифузійний шар не викличе конвекційних потоків, причому його товщина більше рівномірна та збільшується з часом.

Рух електроліту щодо електрода стабілізує товщину дифузійного шару і робить її меншою. У зв'язку з цим не можна розглядати дифузійний шар як нерухомий. У дифузійному шарі зберігається ще рух електроліту щодо поверхні електрода, але розчинена в ньому речовина переноситься за рахунок молекулярної дифузії, а не за рахунок руху електроліту. Зв'язок між щільністю струму та граничним струмом в електролізері можна виразити у вигляді рівняння [18]:

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

$$-\varphi = a + \epsilon \ln \left(\frac{i_k}{I \frac{i_k}{i_{пр}}} \right) \quad (3.23)$$

З рівняння (3.23) видно, що поки $I < I_{пр}$ останній член дорівнює $\ln i$. При цьому вираз приймає звичайний вид електрохімічної рівняння кінетики:

$$-\varphi = a + \epsilon \cdot \ln i. \quad (3.24)$$

Якщо I виростає, то знаменник наближається до нуля та вираз $\epsilon \cdot \ln \frac{i}{i_{пр}}$ швидко зростає. При $I = i_{пр}$ поляризація електрода $-\Delta \varphi \rightarrow \infty$. Це означає, що втрачається залежність швидкості від $-\Delta \varphi$, за даної щільності струму потенціал може набувати різних значень. Або, іншими словами, на катоді швидкість перебігу реакції визначається суто дифузійною кінетикою. З вищезазначеного аналізу випливають важливі висновки для забезпечення одержання рівномірних покриттів заліза.

Перший - рівномірність електролітичних покриттів металів, у тому числі і заліза, на деталях різних розмірів та змін може бути забезпечена на підставі розрахунку геометричних параметрів між деталями та анодами та стінками електролізера, виходячи з рішення суто електричної задачі, якщо $i < \frac{1}{2} i_{пр}$.

Другий – рівномірність електролітичних покриттів металів на деталях може бути забезпечена за умови створення дифузійного шару рівномірної товщини, виходячи з умов гідродинамічного руху електроліту, якщо $\frac{1}{2} i_{пр} < i < i_{пр}$.

Третій – прагнення проводити процес електролізу металів при $i \rightarrow i_{пр}$ призводить до зменшення товщини покриття металів у зв'язку з початком утворення зародків дендритів на поверхні покриття.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Четвертий – на рівномірність електролітичних покриттів надають істотний вплив бульбашки водню, що виділяються разом з ними, які не тільки зменшують електропровідність електроліту, а й скорочують справжню поверхню, де осідає метал.

3.6.2 Вплив газових бульбашок водню на дефекти і рівномірність електролітичного шару заліза, обложеного на поверхню залізовуглецевих сплавів.

Експериментальні дані показують, що при залізненні зразків, незалежно від початкової кислотності електроліту, осадження заліза починається лише після досягнення граничного струму водню.

Відносні швидкості виділення заліза та водню залежать від умов електролізу (рН, Дк, t), природи солей заліза, наявності різного виду добавок. Так, наприклад, швидкість виділення водню в залежності від умов електролізу може коливатися від часток до десятків відсотків швидкості катодної поляризації.

Процес виникнення бульбашки молекулярного водню на кордоні електрод – кислий електроліт можна уявити такими стадіями, що послідовно виникають у часі.

З термодинамічної точки зору, утворення атомарного водню виникає під впливом прикладеного потенціалу розряду водню. Між поверхнею залізо вуглецевого сплаву та атомом водню утворюється "гідридний зв'язок". За своєю фізичною природою вона не є окремою типом зв'язку, але за своєю роллю її доцільно виділити в окрему категорію. Це зумовлено особливостями будови атома водню.

Утворенню гідридного зв'язку між залізом та атомарним воднем передую водневий зв'язок у товщі електроліту, який завжди має місце, завдяки малому розміру іона водню (протону), і яка володіє високою енергією.

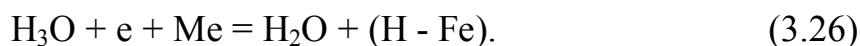
					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сутність водневого зв'язку полягає в тому, що електрон та протон рухаються так, що в кристалі виникають обумовлені їх рухом зв'язки, звані водневими. Важливо при виникненні водневих зв'язків, що першою заповненою електронною оболонкою в кулонівському полі є оболонка із двома електронами. Тому атом водню може утворювати лише один ковалентний зв'язок, що дуже суттєво для характеристики структури відповідних ковалентних кристалів. Утворений атом водню, що має велику активність, адсорбується поверхнею катода.

Залежно від хімічного складу та стану залізовуглецевих сплави атомів утримуються на поверхні з різною силою. У кислих розчинах виділення атомарного водню може бути описано виразом:



Оскільки іон водню в розчині гідратовано, стадію його розряду можна уявити у вигляді:



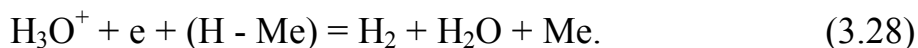
Утворення молекулярного водню з атомів (рекомбінація). Молекули водню значно менш схильні до адсорбції, ніж атоми. Тому вони залишають поверхню, частково переходячи в електроліт і перевагу утворюючи бульбашки газу. Існування газової фази можливе за умови $p < p_1$, де p – тиск водню у бульбашці, p_1 – зовнішній тиск. В іншому випадку бульбашка захлопнеться. Ця стадія, що протікає за каталітичним механізмом, може бути представлена у вигляді:



					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

У певних умовах обидві стадії катодного процесу – розряд іонів H^+ та виділення молекулярного водню можуть протікати одночасно.

При цьому видалення водню з поверхні електрода може протікати електрохімічного механізму:



Зростання водневої бульбашки. Оскільки ззовні доданий достатньо великий термодинамічний потенціал, подальше існування пухирця пов'язане з безперервним збільшенням його радіусу. Зв'язок між p , p_1 та радіусом бульбашки « r » може бути представлена у вигляді рівняння Кельвіна:

$$\frac{RT \ln p_1}{p} = \frac{2\sigma V}{r}, \quad (3.29)$$

де R - Постійна газова; T – температура; σ – поверхневий натяг; V – молярний обсяг.

З рівняння (3.29) слід, що тиск у бульбашці водню підвищується. Різниця тиску призводить до появи надлишкового тиску $\Delta p = p - p_1$. Надмірний радіальний тиск Δp спричиняє розрив електроліту на межі розділу «електрод – електроліт» та відтіснення його в радіальному напрямку на деяку відстань. Величина Δp залежить від кінцевого значення радіуса водневої бульбашки, який він набув в момент відриву.

Відрив водневої бульбашки. На зародок бульбашки діють підйомна сила та сила поверхневого натягу. Зв'язок між підйомною силою і розміром бульбашки може бути представлена у вигляді [22]:

$$F = \frac{4}{3\pi \cdot \rho g}, \quad (3.30)$$

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де r - радіус бульбашки; ρ – густина електроліту; g – прискорення сили тяжіння.

Оскільки об'єм бульбашки малий, то підйомна сила F недостатня для здійснення роботи відриву водневої бульбашки від поверхні електрод. Однак, у міру зростання бульбашки, сила F збільшується і при деякому значенні його радіуса виявляється в змозі здійснити роботу відриву водневої бульбашки від поверхні. Форми і розміри бульбашок водню, що відриваються, визначаються силою поверхневого натягу. На рис. 3.21 зображено пухир водню γ , що сидить на поверхні катода в розчині електроліту. Рівновага бульбашки визначається величинами міжфазових натягів на трьох поверхнях розділу: електроліт - газ ($\sigma_{\beta\gamma}$); катод – електроліт ($\sigma_{\alpha\beta}$), газ –тверде тіло ($\sigma_{\alpha\gamma}$). Бульбашок водню не змінюватиме свою форму, тобто крайовий кут ϕ буде постійний, якщо сили, що діють по лінії дотику трьох фаз (рідкої, твердої та газової), будуть взаємно врівноважені.

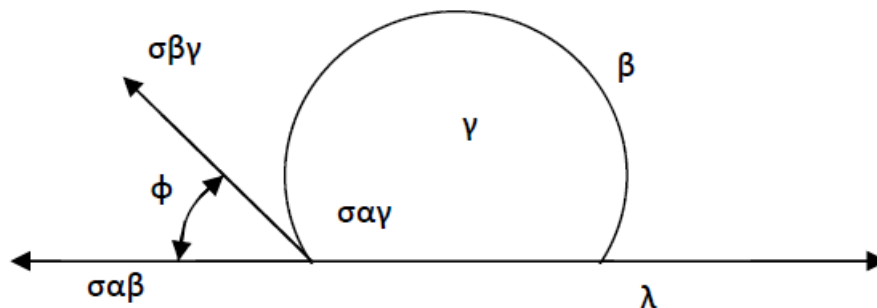


Рисунок 3.21 – Рівноважний стан бульбашки водню, що виділяється на поверхні осаджуваної деталі (катода)

Умовою рівноваги буде дотримано рівність:

$$\sigma_{\alpha\beta} + \sigma_{\beta\gamma} \cos\theta = \sigma_{\alpha\gamma}, \quad (3.31)$$

або

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

$$\cos \vartheta = \frac{(\sigma_{\alpha\gamma} - \sigma_{\alpha\beta})}{\sigma_{\beta\gamma}}. \quad (3.32)$$

Залежно від величини трьох міжфазових натягів крайовий кут φ буде великий чи малий (рис. 3.21). У першому випадку бульбашка буде мати плоску форму і витіснити електроліт із поверхні катода, у разі бульбашка буде наближатися до форми цілої кулі, тобто електроліт витіснить газ із поверхні катода. Очевидно, що при зміні потенціалу має змінюватися величина $\sigma_{\alpha\beta}$. Натяг $\sigma_{\alpha\gamma}$ також може дещо змінюватися з поляризацією внаслідок наявності адсорбційної плівки електроліту на поверхні α/γ , в якій повинен існувати подвійний шар, проте ця зміна відносно мала. Натяг на $\sigma_{\beta\gamma}$ взагалі залежить від потенціалу. Отже, стежачи за зміною кута при зміні потенціалу, можна стежити за зміною, головним чином, величини $\sigma_{\alpha\beta}$. Пухирці найбільших розмірів виділяються при потенціалі електрода, близькому до потенціалу нульового розряду. При цьому крайовий кут змочування має максимальну величину. Крайовий кут і розміри газових бульбашок зменшуються при більш негативному і електропозитивному потенціалі електрода в порівнянні з потенціалом нульового розряду. Об'єм газових бульбашок збільшується $\varphi \rightarrow 60^\circ\text{C}$ параболічної залежності, починаючи зі значення $\varphi = 20^\circ\text{C}$.

Рух газових бульбашок у електроліті. Експериментально рух газових бульбашок вивчався багатьма дослідниками. Результати всіх виконаних робіт можуть бути резюмовані таким чином:

- швидкість руху бульбашок діаметром 0,2-1,5 мм майже не залежить від діаметра бульбашки і дорівнює приблизно 28-30 см/с;
- бульбашки великого розміру піднімаються з дещо більшими швидкостями, а саме близько 35-40 см/с, але виявляються малостійкими.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6.3 Вплив газових бульбашок на розподіл струму на катоді.

При проходженні струму через електролітичну комірку спостерігається падіння напруги, пов'язане з подолання опору електроліту. Падіння напруги, обумовлене подолання опору, залежить від щільності, шляху струму в електроліті та його питомого опору. Питомий опір електроліту залежить від ступеня його заповнення і може бути вираженим як: [22]

$$r_r = Kr, \quad (3.33)$$

де K - коефіцієнт збільшення питомого опору через наявність у ньому газових бульбашок; r – питомий електричний опір чистого електроліту.

Питомий опір електроліту залежить від його температури та концентрації. Коефіцієнт збільшення опору електроліту від включення до нього газових бульбашок залежить не тільки від щільності струму та конструкції електролітичного осередку, а й від температури та в'язкості електроліту, що визначається його концентрацією.

Різні технологічні та конструктивні фактори по-різному можуть впливати на розподіл струму в електроліті. Так, зменшення відстані між електродами може призвести до збільшення газового наповнення електроліту та коефіцієнта K у виразі (3.33). З підвищенням температури та одночасним зниженням питомого опору для чистого електроліту може спостерігатися збільшення його питомого опору через зростання газонаповнення.

Опір проходженню струму в електроліті істотно зростає в присутності газових бульбашок, що утворюються від електродів і рухаються в електроліті вгору. Пухирці звужують переріз електроліту (при цьому підвищується фактична щільність струму в електроліті) і подовжують шлях руху струму.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

Під газонаповненням розуміють відношення обсягу вологого газу, розподіленого у вигляді бульбашок в електроліті до загального обсягу газонаповненого електроліту:

$$b = \frac{V_G}{V_P + V_G}, \quad (3.34)$$

де b - газове наповнення; V_P - обсяг рідкої фази в електроліті; V_G - обсяг газової фази в електроліті

Газове наповнення електроліту визначається співвідношенням швидкостей двох процесів, утворенням газових бульбашок в електроліті, заповнюючому осередку, і відведенням, відокремленням їх від електроліту. Газо наповнення електролітів зростає зі збільшенням щільності струму, висоти електродів, в'язкості електроліту та зменшенням відстані між електродами, тобто зменшенням обсягу електроліту в комірці. Кількість газу, що виділяється лінійно збільшується з підвищенням щільності струму, а газо наповнення зростає у своїй меншій мірою. Це пояснюється укрупненням розмірів газових бульбашок при підйомі їх в електроліті внаслідок злиття бульбашок у міру збільшення шляху або руху рідини зі зростанням висоти електрода та збільшенням інтенсивності утворення бульбашок газу із зростанням щільності струму.

З підвищенням температури в'язкість електроліту знижується, що сприяє збільшенню швидкості підйому газових бульбашок, тобто зменшення газонаповнення. Одночасно зі зростанням температури збільшується об'єм газу, як за рахунок розширення, так і внаслідок підвищення парціального тиску парів води, що насичують газ. При температурі в 70...80 °С газонаповнення мало змінюється з її зростанням, а іноді навіть знижується. Вище 70...80 °С вплив збільшення обсягу газів є визначальним, і газонаповнення зростає, особливо за 100...105 °С.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

Величина газо наповнення залежить від швидкості підйому газових бульбашок в електроліт. Крім в'язкості, на швидкість підйому впливають розміри бульбашок.

Широкомасштабні дослідження щодо рівномірності розподілу товщини покриття електролітичного заліза на клапанах, проведені в виробничих умовах показали, що спостерігається абсолютно однаковий характер розподілу величини покриття по довжині клапана [18, 22]. Конусність покриття $\rho_{\text{п}}$ залежить від його товщини та досягає значних величин до 0,3 мм при розрахунковій товщині 0,7 мм на бік, що свідчить про значну нерівномірність розподілу струму за довжиною стрижня клапана.

На підставі цих же досліджень встановлено, що характер розподілу товщини покриття на клапанах по підвісках залежить від рівномірності газонаповнення між рядами анодів і деталей - катодів, розташованих уздовж ванни залізнення.

3.6.4 Вплив розрідження над дзеркалом електроліту на точність розмірів, форми та якість поверхневого шару заготовок.

Спільний розряд іонів металу та водню, що протікає при електролізі металопокриттів, як зазначалося раніше, призводить до змін структури та властивостей покриттів. Певну роль цьому відіграє адсорбується у процесі електролізу на катоді водень [23]. Нерівномірність газонаповнення воднем, що виділяється, і розчиненим в електроліті киснем в міжелектродному просторі впливає на рівномірність розподілу товщини наноситься покриття по довжині і діаметру деталі. Газонаповнення електроліту визначається співвідношенням швидкостей двох процесів: утворення газових бульбашок в електроліті та відокремлення їх від електроліту. Швидкість першого процесу перевищує швидкість другого, у результаті в електроліті при безперервній роботі накопичується газ у вигляді бульбашок. Газонаповнення слід розглядати як

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

негативний процес, бо воно викликає зміну питомого електричного опору у бік збільшення, і, отже, веде до перерозподілу фактичного значення катодної щільності струму, з усіма наслідками, що звідси випливають. Виконані теоретичні та експериментальні дослідження показали, що значну роль при формуванні рівномірних металопокриттів грає процес десорбції водню в поверхні покриттів [23, 24]. На їх основі розроблено принципово новий спосіб формування [23, 24]. Експерименти, поставлені в цих умовах, підтвердили теоретичні передумови про значне скорочення кількості водню, що поглинається, і, як наслідок, – отримання більш рівномірних і гладких покриттів з оптимальною величиною припуску на механічну обробку [23].

На рис. 3.22 наведені криві розподілу електролітичного залізного покриття за довжиною зразка, отримані у звичайних умовах електролізу та зі створенням розрідження над дзеркалом електроліту.



Рисунок 3.22 – Розподіл електролітичного залізного покриття за довжиною зразка:

1- у звичайних умовах; 2 - при розрідженні над дзеркалом електроліту.

Аналізуючи їх, можна бачити, що розрідження над дзеркалом електроліту істотно впливає на розподіл силових ліній по поверхні деталі,

тому що при цьому полегшуються умови відриву бульбашок водню з поверхні зразка, зменшується час його зростання та затримки на поверхні зразка, внаслідок чого зменшується нерівномірність газонасичення міжелектродного простору.

Це дозволяє припустити, що саме молекулярний водень, що утворюється на поверхні зразків, що покриваються, грає домінуючу роль в рівномірності розподілу силових ліній при формуванні електролітичних покриттів заліза. Товщина покриття як контрольований показник якості деталей, відновлених електролітичним залізом, є випадковою величиною i , як показують дослідження, підпорядковується нормальному закону розподілу. При вимірах зразка в поясі 3 (рис. 3.22), що забезпечує найменшу товщину покриття, саме він є критичним, оскільки визначає достатність припуску на механічну обробку, при цьому спостерігається зміщення (Δh) його математичного очікування щодо розрахункового значення у бік зменшення.

Зміщення вибіркової середньої M_x , товщини покриття Δh свідчить про наявність систематичної помилки. Воно цілком закономірно і пов'язане з нерівномірністю розподілу струму на деталі, внаслідок екранування відновлюваної поверхні воднем, що виділяється при електролізі. На поверхні залізовуглецевих сплавів, що покривається, утворюється водневий «бар'єр», який, збільшуючи електролітичний опір, сприяє нерівномірному розподілу струму і товщини покриття на ній. Зміщення Δh , що спостерігається, у бік зменшення цілком зрозуміло і пов'язане з місцем виміру, де справжнє значення щільності струму, а отже, і товщини покриття менше, ніж розрахункове. Величина усунення вибіркової середньої товщини покриття коливається у досить широких, значних межах $M_{\Delta h}=12,242\dots 12,728$ мм. Середньоквадратичне відхилення товщини покриття Δh , як міра розсіювання фактичних значень через дію випадкових чинників, також коливається у широких, значно значних межах: $\Delta h=0,011\dots 0,031$ мм. До того ж, на зразках, отриманих у нормальних умовах, спостерігається вплив крайового ефекту,

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

тобто йде перерозподіл силових ліній переважно по краях зразка, і покриття має сильно виражену сідлоподібну форму (рис. 3.23, крива 1). Конусність покриття ρ_1 досягає значних величин – до 0,25 мм при розрахунковій товщині 0,3 мм на бік, що свідчить про значну нерівномірність розподілу струму за довжиною зразка.

Змінюючи ступінь розрідженості простору над рівнем електроліту, можна впливати на швидкість видалення з поверхні бульбашок молекулярного водню, але не збільшувати швидкість рекомбінації атомарного водню в молекулярний [23, 24]. Розрідження над дзеркалом електроліту інтенсифікує процеси десорбції газової фракції, зменшуючи час зростання та полегшуючи умови відриву бульбашок водню з поверхні зразка. При цьому екрануючий вплив слабшає, і більшість зразка залишається відкритою (рис. 3.23), що сприяє більш рівномірному розподілу силових ліній по поверхні, що формується. Крайовий ефект все одно спостерігається, але вже меншою мірою.

Піднімаючись вгору, бульбашки водню створюють конвективне перенесення іонів заліза в прикатодний шар, що також покращує розподіл залізного покриття по довжині зразка внаслідок зменшення дифузійних обмежень. Похибка форми по довжині, конусність покриття на зразках, отриманих у звичайних умовах, становить 0,25 мм, а на зразках, отриманих при створенні розрідження над дзеркалом електроліту, 0,05 мм при розрахунковій товщині покриття 0,3 мм на бік. Квалітети точності зразків, формоутворених електролітичним залізним покриттям у звичайних умовах, JT16, а при розрідженні JT10.

З огляду на специфіку процесу електроосадження заліза, як зазначалося раніше, покриття формуються за умов, коли має місце одночасний розряд іонів металу і водню. Адсорбція бульбашок молекулярного водню, що утворюються, на поверхні катода перешкоджає осаждению металу під ними (рис. 3.24).

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

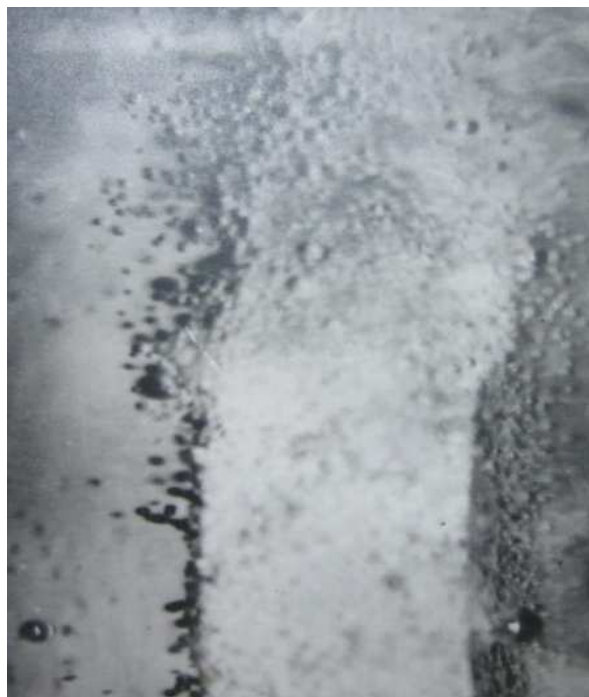


Рисунок 3.23 – Десорбція водню з поверхні зразка, що покривається, при розрідженні над дзеркалом електроліту



Рисунок 3.24 – Адсорбція водню, що виділяється при електролізі, на поверхні катода

Внаслідок цього на поверхні покриттів з'являються не заповнені металом заглиблення (піттинг), які іноді пронизують усю товщину осаду (рис. 3.25). У

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

деяких випадках бульбашки, яким вдалося порівняно міцно закріпитися на поверхні катода, що поступово обростають металом, і тоді в покриттях виникають замкнуті порожнини, так звані «водневі камери». Всі фактори електролізу, що призводять до зменшення ймовірності утворення зародків бульбашок водню та збільшення швидкості їх зростання, перешкоджають виникненню піттингу та водневої пористості у покриттях.



Рисунок 3.25 – Піттинг на поверхні зразка внаслідок тривалої адсорбції водню.

У загальному випадку пористість гальванопокриттів залежить від умов електролізу та значною мірою визначається співвідношенням швидкостей зародження центрів кристалізації та їх зростання. Крім піттингу, на поверхні зразків, отриманих у звичайних умовах, спостерігаються нарости (дендрити). За рахунок значного зменшення розрахункової площі зразка екрануючим воднем відбувається збільшення щільності струму та його перерозподіл на відкритих між бульбашками ділянках, що призводить до утворення дендритів (рис. 3.26).

На зразках, отриманих за умов розрідження над дзеркалом електроліту, цих дефектів немає. Очевидно, бульбашки водню, що рухаються вгору, створюють конвективні потоки, що покращує фронт «живлення» зростаючого покриття, зменшується час зростання і затримки бульбашок водню на поверхні, що формується, знижується його екрануючу дію, збільшується швидкість виникнення зародків кристалізації при електроосадженні покриттів.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це підвищує дисперсність одержуваних шарів, при цьому опади заліза досить рівномірні по довжині та гладкі (рис. 3.27).



Рисунок 3.26 – Дендритоутворення при залізненні у звичайних умовах.



Рисунок 3.27 – Зразок, отриманий під час залізнення зі створенням розрідження над дзеркалом електроліту

На рис. 3.28, 3.29 наведені фотографії поперечних мікрошліфів зразків з електролітичним залізним покриттям, отриманим у звичайних умовах та при розрідженні над дзеркалом електроліту, при збільшенні $\times 500$. Формування покриттів на поверхні основи починається з утворення на ній кристалічних зародків металу, що осаджується [23]. Критичні зародки, що виникли на підкладці, при електролізі зазвичай розростаються до утворення суцільного

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

шару покриття. Чим більше виникає зародків і вище швидкість їх зростання, тим менше товщина суцільного осаду, що утворюється на поверхні підкладки, структура якого, перш за все, визначається характером взаємодії кристалів, що об'єднуються один з одним.

Зростання кристалітів зазвичай починається з утворення з-поміж них містків, мають аморфну структуру і меншу товщину, ніж самі кристаліти. Виникнення містків відбувається різними шляхами; заповненням площі між великими кристалітами великою кількістю дрібних зародків; розростанням безформних вузьких перетяжок; зростанням ниткоподібних кристалів, що з'єднують кристаліти. У покриттях, отриманих при електролізі у звичайних умовах, спостерігається розвиток кристалів за механізмом шаруватого зростання. Формування кристалів за цим механізмом здійснюється шляхом утворення двомірних зародків, що розповсюджуються по межі у вигляді шарів одноатомної або багатоатомної товщини. У більшості випадків кристали ростуть шляхом закономірного переміщення поверхнею грані багатоатомних шарів росту (пакетів), товщина яких залежно від режимів електролізу змінюється в широких межах (0,01-1 мкм).



Рисунок 3.28 – Структура електролітичного заліза, одержаного у звичайних умовах

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92



Рисунок 3.29 – Структура електролітичного заліза, одержаного при розрядженні над дзеркалом електроліту

Причина утворення багатоатомних верств зростання - пасивація катода в результаті адсорбції на гранях кристала, що росте, різного роду речовин. Роль адсорбату можуть виконувати молекули розчинника, іони, які не беруть безпосередньо в електродної реакції, домішки органічних сполук, атоми і молекули водню, гідроксиди металів та інші частинки. При утворенні на межі двовірного зародка його поверхня буде деякий час вільною від адсорбованих чужорідних частинок, і на ній із найменшими енергетичними витратами може виникнути новий зародок. Таке явище послідовного нашарування двовірних зародків формує шар чи «пакет» зростання. Товщина «пакета» залежить від ряду факторів і визначається концентрацією іонів металу, що розряджаються, в зоні нашарування зародків і ступенем пасивації його поверхні. Після завершення розвитку «пакету» нормалі відбувається його тангенціальний зростання вздовж поверхні грані. До моменту досягнення шаром краю грані, біля місця його зародження внаслідок дифузії відновлюється початкова концентрація іонів, що розряджаються. Тому знову створюються умови виникнення наступного шару.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Періодичність процесів зростання призводить до утворення на катоді кристалів, що складаються з множини субзерен шаруватого типу (рис. 3.30).

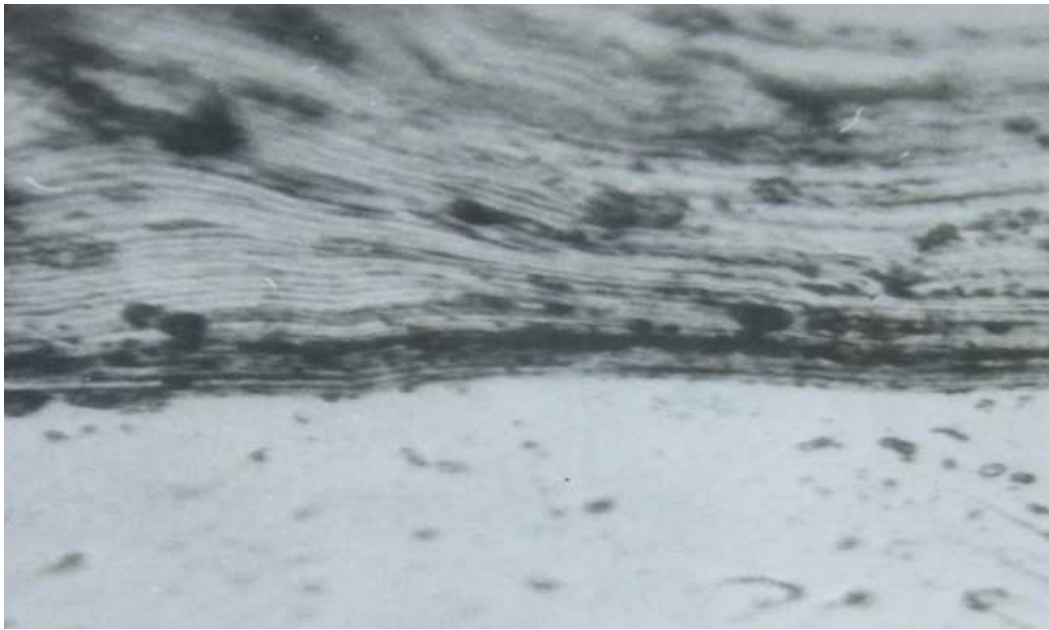


Рисунок 3.30 – Шаруватість структури електролітичного заліза, отриманого у звичайних умовах електролізу.

Досконалість структури кристалів, що ростуть за механізмом шаруватого зростання, головним чином, визначається характером двомірного зародження в період виникнення нового шару «пакету». Зародження кожного наступного шару починається з появи двовимірного зародка лежить на поверхні попереднього. Виникнення зародка в нормальному положенні повинно призводити до зрощення шарів та відсутності між ними будь-яких кордонів. Однак у реальних умовах поверхня зростаючого кристала тією чи іншою мірою покрита адсорбованими чужорідними частинками, і зародки, що виникають на ній, можуть виявитися розорієнтованими щодо нижчого шару. Внаслідок цього при наростанні шарів одна на одну виникає кристалографічна невідповідність ґрат. Компенсація такої невідповідності може відбуватися через появу сіток дислокацій, які у площині сполучення шарів.

На початкових стадіях електроосадження іноді спостерігається епітаксіальне зростання кристалів. У цьому випадку кристали металу, що

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

осаджується, відтворюють структуру кристалів підкладки і набувають форми і орієнтації останніх. Таке зростання можливе внаслідок орієнтаційної відповідності окремих площин кристалічних ґрат обох металів. Товщина осаду, при якій припиняється вплив підкладки на його структуру, в основному залежить від відмінності в параметрах ґрат цієї пари металів та умов електролізу. Як бачимо на рис. 3.13 опади електролітичного заліза мають яскраво виражену дендритоподібну структуру, що складається з відносно великих довгастих волокон. Волокна витягнуті однією з кристалографічних осей, розташовані перпендикулярно до поверхні зразка, яку осідає залізо. Волокниста структура залізних покриттів з волокнами, розташованими перпендикулярно поверхні покриття, на думку окремих дослідників, є сприятливим фактором в оцінці опору металу зносу [23]. З усіх перевірених видів металопокриттів найбільшу зносостійкість показали електроосадженні метали: хром та залізо, які мають однотипну структуру (з вираженою текстурою), відмінну від структури звичайних металургійних металів [23, 24]. Виявлений окремих дослідженнях низький коефіцієнт тертя електролітичного заліза пояснюється, очевидно, також особливістю структури електролітичних опадів.

Іншою характерною особливістю структури покриттів заліза є наявність тріщин (рис. 3.31), які, своєю чергою, також розташовані нормалі до поверхні зразка. Така орієнтація волокон і тріщин визначається, ймовірно, характером утворення текстури покриттів заліза. Наявність тріщин у покриттях заліза вказує на виникнення в них внутрішніх напружень, що перевищують межу міцності електролітичного заліза.

Характер тріщинуватості, головним чином, залежить від структурних особливостей опадів, а також від наявності в них неметалевих включень (часток гідроксиду, продуктів їхнього розпаду). При спів осадженні з металом сторонніх речовин, тріщини зазвичай виникають у місцях скупчення включень. Останні розташовуються переважно за межами зерен – це

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводить до послаблення зв'язку між ними і відповідно до розтріскування осаду. Крім того, тріщинуватість покриттів обумовлена нерівномірним розподілом водню і залишкових напружень по товщині осаду. Всі фактори, що сприяють насиченню воднем покриттів, призводять до тріщиноутворення, що супроводжується розвантаженням опадів і зняттям залишкових напружень [24]. Структура покриттів, отриманих в умовах розрідження над дзеркалом електроліту, відрізняється відсутністю шаруватості в покритті і меншою кількістю тріщин, що свідчить про монолітне покриття, з меншим вмістом гідроксиду і більш високою міцністю самого осаду (рис. 3.29).

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

ВИСНОВКИ

1. Дослідження електрохімічного стану залізовуглецевого сплаву показало, що перенапруження виділення водню значною мірою знижується в залежності від ступеня розрідженості атмосфери над рівнем електроліту. У зв'язку з цим з'являється можливість довільного збільшення або зменшення кількості водню, що виділяється, в залежності від ступеня розрідженості атмосфери, що особливо важливо в початковий період формування покриттів електролітичного заліза на поверхні. Дослідження структурних перетворень в електролітичному залізі, отриманому в електроліті, нагрітому до 55 °С, показало, що отримання контактного шару заліза без наявності в ньому тріщин забезпечується в тих випадках, коли вихід заліза струмом дорівнює не менше 15 % і не більше 30 %.

2. Максимальне значення міцності зчеплення осаду забезпечується тоді, коли формування покриття здійснюється при значенні катодної щільності струму від 5 до 8 А/дм², температурі електроліту 55 °С та ступеня розрідженості атмосфери 70 ... 75 %.

Встановлено можливість досить довільного регулювання виходу заліза по струму в початковий період електролізу, в межах від 0 до 30 %, що при опусканні деталей у ванну під струмом запобігає саморозчиненню поверхні в кислих електролітах та осадженню на ній гідроокисних сполук заліза, що перешкоджають утворенню адгезійного зв'язку між електролітичним залізом та залізовуглецевим сплавом.

3. Встановлено можливість прискореного видалення водню з поверхні деталі при електролізі заліза за рахунок створення розрідженого простору над електролітом, що дозволяє отримувати рівномірні гладкі опади заліза, відкриває перспективи для розробки конструкцій установок, що забезпечують зниження енергетичних та матеріальних витрат, а також зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище. Розрідженість простору над дзеркалом

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

електроліту сприяє створенню однорідного електричного поля та формуванню більш рівномірних покриттів на макропрофілі. При ступені розрідженості 60...65 % ступінь нерівномірності електролітичних залізних покриттів за товщиною зменшується в 2,6 рази.

4. Мікроструктура покриттів заліза, що формуються в умовах розрідження над дзеркалом електроліту, відрізняється від покриттів, отриманих у звичайних умовах, відсутністю шаруватості та меншим числом тріщин, при цьому міцність електролітичного заліза підвищується в 1,8 рази, що говорить про монолітніший осад.

При температурі електроліту 70 °С за рахунок створення допустимого ступеня розрідженості середня висота мікронерівності поверхні осаду зменшується в 2,5 рази.

5. Виконані дослідження дозволяють запропонувати для відновлення зношених деталей автомобілів новий варіант початкового періоду формування електротехнічного заліза на поверхні залізовуглецевих сплавів, можливість практичного здійснення якого ґрунтується на застосуванні розрідженого простору над рівнем електроліту.

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чередніков О.М. Технологічні основи ремонту машин і відновлення деталей: Навчальний посібник. – Чернігів:ЧДТУ, 2008. – 212с.
2. Лузан С.О. Підвищення довговічності деталей машин під час їх відновлювального ремонту / С.О. Лузан, Д.М. Петренко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: 2019. – Вип. 205. – С. 211-217
3. Камель Г. І. Технологічні процеси та комплекси відновлення і зміцнення деталей : конспект лекцій / Г. І. Камель, В. М. Мілютін. — Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2014. — 167 с.
4. Діагностика і технологія ремонту автомобілів : підруч. / В. М. Коваленко, В. К. Щуріхін. – Київ : Літера ЛТД, 2017. – 224 с.
5. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
6. Закалов, О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин: О.В. Закалов. – Тернопіль: ТДТУ, 2000. – 354 с.
7. S. Tung, M. McMillan, Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future, Tribology International. 37 (2004) 517–536
8. Gawne D.T. Failure of electrodeposited chromium coatings on cast iron substrates / D.T. Gawne // Metallurgical and protective coatings – 1984. – P.385-393.
9. К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж Інженерія поверхні. Підручник. – К.: НВП «Наукова думка» НАН України, 2007. – 558 с.
10. Shen, N.Y.; Li, J.; Wang, X.D.; Ye, J.; Yu, Z.X. Analysis and detection of elastic deformation of the large-scale crankshaft in non-circular grinding. In

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

Proceedings of the Mechatronics and Applied Mechanics III; Trans Tech Publications Ltd.: Baech, Switzerland, 2014; Volume 532, pp. 285–290.

11. Okuyama, E.; Goho, K.; Mitsui, K. New analytical method for V-block three-point method. *Precis. Eng.* 2003, 27, pp. 234–244

12. Відновлення деталей автомобілів: Навчальний посібник / укладачі: В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, В.І. Венжега.– Чернігів:ЧНТУ, 2013. – 192с.

13. Лузан С.О. Підвищення довговічності деталей машин під час їх відновлювального ремонту / С.О. Лузан, Д.М. Петренко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: 2019. – Вип. 205. – С. 211-217

14. Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques / [edited] by Krishna Seshan. - 2nd edition. - Norwich, NY 13815. – 656 P.

15. Luzan S. The study of possible application of plasma alumina coating on machine parts / S. Luzan, A. Sidashenko // MOTROL. Commission of Motonzation and Energetics in Agriculture. – Poland: 2016. – Vol. 18. – No. 7. P. 15-18

16. Shingo Nomura. Zn-Fe/Zn-Ni Double-layer electroplated steel sheet / Nomura Shingo, Sakai Hirohiko // Technical Report. – 1983. – №23. – P. 930-938.

17. Gang Ji, J-P.Mornioli T.Grosdidier. Nanostructures in Thermal Spray Coatings // Scripta Materialia. – 2003. – P. 1599-1604.

18. Корж В. М. Нанесення покриття : навчальний посібник / В. М.Корж. — К. : Арістей, 2005. — 204 с.

19. Патик В. Ю. Дослідження процесу відновлення та зміцнення деталей залізо-боридним покриттям з наступним ціануванням: кваліфікаційна робота магістра: спец. 133 - Галузеве машинобудування; наук. кер. В. К Аветісян; Харків, 2020. 68 с.

20. Pinchuk S. Peculiarities of Producing an Electrolytic Iron Powder from Rolling Manufacture Waste / S. Pinchuk , A. Vnukov , R. Cheranev // Chem. Chem. Technol. – 2019. – Vol. 13, No. 1, pp. 121–128

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Huang Y. D. Effect of thermomechanical processes on roomtemperature mechanical properties of Fe₃Al-based alloys / Y. D. Huang, W., Y. Yang, Z. Q. Sun // Journal of Materials Science Letters. – 1998. – Vol. 17. – No.1.– P. 1781 – 1784.

22. Ганич Р. п. Дослідження впливу кристалізаційної перенапруги на розмір зерен в електролітичних плівках заліза, отриманих імпульсним струмом / Р.В. п. Ганич // Фізика і хімія твердого тіла. - 2013. - Т. 14, № 1. – С. 167-172.

23. Ткаченко А. Деякі деталі взаємодії атомарного водню з поверхнями Si (100) / А. Ткаченко, С. Бабко, Г. Мікаєлян // ВІСНИК ЛЬВІВ. УН-ТУ Серія фізична. – 2008. – Вип. 41. – С.92-97

24. Shane S.F., Kolansky K.W., Zare R.N. Internal – state distribution of H₂ desorbed from mono – and dihydride species on Si(100) // J. Chem. Phys. 1992. Vol. 97. N 5. P. 3704–3710

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

ДОДАТКИ

					МРМТВАТАМ 23.22372.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		102