

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерії машин, споруд та технологій

(назва факультету)

Автомобілів

(повна назва кафедри)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Удосконалення технологічного процесу відновлення валу ротора турбокомпресора Garrett GT2049S для двигуна 2.0 TDI "DuraTorq" Ford Transit V з дослідженням технологічного процесу електроосадження покриттів

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МАм-61  
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Горбоніс Р.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Юцишин М.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Рогатинський Р.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Левкович М.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Зав. кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій  
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автомобілів  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«20» листопада 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

студенту Горбоносу Роману Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технологічного процесу відновлення валу ротора турбокомпресора Garrett GT2049S для двигуна 2.0 TDI "DuraTorq" Ford Transit V з дослідженням технологічного процесу електроосадження покриттів

Керівник роботи Рогатинський Роман Михайлович., д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «11» листопада 2023 року № 4/7-1071

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2023

3. Вихідні дані до роботи Характеристика валу ротора турбокомпресора Garrett GT2049S для двигуна 2.0 TDI "DuraTorq" Ford Transit V

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ. 4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

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

Методи відновлення зовнішніх циліндричних поверхонь – 1А1.

Види наплавленням – 1А1.

Принципова схема лазерної установки – 1А1.

Патрон цанговий – 1А1.

Установка для наплавлення – 2А1.

Привід обертача для накладання кільцевих швів – 1А1.

Головка для наплавлення – 1А1.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 20.11.2023р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	23.11.2023	
2	Технологічний розділ	29.11.2023	
3	Конструкторський розділ	04.12.2023	
4	Науково-дослідний розділ	06.12.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	13.12.2023	
6	Оформлення графічної частини	20.12.2023	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.12.2023	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Горбоніс Р.І.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рогатинський Р.М.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя**

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій  
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автомобілів  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«20» листопада 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

студенту Ющину Максиму Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технологічного процесу відновлення валу ротора турбокомпресора Garrett GT2049S для двигуна 2.0 TDI "DuraTorq" Ford Transit V з дослідженням технологічного процесу електроосадження покриттів

Керівник роботи Рогатинський Роман Михайлович., д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» листопада 2023 року № 4/7-1071

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2023

3. Вихідні дані до роботи Характеристика валу ротора турбокомпресора Garrett GT2049S для двигуна 2.0 TDI "DuraTorq" Ford Transit V

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ. 4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

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

Установка для наплавлення – 1А1.

Пристрій для провертання валів – 1А1.

Мікротвердість та концентрація добавок в покритті змінюються в залежності від параметрів процесу електролітичного осадження – 1А1. Кореляція між

мікротвердістю залізо-кобальтового покриття та умовами електролізу – 2А1.

Структурні різноманітності в електролітичному сплаві Fe-Co – 1А1.

Співставна стійкість до зносу покриттів Fe-Co – 1А1.

Зварювально-наплавочна дільниця – 1А1.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 20.11.2023р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	23.11.2023	
2	Технологічний розділ	29.11.2023	
3	Конструкторський розділ	04.12.2023	
4	Науково-дослідний розділ	06.12.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	13.12.2023	
6	Оформлення графічної частини	20.12.2023	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.12.2023	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ющипин М.І.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рогатинський Р.М.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Удосконалення технологічного процесу відновлення валу ротора турбокомпресора Garrett GT2049S для двигуна 2.0 TDI "DuraTorq" Ford Transit V з дослідженням технологічного процесу електроосадження покриттів».

Робота виконана на кафедрі автомобілів ТНТУ ім. І. Пулюя. Керівник кваліфікаційної роботи магістра д.т.н., професор Рогатинський Роман Михайлович.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів і 120 сторінок формату А4 та 16 аркушів формату А1 графічної частини 1 сторінка додатків.

Ключові слова: покращення, ефективність, надійність, тертя, довговічність.

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	9
<b>1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ</b> .....	11
1.1 Конфігурації з одинарним турбонагнітачем.....	11
1.2 Послідовне турбонаддування.....	17
1.3 Двоступеневі системи.....	19
1.4 Каталог компонентів, що вимагають ремонту.....	20
1.5 Інноваційні методи реставрації компонентів авто- та тракторної техніки..	23
1.6. Використання сплавних елементів у процесі відновлення за допомогою твердого заліза.....	27
<b>2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ</b> .....	34
2.1 Теплова обробка електрохімічного сплаву.....	34
2.2 Раціоналізація посилення електролітично осадженого заліза за допомогою кобальту.....	36
2.3 Методика нанесення покриття.....	50
2.4 Підхід до аналізу структури та фізико-механічних характеристик покриття.....	53
<b>3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ</b> .....	60
3.1 Оцінка продуктивності турбінних агрегатів.....	60
3.1.1 Потужність турбіни за ізентропічним процесом.....	61
3.1.2 Застосована потужність.....	63
3.1.3 Продуктивність турбіни.....	65
3.2 Вибір найбільш точного методу для оцінки ефективності.....	66
<b>4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ</b> .....	75
4.1 Мікротвердість та концентрація добавок в покритті змінюються в залежності від параметрів процесу електролітичного осадження.....	75
4.2 Розгляд результатів щодо адгезії покриття до базового металу.....	87
4.3 Аналіз стійкості до зношування електроосадженого залізо-кобальтового сплаву.....	88
4.5 Співставна стійкість до зносу покриттів Fe–Co.....	92
4.6 Тестування функціональності відновленого залізо-кобальтовим	

	8
покриттям вала ротора турбокомпресора було здійснено в лабораторії.....	98
4.7 Оперативне тестування функціональності реставрованого валу ротора турбокомпресора з залізо-кобальтовим покриттям.....	99
<b>5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>	<b>100</b>
5.1 Виробничий травматизм на автомобільному транспорті.....	100
5.2 Аварії з викидом або загрозою викиду небезпечних хімічних речовин.....	107
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>117</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ.....</b>	<b>118</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	



## ВСТУП

Магістерська робота виглядає цікавою та актуальною для автомобільної промисловості. Ось можливий широкий вступ до вашої теми:

У сучасному світі автомобільна промисловість є однією з найважливіших галузей економіки, що постійно розвивається та вдосконалюється. Одним із ключових аспектів безперервної роботи автотранспорту є двигуни внутрішнього згорання, які потребують постійного обслуговування та ремонту. В цьому контексті важливу роль відіграє ефективність та надійність турбокомпресорів, які використовуються для підвищення продуктивності двигунів.

Один із популярних двигунів, що використовуються в легкових та комерційних автомобілях, це двигун 2.0 TDI "DuraTorq" від Ford Transit V. Цей двигун відомий своєю надійністю та ефективністю, проте, як і будь-яка інша технічна система, він підлягає зносу та потребує регулярного обслуговування.

Один із ключових елементів, які впливають на ефективність та тривалість служби турбокомпресора в цьому двигуні, є стан валу ротора. Вал ротора є одним із найбільш навантажених деталей в турбокомпресорі, і його стан може впливати на продуктивність та надійність всього двигуна. Тому вдосконалення технологічного процесу відновлення валу ротора турбокомпресора стає важливою завданням для забезпечення надійності та продуктивності транспортних засобів.

Дослідженням технологічного процесу електроосадження покриттів можна підвищити ефективність відновлення валу ротора турбокомпресора, забезпечивши його надійність та довговічність. Електроосадження покриттів - це технологічний процес, який дозволяє наносити захисні покриття на металеві поверхні для зменшення тертя, підвищення міцності та захисту від корозії.

У цій магістерській роботі ми будемо розглядати такі аспекти:

Аналіз стану та причини пошкодження валу ротора турбокомпресора.

Вивчення сучасних методів відновлення валів роторів.

Дослідження процесу електроосадження покриттів для покращення характеристик відновленого валу.

Проведення експериментів та аналіз результатів для підтвердження ефективності технологічних покращень.

Розробка рекомендацій для впровадження покращеного технологічного процесу відновлення валів роторів турбокомпресорів.

Ця робота має велике практичне значення, оскільки впровадження покращень у технологічний процес відновлення валів роторів турбокомпресорів може сприяти підвищенню ефективності автомобільних двигунів, зменшенню витрат пального, та подовженню терміну служби автомобілів, що є важливими факторами в сучасній автомобільній індустрії.

# 1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Конфігурації з одинарним турбонагнітачем

Перехідна динаміка конфігурацій з одинарним турбонагнітачем може покращуватися завдяки вдосконаленням у сфері турбонагнітання. Проте, вдосконалення процесу руху повітря, включаючи регулювання кутів лопаток, є довготривалим завданням, що продовжується десятиліттями, тому значні покращення в короткостроковій перспективі неможливі.

Сучасні жорсткі турбіни, незалежно від наявності регулювального клапана, не здатні забезпечити компресор достатньою потужністю для потрібного рівня наддуву на малих оборотах та у перехідних режимах. Додатково, обмеженість діапазону руху центробіжного компресора стає критичним чинником.

Ясно, що з високими рівнями наддуву, діапазон стає вузьким. Це може призвести до ускладнень, якщо турбіна ефективно справляється з крайніми потоками, достатньо добре, щоб спровокувати компресор на заклинювання та нагнітання, особливо при використанні електричної підтримки на низьких обертах двигуна. Крім того, при необхідності досягнення вищих рівнів наддуву, стає ще складніше забезпечити прийнятну ширину діапазону використання.

У 1990 році компанія Porsche здійснила значне дослідження, протестувавши різні варіанти однотурбінних систем для свого чотирициліндрового мотора 944. Вони аналізували традиційну конструкцію з довгими впускними трактами та великими об'ємами, порівнюючи її з варіантом, де впускні тракти були значно скорочені (на 21-28% від оригіналу) та мали лише 30-38% об'єму оригінальної системи. До цього компактнішого колектора вони під'єднали звичайний турбонагнітач, модель з двома впусками але одним регулювальним клапаном, та турбонагнітач з регульованою геометрією (VGT). Для оцінювання динаміки переходів, вони провели експеримент, імітуючи розгін автомобіля на другій передачі з 2000 об/хв та 2 Bar ВМЕР, використовуючи  $\Delta$ об/хв до 15 Bar ВМЕР як показник ефективності. Використання регульованої геометрії збільшило реакцію турбонагнітача на

60%, двохідна система покращилася на 24%, а зменшення об'єму колектора дало покращення на 22%. Значне підвищення продуктивності турбіни з регульованою геометрією було зумовлено не лише можливістю зміни потоків, але й 60% зменшенням інерції ротора. Регульованість дозволила використати турбінне колесо з на 18% меншим діаметром. Проте, використання регульованої геометрії мало й недолік - зниження ефективності на високих оборотах, що впливало на максимальну потужність двигуна. Вони також встановили, що загальна продуктивність турбонагнітача має таку ж значимість, як і момент інерції ротора, у визначенні характеристик реакції.

Внаслідок застосування адаптивності, турбіни здатні значно ефективніше використовувати енергію вихлопних газів при номінальних потоках, не відповідних проектним параметрам. Це спричинило значне поліпшення ефективності, особливо у перехідних режимах роботи, і стало ключовим фактором прогресу дизельних легкових авто у минулому десятилітті. Широко обговорюються ці адаптивні турбіни.

Проте, найефективніший варіант, VGT (турбіна з регульованим дифузором і лопатками), поки що не застосовується у бензинових двигунах через вимоги до термостійкості.

На ілюстрації 1.1 видно невеликі направляючі лопатки та їх складний механізм регулювання.

Єдина адаптивна турбіна, що підходить для роботи при температурах бензинових двигунів, - це VST від 3K-Warner (ілюстрація 1.2), але вона менш ефективна, ніж VGT. Ілюстрація 1.3 демонструє час розгону для чотирьох різних турбінних рішень, які ще не були впроваджені в масове виробництво. Інша технологія, VNT, регулює ширину дифузора турбіни аналогічно зображеному на ілюстрації 1.4 змінному компресору, однак такий турбонагнітач для бензинових двигунів поки що не випускається.

Дослідження, вивчало методи скорочення часу реакції одиночного турбонагнітача. З використанням турбінного колеса з нітриду кремнію (SiN) вдалося знизити інерцію (самого колеса) на 64%, а з використанням сплаву TiAl — на 50% у порівнянні з традиційними колесами з інконелю, як показано на малюнку 1.4.

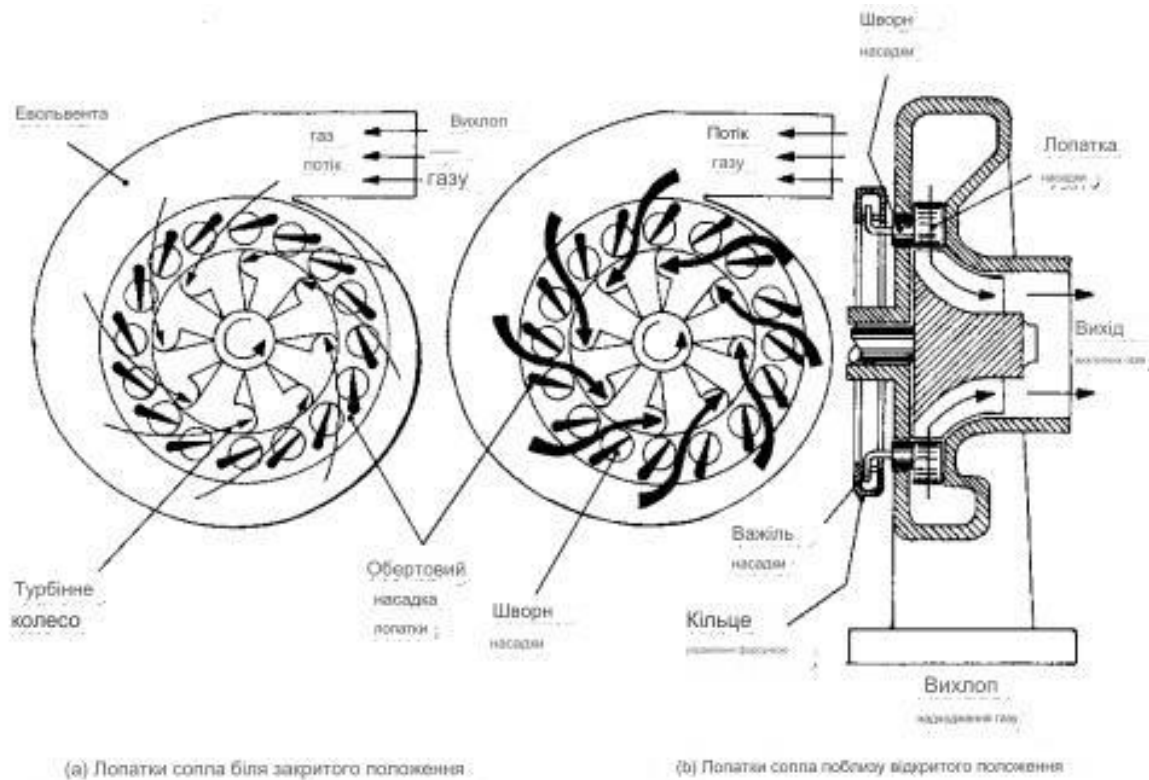


Рис. 1.1. Турбонагнітач VGT з регульованими направляючими лопатками.

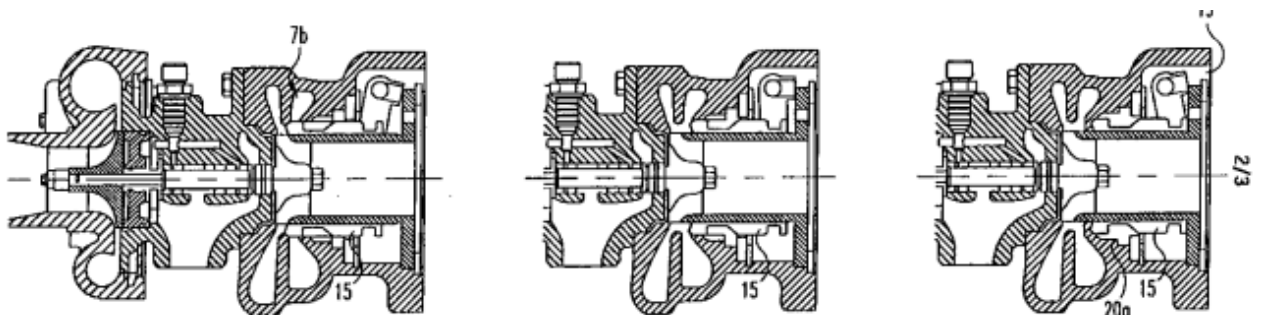


Рис. 1.2. Турбонагнітач VST, розроблений компанією 3K-Warner. Цей пристрій адаптує свою структуру, з'єднуючи або відокремлюючи додаткову спіраль (7b) з основним ротором через механізм з'єднання, що позначено як елемент 15 на малюнку. Він також оснащений додатковим каналом (20a), який функціонує як регульовальний клапан.

Ще одним шляхом підвищення швидкодії турбонагнітача є зменшення тертя в підшипниках. На низьких швидкостях, сила тертя може складати до третини усієї потужності турбіни. Заміна на кулькові підшипники може зменшити необхідну для подолання тертя потужність на 50%. Проте, не існує даних про те, наскільки це може скоротити час перехідної реакції. Виробники турбонагнітачів стверджують, що механічний ККД турбонагнітача складає 95-100% на всіх режимах роботи.

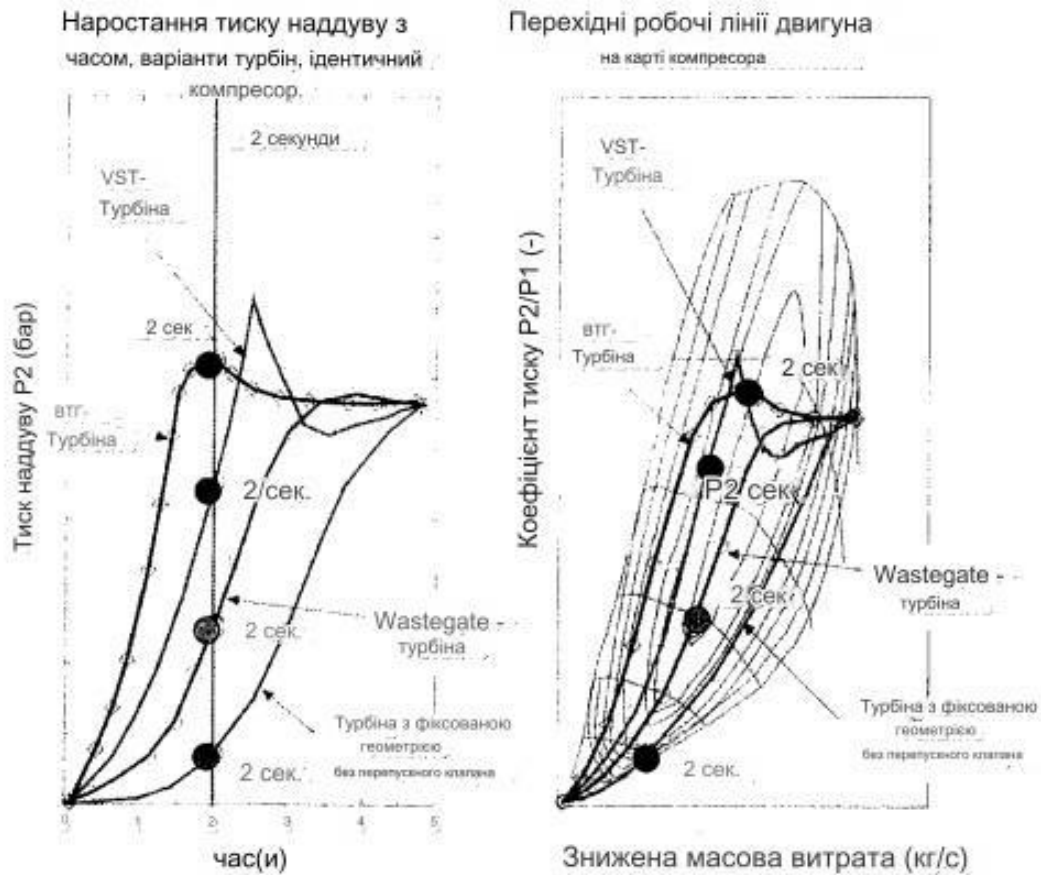


Рис. 1.3. Тиск наддуву після двох секунд зміни режимів для чотирьох відмінних конструкцій турбін.

Зі збільшенням потужності турбіни на малих обертах, що веде до знижених масових потоків, існує ризик переходу компресора в стан перекачування. Для запобігання цьому необхідне розширення характеристик компресора. Це можна здійснити за допомогою впускних отворів з обходом (або збільшенням ширини характеристик) та застосуванням змінних компресорів. Впускний отвір з обходом забезпечує повторний прохід частини потоку, що виходить з-за ротора, назад до його входу. В стані перекачування компресор реєструє більший потік, ніж фактичний, зміщуючи граничну лінію перекачування на карті вліво. При стані перекачування цей обхід діє як розширення вхідного отвору, дозволяючи додатковий потік. Деталі можна побачити на лівій частині ілюстрації 1.5.

Згідно з аналізом Concepts NREC, приблизно 30-50% енергії, витраченої компресором, є кінетичною на вході дифузора. Від 45 до 60% цієї кінетичної енергії потім перетворюється на статичний тиск у дифузорі.

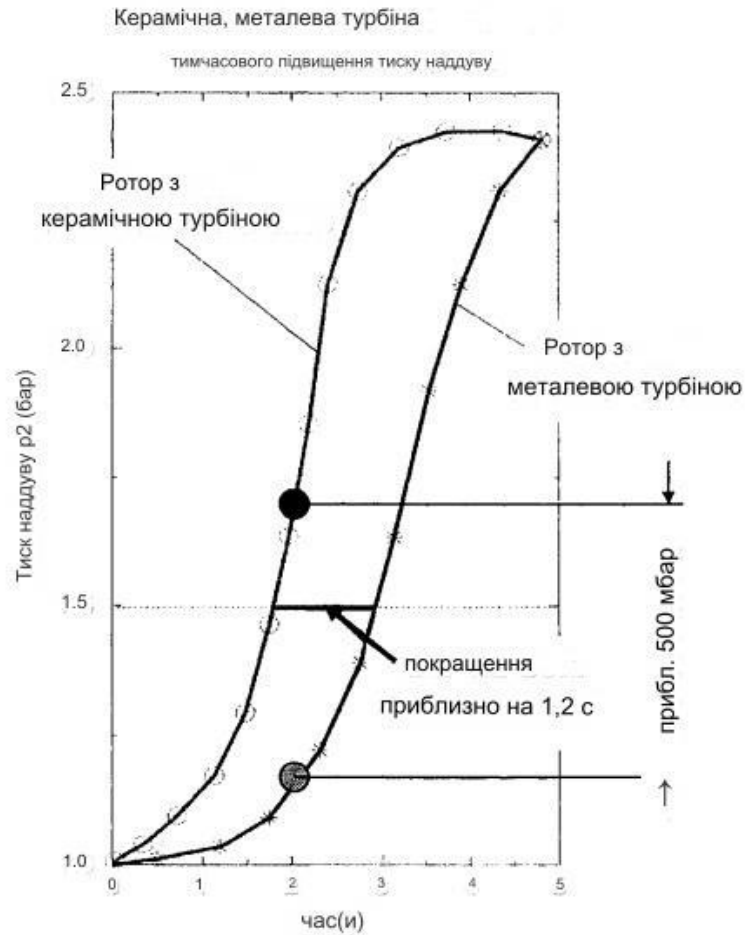


Рис. 1.4. поліпшення динаміки реакції завдяки скороченню інерційних характеристик турбінного диска.

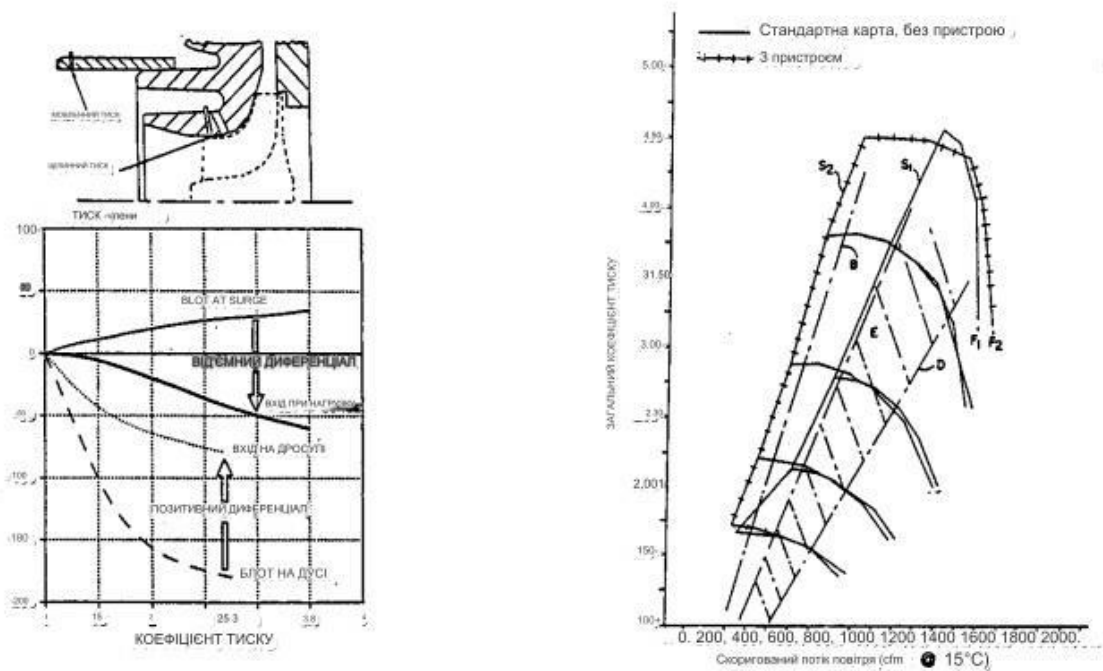


Рис. 1.5. рециркуляції повітря з канавки назад на вхід. У стані перекачування, коли тиск на вході вищий ніж у канавці, додаткове повітря надходить у компресор через канавку з входу.

Якщо дифузор оснащено направляючими лопатками, як у дифузори турбіни VGT, ефективність перетворення може досягати 55-75%, хоча і в більш обмеженому діапазоні потоків. Тому в автомобільних умовах направляючі лопатки повинні бути регульованими. Звуження дифузора (без лопаток) змістить граничну лінію перекачування вліво на карті, знизивши ризик перекачування. Однак це одночасно звужить загальні характеристики, тому розмір зазору дифузора має бути регульованим, як показано на малюнку 1.6.

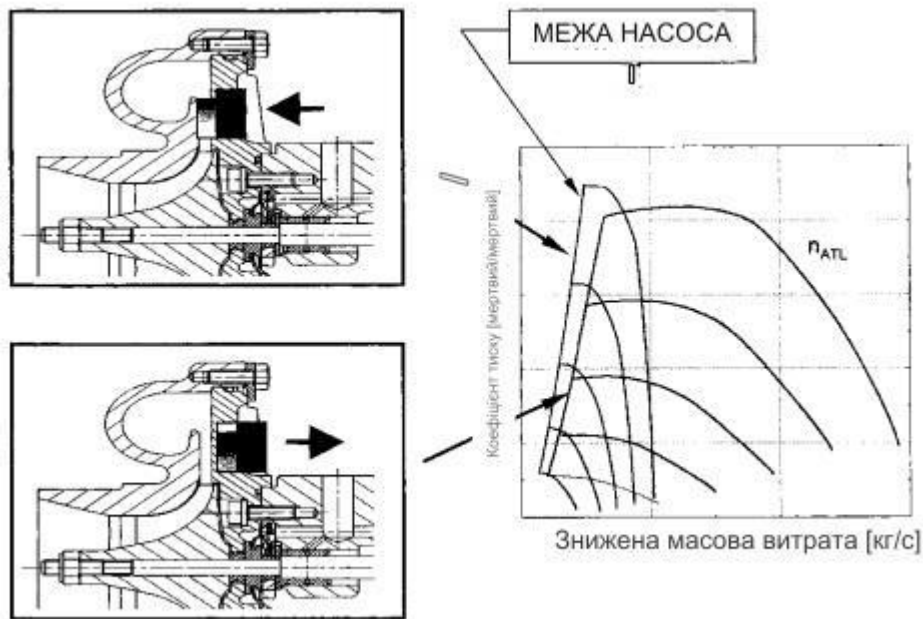


Рис. 1.6. Зменшення ширини дифузора спричиняє переміщення характеристичної карти вліво, але така зміна робить карту більш вузькою, тому ширина дифузора мусить бути регульована.

На вхідну частину компресора можливо монтаж направляючих лопатей. Згідно з даними на рис. 1.7, індукція співвірного потоку зміщує параметри роботи компресора вліво, забезпечуючи збільшення тиску наддуву для режимів із зниженими масовими потоками. В той же час, якщо лопатки створюють обертовий потік у протилежному напрямку, параметри зсуваються праворуч, що призводить до розширення зони перекачування для потоків із великою масою. Проте інтеграція направляючих лопаток на вході звужує характеристичну карту, тому вхідні лопатки повинні мати можливість зміни положення.



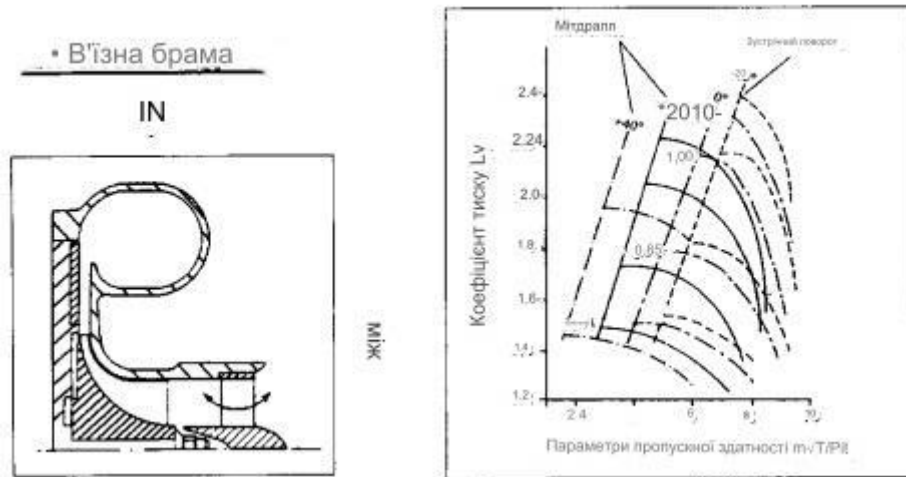


Рис. 1.7. Регульовані лопатки на впуску компресора. "Mitdrall" вказує на однаковий напрямок обертання з повітрям, в той час як "Gegendrall" відноситься до обертання в протилежну сторону.

Щоб збільшити пропускну здатність через компресор, можна регулювати ступінь відкриття клапана зниження тиску. Це призведе до зростання потоку через компресор при однаковому потоці до двигуна, дозволяючи використовувати більш високий тиск наддуву без загрози переходу в стан перекачування. Відповідно до досліджень Fieweger та ін., таке перенаправлення повітря може бути більш ефективним, ніж використання змінної геометрії в компресорі. Але це також зумовлює потребу в більшій потужності для транспортування збільшеного масового потоку, що веде до підвищення турбінної потужності та вищого протитиску.

Таким чином, можна дійти висновку, що для виробництва турбін з достатньою ефективністю, які б могли приводити компресор до потрібних параметрів наддуву в усьому робочому діапазоні, компресор мабуть мусив би мати здатність до зміни геометрії.

## 1.2 Послідовне турбонаддування

Більш кардинальним варіантом змінної геометрії є впровадження послідовного турбонаддування. На відміну від адаптації одного нагнітача, тут модифікується кількість нагнітачів. Послідовне турбонаддування використовується для розширення спектру потоків, необхідних для заданого

тиску наддуву. Оскільки все одно використовується лише одна стадія компресії, це не обов'язково збільшує тиск наддуву.

Випробування послідовних систем, опублікованих у доповіді SAE у 1991 році в рамках програми двигунів на метанолі. Двигун був шестициліндровим, і метою було досягти тиску наддуву трохи менше ніж 2 Bar abs. За їхніми даними, система з паралельними турбонагнітачами має приблизно на 30% менший інерційний момент порівняно з одинарним турбонагнітачем з аналогічними характеристиками максимального потоку, тому мала б перевагу з точки зору швидкодії. Для подальшого підвищення швидкості реакції було досліджено послідовні системи. Вони прийшли до висновку, що система послідовного типу є переважною над паралельно-послідовною системою через складнощі з плавним переходом від роботи одного турбонагнітача до двох.

Проте, система послідовного типу має вузький діапазон потоків, оскільки всі масові потоки мають проходити через два компресори. У той же час, двоступенева компресія дозволяє досягти вищих тисків наддуву з прийнятним діапазоном потоків. Мал. 1.8 відображає систему послідовного турбонаддування.

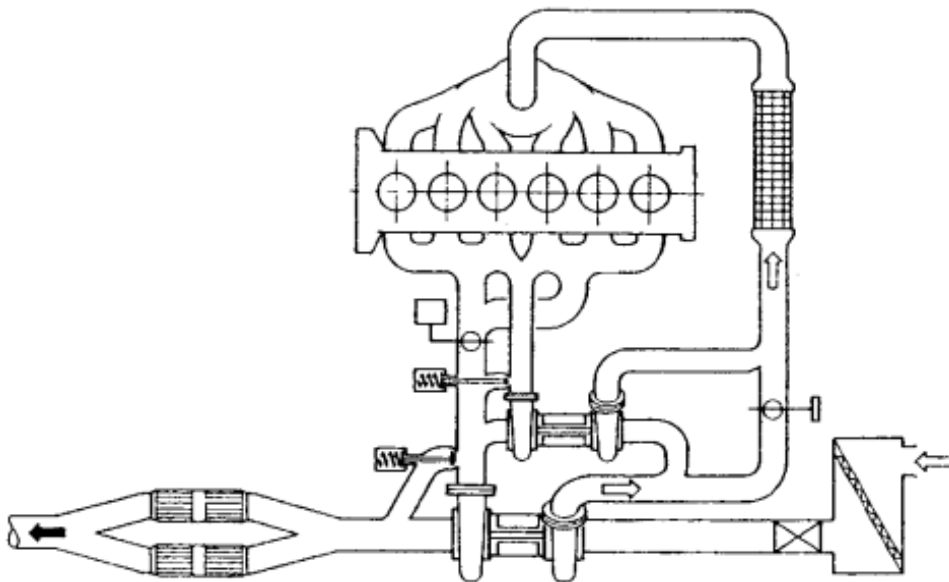


Рис. 1.8. Послідовно-паралельні системи. Система складається з турбонагнітачів низького (LP) та високого (HP) тиску, де LP турбіна може бути відключена за допомогою дросельної заслінки в вихлопному колекторі. Інша дросельна заслінка на стороні компресора дозволяє перейти від послідовної роботи до роботи тільки HP компресора.

Альтернативний підхід полягає у збільшенні об'єму потоку, що проходить через компресор, шляхом регулювання відкриття клапана для зниження тиску. Це збільшить об'єм потоку через компресор за рівних умов подачі до двигуна, дозволяючи підвищити тиск наддуву без небезпеки заклинювання. Таке перенаправлення може бути більш продуктивним, ніж використання компресорів із змінною геометрією. Проте, для переміщення збільшеного об'єму потоку необхідно витратити більше енергії компресора, що в свою чергу вимагає більшої потужності турбіни та призводить до підвищення протитиску.

Можливий висновок полягає в тому, що для виробництва турбін з достатньою продуктивністю, щоб керувати компресором та досягати необхідного тиску наддуву на всіх етапах роботи, компресор, імовірно, вимагатиме змінної геометрії.

### **1.3 Двоступеневі системи**

Не виявлено досліджень, що стосуються двоступеневого турбонаддуву бензинових двигунів. Зазвичай ця технологія застосовується для тисків наддуву, які значно перевищують 2 Bar abs, однак компанія ЗК представила двоступеневу систему для тиску наддуву у 3 bar abs для дизельних двигунів, як це описано у Pflüger та ін. Ілюстрація 1.9 показує розподіл відношення тиску між компресорами HP та LP. Система складається з двох турбонагнітачів нерівних розмірів із регульовальним клапаном на стадії HP та міжстадійним охолодженням. Система розроблена для 12-літрового дизельного двигуна, де розміри HP та LP стадій складають 85% та 112% від розміру одиночного турбо, налаштованого для такого ж двигуна. Перехідні режими не випробовували, але у тексті зазначається, що двоступенева система перевершує послідовну турбо систему в перехідних режимах.

На нижньому кінці швидкісного діапазону точка досягнення тиску наддуву 2 Bar abs зміщена з 1000 об/хв для одиночної турбо системи до 700 об/хв для двоступеневої системи.

У 2004 році BMW представила нову модель 535d із двоступеневою системою наддуву, розробленою ЗК. Система аналогічна до тієї, що використовується у вантажних автомобілях, з додаванням регулювального клапану для стадії LP. Документація системи та двигуна виглядає обнадійливо, з вражаючими характеристиками. ЗК детально роз'яснили відмінності між двома системами у вельми пізнавальній роботі на 9. Aufladetechnische Konferenz у Дрездені. Як літературний джерело з обмежень конструкції радіальних компресорів, вона надзвичайно інформативна. Вони приходять до висновку, що для одночасного збільшення тиску та робочого діапазону з збереженням або підвищенням ефективності одноступеневий компресор мусить бути обладнаний регульованими направляючими лопатками на вході і в дифузорі, або ж повинна бути використана двоступенева система. Оскільки двоступенева система включає перевірені технології, вважається, що це більш надійний напрямок.

Santemi також описав подвійну турбінну, послідовну систему, де компресори функціонують у двоступеневому (послідовному) режимі для низькошвидкісного діапазону двигуна і переключаються на паралельний режим для вищих швидкостей. Він стверджує, що при однакових розмірах турбонагнітачів карти компресорів ідеально підходять для цього режиму роботи. Турбіни працюють паралельно. Однак, детальні характеристики системи не були представлені.

#### **1.4 Каталог компонентів, що вимагають ремонту**

Для раціонального вибору методів ремонту необхідно знати рівень зносу компонентів автотракторної техніки під час їх використання. Відзначається, що товщина металевого шару, який аплікується на компоненти, зумовлюється розміром зносу та необхідністю додаткового оброблення. З іншого боку, використання властивостей металізації, які впливають на термін служби компонентів, у значній мірі залежить від товщини нанесеного шару. Фінансова ефективність використаних методів ремонту безпосередньо пов'язана з товщиною шарів покриття, оскільки вона впливає на часові витрати на нанесення покриття, споживання матеріалів тощо.

Таблиця 1.1 Перелік компонентів автотракторної техніки, що потребують ремонту.

Найменування деталі	Значення зносу, мм
Колінчастий вал	0,14 ... 0,2
Розподільний вал	0,20 ... 0,25
Вал ведучий коробки передач	0,02...0,1
Поворотний кулак	0,04 ... 0,06
Шворень	0,02...0,04
Труба півосі	0,22..0,32
Хрестовина диференціалу	0,03 ... 0,1
Шатун	0,05 ... 0,2
Важіль верхній лівого поворотного кулака	0,04 ... 0,06
Деталі паливного насосу і карбюратора	0,06 ... 0,1
Впускний та випускний клапан	0,20 ... 0,22
Коромисло	0,1...0,3
Тягач	0,05 ... 0,08
Вал ротора турбокомпресора	0,3...0,35

Сьогодні існує проблематика ремонту роторного валу турбонагнітача для вітчизняних та імпорتنих автотракторних машин, оскільки найпоширенішим методом реабілітації цього компонента є його заміна на новий. Дизайни імпорتنих і вітчизняних турбонагнітачів (ТН) фактично аналогічні. Присутні варіації в конфігурації окремих частин і розмірах складових, через їхнє призначення для різних типів двигунів. У різних варіантах ТН одного розміру переважно відрізняється лише корпус турбіни (підключення вихлопних газів і кріплення до двигуна), рідше - корпус компресора, колеса турбіни та компресора, а також кут повороту корпусів компресора, турбіни та центрального корпусу щодо одне одного. Турбонагнітач складається з трьох основних частин: корпусу компресора (компресорного равлика), центрального корпусу (картриджа), який є підшипниковим вузлом, і корпусу турбіни (турбінного равлика). Картридж включає в себе вал ротора з турбінним і компресорними колесами. Обертання відбувається у підшипнику ковзання стаціонарного корпусу, який забезпечує подачу мастильного матеріалу до

тертьового вузла валу. Загальний зовнішній вигляд турбонагнітача наведено на рисунку 1.1.



Рис.1.9. Турбокомпресор Garrett GT2049S для двигуна 2.0 TDI "DuraTorq"  
Ford Transit V :

1 - корпус компресора; 2 – середній корпус; 3 – корпус турбіни

Під час експлуатації турбонагнітачі піддаються інтенсивним температурним та циклічним навантаженням. Максимальна швидкість обертання валу ротора сучасних турбонагнітачів досягає 60 000 об/хв. Вихлопні гази з колектора можуть мати температуру до 700 °С, в той час як температура компонентів корпусу з компресорної сторони коливається від 90 до 160 °С, а з турбінної сторони - від 670 до 720 °С. Підшипникова втулка витримує навантаження при обертанні валу ротора, виконуючи функції як осьового, так і радіального підшипника. Постачання масла під тиском з системи змащування двигуна необхідне для змащування підшипників. Аналізуючи джерела інформації про поломки турбонагнітачів, було виявлено, що понад 90% неполадок виникають через пошкодження картриджа, а саме через надмірний знос у взаємодії валу ротора з підшипником. Заміна цієї несправної частини на нову коштує близько 70-80% від вартості турбонагнітача і часто неможлива через відсутність на ринку, оскільки виробники, особливо закордонні, продають свою продукцію лише у зібраному вигляді. На ринку запчастин для турбонагнітачів представлений вибір аналогових компонентів для оригінальних турбонагнітачів, таких як картриджі та їх окремі частини - вал ротора і

підшипник ковзання. Проте, з-поміж них найбільшим попитом користується підшипник ковзання через його доступність за ціною. Вал ротора, який складніше виготовляти та має значущість у роботі турбонагнітача, коштує близько 40-50% від вартості турбонагнітача, і виробник цього компонента не надає гарантії на термін служби. Знос валу ротора турбонагнітача до його повного виходу з ладу складає від 0,3 до 0,35 мм.



Рис. 1.2. Зовнішній вигляд роторного валу турбонагнітача від Garrett, модель GT2049S, призначений для мотору 2.0 TDI DuraTorq, що встановлюється в автомобілі Ford Transit V.

### **1.5 Інноваційні методи реставрації компонентів авто- та тракторної техніки**

Новітня техніка авто- та тракторобудування, що вводиться в експлуатацію, вимагає високоякісного обслуговування та ремонту, через що виникає нагальна потреба впровадження передових методів реставрації компонентів у ремонтних підприємствах. Інноваційні методи реставрації повинні бути максимально ефективними та гарантувати тривалий термін служби відновлених компонентів.

Для адекватного реагування на ці виклики у секторі виробництва автомобілів та тракторів, сервісний центр має бути оснащений згідно з найновішими стандартами машинобудівної індустрії.

Ефективність ремонту авто- та тракторної техніки та продовження їх експлуатаційного періоду значною мірою визначається методами, якими проводиться реставрація зношених або ушкоджених компонентів.

Компоненти автомобільної та тракторної техніки, що потребують

ремонту, часто характеризуються широким спектром пошкоджень. Ці пошкодження можуть виникати під час використання обладнання через конструкційні слабкі місця окремих елементів, невідповідності технічним вимогам під час їх виробництва, або внаслідок недотримання норм технічної експлуатації транспортних засобів і тракторів, а також звичайного зносу.

Сучасне обладнання автомобільної та тракторної техніки характеризується вдосконаленою конструкцією, а її виробництво вважається одним з лідерів у сфері машинобудування. Таким чином, дефекти компонентів з причин, пов'язаних із конструкцією чи виробничим процесом наприклад, через невірний вибір матеріалу або посадкових місць з'єднань, неякісну механічну чи термічну обробку трапляються вкрай рідко. Умови використання техніки, її технічне обслуговування та ремонт можуть впливати як позитивно, сповільнюючи процес виникнення дефектів через нормальний знос, так і негативно, спричиняючи прискорений знос та різні ушкодження компонентів.

Ушкодження компонентів часто виявляються у вигляді складних комбінацій зносу та різноманітних пошкоджень. Тема експлуатаційних та ремонтних вимог до автотракторної техніки неодноразово обговорювалася у фаховій літературі та в працях таких авторів, як С.П. Баженов, В.М. Власов та Є.С. Кузнєцов. Типові дефекти, які зустрічаються в компонентах, можуть бути класифіковані як зношування, несправності через аварії та газова корозія. Переважно ці проблеми пов'язані з нормальним зносом компонентів.

Щоб повністю відновити функціональність зношених компонентів, потрібно відновити їхні первинні розміри, геометрію та характеристики поверхні, особливо твердість, оскільки внутрішні властивості зазвичай зберігаються, за винятком рідкісних випадків появи втомних тріщин внаслідок зносу. У таких ситуаціях можливість заміни компонентів та точність з'єднань повністю відновлюються.

В практичному застосуванні також використовується методика лише відновлення геометричних параметрів компонентів шляхом приведення їх до розмірів, більших або менших за початкові. Хоча точність з'єднань при цьому відновлюється, можливість заміни деталей зберігається обмежено, у межах встановленого стандартного розміру ремонту, а у випадку використання вільно



визначених розмірів ця можливість заміни повністю втрачається. Приведення компонентів до ремонтного розміру та їх правильної геометричної форми здійснюється за допомогою механічної обробки.

У цьому контексті особливо важливим є відновлення зношених деталей автомобільної та тракторної техніки за допомогою різних методів. До методів відновлення належать: ремонт деталей шляхом пластичного деформування, ремонт за допомогою наплавлення металевих шарів, наплавлення, ремонт газотермічним напиленням, відновлення за допомогою гальванічного покриття (хромування, залізнення). Всі ці методи, хоча й не є ідентичними, застосовуються у ремонтному виробництві в залежності від його масштабу та обладнання. Розглянемо детальніше суть кожного з них.

Метод ремонту через пластичне деформування здобув широку популярність, але має значні обмеження та не відповідає передовим підходам, які вимагаються для прогресивного розвитку ремонтного сектору. Серед головних недоліків цієї техніки варто зазначити зміну фізико-механічних характеристик та утворення тріщин на відновлюваних компонентах.

Нанесення металевих шарів методом зварювання використовується для ліквідації різних тріщин, з'єднання відщеплених частин та зламів у чавунних литих компонентах, а також широко застосовується при ремонті шасі, кабін та крил автотранспорту. Придатність відновлення компонентів за цією технікою та сфера застосування різноманітних видів зварювання визначається рівнем ушкоджень та функціональним призначенням деталі. У дослідженнях А.А. Зуєва описана технологія відновлення кривошипних валів шляхом призварювання розбірної ремонтної втулки на шийку з дотриманням щадних режимів.

Для відтворення первісних розмірів та форми компонентів замість методу наварювання часто використовується наплавка, яка входить до категорії металічних покриттів. Ця техніка дозволяє відновити зношені деталі до їхніх початкових розмірів, забезпечуючи їхню можливість заміни. Це становить значну перевагу у порівнянні з іншими методами. У наукових працях Н.М. Ожегова обговорюються способи збільшення довговічності робочих елементів ґрунтообробної техніки за допомогою створення зміцнювального шару

методом наплавки. Методики відновлення компонентів із застосуванням металічних покриттів також широко використовуються за кордоном.

На сьогодні однією з ключових задач є ремонт пари поршень-гільза у відремонтованих моторах. Варіанти вирішення цього питання пропонує В.Я. Сковородін у своїх наукових роботах. Він досліджує використання нових матеріалів з низьким коефіцієнтом тертя для реставрації зношених пар поршень-гільза.

Техніка газотермічного напилення базується на розпиленні покриття на ремонтований компонент за допомогою газового потоку порошку, нагрітого до текучого стану. Цей метод виявляється малоефективним для реставрації малих деталей через низьку ефективність використання матеріалу, який наноситься.

Електролітично нанесений хром характеризується високими фізико-механічними характеристиками. Процес відновлення деталей за допомогою хромування найбільш детально описаний Д.В. Колмиковим. Проте ця методика має кілька значних недоліків: зниження втомної міцності до 27%, дуже низька ефективність використання металу при струмі 13–15%, та погане зчеплення відновленої поверхні з мінеральним маслом.

На сучасному етапі найбільш прогресивним методом ремонту компонентів є електролітичне нанесення заліза та його сплавів, що дозволяє ефективно відновлювати велику кількість зношених дорогих деталей, забезпечуючи їх можливість заміни. Серед переваг цієї техніки варто відзначити високу стійкість до зносу, велику швидкість нанесення 1-1,2 мм/год, високу ефективність використання металу від струму 75-95%, можливість створення покриття товщиною в 1 мм і більше, низьку вартість компонентів електроліту та можливість їх виробництва локально.

Таким чином, в даний час найбільш обіцяючим методом ремонту деталей автомобільної та тракторної техніки вважається залізнення. Ця техніка займає значне місце в ремонтному виробництві та очікується, що відіграватиме важливу роль у майбутньому, особливо у централізованих ремонтних процесах, а також виявляється підходящою для відновлення широкого спектру деталей, перелічених у таблиці 1.1.

## 1.6. Використання сплавних елементів у процесі відновлення за допомогою твердого заліза

Чисте електролітичне залізо вперше було отримано Б.С. Якобі та Є.І. Клейном. З цього приводу Б.С. Якобі висловився: досягнення є ексклюзивним для нашої країни і не може бути заперечене іншими. Відкриття того часу вважаються проривом, який кардинально змінив розвиток технології електролітичного осадження металів.

Б.С. Якобі та Є.І. Клейн були піонерами у вивченні характеристик заліза, отриманого з сірчаноокислих розчинів, і пізніше вони запропонували наступний склад електроліту та параметри для електролітичного осадження: феросульфат –  $200 \text{ кг/м}^3$ , сульфат магнію –  $50 \text{ кг/м}^3$ , щільність струму на катоді  $0,1\text{--}0,3 \text{ А/дм}^2$ , температура електроліту  $20\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Того ж року Б.С. Якобі та Є.І. Клейн ефективно використовували сірчаноокислий розчин для створення електролітичного залізного покриття на мідних кліше та друкованих платах, щоб підвищити їх зносостійкість.

Дослідження Б.С. Якобі та Є.І. Клейна стали початком широкого застосування в друкарській галузі так званих не нагріваних електролітів, у яких осадження заліза проводиться при кімнатній температурі і з низькою щільністю струму. Через відносно високу твердість отриманих відкладень заліза, цей процес в літературі вітчизняних та іноземних дослідників отримав назву осадження.

Професор Р.Е. Ленц провів аналіз властивостей заліза, осадженого методом Є.І. Клейна, і представив свої висновки у дослідженні «Абсорбція газів електролітичним залізом». Це дослідження допомогло зрозуміти, що електролітичні відкладення заліза містять водень, що впливає на фізико-механічні характеристики покриття, зокрема, підвищуючи твердість та крихкість. Висновки Ленца згодом отримали підтвердження у роботах Ф. Габера. Відтоді залізнення стало поширеним методом у промисловості для підвищення міцності поверхонь деталей, особливо вироблених з вуглецевої сталі. Завдяки розвитку ремонтного виробництва, використання цієї техніки для відновлення різних машин і агрегатів стало розповсюдженим та затребуваним.

Дослідження процесу нанесення заліза з холодних електролітів зайняло значне місце у науковій літературі (роботи Н. Лангбейна, К. Біндера, В. Бертольда та інших), де для графічної промисловості було розроблено широкий спектр холодних електролітів для створення міцних, товстих і тонких залізних відкладень. У своїх дослідженнях Ф. Фестер та А. Кофетті дослідили зв'язок між потенціалом осадження заліза та катодною щільністю струму.

У міру розширення різних секторів промисловості з'явилася потреба у великих обсягах чистого заліза з унікальними характеристиками магнітними, електричними, технічними. У цьому контексті перед фахівцями гальванотехніки постало завдання виробництва м'якого електролітичного заліза будь-якої товщини з високою ефективністю. Як відповідь на це були використані гарячі електроліти з температурою 95-105 °С. Це призвело до появи нової галузі промисловості під час Подальший розвиток цього напрямку ґрунтувався виключно на використанні хлоридних електролітів. Інші типи електролітів сульфатні, лужні тощо залишалися на рівні експериментів і не набули промислового застосування.

Таким чином, приходиться констатувати, що у практиці створення електролітичних залізних покриттів використовувались два типи електролітів: не нагрівані та нагрівані. Використання першого типу електролітів відбувалося без підігріву. Основна проблема при їх використанні полягала в обмеженій щільності струму (в межах 0,1 до 1,0 А/дм<sup>2</sup>). Внаслідок низької швидкості осадження заліза при малих щільностях катодного струму, не нагрівані електроліти не знайшли широкого застосування в процесах електролітичного відновлення машинних деталей.

Задля збільшення ефективності процесу електролітичного нанесення покриттів та поліпшення якості отримуваних відкладень, подальші експерименти з електролітичного формування покриттів здійснювалися за допомогою нагріваних електролітів.

Академік Ю.М. Петров дослідив ефект добавок у електроліті та параметри електролізу на фізико-механічні характеристики електролітичних покриттів. Він довів, що зі стандартних нагріваних хлоридних розчинів можна отримати покриття з механічною міцністю в діапазоні 200–240 кг/мм<sup>2</sup>.

Низька міцність покриттів, отриманих із хлоридних розчинів за рекомендованими параметрами електролізу, засвідчила необхідність виконання ряду досліджень з підвищення міцності залізних покриттів. У другій частині своєї дослідницької роботи Ю.М. Петров зосередився на ефектах від використання органічних добавок на міцність покриттів і запропонував два нових компоненти для хлоридного розчину, які дозволяють отримувати покриття із твердістю 3200 - 7000 МПа.

Варто відзначити також дослідження В.П. Ревякіна, І.К. Мінькова та А.П. Смєлова, які досліджували формування більш міцних катодних відкладень із хлоридних розчинів, що містять солі марганцю, нікелю, кобальту та хрому. Їхні результати вказують на можливість створення сплавів заліза з кобальтом, нікелем та хромом, які демонструють підвищені на 20 - 40 % механічні характеристики порівняно із звичайними залізними відкладеннями.

У подальшому, вітчизняні та іноземні науковці запропонували сульфатні електроліти, у склад яких включено органічні та неорганічні добавки для покращення фізико-механічних характеристик покриття.

Наприклад, Б.Є. Кожаків та К.С. Ібіщев проводили роботи з електролітичного нанесення покриттів із розчину, що містить такі компоненти, кг/м<sup>3</sup>: феросульфат – 200 - 250; магній сульфат – 150 – 180; борна кислота – 25 – 30; фторид натрію – 1 - 2; сульфатна кислота - 1,5 - 21; тінаніл амоній сульфат – 4 – 5. Одна з переваг цього розчину полягала у збільшеній опірності до окислення при зберіганні на повітрі. Електролітичні покриття, створені за допомогою цього розчину, характеризуються високою мікротвердістю та стійкістю до зносу.

У публікаціях та патентах Н.Т. Кудрявцева та Л.А. Яковлевої розглядалися оптимальні умови для створення міцних, товстих залізних покриттів із підвищеною міцністю з сульфатних розчинів заліза зі стабілізаторами  $Al_2(SO_4)_3$  та  $K_2SO_4$ , що захищають електроліт від окислення. Експериментально було визначено ідеальний склад електролітів для отримання міцних (250 - 600 кг/мм<sup>2</sup>) і зносостійких відкладень заліза за температури електроліту від 20 до 70 ° С та щільності струму від 3 до 15 А/дм<sup>2</sup>.

Отже, розчини для електролітичного залізнення поділяються на дві

головні категорії: кислі розчини з гідратованими іонами заліза та лужні розчини, які містять залізо у тривалентній формі та різноманітні комплексні з'єднання. Для створення електролітичних залізних покриттів були розроблені хлоридні, сульфатні, фторборатні, борфтористо-водневі, фенолсульфонові, кремнефтористі та органічні електроліти, серед інших.

Н.Т. Кудрявцев та М.М. Мельникова досліджували процеси формування міцних залізних відкладень із борфтористо-водневих розчинів. На основі їхніх досліджень були розроблені формули борфтористо-водневих електролітів борфтористо-водневе залізо і борна кислота, ефективних при нижчих температурах 20 - 40 ° С і характеризуються підвищеною продуктивністю процесу та кращою якістю отриманих покриттів.

Л.А. Яковлева та Ш.І. Чалаганідзе розробили фенолсульфоновий розчин для створення міцних відкладень заліза. Відповідно до результатів їхніх досліджень, залізні відкладення із цього розчину мають високу адгезію до основи і відзначаються чудовими механічними характеристиками ( $H = 400 - 790 \text{ кг/мм}^2$  та  $B_v = 41 - 57 \text{ кг/мм}^2$ ) при максимальній товщині до 0,3 мм. Процес нанесення заліза характеризується високою продуктивністю за струмом в діапазоні від 72 до 99,8 % і проводиться при щільності струму до 10-12 А/дм<sup>2</sup>.

Кислі електроліти, особливо хлоридні, здобули значну популярність у сфері ремонтного виробництва завдяки їхнім основним перевагам: простоті хімічного складу, високій швидкості формування покриття (можливості проведення електролізу при великій щільності струму), відмінній електропровідності, а також здатності формувати покриття потрібної товщини. Існують три варіанти хлоридних електролітів: висококонцентровані з підвищеним вмістом хлориду заліза (500 – 700 кг/м<sup>3</sup>), середньоконцентровані з середнім вмістом хлориду заліза (400 – 450 кг/м<sup>3</sup>) та малоконцентровані з низьким вмістом хлориду заліза (200 – 250 кг/м<sup>3</sup>).

Для ремонтного заводу, який використовує цей тип електроліту, висуваються наступні ключові вимоги:

Створення на ремонтних деталях товстих електролітичних покриттів з необхідними міцнісними характеристиками;

Точне управління процесом електролізу для формування електролітичних

покриттів згідно з задалегідь встановленим режимом;

Висока ефективність процесу створення електролітичних покриттів;

Надійність і простота в складі електроліту;

Доступність і економічність матеріалів для приготування електроліту;

Простота моніторингу та регулювання електроліту.

Обговорюючи гарячі хлоридні розчини, важливо звернути увагу на дослідження М.П. Мілкова. Він керував вивченням впливу компонентів електроліту та параметрів процесу електроосадження на фізико-механічні властивості формованих покриттів. Також він розробив методику попередньої обробки поверхні для забезпечення ефективної адгезії електролітичних покриттів. В результаті було визначено оптимальні умови електроосадження температура розчину 60 – 80 °С, катодна щільність струму 20 А/дм<sup>2</sup> і склад розчину хлорид заліза 200 кг/м<sup>3</sup>, соляна кислота 0,6–0,8 кг/м<sup>3</sup>, а також технологію підготовки деталей і нанесення покриттів. Розроблений ним склад розчину дозволяє формувати щільні, дрібнозернисті відкладення з високими механічними характеристиками (твердість покриттів до 4500-6300 МПа) та швидкістю осаження 0,4-0,5 мм/год.

За інформацією джерел, електролітичне залізо, осажене з хлоридних розчинів, має мікротвердість в межах 4500 - 6500 МПа. В сучасному світі, з розширенням сфери використання машин та обладнання, виникає потреба в їх адаптації до все більш важких та складних умов експлуатації. Відомо, що компоненти машинобудування на 75 – 80% утворені із вузлів тертя, а їх ефективна робота критично важлива для функціонування машин. Проблеми з відповідністю стандартних конструкційних матеріалів вимогам нових технологій та техніки стають дедалі очевиднішими. Особливі труднощі виникають при виборі та застосуванні триботехнічних матеріалів для швидкісних вузлів тертя, центрифуг, ущільнень, кріплень у важковантажному автотранспорті та гусеничному транспорті, зубчастих передачах, ріжучих інструментах для обробки твердих сплавів та кераміки. Сучасні умови експлуатації вузлів тертя часто включають високі контактні навантаження у зонах тертя та значні швидкості руху тертьових поверхонь.

Отже, ключовими вимогами до відновлених компонентів є їх

довговічність та здатність витримувати високі температури та корозійно-активні середовища. Це завдання можна вирішити двома методами:

Підсилення міцності електролітичних покриттів шляхом термічної обробки.

Покращення фізичних та механічних характеристик гальванічних покриттів шляхом додавання різних легуючих компонентів до складу електроліту.

Перша методика для забезпечення сплавам конкретних характеристик і будови полягає у використанні процесу нагрівання. Існують три різновиди такої процедури: обробка з хімічним та тепловим впливом, метод застосування тепла та підхід, що комбінує тепло і механічні дії.

В процедурі теплової обробки металів та їх сплавів відбувається перетворення їх внутрішнього будови через процеси нагріву, утримання температури та пізніше охолодження, що забезпечує потрібні фізико-механічні характеристики. Основні методи цієї обробки включають процеси анілінгу, загартовування і відпускання.

Хімічно-теплова обробка, включає збагачення поверхні металу різними елементами для збільшення його стійкості до зносу, підвищення твердості та корозійної стійкості. Цей метод вимагає високої температури та довготривалого часу витримки. Ключові техніки хімічно-теплової обробки включають карбюризацію збагачення вуглецем, нітрування збагачення азотом, карбонітрування (одночасне збагачення вуглецем та азотом) та дифузійну металізацію або поверхневе додавання легуючих елементів. Залежно від елемента, який використовується для збагачення зовнішнього шару, цей метод поділяється на хромування збагачення хромом, алюмінізацію збагачення алюмінієм, силіцидування збагачення кремнієм.

Термомеханічне формування є процедурою для металів, що сприяє поліпшенню їх механічних характеристик порівняно зі стандартними методами загартовування чи відпускання. Цей процес включає в себе комбінацію еластичної деформації з тепловою обробкою.

Отже, наявні техніки теплової обробки забезпечують істотне зміцнення зовнішнього шару, підвищуючи стійкість до зношування та витривалість



сталевих компонентів під впливом втоми, оскільки вони викликають напруження стиску у зовнішніх шарах. Ясно, що використання цих методів теплової обробки може кардинально покращити стійкість до зношування та інші функціональні характеристики електролітичних покриттів, які базуються на залізі.

Посилення покриттів за допомогою теплових методів досліджували вчені, такі як В.І. Андрюшечкін, В.І. Архарова, Ю.М. Грибоедов, А. Брамлей, Ф. Гальміша та інші. Їх дослідницька робота була зосереджена на покращенні механічних характеристик електрохімічних залізних покриттів (адгезія, твердість, стійкість до зношування). В ході експериментів було встановлено, що термічна обробка підвищує твердість і зносостійкість електроосаджених покриттів.

Сьогодні вчені все більше цікавляться другим методом, а саме додаванням легуючих компонентів, через потенціал створення покриттів з унікальними фізичними, механічними та хімічними характеристиками.

П.А. Коваленко, Л.М. Мясковський та Л.І. Каданер досліджували процес формування сплавів титану з залізом із застосуванням кислотних електролітів. Рентгенівський структурний аналіз цих сплавів виявив, що вони є фізичною сумішшю титану і хімічної сполуки заліза з титаном. Електрохімічне збагачення заліза фосфором, яке вивчалось І.А. Ісіченком, підвищує фізико-механічні характеристики осадів.

Л.М. Гольц і В.М. Харламов застосували у процесі електролітичного осадження розчин, що містить кислотні солі хрому та заліза з концентраційним співвідношенням хрому до заліза 1,5:0,1. Інтегруючи в електроліт сульфат амонію, сульфат натрію, сульфат магнію та розділяючи катодну та анодну зони за допомогою пористої перегородки, вони зуміли створити сплав, який при температурі 20-40°C і щільності струму 10 - 15 А/дм<sup>2</sup> містив 80% хрому.

Ми вважаємо, що використання кобальту в комбінації з залізом посилить основний компонент сплаву (залізо) та покращить його фізико-механічні характеристики, включаючи термічну стійкість, стійкість до зношування та зменшення тертя.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Теплова обробка електрохімічного сплаву

Теплова обробка сплавів означає ряд процедур, які включають нагрів, утримання температури та наступне охолодження, що призводить до зміни структури металів, надаючи їм потрібні фізико-механічні характеристики, такі як мікротвердість, стійкість до зношування та витривалість.

У дослідженнях академіка О.О. Бочвара викладено систематизацію різних методів теплової обробки, яка є загальноприйнятою та застосовною до усіх видів обробки сплавів на будь-якій основі. Згідно з цією систематизацією, усі форми теплової обробки поділяються на п'ять основних категорій.

У першу категорію входять методи, які вирішують проблеми, спричинені холодною еластичною деформацією, за допомогою подальшого підігріву. Ці методи згруповані під спільною назвою перший вид анілінгу.

Методи другої категорії зумовлені наявністю фазових змін у твердому стані та включають підігрів матеріалу вище критичних точок, за яким слідує дуже повільне охолодження для досягнення структури, яка якнайбільше відповідає рівноважному стану. Ці методи відомі як другий вид анілінгу або фазова рекристалізація.

Третя категорія методів теплової обробки включає швидке охолодження матеріалу після підігріву вище критичних точок, що відомо як процес загартовування. У випадку швидкого охолодження сплавів формуються нерівноважні структури мартенситного типу, тобто цей процес супроводжується фазовою зміною.

Четверта категорія теплових обробок включає підігрів сплаву, який раніше був загартований, з метою зниження рівня його нерівноважного стану. Процес підігріву після загартовування призводить до відпускання.

П'ята категорія методів теплової обробки охоплює техніки, які використовують дифузійне збагачення зовнішнього шару деталей різними елементами, відомі як хімічно-теплова обробка.

Електроосаджені сплави містять домішки іноземного мікрівмісту різного походження, які під час теплової обробки, у випадку коли температура середовища перевищує їхній рівень термостійкості, руйнуються з викидом газів. Це викликає деформацію кристалічних структур та формування дрібнозернистого будови металу

Під впливом теплової обробки електролітичних покриттів відбувається перекристалізація та змінюються характеристики цього сплаву, а також виникають дифузійні явища через термохімічні реакції між елементами, покриттям та основою. Ці процеси сприяють міцному з'єднанню та дегазації покриття.

електроосадження є надмірно насиченим твердим розчином. Застосування теплової обробки сприяє випреципітації зайвої фази, зокрема утворенню інтерметаліду або фази розсіювання, що веде до збільшення мікротвердості та стійкості до зносу електроосадженого покриття.

З результатів досліджень, проведених В.І. Серебровським та Н.В. Коняєвим, випливає, що тепла обробка електрохімічних сплавів при температурах до 300 °С на протязі однієї години майже не впливає на мікротвердість, хоча внутрішні механічні напруження істотно зменшуються.

Для підвищення стійкості до зношування реставрованих поверхонь компонентів шляхом збільшення мікротвердості покриття та зменшення внутрішніх напружень рекомендується метод посилення електролітичного залізо-кобальтового покриття за допомогою теплової обробки при температурі 400 °С на протязі однієї години, який також сприяє стабілізації характеристик отриманих покриттів.

Очікується, що використання електролітичного залізо-кобальтового покриття, застосованого і потім підданого тепловій обробці при температурі 400 °С на одну годину, допоможе відновити ремонтний резерв та продовжити термін експлуатації вала ротора турбокомпресора марки Garrett GT2049S, використовуваного в двигуні 2.0 TDI «DuraTorq» автомобіля Ford Transit V.

## 2.2 Раціоналізація посилення електролітично осадженого заліза за допомогою кобальту

Використання холодних електролітів у процесі електроосадження має декілька недоліків, включаючи низьку ефективність формування покриття, обмежену стійкість до зношування та невисоку мікротвердість. Однак, сучасні дослідники працюють над удосконаленням методів виробництва залізних покриттів за допомогою холодних електролітів.

Ці дослідження проводяться у двох основних аспектах:

Створення стабільних електролітів, які дозволяють використовувати високі щільності струму.

Застосування змінних умов для електролізу, що сприяє підвищенню ефективності процесу.

Формування електролітичних покриттів в поточних електролітах під час змінних режимів електролізу може бути здійснено за допомогою програмного управління процесом електролізу, використання ультразвукових вібрацій та магнітного поля, а також різноманітних видів періодичного струму.

Метод залізнення за допомогою ультразвуку та магнітного поля не став широко вживаним через складність використовуваного обладнання та обмежену продуктивність цього процесу.

Для підвищення ефективності металу за струмом та мікротвердості отриманих покриттів часто використовується поточний метод залізнення. Перевагою цієї техніки є здатність реставрувати великі деталі складної форми шляхом місцевого нанесення покриття на зношені області. Наприклад, можна відновити шийки кривошипних валів за допомогою анодно-струменевого методу, який дозволяє додавати покриття прямо на зношені ділянки без необхідності використання ізоляції на частинах, які не потребують відновлення.

За допомогою програмного управління параметрами електролізу можна наносити покриття потрібної товщини з попередньо обраними характеристиками. Однак, використання цієї методики вимагає розробки складних систем, що часто не виправдовується ефективністю самого процесу.

Вперше застосування змінного струму в електрохімічному процесі було здійснено відомим науковцем А. Де-Ла-Рівом у 1838 році. У своїх дослідженнях він зробив висновок, що змінний струм впливає на процес по-іншому, порівняно зі струмом постійним.

Осадження металу за допомогою змінного струму є більш обнадійливим підходом у створенні гальванічних покриттів. Важливим фактором, який впливає на ефективність процесу та якість покриттів, є форма хвилі струму та її параметри. У останні роки для покращення ефективності та якості електролітичних покриттів використовуються різні типи періодичного струму. Періодичний струм - це тип електричного струму, чий миттєві значення повторюються через регулярні інтервали часу. Різноманітність форм та параметрів періодичного струму забезпечує його перемикання.

Метод електролізу за допомогою однофазного періодичного струму був розроблений Р.С. Піявським та А.А. Епштейном. Пізніше Р.С. Піявський працював над електролітичним нанесенням покриттів за допомогою асиметричного несинусоїдального струму. Цей тип струму був створений завдяки використанню вентилів, які працювали на принципі зустрічно-паралельного підключення, розділяючи симетричний струм на негативну та позитивну частини. Виявлено, що такий метод сприяє підвищенню ефективності процесу залізнення у холодних електролітах.

З'явлення форми періодичного струму з оберненим імпульсом відбувається при комбінуванні змінної синусоїдальної компоненти з синусоїдальним струмом однофазного випрямляча. При аналізі такого струму враховуються параметри, як-от: частота коливань, періодичність коливань, миттєвий показник періодичного струму, амплітуди прямого та оберненого струму, час існування прямих та обернених імпульсів, інтервал часу оберненого імпульсу.

Використання динамічних режимів електролізу, які відрізняються змінами у розмірах та орієнтації струму з плином часу, дозволяє поліпшити процеси електрокристалізації металів. Застосування струмів із складними конфігураціями може призвести до створення високоякісних електролітичних покриттів, підвищуючи продуктивність установок завдяки оптимізації процесу

електролізу. Комбінування змінного струму з постійним, інтервалами перерв і реверсією струму дозволяє, за умови однакового електроосадження, регулювати швидкість електролізу та якість катодного відкладення за рахунок зниження дифузійних перешкод. Модифікуючи параметри складного струму частоту пульсацій, довжину періоду, можна добитися різних налаштувань режиму електролізу, що впливають на товщину утвореного шару та розмір кристалів.

Всі параметри, що впливають на процес електролізу, тісно взаємопов'язані. Наприклад, температура розчину в електролізі має вплив на якість формуючихся електролітичних покриттів. Різке збільшення температури розчину спричиняє зростання рівня дифузії та зниження перенапружень, що, у свою чергу, впливає на електролітичні осадки, роблячи їх грубозернистими. Однак, при високій температурі розчину можливо використання підвищеної щільності катодного струму, що дозволяє прискорити процес електроосадження.

Для виробництва якісних покриттів через електроосадження критично важливо встановити оптимальний режим щільності катодного струму, що забезпечує незмінну концентрацію катіонів у шарі електроліту, що безпосередньо прилягає до катода. При переключенні з катодного відкладення металу на анодне розчинення, спостерігається, що в прикатодному шарі розпочинається розчинення осажденного металу, тобто його насичення катіонами металу. В такому режимі можливе застосування вищої щільності катодного струму, в порівнянні зі стаціонарним режимом на постійному струмі.

Анодний етап періоду при електроосаженні в динамічних режимах сприяє покращенню якості отриманих покриттів. Для створення гладких, компактних та блискучих покриттів можливе використання процесу розчинення металевих виступів на поверхні покриття. Тип струму, який застосовується, визначає рівень блиску поверхні, яка виходить у результаті.

Використання струму зі змінною полярністю при високих щільностях допомагає уникнути пасивації анодів під час їх розчинення. Це пояснюється тим, що під час анодного напівперіоду відбувається часткове зняття заряду з катіонів металу, які скупчилися на поверхні анода. Внаслідок цього у

прикатодній зоні не виникає підвищеної концентрації катіонів, що дозволяє розчинити у електроліті продукти, що утворюються на аноді, не призводячи до їх пасивації. Періодична катодна поляризація анодів спричиняє відновлення пасивного шару на металі, який з'являється через анодну поляризацію електрода при підвищених щільностях струму.

Покриття, нанесені використовуючи змінний струм, та покриття, отримані через застосування постійного струму, мають різницю у своїй пористості, структурі на мікрорівні, механічних характеристиках та чистоті поверхні. Хромові покриття, що виготовляються з допомогою змінного струму, мають високий рівень гладкості, що усуває потребу в подальшій механічній обробці деталей.

При використанні постійного струму для нанесення нікелевих, хромових та залізних покриттів утворюються внутрішні розтягуючі напруження, які негативно впливають на реставровані деталі, зокрема, зменшуючи їхню стійкість до втоми. Таке відновлення деталей, що піддаються змінним навантаженням, із застосуванням зазначених покриттів є недоцільним. Втім, використання змінного струму для створення цих покриттів, що сприяє зниженню внутрішніх напружень, розширює сферу їх використання у ремонтних роботах.

Серед всіх варіантів складних струмів для ремонтного виробництва найбільш перспективним є використання асиметричного змінного струму промислової частоти. Для створення такого струму потрібно обладнання, як-от трансформатор для зниження напруги, вимірювальні інструменти, реостати та напівпровідникові діоди. Найпростіша схема включає джерело асиметричного струму з парою діодів, розташованих у зустрічному порядку. Вона дозволяє розділити струми протилежних напрямків через діоди, а за допомогою реостата можна регулювати амплітуду напівперіодів струму.

При електроосажденні металу за допомогою асиметричного струму, швидкість процесу відповідає середньому показнику катодної щільності струму, який завжди нижчий за щільність прямого струму. Однак, темп електроосадження в такому випадку вищий, ніж при застосуванні постійного струму, оскільки щільність прямого струму значно більша, ніж у постійного.

Під час проходження асиметричного струму через гальванічну ланку, електрод, на якому відбувається осадження металу протягом одного напівперіоду, функціонує як катод, а протилежний електрод – як анод. Протягом періодів, коли відбувається катодне осадження, на поверхні осаджується певна кількість металу, обсяг якої відповідає середньому рівню катодного струму за цей період.

Коли вимірювальний пристрій магнітоелектричної системи під'єднано до кола за схемою, яка створює асиметричний струм, цей прилад фіксує лише один напівперіод струму за цикл, в той час як інший напівперіод струму протікає через паралельну лінію, до якої підключений діод, але у протилежному напрямку.

Експериментальні дані свідчать, що при формуванні електролітичних покриттів з хлоридних електролітів коефіцієнт асиметрії повинен бути в діапазоні  $\beta=5-6$ . При такому рівні асиметрії спостерігається найвища швидкість нарощування покриття, тоді як товщина, якість і мікротвердість покриття будуть залежати від щільності струму катодного.

Отже, на основі вивчення літературних джерел та аналізу результатів власних дослідів можна зробити висновок про численні переваги використання асиметричного струму у порівнянні з електроосадженням заліза за допомогою постійного струму. За нашими спостереженнями, впровадження цього типу струму допоможе покращити фізико-механічні характеристики електролітичних залізо-кобальтових покриттів, особливо з точки зору збільшення їх зносостійкості, а також сприятиме зростанню ефективності процесу електролізу.

Одним із ключових критеріїв для оцінки придатності сплаву до електролітичного нарощування на зношені поверхні деталей є їх стійкість до зносу. Ця властивість покриттів комплексна та залежить від багатьох чинників, серед яких важливі концентрація хлориду заліза  $200 - 400 \text{ кг/м}^3$ , рівень асиметрії  $2 - 6$ , щільність катодного струму  $20 - 60 \text{ А/дм}^2$ , концентрація хлориду кобальту  $5 - 25 \text{ кг/м}^3$ , кислотність розчину  $0,6 - 1,0$  та температура електроліту  $20-60 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Стійкість до зношування електролітичних покриттів заліза та кобальту визначається через пряму функціональну зв'язок з умовами процесу такими як концентрації хлориду заліза  $C(FeCl_2 \cdot 4H_2O)$  та хлориду кобальту  $C(CoCl_2)$  і параметрами електролізу щільність струму  $D_k$ , коефіцієнт асиметрії  $\beta$ , рівень кислотності  $pH$ , температура розчину  $t$ :

$$U = f(C(FeCl_2 \cdot 4H_2O), \beta, D_k, CCoCl_2, pH, t), \quad (2.1)$$

Стійкість до зношування в гальванотехніці є складним багатоаспектним процесом, що вимагає його оптимізації. Відповідно, використовуючи певний алгоритм, виконуються експериментальні серії з обмеженою кількістю варіацій. Результати цих дослідів аналізуються за допомогою статистичних методів, і, при необхідності, створюється математична модель. Така модель потім використовується для подальшого удосконалення методики проведення експериментів.

Застосування методики планування досліджень дозволяє вирішити ряд ключових завдань:

Реалізовувати комплексні дослідження, враховуючи вплив кожного фактора окремо, а також їх взаємозв'язок на кінцевий результат;

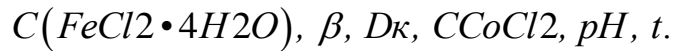
Керувати процесом експериментування відповідно до розробленого плану;

Дотримуватися принципів повторюваності та випадковості у проведенні досліджень;

Спростувати розрахункові процедури для аналізу результатів експериментів, використовуючи універсальні, алгоритмізовані методики.

Визначення підходу до планування експерименту в гальванотехніці залежить переважно від цілей та завдань дослідження, предмета дослідження та існуючих наперед відомих даних.

При складанні плану для досліджень у сфері гальванізації зазвичай враховують шість незалежних факторів:



При цьому загальна кількість різних способів проведення експерименту становить  $n = 5$ . У порівнянні з усією можливою кількістю комбінацій варіантів, яка становить  $nm = 56 = 15625$ , розроблений план включатиме лише  $n^2 = 5^2 = 25$ . Це дозволяє зменшити кількість необхідних експериментів у  $nm - 2 = 54 = 625$  разів.

Для аналізу параметрів процесу, який залежить від декількох факторів, необхідно здійснити комплексний експеримент з наступним створенням математичної моделі. За методикою, запропонованою В.М. Мордашевим, для зменшення кількості експериментів спочатку можна дослідити залежності від кожного фактора окремо або їх парних комбінацій, при цьому зафіксувавши інші фактори. Після усереднення отриманих даних можливо уточнити результати, створивши комплексну багатофакторну модель. Для цієї мети в даний час активно використовуються методики складання оптимальних планів експериментів. Одним з найбільш розповсюджених підходів є використання ортогонального квадрата латинського.

Під час аналізу даних, отриманих з планування експериментів у форматі ортогонального латинського квадрата, слід дотримуватися таких вказівок:

Результати досліджень, зібрані при однакових рівнях окремого параметра, потрібно об'єднати, використовуючи арифметичне або геометричне середнє.

На основі усереднених даних для кожного параметра складають точкові діаграми та апроксимують їх за допомогою гладких кривих.

Проведені гладкі криві дозволяють робити припущення щодо характеру багатофакторної залежності (потрібної функції):

у формі суми окремих функцій для різних параметрів (якщо усі криві гладкі);

як комбінація однієї функції в сумі з іншими;

у вигляді добутку двох окремих функцій (дві гладкі криві) плюс сума інших.



випадку, коли коефіцієнти взаємної кореляції між факторами, які впливають на кінцевий показник, перевищують 0,8, рекомендується включати в модель тільки один з цих факторів.

Сформована модель повинна бути адекватною, для чого вона має включати усі важливі незалежні змінні, які мають значний вплив на результат, зокрема, ключові фактори. Неінтегрування до моделі хоча б одного із вагомих факторів та їх потенційних комбінацій часто може спотворити точне відображення явища або процесу, що відбувається в об'єкті. Це може призвести до невірної трактування отриманих даних та їх застосування в практичній діяльності.

Існують спеціалізовані методики для оцінки значущості факторів, які входять у математичну модель, і ці методи не потребують проведення великої кількості експериментів. Це також сприяє скороченню витрат, пов'язаних із реалізацією експериментів та обчислювальними операціями.

Серед цих методик можна виділити:

Методи аналізу варіативності, які базуються на оцінці внеску аналізованого фактора в загальну розкиданість результатів;

Методики, що використовують часткові насичені факторні схеми, дозволяючи на основі створеної лінійної регресійної моделі визначати значущість факторів через їх вплив на математичне сподівання кінцевого результату;

Підходи, які застосовують повністю насичені оптимальні експериментальні плани, такі як плани Плакетта-Берю. Методика оцінювання важливості досліджуваних факторів аналогічна використанню часткових насичених факторних схем;

Застосування перенасичених оптимальних планів або методики випадкового розподілу, якщо патентний пошук показує наявність значущості фактора;

Патентний аналіз експертне опитування, що дозволяє впорядкувати досліджувані фактори за ступенем їх впливу на кінцевий результат.

Зазначені методи застосовують такі терміни, як кількість ступенів вільності та рівень насичення плану. Кількість ступенів вільності  $f$

визначається як різниця між загальною кількістю експериментів  $N$  та кількістю невизначених параметрів  $k$  у математичній моделі:

$$\varphi = N - k, \quad (2.2)$$

За значенням числа  $\varphi$  можна визначити, чи є план насиченим або не повністю насиченим. В залежності від ситуації:

Якщо кількість проведених експериментів більша, ніж кількість параметрів, що оцінюються, тобто  $\varphi > 0$ ,  $N > k$ , план вважається не повністю насиченим. Це дозволяє провести перевірку адекватності моделі;

Коли кількість експериментів дорівнює кількості шуканих параметрів, тобто  $\varphi = 0$ ,  $N = k$ , план є насиченим, і перевірка адекватності стає неможливою;

Якщо кількість експериментів менша за кількість оцінюваних параметрів, тобто  $\varphi < 0$ ,  $N < k$ , план вважається наднасиченим.

Ми використовували метод насичених дробових факторів для ідентифікації значущих факторів, базуючись на гіпотезі, що існують лише лінійні ефекти. При цьому оцінка значимості факторів здійснюється на основі їх впливу на математичне сподівання кінцевого результату.

Ми припускаємо існування лінійного взаємозв'язку між кінцевим результатом і факторами. Використовуючи програмне забезпечення Excel, ми обчислюємо значення коефіцієнтів регресії (для постульованої моделі), а потім проводимо аналіз значущості цих оцінок відповідно до наступної формули:

$$|a_i| \geq t_{кр} S_i, \quad (2.3)$$

де  $i = 0, 1, 2 \dots n$ ;

$t_{кр}$  – це величина критичного значення тесту Стьюдента при визначеному рівні значущості, наприклад,  $\alpha = 0,05$ , та з урахуванням ступенів вільності  $\varphi_2 = (r - 1)N$ ;  $N$

Кількість точок у плані експерименту;

$r$  - Кількість повторень вимірювань у експерименті;

$S_{i2}$  – розрахункова оцінка варіативності перевірюваного коефіцієнта.

У випадку задоволення цього критерію, коефіцієнт є значущим, а відповідний фактор вважається важливим.

Оскільки значення оцінок коефіцієнтів лінійної моделі за  $x$ ,  $y$ ,  $z$  перевищують  $0,426571537932$  за абсолютною величиною, то коефіцієнт асиметрії, катодна щільність струму та концентрація хлориду кобальту відіграють провідну роль у дослідженні цього явища, і тому вони будуть виключно використані при формуванні математичної моделі.

Визначені значимі фактори, які впливають на зносостійкість, відповідають результатам, отриманим в ході наших однофакторних експериментів, візуалізацію яких можна побачити на малюнку 2.2.

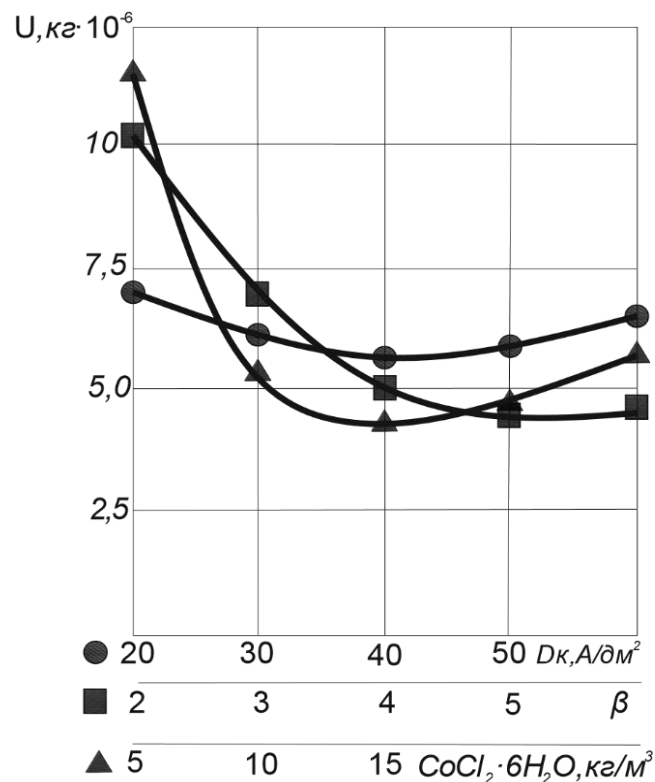


Рис. 2.2. Відображення впливу параметрів електролізу на зносостійкість електролітичного сплаву Fe–Co.

На основі даних експерименту, проведеного за допомогою програмного забезпечення Statgraphics Plus 5.0 та з врахуванням визначених важливих факторів, було створено математичну модель для оцінки зносостійкості

електроосаженного залізо-кобальтового покриття, що представлена наступним чином:

$$U = 37,37 + 0,61 \cdot \beta + 310D_k + 4610CCoCl_2 - 6,28 \cdot \beta - 0,27 \cdot D_k - 1,63 \cdot CCoCl_2, \quad (2.4)$$

Всі коефіцієнти цієї моделі мають значимість на рівні 90%, а модель є адекватною з коефіцієнтом детермінації  $R^2$ , що дорівнює 91,14%. Це свідчить про те, що кожен з факторів, які враховані в моделі, має певний вплив на зносостійкість покриття електролітичного.

З розгляду розробленої моделі випливає, що найсуттєвіший вплив на знос покриттів має рівень легуючого елемента у розчині. Переконавання полягає в тому, що збільшення концентрації хлориду кобальту до номінальних показників знижує знос як мінімум наполовину. Проте, коли рівень хлориду кобальту перевищує оптимальні значення, знос покриття посилюється. Це можна пояснити зміною структури покриття та підвищенням його ламкості. Зростання ламкості сприяє вбудовуванню в контактне тіло відламаних часток твердого покриття, в результаті чого переважає абразивна дія, що підсилює зношування покриття.

Зміна значень асиметричного індексу в межах від трьох до шести сприяє ефективному зменшенню зносу аналізованих поверхонь, що можна пояснити утворенням структури з дрібними кристалами на поверхні покриття.

Аналіз робіт різних науковців підтверджує, що регулювання інтенсивності електричного струму в межах 30-60 ампер на квадратний дециметр сприяє зниженню зношування вивчених гальванічних покриттів. Також було визначено оптимальний режим електролізу через вивчення функціональної залежності  $u = f(x, y, z)$ , де  $x = \beta$ ,  $y = D_k$ ,  $z = CCoCl_2$ , що призводить до локального екстремуму.

$$(x, y, z) = 37,37 - 6,28x - 0,27y - 1,63z + 0,61x^2 + 0,003y^2 + 0,046z^2,$$

Якщо екстремум існує, він можливий тільки в точці стабільності. Положення цієї точки встановлюється шляхом вирішення набору рівнянь (2.5), які представляють обов'язкову умову для знаходження екстремуму в функціях, що мають три змінні:

$$\begin{aligned}U' x(x, y, z) &= 0 \\U' y(x, y, z) &= 0, \\U' z(x, y, z) &= 0\end{aligned}\tag{2.5}$$

Не кожна стабільна точка обов'язково є точкою локального екстремуму, тому для кожної з таких точок необхідно перевіряти відповідність критеріям достатності. Одна з варіантів цих критеріїв включає позитивність або негативність квадратичної форми відносно диференціалів  $dx$ ,  $dy$  та  $dz$ , яка має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}F = U'_{xx}(P_0)dx^2 + U'_{yy}(P_0)dy^2 + U'_{zz}(P_0)dz^2 + 2U'_{xy}(P_0)dxdy + \\+ 2U'_{xz}(P_0)dxdz + 2U'_{yz}(P_0)dydz\end{aligned}$$

де  $P_0(x_0, y_0, z_0)$  — точка стабільності функції, а  $U'_{xx}(P_0)$ ,

$$U'_{yy}(P_0), U'_{zz}(P_0),$$

$$U'_{xy}(P_0) = U'_{yx}(P_0), U''_{xz}(P_0) = U''_{zx}(P_0) \text{ та } U''_{yz}(P_0) = U''_{zy}(P_0)$$

— похідні другого ступеня, розраховані в точці стабільності.

Матриця для квадратичної форми (матриця Гессіана) представлена наступним чином:

$$\begin{pmatrix} U''_{xx}(P_0) & U''_{xy}(P_0) & U''_{xz}(P_0) \\ U''_{xy}(P_0) & U''_{yy}(P_0) & U''_{yz}(P_0) \\ U''_{xz}(P_0) & U''_{yz}(P_0) & U''_{zz}(P_0) \end{pmatrix}$$



$$H = U'_{yx}(P_0)U'_{yy}(P_0)U'_{yz}(P_0).$$

$$U''_{zx}(P_0)U''_{zy}(P_0)U''_{zz}(P_0).$$

Якщо у точці  $P_0$  квадратична форма має позитивне значення, це вказує на мінімум (min) в цій точці, а якщо значення негативне, це означає максимум (max). У випадку, коли квадратична форма має невизначений знак у точці  $P_0(x_0, y_0, z_0)$ , функція не досягає екстремуму.

Так як усі головні мінори є позитивними, функція  $u(x,y,z)$  має мінімальне значення у точці  $P_0$ , яке дорівнює:

$$u_{min} = u(5,148; 45; 17,7) = 0,692.$$

Отже, мінімальний знос покриття, який становить  $0,692 \text{ кг} \cdot 10^{-6}$ , спостерігається при таких значеннях аналізованих чинників (параметрах електролізу): величина коефіцієнта асиметрії  $\beta$  рівна 5,148, щільність катодного струму  $D_k$  становить  $45 \text{ A/dm}^2$ , а концентрація хлориду кобальту в розчині електроліту  $CCoCl_2$  –  $\text{кг} / \text{м}^3$ .

Сформульована математична модель стійкості до зношування залізо-кобальтових покриттів (2.4) дозволяє зіставити дані оптимального режиму електролізу з даними від комбінацій чинників, які мають значення для майбутнього прогнозування, але які не були вивчені в рамках реальних експериментів.

Огляд інформації, представленої у таблиці 2.1, дозволяє визначити вплив конкретного чинника на стійкість до зносу при стабільності двох інших параметрів. Додатково, ці дані вказують на те, що найнижче зареєстроване значення зносу становить  $0,692 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ .

Таблиця 2.1. Аналіз результатів зносу у точках окремих експерименту

$\beta$	$D_k, A / \text{дм}^2$	$CCoCl_2, \text{кг} / \text{м}^3$	$U, \text{кг}10-6$
5,148	45	17,7	0,692
5	45	17,7	0,705
5,148	45	18	0,696
4,14	43	17,2	1,336
5,2	44	18	0,7
5	50	17	0,804

### 2.3 Методика нанесення покриття

Процес електролітичного осадження залізо-кобальтових покриттів виконувався в електроліті з таким складом: хлоридне залізо –  $200-400 \text{ кг} / \text{м}^3$ , хлоридна кислота –  $0,7-1,8 \text{ кг} / \text{м}^3$ , хлорид кобальту –  $5-25 \text{ кг} / \text{м}^3$ , сорти «ХЧ» та «ЧДА». Умови нанесення покриття включали: щільність катодного струму –  $20-60 A / \text{дм}^2$ , коефіцієнт асиметрії –  $2-6$ , температура розчину –  $20-60 \text{ }^\circ\text{C}$ , рівень кислотності –  $\text{pH} 0,6-1,0$ . Електроліт готувався шляхом розчинення сталеві тирси (сталь 10 або сталь 20) у промисловій хлоридній кислоті. Після повної розчинності тирси, суміш перемішували та фільтрували до електролітичної ванни. Розчин підігрівали до робочої температури та обробляли на катодах, обгорнутих у скловолокно.

Щільності електричного струму  $12-18 A / \text{дм}^2$ . Додаткові інгредієнти розчиняли у відокремлених контейнерах, пропускали через фільтр та переливали до ванни. В якості ванн використовувалися керамічні та скляні ємності об'ємом  $0,5$  та  $1$  літр.

Для створення Fe–Co покриттів використовували проби, зроблені з сталі Ст10 та Ст20, з розмірами  $25 \times 25$  мм. Проведення повторних експериментів у тих же умовах електролітичного осадження відбувалося не рідше ніж 4 рази, причому для кожного експерименту використовували новопідготовлений

електроліт. При зміні одного з параметрів електролізу, інші параметри залишалися сталими.

Рівень кислотності електроліту вимірювали за допомогою портативного рН-метра, прилад налаштовували використовуючи стандартні буферні лужні та кислі розчини. Для збереження потрібної концентрації електроліту у ванні доливали дистильовану воду з допоміжною соляною кислотою.

У ході проведення досліджень та видалення електроліту з компонентами, концентрація елементів у розчині змінювалася, що спричиняло зміни у процесі електролізу та фізико-механічних характеристиках покриттів.

Визначення змін у концентрації компонентів проводилося за допомогою хімічного аналітичного методу. Рівень заліза в електроліті підтримувався завдяки розчиненню анодів, виготовлених із сталі з низьким вмістом вуглецю, тоді як концентрація хлориду кобальту регулювалася шляхом періодичного додавання до електроліту розчину хлориду кобальту.

Вага електролітичного металу вимірювалася за допомогою лабораторних ваги ВЛА-200М, обчислюючи різницю у вазі проби до та після нанесення покриття із точністю до 0,1 мг.

Лабораторний агрегат функціонував з використанням асиметричного змінного струму стандартної частоти, налаштованого згідно з розробленим планом. Дана конфігурація демонструється на ілюстрації 2.1.

Покриття наносилось на проби плоскої та циліндричної форм, їх поверхнева шорсткість відповідала 6–7 класу. Перед застосуванням електролітичного покриття, проби піддавалися ґрунтовному очищенню в ацетоні, за яким слідувало вагове визначення та обробка їх поверхонь віденським вапном для знежирення. На завершальному етапі, проби промивались водою та піддавались анодному травленню в 30% розчині сірчаної кислоти.

Процес травлення займав від 1 до 2 хвилин при інтенсивності струму в діапазоні 30-70 А/дм<sup>2</sup>. Наприкінці зразки обполіскували холодною проточною водою, вішали на підвіски та занурювали в гальванічну ванну. Параметри електролізу, такі як інтенсивність струму та коефіцієнт асиметрії,

налаштовували протягом 4-5 хвилин до рівнів, необхідних для створення якісного покриття.

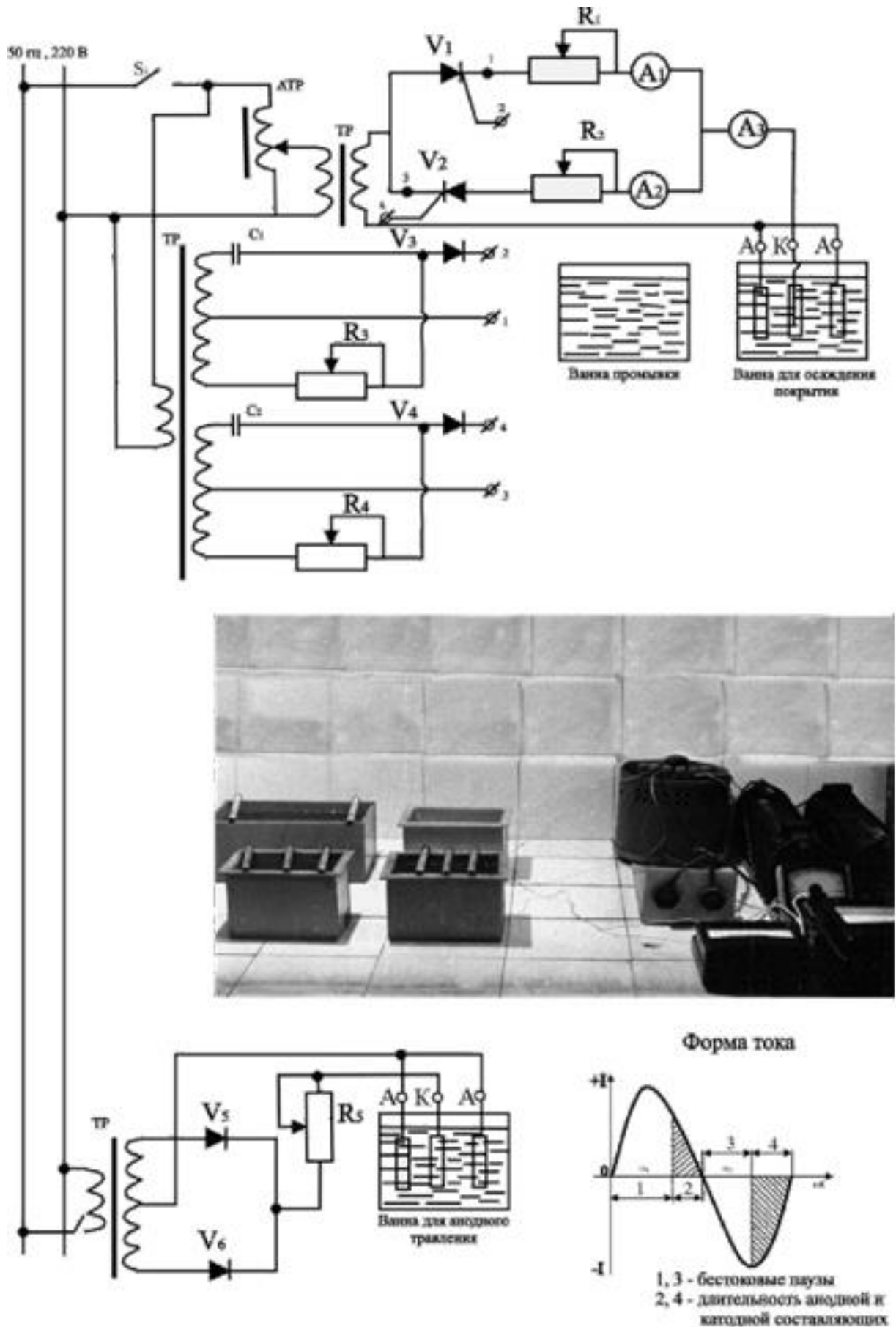


Рис. 2.3. Механізм для накладання покриття електролітичного.

Дослідні проби піддавалися термічній обробці за температури  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , утримуючи їх протягом 1 години в лабораторній електричній печі *СНОЛ-1.6.2.0.0.8/9-М1*. Цей процес виконувався відповідно до стандартів, встановлених.

#### 2.4 Підхід до аналізу структури та фізико-механічних характеристик покриття

Для вивчення мікроструктури покриттів Fe-Co використовували мікроскоп МІМ-8М, здійснюючи спостереження з 450-кратним збільшенням на розрізних шліфах. Процедура створення шліфів для аналізу детально описана в джерелі. Етчінг залізо-кобальтових покриттів проводили за допомогою 5% розчину кислоти азотної в етиловому спирті.

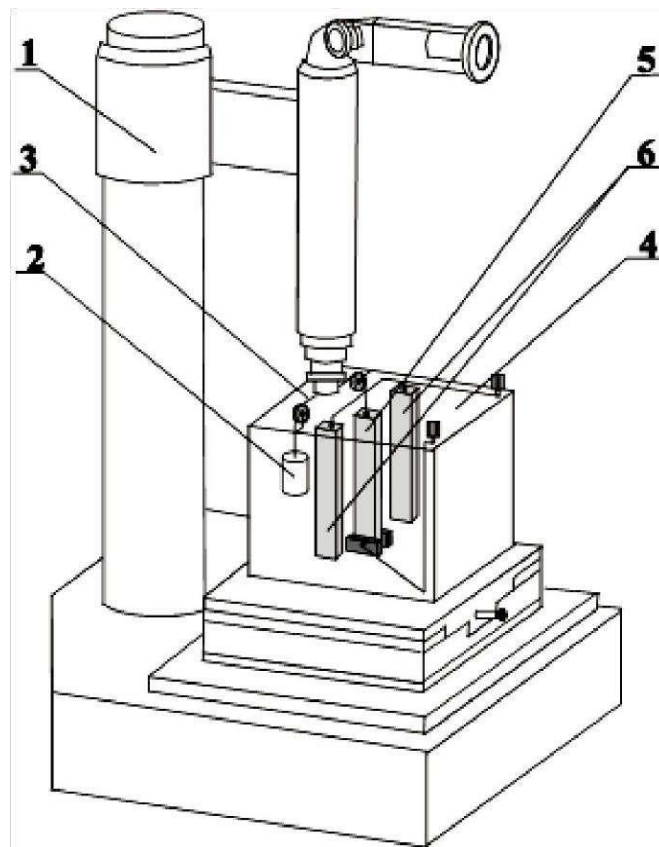


Рис. 2.4. Система для визначення внутрішніх напружень в покриття:

- 1 - мікротвердомір ПМТ - 3; 2 – попереднійвантаж - натягувач;
- 3 – міднийдріт діаметром0,10мм; 4 – електролітичнийосередок;
- 5 – стрічковийкатод; 6 – анод.

Ми також займалися проведенням рентгеноструктурного аналізу за допомогою апарату ДРОН-3М, інтерпретація отриманих дифракційних картин виконувалася відповідно до загальноприйнятих процедур.

З метою встановлення фазової структури під час аналізу рентгенівських спектрів було складено графіки, виходячи з довідкових значень міжплощинних розстоянь.

Визначення внутрішнього напруження в електролітично осадженому Fe–Co покритті здійснювалось на спеціально підготовленому обладнанні, деталі якого показано на ілюстрації 3.5. Під час процесу електролітичного осадження покриття на стрічковий катод, відбувалося його спонтанне деформування.

Для катода застосовувалась тонка пластинка зі стрічкової сталі Ст45, маючи товщину 0,2 мм і виміри 80×10 мм.

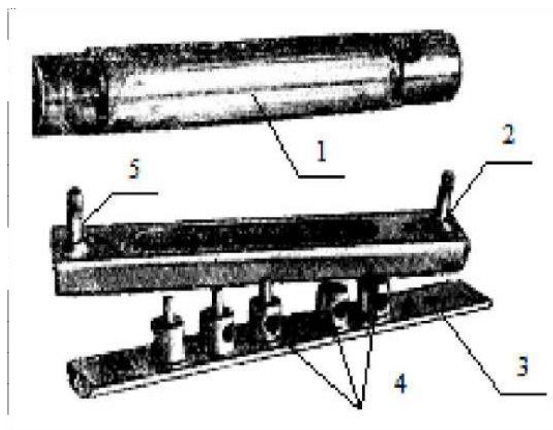


Рис. 2.5. Загальний візуальний вигляд пристрою для вимірювання міцності зчеплення:

- 1 - блокузборіпісляелектролізу; 2 - корпусблоку; 3 - кришкаблоку;  
4 - штифти; 5 - гвинт.

Нижню частину катода фіксували у електролітичному відсіку за допомогою стискальної пластини, до місця кріплення під'єднували кабель від джерела електроструму. До верхньої частини стрічкового катода приєднували мідний провід з діаметром 0,10 мм, який з'єднував стрічковий катод з гирею-натягувачем і розміщувався на роликах натягувального механізму. На переміщуваний столик приладу ПМТ-3 монтували камеру для

електроосадження так, щоб в окулярі МОВ-1-15×У4.2 був видимий мідний провід.

Під час електролізу, з рівними інтервалами часу, здійснювали вимірювання деформації катода, яка встановлювалась за рухом мідного проводу. Використання окуляра МОВ-1-15×У4.2 забезпечувало точність вимірювань до 0,3 мікрметра.

Для тестування адгезійної міцності електролітичних покриттів ми сконструювали спеціалізований демонтований пристрій, оснащений п'ятьма отворами під штифти з діаметром 3 мм, що дозволяло вимірювати товщину електролітичного покриття в 0,3 мм. Зовнішній вигляд цього пристрою демонструється на малюнку 2.5.

Штифти монтувалися в блок і фіксувалися за допомогою гвинтів, тоді як верхню поверхню кришки вирівнювали на круглошліфувальному обладнанні до шорсткості  $Ra = 2,5 - 0,63$  мкм. Наступні тести на зчеплення здійснювалися за допомогою випробувальної машини РМ-05.

Тести зразків на стійкість до зносу виконувалися за методикою диск-гальмівна накладка у сухих умовах тертя на апараті СМЦ-2, відповідно до стандартів. Конфігурація проб для тестування відображена на ілюстрації 2.6.

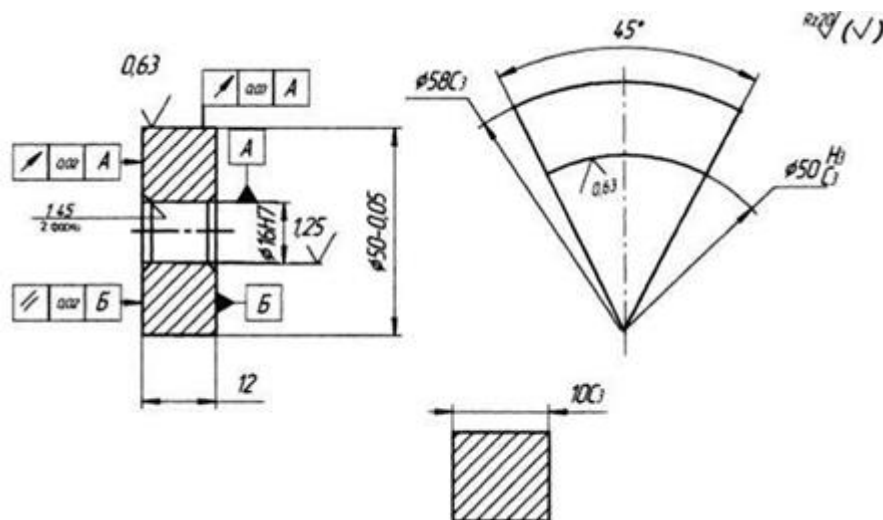


Рис. 2.6. Конфігурація примірників для проведення тестів на стійкість до зносу.

Для тестів використовувались валики зі сталі 45. Для стандартного порівняння валики гартували на глибину 1,5 мм та проводили відпуск при 300

°C. Зовнішній діаметр валиків для нанесення покриттів складав 49,7 мм.

Товщина покриття, що застосовувалося на валики, варіювалася від 0,2 до 0,5 мм.

Ролики з нашаруванням Fe-Co обробляли шліфуванням та поліруванням. В результаті механічної обробки діаметр зразка досягав  $50 \pm 0,01$  мм, з поверхневою шорсткістю  $Ra = 0,5 - 2,0$  мкм. Стандартні ролики вироблялися в аналогічний спосіб, але без процедури нанесення покриття.

У тестах використовували контрольні зразки у вигляді гальмівних накладок, зроблених з сірого чавуну. Поверхня, що контактує між валиком та накладкою, мала площу  $2 \text{ см}^2$ .

На випробування були винесені наступні типи зразків:

Валики з покриттям чистого електролітичного заліза.

Валики з покриттям електролітичного сплаву Fe-Co.

Валики з покриттям електролітичного сплаву Fe-Co, які піддавалися термічній обробці при  $400 \text{ °C}$  на протязі однієї години.

Під час тестування на зносостійкість покриттів Fe-Co швидкість скольження становила  $0,94 \text{ м/с}$ , а навантаження  $-0,75 \text{ МПа}$ . Вимірювання зносу проводилося за допомогою зважування зразків на відмінності у вазі після кожних 1000 метрів пробігу в тестах без мастильних матеріалів і через кожні 500 метрів пробігу при тестуванні при лімітованому терті. Вагу зразків до і після випробувань фіксували на лабораторних вагах ВЛА-200М, на підставі чого визначали ступінь зносу.

Під час випробувань на тертя без мастила загальна дистанція, пройдена зразками, склала 4000 метрів. Протягом тестувань реєструвалися дистанція, яку пройшли зразки, температура в об'ємі та сила тертя. Крім того, формувалася графік, що відображає змін моменту тертя.

Вимірювання середньої температури гальмівних накладок здійснювали за допомогою термопари з хромель-алюмелю, потенціометра F-307 та дзеркального гальванометра типу ГМП. Щоб очистити від продуктів зносу, на апараті для тестування тертя встановлювали щітку, яка постійно контактувала з



робочою поверхнею тестованого зразка. Момент тертя фіксувався за допомогою шкали обладнання СМЦ-2.

З використанням інтегратора апарату СМЦ-2 для тестування тертя та виходячи з формул, що описані далі, було виконано обчислення таких параметрів:

$$A = 2Mnu, \quad (2.6)$$

Коефіцієнт опору при русі об'єкта визначали на основі рівняння:

$$F = F / P, \quad (2.7)$$

Величину фрикційної сили можливо розрахувати використовуючи відповідне математичне рівняння:

$$F = A / S, \quad (2.8)$$

$$S = \pi dN, \quad (2.9)$$

Значення  $A$  та  $S$  вносили у рівняння 2.8, в результаті чого визначали фрикційну силу:

$$F = 2Mnu / \pi dN, \quad (2.10)$$

Знайдене рівняння вводили в математичну модель 2.7:

$$f = 15,94Mnu / NP, \quad (2.11)$$

Аналіз поверхні об'єктів після тестувань здійснювався за допомогою металографічних приладів ПМТ-3, МІМ-8М. Визначення втомної міцності відбувалося через методику використання консольного типу навантаження на рухомий об'єкт, тоді як адгезію визначали шляхом порівняння граничної втоми

об'єкта з Fe-Co покриттям та граничної втоми базового металу. Тести проводились на об'єктах з діаметром 10 мм за допомогою апарату УКИ-10М.

Границю міцності об'єктів вдається розрахувати, опираючись на рівняння:

Тестування відбувалося за умови - 5 ... 106 обертів. Основним показником під час цих тестів було цілковите розламування тестованого об'єкта.

$$M / W = 32Pl / \pi d^3, \quad (2.12)$$

Об'єкти були створені з нормалізованої сталі 45. Зовнішні виміри цих об'єктів становили  $10 \pm 0,01$  мм. Об'єкти, призначені для накладення Fe-3 покриття, мали діаметр 9,6 мм. Текстура поверхні об'єктів варіювалася в межах  $Ra = 6,3 - 2,5$  мкм.

Визначення мікротвердості електролітичних залізо-кобальтових покриттів проводилось за допомогою апарату ПМТ-3, розробленого М.М. Хрущовим та Є.С. Берковичем (див. рисунок 2.7), у відповідності до стандарту.



Рис. 2.7. Вид приладу для вимірювання мікротвердості ПМТ-3.

Для нейтралізації впливу підложки на результати дослідження, мікротвердість фіксувалася на перехресних полірованих перетинах у середині шару покриття, при цьому проводились три проколи.

Стійкість електролітичних сплавів до корозії вивчалася в умовах симуляції тропічного клімату у камері КХТВ-64 за такими умовами протягом одного дня: 14 годин при температурі 55 °С і вологості 96–98 %, потім наступні 10 годин при температурі 25 °С і вологості 96–98 %. Зразки розміром 25×25 мм зі сталі 10 покривали 2 мм шаром. Період тестування тривав 77 днів.

Оцінка корозійної стійкості базувалася на процентному співвідношенні кородованої площі зразка або числі корозійних ушкоджень на ньому. Перевірка функціональності реставрованих компонентів з залізо-кобальтовим покриттям здійснювалася на автомобільно-тракторній техніці. Проведення цього типу випробувань було ключовою метою для визначення ефективності покриттів у відновленні зношених деталей з можливістю їх подальшого використання.

## 3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Оцінка продуктивності турбінних агрегатів

Різноманітні методики існують для оцінки продуктивності турбін. Загалом, розглядають продуктивність як відношення отриманої роботи до вкладеної енергії в систему, що є актуальним, наприклад, для вимірювання продуктивності теплових двигунів через співвідношення виходу механічної потужності до енергії спаленого палива. Однак, у випадку турбомеханізмів, перевага надається ізентропічній продуктивності. Така продуктивність вимірюється як відношення між реальною зміною ентальпії у пристрої та теоретично ідеальною (ізентропічною) зміною ентальпії. У контексті радіальних турбін, це веде до визначення продуктивності як пропорції між реальною зміною загальної ентальпії та зміною ентальпії при ідеальному ізентропічному розширенні стиснутого газу.

У більшості турбокомпресорів з інтегрованим обтічним клапаном відсутня можливість розсіювання на виході з пристрою, що призводить до розподілу всієї кінетичної енергії в вихлопних газах. Таким чином, найбільш адекватним показником ефективності стає показник з повного на статичний, як це демонструється у формулі 3.1.

$$\eta_{TS} = \frac{h_{03} - h_{04}}{h_{03} - h_{4s}} \quad (3.1)$$

Щоб зафіксувати миттєву ефективність, необхідно застосовувати цю формулу для кожного окремого стану в турбіні. Здійснення вимірів реальної зміни загальної ентальпії вимагало б фіксації поточної температури, що виявилось надто складним завданням для цього проекту. Ще однією складністю

у визначенні ефективності, як описано у формулі 3.1, є те, що втрати тепла через випромінювання потенційно підвищують ефективність. Це відбувається через зниження ентальпії на виході з турбіни, що збільшує чисельник, але не впливає на знаменник, що веде до здається вищої

ефективності. Аби уникнути проблем з урахуванням теплового випромінювання та розробкою швидкісних методів вимірювання температури, у формулі 3.1 реальна зміна загальної ентальпії замінюється на виміряну використану потужність турбіни. Отже, ефективність турбіни тепер розраховується як відношення використаної потужності до максимально можливої ізентропічної потужності. Ці два параметри будуть розглянуті окремо.

$$\eta_t = \frac{P_{utilized}}{P_{isentropic}} \quad (3.2)$$

### 3.1.1 Потужність турбіни за ізентропічним процесом

Величина ізентропічної потужності визначається як дисперитет значень ентальпії між точками впуску та випуску турбіни. Формулювання пропонує таке:

$$mc_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \quad (3.3)$$

$$h = \int_0^h dh = m \int_0^T c_p dT \quad (3.4)$$

Відповідно, зміна у часі цього параметра визначає потужність:

$$P = \frac{dh}{dt} = \dot{m} \int_0^T c_p dT \quad (3.5)$$

Отже, ізентропічна потужність визначається як дисбаланс між потужністю, яка подається в турбіну, та потужністю, що виводиться з неї:

$$P_{isentropic} = \dot{m}_{in} \int_0^{T_{in}} c_p dT - \dot{m}_{out} \int_0^{T_{out}} c_p dT \quad (3.6)$$

Підбір полінома для  $c_p$  у встановленому температурному діапазоні доповнює аналітичний огляд.

Важливо відзначити, що при обчисленні за формулою 6.6 буде доцільно використовувати заміну відношення температур на відношення тисків, що відповідають ізентропічним стандартам. Внаслідок цього виникає відношення питомих теплоємностей,  $\gamma$ , у показнику ступеня. Його необхідно обчислити як середнє для діапазону температур у відношенні температур, і це не має прямого зв'язку з  $c_p$  у інших частинах формули.

Таке визначення ізентропічної потужності є спробою вирішити дилему щодо відмінностей масопотоків на вході та виході, тобто скупчення маси в турбіні.

Але цей підхід може мати інші проблеми, зокрема з затримками часу різних процесів (подача, генерація потужності в роторі та відтік). Оптимальним визначенням ізентропічної потужності було б підрахунок суми всіх потенційних імпульсів від молекул газу, що впливають на лопаті. Однак обмежені дані про реальний потік і термодинамічні характеристики всередині ротора і його найближчого оточення змушують перенести аналіз на зовнішні межі, де існує більше інформації про стан. Відтак визначаємо ізентропічну потужність як диференціацію ентальпій між двома межами, що походить від теорії стаціонарного потоку.

Припущення, що ізентропічна потужність є диференціацією ентальпій між початковою та кінцевою межами, представляє собою підхід із використанням контрольного об'єму.

Припускається, що ізентропічна потужність розподіляється рівномірно по об'єму на кожному етапі часу. Це відрізняється від реальної ситуації, коли потужність генерується у дуже конкретному місці - у роторі. Оскільки об'єм ротора становить лише незначну частину загального об'єму турбіни (а отже, і контрольного об'єму), підхід з використанням контрольного об'єму вносить

проблему фазової невідповідності між подачею, відведенням і генерацією потужності. Модифікація цього підходу могла б включати використання масопотоку, який краще відображає реалії ротора. Застосування рівності масопотоків на вході та виході, використовуючи середнє арифметичне входу та виходу як такий масопотік - це один із методів.

Формула (3.6) спрощується з припущенням, що  $m_{in}=m_{out}$ :

$$P_{isentropic,m} = \dot{m} \left[ \int_0^{T_{in}} c_p dT - \int_0^{T_{out}} c_p dT \right] = \dot{m} \int_{T_{out}}^{T_{in}} c_p dT \quad (3.7)$$

Це істотно обмежує область застосування інтегралу для  $c_p$ , і поширена гіпотеза вважає, що  $c_p$  залишається незмінним у цьому проміжку, що призводить до:

$$P_{isentropic,m} = \dot{m} \bar{c}_p (T_{in} - T_{out}) = \dot{m} \bar{c}_p T_{in} \left( 1 - \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\bar{\gamma}-1}{\bar{\gamma}}} \right) \quad (3.8)$$

Де масопотік представляє собою середнє значення протягом кожного окремого моменту часу.

### 3.1.2 Застосована потужність

Застосована потужність включає три компоненти: потужність, споживану компресором для стискання вхідного повітря, потужність, необхідну для розгону та зупинки ротора вздовж його траєкторії швидкості (ротор має коливання з амплітудою близько 1% від середньої швидкості) та втрати потужності в підшипниках через тертя.

$$P_{utilized} = \left( \frac{2\pi}{60} \right)^2 J_{rotor} N_{rotor} \frac{dN_{rotor}}{dt} + \frac{P_{compression}}{\eta_{mech}} \quad (3.9)$$

Перший термін - це потужність, необхідна для прискорення та замедлення ротора (інерційна потужність), другий термін - це потужність компресора разом з тертям у підшипниках. Симуляції не показують значних відмінностей у масопотоці між входом та виходом компресора, і тому вираз для  $P_{\text{compression}}$  є таким:

$$P_{\text{compression}} = \dot{m}_{\text{air}} \int_{T_{\text{in}}}^{T_{\text{out}}} c_p dT \quad (3.10)$$

Так само, як і для ізентропічної потужності, необхідний поліноміальний формул для  $c_p$ . Для рахунку формули 3.10 СА, отриманої на основі зібраних даних, потрібно перейти від температур до тисків, тому що не було можливості провести вимірювання температур з роздільністю СА. Використання ізентропічної відносності неможливе, адже процес не ізентропічний. Замість цього використовується та розробляється формула для ізентропічної ефективності:

$$\frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}} = \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)^{\frac{\bar{\gamma}-1}{\bar{\gamma}}} \frac{1}{\eta} - \frac{1-\eta}{\eta} \quad (3.11)$$

де символ над  $\gamma$  свідчить, що  $\gamma$  представляє середнє значення протягом температурного інтервалу.

Вважалося, що просте лінійне рівняння адекватно описує  $c_p$ , і ця формула була виведена на основі рівнянь 3.10 та 3.11.

Поширена гіпотеза припускає, що вихідна потужність компресора залишається незмінною, отже, її можна визначити за формулою:

$$\bar{P}_{\text{compressor}} = \bar{m}_{\text{air}} \bar{c}_{p,\text{air}} (\bar{T}_{0,2K} - \bar{T}_{0,1K}) \quad (3.12)$$

Біглий перегляд даних симуляції та вимірювань вказує на те, що амплітуда зміни потужності компресора варіюється в межах 20-30%, що свідчить про її нестабільність.



### 3.1.3 Продуктивність турбіни

Формули для ізентропічної та ефективно використаної потужності можна застосувати в декількох варіантах оцінки продуктивності турбіни. Найбільш складним варіантом є постійно змінювана потужність компресора в поєднанні з нерівномірним потоком ізентропічної потужності турбіни, тобто формули 3.6, 3.9 та 3.10:

$$\eta_{isentropic} = \frac{\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 J_{rotor} N_{rotor} \frac{dN_{rotor}}{dt} + \frac{\dot{m}_{air} \int_{T_{0,C,in}}^{T_{0,C,out}} c_p dT}{\eta_{mech}}}{\dot{m}_t \int_0^{T_{0,t,in}} c_p dT - \dot{m}_t \int_0^{T_{t,out}} c_p dT} \quad (3.13)$$

За умови, що масовий потік є однаковим при вході та виході турбіни, формула 3.8 може слугувати як знаменник:

$$\eta_{isentropic} = \frac{\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 J_{rotor} N_{rotor} \frac{dN_{rotor}}{dt} + \frac{\dot{m}_{air} \int_{T_{0,C,in}}^{T_{0,C,out}} c_p dT}{\eta_{mech}}}{\dot{m}_t \bar{c}_p T_{0,t,in} \left(1 - \left(\frac{P_{t,out}}{P_{0,t,in}}\right)^{\frac{\bar{\gamma}-1}{\bar{\gamma}}}\right)} \quad (3.14)$$

Додатково, у разі використання потужності компресора з GT-Power, формулювання має такий вигляд:

$$\eta_{isentropic} = \frac{\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 J_{rotor} N_{rotor} \frac{dN_{rotor}}{dt} + \frac{P_{C\_GTP}}{\eta_{mech}}}{\dot{m}_t \bar{c}_p T_{0,t,in} \left(1 - \left(\frac{P_{t,out}}{P_{0,t,in}}\right)^{\frac{\bar{\gamma}-1}{\bar{\gamma}}}\right)} \quad (3.15)$$

Та у випадку, коли потужність компресора розглядається як незмінна у часі, для обчислення потужності компресора застосовується формула 3.12:

$$P_{\text{ізентропіч}} = \frac{\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 J_{\text{rotor}} N_{\text{rotor}} \frac{dN_{\text{rotor}}}{dt} + \frac{\bar{m}_{\text{air}} \bar{c}_{p,\text{air}} (\bar{T}_{0,2K} - \bar{T}_{0,1K})}{\eta_{\text{mech}}}}{\dot{m}_t \bar{c}_p T_{0,t\_in} \left(1 - \left(\frac{P_{t\_out}}{P_{0,t\_in}}\right)^{\frac{\bar{\gamma}-1}{\bar{\gamma}}}\right)} \quad (3.16)$$

### 3.2 Вибір найбільш точного методу для оцінки ефективності

Актуальним є вибір найбільш точного методу для оцінки ефективності.

Існують три варіанти для визначення виконаної роботи. На рисунку 3.1 представлено приклад для T2M35 зі швидкістю 1500 об/хв. Видно, що врахування коливань роботи компресії має значний вплив. В цьому випадку амплітуда коливань швидкості турбонагнітача відносно невелика, в інших ситуаціях гіпотеза про постійність потужності компресора менш неточна, проте важливо врахувати цей аспект.

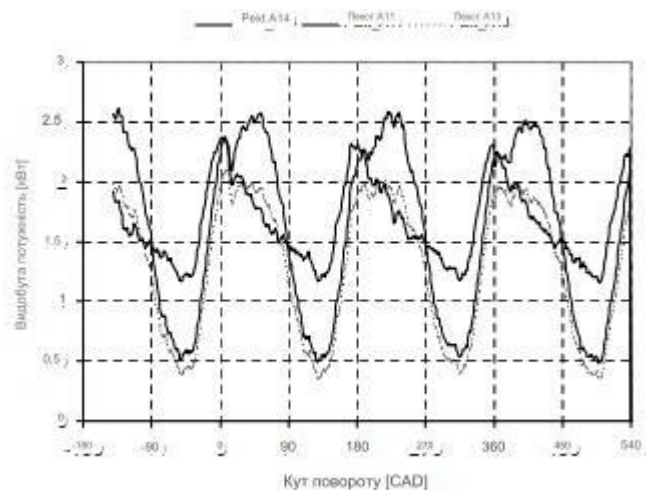


Рис. 3.1. Розрахунок вилученої потужності здійснено трьома методами згідно з рівняннями 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 для T2M3 зі швидкістю 1500 об/хв.

Окрім цього, існує пара формул для визначення ізентропічної потужності турбіни.

Формула 3.13 охоплює аналіз різного масопотоку на вході та виході, а 3.14 базується на гіпотезі рівності масопотоку при вході в турбіну та виході з

неї. Оскільки масопоток не міг бути визначений через вимірювання, у розрахунках використовуються тільки модельовані дані. Особливий інтерес становлять масопотоки на вході та виході з визначених меж для розрахунків ефективності, а саме масопотоки в точках вимірювання тиску. Впускний колектор та камера вихідного трубопроводу турбіни відтворені як елементи труб у GT-Power, і використовуються масопотоки на вході в трубу впускного колектора та на виході з труби, яка представляє камеру виходу. Рисунок 3.2 демонструє, що значні відмінності між входом та виходом існують, та об'єм турбіни має функціонувати як акумулюючий буфер.

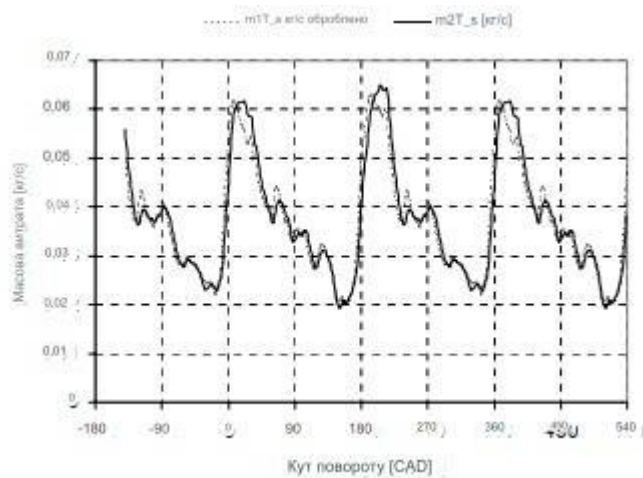


Рис. 3.2. Показники масопотоку на вході та виході турбіни для T2M2 1500 об/хв.

На ілюстрації 3.3 відображені результати для обох версій ізентропічної потужності, взяті з T2M2 1500 об/хв. Графік, розрахований за формулою 3.14, має надмірно багато шуму, тоді як два інші графіки виглядають досить подібними один до одного, що свідчить про те, що місце визначення масопотоку не є критичним, якщо припустити, що він залишається стабільним усередині турбіни.

Головне запитання полягає в тому, чому вираз 3.13 для ізентропічної потужності видає так багато шуму.

Роз'яснення цього явища можна знайти на ілюстраціях 3.2 та 3.4. На ілюстрації 3.4 ізентропічна потужність подана поруч з параметром накопичення маси, визначеного:

$$ms = \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{\dot{m}_{in}} \quad (3.17)$$

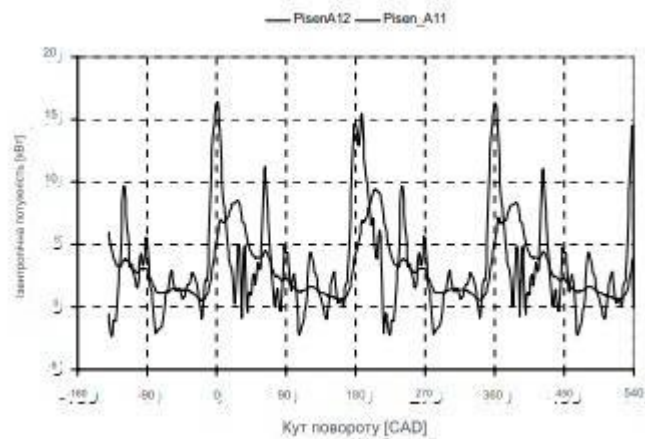


Рис. 3.3. Дані з обох методів розрахунку ізентропічної потужності для T2M2 1500 об/хв.

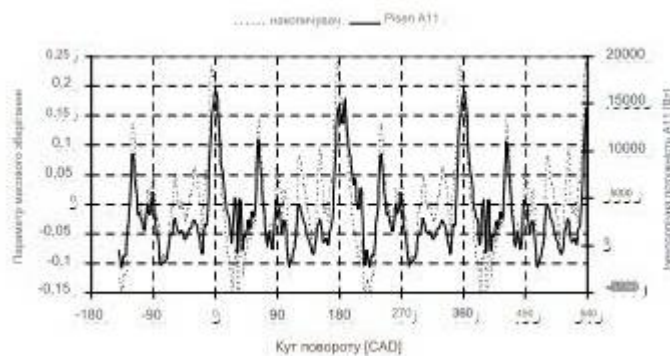


Рис. 3.4. Зіставлення ізентропічної потужності згідно з формулою 3.13 та коефіцієнтом накопичення маси для T2M2 1500 об/хв.

Це відображає ясну залежність між коливанням ізентропічної потужності та змінами в збереженні маси. Видно, що вхідний потік у спіральний впускний колектор різко коливається і здається дуже зашумленим. Інформація повністю отримана зі змін тиску та руху масопотоку, з чого випливає, що зашумлений вхідний масопотік є наслідком резонансних явищ у колекторі, викликаних взаємодією різних труб та розгалужень потоків.

На ілюстраціях 3.5-3.7 відбувається порівняння варіантів оцінювання ефективності згідно з рівняннями 3.14 та 3.15 для трьох відмінних колекторів, кожен з яких створює унікальні форми імпульсів на вході в турбіну.

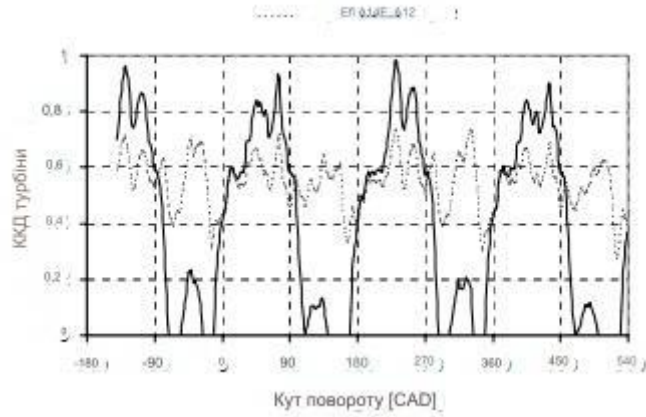


Рис. 3.5. Визначення продуктивності турбіни з використанням підходів 3.14 та 3.16. Для турбіни 2 із колектором 2 на 1500 об/хв.

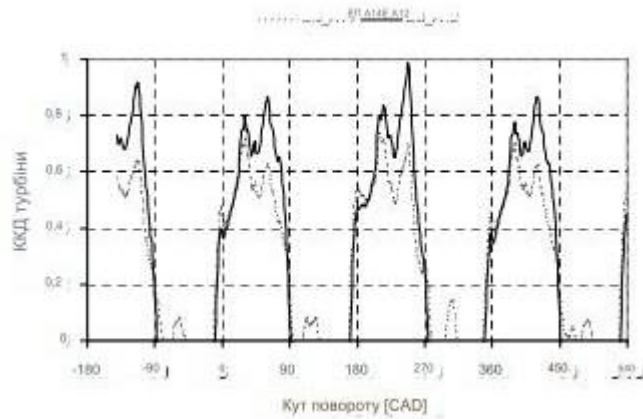


Рис. 3.6. Обчислення продуктивності турбіни за методиками 3.14 та 3.16. Турбіна 2 та колектор 1 на 1500 об/хв.

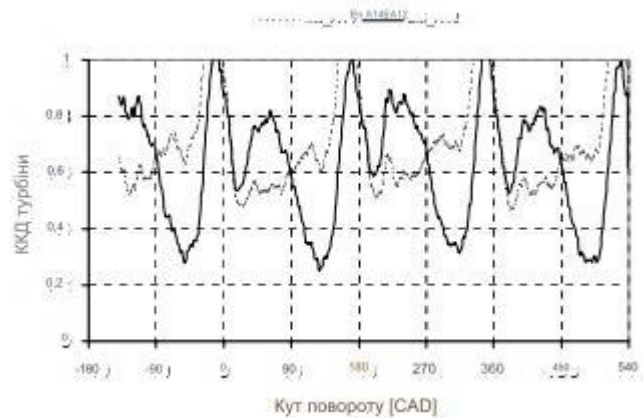


Рис. 3.7.

Розрахунок ефективності турбіни за формулами 3.14 та 3.16. Турбіна 2 та колектор 3 на 1500 об/хв.

У різних сценаріях розрахунки, базовані на формулі 3.16, виявляються з надто неправдоподібними показниками для комбінацій апаратури T2M1 та T2M3, що впливає з надто спрощеного визначення роботи компресора. Окрім того, деякі графіки показують ділянки з ефективністю нижчою за 0. Детальніше про це буде згадано нижче.

Тут доходять висновку, що найадекватнішим для використання миттєвим показником ефективності турбіни на двигуні є формула 3.14, де припускається рівність масопотоку на вході та виході з турбіни, але враховується коливна потужність компресора.

Це відповідає аналізу Кінга. Втім, слід відзначити недостатність інформації про шумний та коливаючий масопотік у турбіну. Було б більш впевнено мати точні дані про фактичний масопотік на двигуні. Методика за 3.13 відкидається через високий рівень шуму, що призводить до нереально коливаючоїся ефективності.

Рішення обчислювати потужність компресора з виміряних тисків замість прямого використання даних з GT-Power базувалося на проблемах з синхронізацією обчисленого тиску виходу компресора з вимірним. Причиною цього є те, що вхідна система між клапанами та компресором є чутливою до резонансу, де іноді складні конструкції, такі як міжохолоджувач, вхідний колектор та спіральний колектор компресора, можуть не завжди бути точно відтворені у всіх деталях за допомогою 1D-спрощення.

Графіки з роздільною здатністю CA ефективні для осмислення явищ та детальних досліджень, але для порівняння великих обсягів даних, різних сценаріїв, різного обладнання тощо краще підходять середні значення. Графіки ефективності турбіни на ілюстраціях 3.5-3.7 можуть бути усереднені за часом, або середнє значення може бути зважене за масопотоком або ізентропічною потужністю. Додатково, середнє може бути отримано шляхом окремого інтегрування чисельника та знаменника, а потім їх ділення. Той факт, що значення відрізняються між різними методами усереднення, не викликає здивування. Ефективність, по суті, повинна вказувати на те, яка частка внесеної кількості роботи була використана. Отже, розрахунок ефективності шляхом ділення загальної кількості отриманої потужності на загальну кількість

внесеної потужності не може бути помилковим, оскільки він відповідає основному визначенню ефективності.

Помилки можуть виникати, коли середню ефективність розраховують іншим чином.

Різниця між усередненою ефективністю, зваженою ізентропічною потужністю, та методом співвідношення інтегральних показників полягає в тому, що у першому випадку спочатку розраховується співвідношення, а потім виконується інтегрування, тоді як у другому випадку - навпаки. Оскільки співвідношення є нелінійною функцією, два підходи не дадуть однакових результатів, тобто вони не є комутативними.

Отже, вірним єдиним значенням ефективності для часозалежного процесу протягом визначеного інтервалу часу має бути співвідношення окремих інтегралів по часу отриманої та доступної потужності.

Це призводить до альтернативного методу визначення ефективності; що ефективність завжди є співвідношенням між двома часовими інтегралами, одним отриманої потужності та одним ідеальної (у даному випадку ізентропічної) потужності.

$$\eta(t) = \frac{\int_{t_i - \Delta t / 2}^{t_i + \Delta t / 2} P_{\text{extracted}}(t) dt}{\int_{t_i - \Delta t / 2}^{t_i + \Delta t / 2} P_{\text{ideal}}(t) dt} \quad (3.18)$$

$$P_{\text{ext}}(t) = \left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 J_{\text{rotor}} N_{\text{rotor}} \frac{dN_{\text{rotor}}}{dt} + \frac{\dot{m}_{\text{air}} \int_{T_{0,C_{\text{in}}}}^{T_{0,C_{\text{out}}}} c_p dT}{\eta_{\text{mech}}} \quad (3.19)$$

$$P_{\text{ideal}}(t) = \dot{m}_t \bar{c}_p T_{0,t_{\text{in}}} \left( 1 - \left( \frac{P_{t_{\text{out}}}}{P_{0,t_{\text{in}}}} \right)^{\frac{\bar{\gamma}-1}{\bar{\gamma}}} \right)$$

У цих виразах кожна включена величина може бути функцією часу. Якщо  $\Delta t$  є тривалістю одного циклу двигуна, результат буде співвідношенням інтегралів. За визначенням ефективності відповідно до 3.18 ніколи не

існуватиме миттєвої ефективності, вона завжди буде інтегралом за часовим інтервалом. Але якщо інтервал становить 1CAD, результат дорівнюватиме тому, що вище називається миттєвою ефективністю (оскільки роздільність аналізу вище становить 1CAD).

Рівняння 3.18. також дає строгий спосіб аналізу ефективності за певними інтервалами, наприклад, під час продування або для виокремлення ефективності за інтервалами, де масопотік перевищує певне порогове значення. Крім того, можуть бути розраховані згладжені криві ефективності відносно CAD, де межі інтегрування будуть  $t-\Delta t/2$  та  $t+\Delta t/2$ , і одне значення розраховується для кожного  $t$  (у цьому випадку для кожного CAD), тобто центроване, плаваюче усереднення за часом  $\Delta t$ .

Це рівняння також може пояснити, чому існують проблеми з фазуванням роботи всередині контрольного об'єму. Коли інтервал, за яким має бути розрахована ефективність, не значно довший за характерний час затримки фази, розрахунок стає дуже чутливим, і ефективність може приймати значення дуже віддалені від  $0 < \eta < 1$ , чого слід очікувати від ефективності (відповідно до збереження енергії). Плаваючі, центровані усереднені криві представлені на рисунку 3.8. На рисунку показано три криві для визначення 3.14 з інтервалом інтеграції 1, 30 та 90 CAD та одна крива для визначення 3.13 з інтервалом інтеграції 90 CAD.

Ілюстрація 3.8. Змінні середні показники ефективності за визначеннями 3.13 та 3.14 із різними періодами усереднення.  $Eff_{3.14}$ ,  $FA_{90\ 3.14}$  і  $FA_{30\ 3.14}$  відповідають визначенню 3.142 з періодами інтеграції 1, 30 та 90 CAD відповідно, тоді як  $FA_{90\ 3.13}$  відповідає визначенню 3.13 з 90 CAD періодом інтеграції. T2M2 1500 об/хв.

Очевидно, визначення A11 не дає задовільних результатів, незважаючи на довгий період усереднення в 90 CAD. Щоб продемонструвати, наскільки великі періоди усереднення можуть спотворити форму кривої, для 3.14 -ефективності нанесені графіки з періодами усереднення 1, 30 та 90 CAD. Були протестовані й інші періоди, але здається, що 30 CAD є підходящим періодом для використання ефективності 3.14.



Як видно, зокрема, на рисунках 3.8 та 3.9, крива ефективності часто буває від'ємною. Це можливо тільки у випадку, коли використана або ізентропічна потужність є від'ємною. З усіх точок роботи, детально проаналізованих у цьому дослідженні, не було знайдено жодної, де ізентропічна потужність була б від'ємною, тому від'ємна ефективність виникає через компресор. Інтервали, у яких спостерігається від'ємна ефективність, зазвичай є періодами з дуже низькою потужністю з обох боків турбіни.

Таким чином, малі від'ємні значення потужності можуть вести до дуже великих від'ємних значень ефективності. Причиною від'ємної використаної потужності, можливо, є неточності вхідних даних, оскільки від'ємна амплітуда значно менша від позитивної ( $|\min| \ll |\max|$ ). Тому від'ємні показники ефективності можна не брати до уваги, і припускати, що ефективність у цих випадках дорівнює 0, оскільки потужність не виробляється.

На жаль, ця методика не завжди ефективна при різних умовах роботи. Наприклад, при 1000 об/хв графік ефективності відносно обертів вказує на неправдоподібні показники з піковими значеннями вище 1, як показано на рисунку 3.9. Ефективність понад 1 спостерігається, коли реально використана потужність перевищує ізентропічну. На рисунку 3.10 видно, що фактична потужність (сплошна лінія) перевищує ізентропічну (сіра лінія) протягом коротких періодів близько -35, 145, 325 та 505 CAD. Ця проблема з'являється на наростаючих ділянках кожного піку ізентропічної потужності. Причиною перевищення ефективності понад одиницю є зміна фазування між інерційною та компресійною потужністю в залежності від обертів. Це показано на рисунку 3.11, де представлені інерційна потужність та потужність лише для компресії при 1000 та 1500 об/хв. Як видно з малюнка, проблема не пов'язана з невідповідністю фаз між симуляцією та реальними вимірами, адже виміряна та симульована потужності компресора збігаються за фазами. Також, вимірювання тиску на виході компресора добре узгоджуються з фазовою різницею, що спостерігається на рисунку. Це свідчить про те, що формула для обчислення потужності компресії потребує додаткових доопрацювань. Наприклад, можливо, спрощено оцінено вплив тертя. Оскільки потужності в цих випадках є

досить низькими (декілька сотень ват), існує ймовірність, що модель тертя є причиною таких результатів.

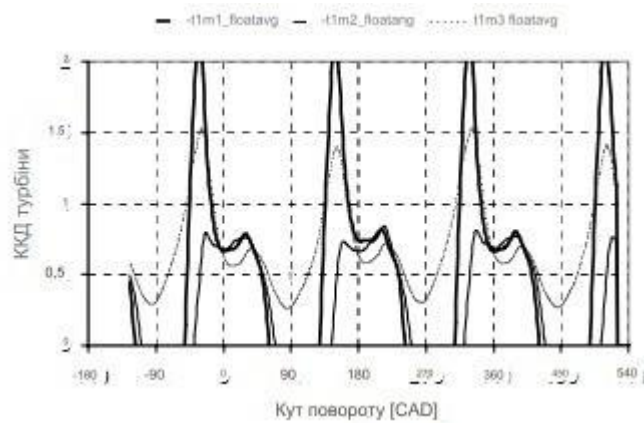


Рис. 3.10. Змінні середні рівні ефективності турбіни при 1000 об/хв для турбіни 1 та всіх трьох видів колекторів. Зокрема, колектори 1 та 3 продемонстрували надзвичайно високі показники ефективності.

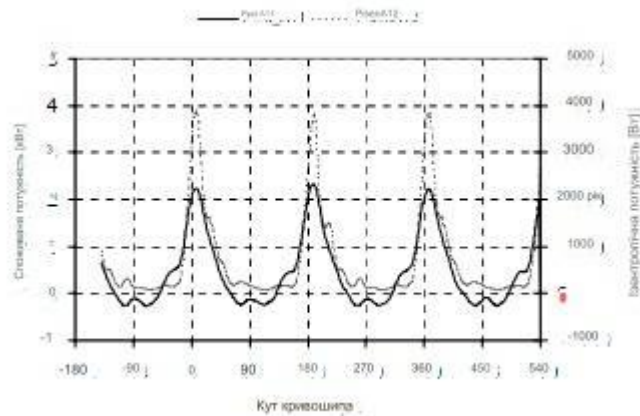


Рис. 3.11. Зіставлення ізентропічної потужності та реалізованої потужності для T1M1 на 1000 об/хв. Ясно, що реалізована потужність перевищує ізентропічну на початку кожного циклу.

Цікавим є також порівняння обчислених даних ефективності з показниками, відображеними в результатах GT-Power. Показники ефективності від GT-Power представляють собою усереднені за часом та зважені за масопотоком значення миттєвої (константної протягом кожного часового інтервалу, приблизно 1 CAD) ефективності. Це може бути однією з причин, через які отримані результати відрізняються.

## 4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

### 4.1 Мікротвердість та концентрація добавок в покритті змінюються в залежності від параметрів процесу електролітичного осадження

Для створення залізного сплаву з додаванням кобальту використовується кобальтова сіль  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  як основний інгредієнт. Іонна концентрація у процесі осадження сплаву істотно впливає на його фізико-механічні характеристики, особливо на структурні аспекти. Зменшення концентрації сприяє формуванню дрібнозернистої, компактної структури, критичної для стійкості до зношування покриттів. Водночас, збільшення розведення електроліту, хоча й є бажаним, обмежується максимальною щільністю струму, що може знизити ефективність процесу, а також призводить до утворення крихких і структурно нестабільних покриттів.

Згідно з нашими попередніми результатами, оптимальний діапазон концентрації залізного хлориду, який є ключовим елементом електроліту, становить  $200 - 400 \text{ кг/м}^3$ , а для кобальтового хлориду, що діє як добавка, –  $5 - 25 \text{ кг/м}^3$ . Додавання такої кількості кобальтової солі значно впливає на характеристики покриття, зокрема на його фізичні та механічні параметри. Присутність кобальту в сплаві з залізом покращує його стійкість до зношування, знижує внутрішні напруження та тертя, а також підвищує хімічну та теплову стійкість. Електроліт з додаванням кобальтових солей сприяє вирівнюванню поверхні, оскільки гальванічне покриття з кобальтом може згладити дрібні нерівності. Таким чином, якість поверхні перед нанесенням залізо-кобальтового покриття може досягати рівня шорсткості  $Ra = 2 \text{ мкм}$ .

Активність електроліту значно впливає на хід процесу та утворення покриття, особливо його кислотний рівень. Низький рівень кислотності може призвести до того, що на поверхні біля катода будуть формуватися гідроксиди. З іншого боку, висока кислотність зменшує ефективність осадження сплаву, збільшує агресивність розчину. Тому для наших цілей оптимальним є підтримання рівня кислотності в діапазоні  $0,6 - 1,0$ .

В контексті електролітичного процесу, особливо у випадку щільності струму, важливо, щоб вона корелювала з концентрацією та рівнем кислотності розчину. У процедурах гальванічного осадження залізних сплавів, умови електролізу зазвичай наступні: температура коливається між 20 – 60 °С, катодна щільність струму варіюється від 20 до 60 А/дм<sup>2</sup>, а співвідношення асиметрії струму має значення від 2 до 6.

Щоб мінімізувати кількість необхідних експериментів і розробити математичну модель процесу електролізу, було використано метод оптимізованого планування дослідів. Змінними елементами в цьому підході були: рівень  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ , величина асиметрії  $\beta$ , щільність катодного струму  $D_k$ , кислотність розчину, рівень  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ , та температура розчину. Ці параметри представлено в таблиці 4.1.

Табличний матеріал 4.1, що містить відомості про характеристики електролізу, призначені для структурування подальших наукових випробувань.

$FeCl_2 \cdot 4H_2O$ , кг / м <sup>3</sup>	$\beta$	$D_k, A / дм^2$	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$ , кг / м <sup>3</sup>	pH	t, °C
200 – 400	2 – 6	20 – 60	5 – 25	0,6 – 1,0	20 – 60

Ми створили шестифакторний латинський квадрат, де кожна комбінація факторів зустрічалась лише раз. Для розробки математичної моделі, що відображає вміст кобальту у покритті, ми аналізували зібрані дані за допомогою програми Statgraphics Plus 5.0. Точність розробленої моделі відповідає зазначеним критеріям. Використовуючи ці дані, ми розробили залежності вмісту кобальту в Fe–C покриттях від параметрів електролізу, що представлені на рисунку 4.1.

Для кожної з сформованих графіків була добрана відповідна одновимірна функція з належними параметрами:

$$Z(FeCl_2) = 1,610 - 3CFeCl_2 + 1,3396, \quad (4.2)$$

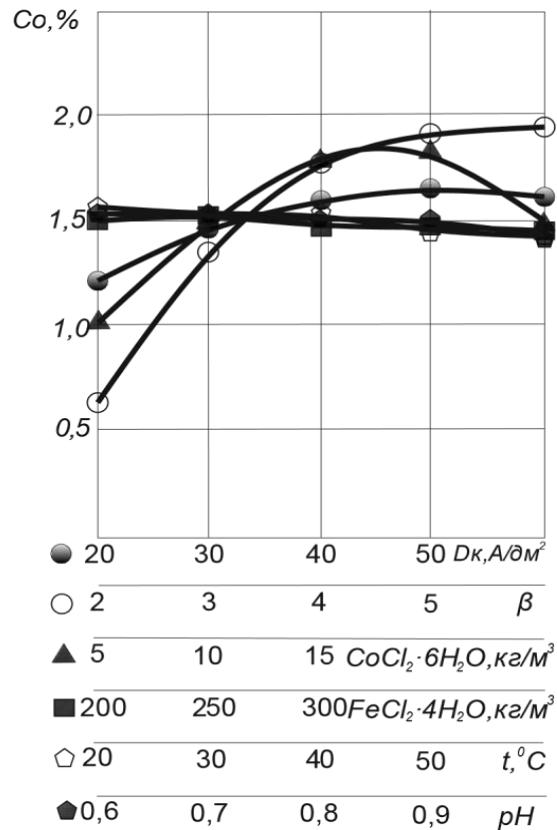


Рис. 4.1. Зміна кількості кобальту у покритті зі сплаву заліза та кобальту в залежності від різних умов процесу електролізу.

$$3(\beta) = -0,1001\beta^2 + 1,1333\beta - 1,2272, \quad (4.3)$$

$$3(CoCl_2) = -4,9 \cdot 10^{-3} CCoCl_2^2 + 0,1694 CCoCl_2 + 0,3128, \quad (4.4)$$

$$3(D_k) = -3 \cdot 10^{-4} D_k^2 + 3,49 \cdot 10^{-2} D_k + 0,7284, \quad (4.5)$$

$$3(t) = -2 \cdot 10^{-4} t + 1,5648, \quad (4.6)$$

$$3(pH) = 2,344 pH + 0,6844, \quad (4.7)$$

Аналізуючи всі одновимірні функції, ми прийшли до висновку, що основними визначальними факторами для концентрації кобальту в покритті є щільність катодного струму, співвідношення асиметрії струму та концентрація кобальтового хлориду. Під час обробки та аналізу зібраних даних, ми виявили математичну модель  $S=f(\beta, D_k, C)$ , яка представляє собою комбінацію трьох

одновимірних функцій, які мають найсуттєвіший вплив на вміст кобальту у покритті.

Інформація про умови електролізу та відповідні отримані результати наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Кореляція між кількістю кобальту в залізо-кобальтовому покритті та умовами електролітичного процесу.

№ досвіду	$\text{FeCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ , кг / м <sup>3</sup>	$\beta$	$D_k, \text{A} /$ дм <sup>2</sup>	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , кг / м <sup>3</sup>	$pH$	$t, ^\circ\text{C}$	$z, \%$	Сорасч, %
1	200	2	20	5	0,6	20	0,01	0,6
2	200	3	30	15	0,9	60	1,5	1,2
3	200	4	40	25	0,7	50	1,7	1,8
4	200	5	50	10	1	40	2	1,8
5	200	6	60	20	0,8	30	2,3	2,4
6	250	2	30	10	0,7	30	0,7	0,66
7	250	3	40	20	1	20	1,65	1,3
8	250	4	50	5	0,8	60	1,4	1,3
9	250	5	60	15	0,6	50	2,28	2,03
10	250	6	20	25	0,9	40	1,9	1,7
11	300	2	40	15	0,8	40	1	0,7
12	300	3	50	25	0,6	30	1,4	1,4
13	300	4	60	10	0,9	20	1,8	1,5
14	300	5	20	20	0,7	60	1,9	1,7
15	300	6	30	5	1	50	1,3	1,3
16	350	2	50	20	0,9	50	0,9	0,7
17	350	3	60	5	0,7	40	1	0,8
18	350	4	20	15	1	30	1,65	1,5

19	350	5	30	25	0,8	20	1,9	1,9
20	350	6	40	10	0,6	60	2	1,7
21	400	2	60	25	1	60	0,5	0,7
22	400	3	20	10	0,8	50	1	1,1
23	400	4	30	20	0,6	40	1,9	1,7
24	400	5	40	5	0,9	30	1,5	1,5
25	400	6	50	15	0,7	30	2,4	2,1

Ця кореляція між кількістю кобальту в електролітичному покритті та умовами електролізу зумовлена тим, що кобальт включається в осад через хімічні та електрохімічні процеси, а також у вигляді механічних домішок.

Концентрація кобальту у покритті зростає зі збільшенням катодної щільності струму, що відбувається через зміни в швидкості електролітичного процесу. Зі зростанням щільності струму, іони активніше переміщуються до катода, в той час як інтенсивність хімічної реакції зменшується. Кобальт, як механічна примісь, включається у покриття при високих рівнях щільності струму.

Зростання рівня кобальту в покритті є результатом підвищення концентрації кобальтового хлориду в електроліті, оскільки це призводить до збільшення кількості іонів, які накопичуються на катоді.

Зростання кількості кобальту у покритті корелює зі збільшенням співвідношення асиметрії струму. Ця залежність прямо пов'язана з динамікою електролізу: коли анодна компонента зменшується, швидкість осадження зростає, що сприяє збільшенню потоку іонів кобальту до катода.

Для розробки математичної моделі, що показує зв'язок між мікротвердістю та умовами електролізу, застосовувалось методологія експериментального планування за тривимірним латинським квадратом. Раніше визначені ключові фактори для експериментального плану та тривимірний латинський квадрат демонструються у таблиці 4.3 та на ілюстрації 4.2.

Таблиця 4.3. Параметри змінних у процесі організації експерименту

Найменування параметрів електролізу	1	2	3	4	5
катодна щільність струму $D_k, A / dm^2$	20	30	40	50	60
коефіцієнта симетрії струму $\beta$	2	3	4	5	6
концентрація хлориду кобальту $CoCl_2 \cdot 6H_2O, кг/м^3$	5	10	15	20	25

Основні параметри, що контролюють процес електролізу на виробництві, це щільність катодного струму та співвідношення асиметрії. Щоб забезпечити високу адгезію електролітичного покриття до основи, необхідно налаштувати ці параметри на ранній стадії електролізу. Підвищення рівня хлориду кобальту зміцнює мікротвердість електролітичного покриття. Ці елементи легко регулюються та контролюються у процесах ремонтного виробництва.

Хлорид кобальту $D_k$	5						10						15						20						25					
	$\beta$	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6				
20																														
30																														
40																														
50																														
60																														

Рис. 4.2. Складений латинський квадрат для тривимірного набору факторів.



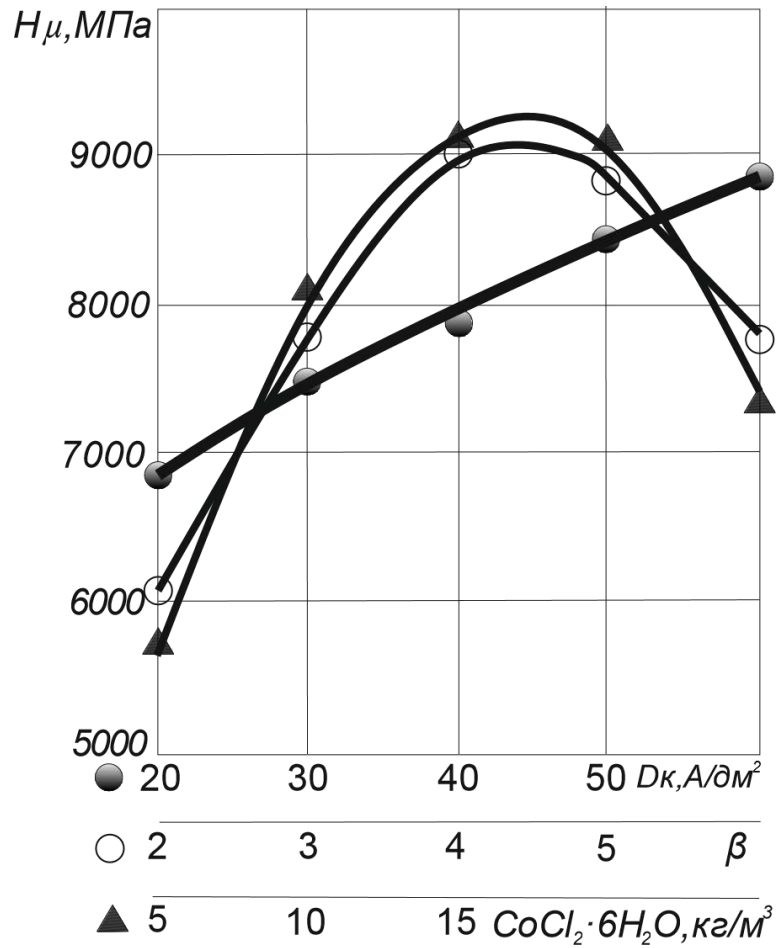


Рис. 4.3. Кореляція між мікротвердістю залізо-кобальтового покриття та умовами електролізу.

Після зіставлення обчислювальних та експериментальних результатів, ми прийшли до висновку, що розроблена математична модель є достатньо надійною. Інформація щодо умов електролізу та отриманих показників викладена в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Кореляція між мікротвердістю залізо-кобальтового покриття та умовами електролізу

№ досвіду	$\beta$	$D_k, A / dm^2$	$CoCl_2 \cdot 6H_2O, kg / m^3$	$H, MPa$	$H_{теор.} MPa$
1	2	20	5	4250	3876
2	3	30	15	9000	8788
3	4	40	25	8750	8912

4	5	50	10	9650	9583
5	6	60	20	10850	10580
6	2	30	10	6000	5966
7	3	40	20	8950	9009
8	4	50	5	7400	7374
9	5	60	15	11000	11289
10	6	20	25	5100	5901
11	2	40	15	6000	7012
12	3	50	25	8050	8184
13	4	60	10	10000	9905
14	5	20	20	8700	8535
15	6	30	5	5050	4803
16	2	50	20	7600	7013
17	3	60	5	6050	6427
18	4	20	15	10000	9075
19	5	30	25	8450	8150
20	6	40	10	8250	7774

Зростання концентрації хлориду кобальту в електроліті з 5 до 25 кг/м<sup>3</sup> сприяє збільшенню насичення подвійного електричного шару іонами кобальту. Це, у свою чергу, збільшує шанси формування твердого розчину через відновлення іонів кобальту до його елементарного стану. В кристалічній структурі електролітичного заліза виникають деформації, що викликані інтеграцією часток кобальту. Ці деформації ведуть до збільшення мікротвердості та внутрішніх напружень у матеріалі. Підтвердженням цього є графік, який показує залежність мікротвердості осаду від рівня хлориду кобальту.

Підвищення щільності катодного струму сприяє зростанню показників мікротвердості покриття. На наш погляд, це відбувається, з одного боку, через

збільшення концентрації кобальту у покритті, а з іншого - через формування осадів з дрібнозернистою структурою та високою мікротвердістю при високих рівнях щільності струму.

Зміна співвідношення асиметрії струму впливає на мікротвердість покриттів. Низькі рівні  $\beta$  сприяють формуванню м'яких, малонапружених осадів з міцним зчепленням з основою і грубозернистою структурою. У таких осадах міститься мала кількість легуючого елемента. Натомість високі показники  $\beta$  зумовлюють включення кобальту в осад як через хімічні реакції, так і механічним шляхом (через інтеракцію з іонами заліза). Це веде до більш інтенсивних спотворень у кристалічній структурі електролітичного заліза, що підвищує мікротвердість та внутрішні напруження.

Процедура електролітичного формування залізо-кобальтового покриття може зайняти значний час, проте максимальна можлива товщина такого покриття обмежена декількома факторами, зокрема утворенням горбів та дендритів на поверхні, яка обробляється. Для досягнення товщини покриття від 1 до 1,5 мм, потрібно вибрати оптимальний режим електролізу та регулярно фільтрувати електроліт. Якщо існує потреба в більш товстому покритті, то після формування першого гальванічного шару його обробляють механічно, а потім процес нанесення покриття повторюють.

#### **4.2 Розгляд результатів щодо адгезії покриття до базового металу**

При відновленні та посиленні деталей часто стикаємося з різними умовами їхньої поверхні, включаючи зношення, механічну обробку, подряпини, вм'ятини та корозію. Стан поверхні, призначеної для електролітичного покриття, відіграє значну роль у міцності адгезії. Шорсткість, яку можна досягти за допомогою механічної та хімічної обробки, підвищує надійність приєднання електролітичного покриття до базового металу.

Різні дослідники надають різні пояснення природі адгезійних сил, що виникають між базовим металом і покриттям.

Однією з основних теорій, запропонованою Мак-Беном, є теорія механічного захоплення, яка трактує міцність зчеплення як взаємне зчеплення двох поверхонь.

Досягнення міцності адгезії покриття та створення рівномірної структури поверхні залежить від виконання таких умов:

Метал повинен мати рівномірну структуру без тріщин, пор та чужорідних включень.

Вибір режимів механічної обробки має забезпечувати мінімізацію внутрішніх напружень у металі та уникнення поверхневого ущільнення.

Поверхня, яка буде покриватися гальванічно, має бути оптимально шорсткою та рівномірно обробленою.

З цього висновку слідує, що найбільш придатними для гальванічного покриття залізними сплавами є сталі з низьким вмістом вуглецю, без додавання легуючих елементів та без термічної обробки.

Ми поставили перед собою мету дослідити адгезію основи з електролітичним залізо-кобальтовим покриттям, сформованим за допомогою струму зі змінною полярністю під час різних умов електролізу.

Для розробки математичної моделі адгезії електролітично нанесеного сплаву Fe–Co до базового металу ми використовували зазначений раніше метод трифакторного латинського квадрата. Відповідні фактори та результати експериментальних досліджень вміщені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Залежність міцності адгезії електролітичного залізо-кобального сплаву до основи від умов електролізу

№ досвіду	$\beta$	$D_k, A / \text{дм}^2$	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}, \text{кг} / \text{м}^3$	$\sigma_{\text{сц}}, \text{МПа}$
1	2	20	5	350
2	3	30	15	97
3	4	40	25	82
4	5	50	10	125

5	6	60	20	78
6	2	30	10	175
7	3	40	20	72
8	4	50	5	130
9	5	60	15	110
10	6	20	25	64
11	2	40	15	120
12	3	50	25	99
13	4	60	10	115
14	5	20	20	75
15	6	30	5	118
16	2	50	20	88
17	3	60	5	227
18	4	20	15	97
19	5	30	25	69
20	6	40	10	123

Відібравши дані про силу з'єднання між основним металом та електроосадженими залізо-кобальтовими покриттями, зареєстровані за однакових умов, та визначивши середні значення, були створені діаграми (див. рисунок 4.9).

З діаграм впливає взаємозв'язок між адгезією Fe-Co сплаву та матеріалом основи, який зумовлений умовами електролізу. Найменша прочність адгезії спостерігається при високих параметрах електролізу. Регулювання електролізу до технологічних параметрів збільшує якість адгезії. При нанесенні Fe-Co покриттів електролітичним способом на змінному струмі існує три методики регулювання. Перша методика включає вибір ідеального співвідношення асиметрії та низької інтенсивності струму. Друга полягає у встановленні оптимальної інтенсивності струму з низьким співвідношенням

асиметрії, а далі поступовому налаштуванні параметрів електролізу до необхідних значень. Третя методика використовує низькі налаштування електролізу з подальшим їх підвищенням до потрібних рівнів.

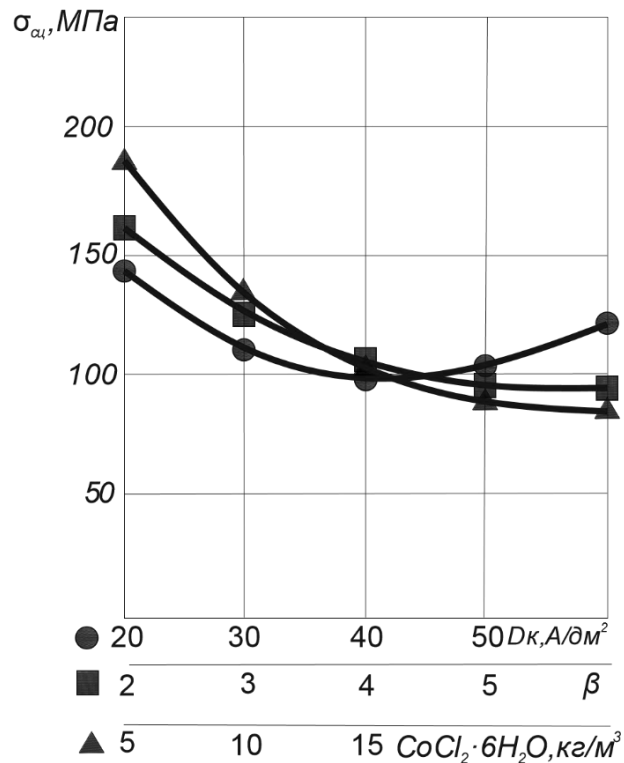


Рис. 4.9. Взаємозв'язок між силою адгезії електролітичного сплаву заліза та кобальту та матеріалом основи, обумовлений умовами електролізу.

$$\sigma_{ад} = 588,9 - 72,9 \cdot \beta - 32,6 \cdot C_{CoCl_2} + 1,9 \cdot \beta^2 + 0,3 \cdot C_{CoCl_2}^2 + 3,04 \cdot \beta \cdot C_{CoCl_2} + 0,16 \cdot D_k \cdot C_{CoCl_2} + 11 \cdot D_k, \quad (4.10)$$

Перша методика не підходить для електроосадження легованого заліза, оскільки при цих параметрах електролізу покриття виходять жорсткими, проте зі слабкою адгезією. У другій методиці виникає можливість швидкого налаштування процесу електролізу до експлуатаційного стану, однак ідеальна інтенсивність струму 40 А/дм<sup>2</sup> не сприяє збільшенню прочності адгезії. Тоді як застосування третьої методики забезпечує оптимальну адгезію електролітичного покриття Fe–Co до основи, завдяки створенню умов для поліпшення структури базового металу.

Сила адгезії зменшується з ростом рівня хлориду кобальту у розчині електроліту, оскільки це призводить до зростання внутрішніх стресів і деформації кристалічної структури заліза.

Наші експерименти виявили, що електролітично нанесене Fe-Co покриття на компонентах залишалось стійким і не відділялося під час численних ударів молотом, під час обробки на верстатах, тестуванні на стійкість до зношування, а також під час використання відремонтованих частин.

### **4.3 Аналіз стійкості до зношування електроосадженого залізо-кобальтового сплаву**

Стійкість до зношування є ключовою особливістю цих сплавів, що визначається через ряд характеристик електролітичних покриттів, які піддаються зносу в процесі використання.

Головна мета експериментального аналізу полягає у визначенні відносної стійкості до зношування покриття, яка є ключовим критерієм функціональності реставрованого компонента.

Властивості покриттів, які мають значення для зносу, включають формування оксидних шарів, будову, рівень напруження, мікрохарактеристики твердості та хімічні компоненти.

Ключовими параметрами є хімічний склад та будова, які впливають на механічні, магнітні, прочнісні, хімічні та фізичні характеристики покриттів. Проте ці параметри не залишаються незмінними під час зношування, оскільки вони залежать від умов зносу, таких як середовище, навантаження та швидкість.

Ми здійснили серію досліджень, щоб оцінити вплив хлориду кобальту та різних параметрів електролізу на стійкість до зносу покриття Fe-C. Осадження проводили з електролітного розчину наступного складу: хлорид заліза – 300 кг/м<sup>3</sup>, температура електроліту – 40 °C, рН=1. У розчин додавали різні кількості хлориду кобальту, і електроліз проводили при змінних рівнях  $D_k$  та  $\beta$ .

За результатами наших досліджень було виявлено, що рівень зносу покриття найбільше залежав від рівня хлориду кобальту в електроліті. Ідеальна

кількість хлориду кобальту знижує зношування електролітичного сплаву Fe-Co приблизно в два рази. Проте, перевищення кількості хлориду кобальту понад стандартні показники збільшує зношування покриття. Ми припускаємо, що це через вплив легуючого елемента, який змінює структуру та підвищує крихкість. Збільшення зносу покриття також сприяється внаслідок включення відокремлених частинок твердого покриття в контртіло.

На основі проведених нами дослідів та аналізу даних було визначено оптимальні параметри електролізу:

- співвідношення асиметрії  $\beta = 5,148$ ;
- інтенсивність катодного струму  $D_k = 45 \text{ A} / \text{дм}^2$ ;
- рівень хлориду кобальту у розчині електроліту  $C_{CoCl_2} = 17,7 \text{ кг} / \text{м}^3$ .

#### 4.4 Структурні різноманітності в електролітичному сплаві Fe-Co

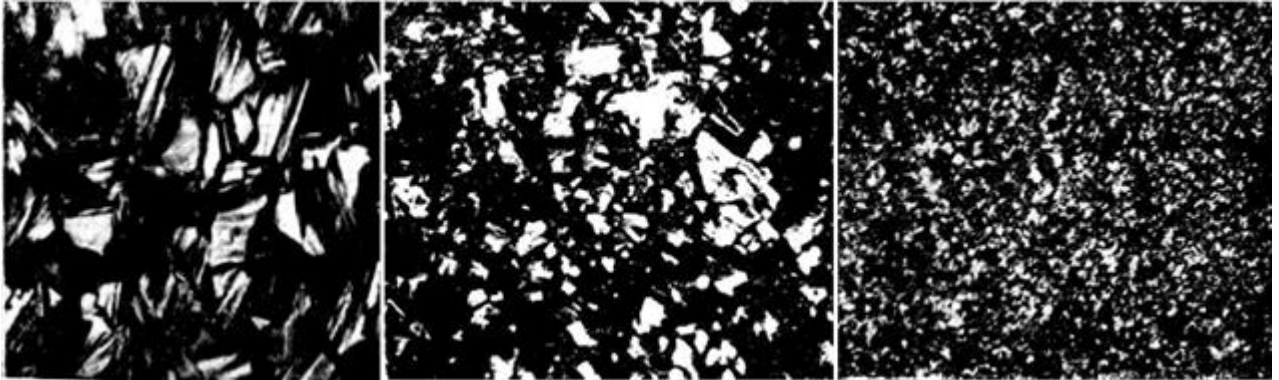
Ми дослідили зміни на поверхні сплаву Fe-Co, які залежать від ступеня легування. Для створення грубозернистої структури покриття використовувалися делікатні умови електролізу.

На графіці 4.11 представлені мікроскопічні знімки поверхонь електроосаджених сплавів, які були створені за різних умов електролізу. З аналізу цих зображень можна зрозуміти, що зростання вмісту кобальту у покритті веде до збільшення розмірів кристалів, що помітно на змінах поверхонь окремих кристалів. Також було виявлено, що електроосаджені сплави мають більшу дисперсію, ніж відкладення чистих металів під час однакових умов процесу. При збільшенні концентрації добавки, що містить кобальт, розмір зерен поступово зменшується через зростання кількості центрів кристалізації.

В ході електрохімічних процесів на катоді формується дрібнозерниста структура електролітичного сплаву заліза і кобальту, визначена параметрами електролізу (складу розчину, температури, рівня рН, інтенсивності струму та співвідношення асиметрії). Зміни в цих параметрах призводять до створення



покриттів з різноманітними структурами, що впливають на фізичні та механічні характеристики осадженого матеріалу.



*Fe – 0,5%Co Fe – 1,0%Co Fe – 2,0%Co.*

Рис. 4.11. Залежність розмірів зерен металу Fe–C від кількості кобальту у покритті 5000.

Параметри електролізу формують структуру як осаджень чистого заліза, так і електролітичного сплаву заліза і кобальту. Крім того, значний вплив на структуру має характер елемента, який додається до електролітичних осаджень.

Такі характеристики структури, як неоднорідність, розмірність, концентрація дефектів у кристалічній структурі, незбалансованість, є результатом особливостей процесу електрокристалізації залізних легованих осадів. Ці елементи визначають унікальні характеристики електроосаджених покриттів.

Під час вивчення структури електролітичних сплавів було зазначено такі характеристики: шари осадженого металу, що безпосередньо контактують з основою, мають високий рівень розподілу частинок, дефектність та значні внутрішні стреси. Проте подальше нарощування осаду веде до плавного збільшення розмірів його зерен, що сприяє концентрації дефектів у кристалічних решітках, і в результаті зниженню внутрішньої напруги.

Підвищення ступеня поляризації катода спричиняє більшу фрагментацію зерен, зростання кута дезорієнтації між субзернами та зростання концентрації дислокацій. Збільшення рівня легування також має вплив на деталізовану структуру сплавів.

Розмір кута дезорієнтації впливає на характеристики меж субзерен, які можуть мати різні форми:

- нахилені решітки;
- решітки крутіння;
- нерегулярні решітки

У самих субзернах окремі дислокації зустрічаються нечасто (концентрація в них на 5–6 порядків менша, ніж на межах). Варто відмітити, що рівень легування при електрокристалізації залізних сплавів не є головним чинником змін у структурі осадів. Набагато більше впливають параметри електролізу. Дослідження вказують на те, що щільність дислокацій у сплавах значно вища, ніж у осадах розчинника-металу, створених у аналогічних умовах електролізу. Наприклад, у сплаві Fe - 2%Co щільність дислокацій становила  $3 \cdot 10^{10} - 12 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , в той час як у чистому залізі –  $4 \cdot 10^{10} - 12 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Аналіз покриття дозволяє зробити висновок, що зерна ініціюються на пасивованих сегментах основи і розвиваються автономно одне від одного. Ця гіпотеза базується на спостереженні, що границі зерен у покриттях не містять дислокацій та мають великі кути.

При електрокристалізації в деяких металах спостерігається порушення звичайної послідовності атомних рівнів, що призводить до утворення дефектів у структурі, типу двійникових або деформаційних. У таких металах існує зв'язок між енергією дефекту упаковки та інтенсивністю катодного струму: посилення інтенсивності струму сприяє підвищенню ймовірності формування двійників. Утворення двійників у покриттях зазвичай відбувається за механізмом неспіввідносного зароджування: окремі зародки входять у двійникове відношення до нижнього шару.

Послідовне повторне утворення двійників спричиняє виникнення дефектів упаковки деформаційного характеру. Однак ймовірність такого повторного двійникування значно нижча, ніж для одноразового випадку. Також слід відзначити, що електрокристалізація металів за наявності адсорбційних добавок веде до збільшення кількості дефектів упаковки.

Однією з ключових властивостей структури електролітичних покриттів є розподіл розмірів їх зерен або кристалів. Класифікація покриттів залежно від

абсолютних розмірів їх структурних одиниць розділяється на: грубозернисті, середньозернисті та мелкозернисті покриття. Мелкозернисті мають розмір кристалів  $10^{-5}$  см і менше, середньозернисті -  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  см, грубозернисті -  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  см. У більшості випадків покриття утворюються з розміром зерен меншим за 100 нм. Такі покриття класифікуються як ультрамелкодисперсні матеріали, які знаходяться на межі між полікристалічними та аморфними структурами.

Розподіл розмірів зерен в електролітичних покриттях, як відомо, залежить від параметрів електролізу та визначається балансом між швидкостями формування та росту кристалів. Коли темп утворення зародків переважає над темпом їх розвитку, на катоді утворюються мелкокристалічні та ультрамелкодисперсні осади.

Підвищення інтенсивності струму зумовлює більшу поляризацію катода, що сприяє зростанню розмірів зерен у осадах. Низькі рівні струму спричиняють утворення грубозернистих осадів через перевагу швидкості росту вже існуючих зародків над темпом появи нових кристалізаційних центрів.

Підвищення температури розчину електроліту призводить до зниження поляризації на катоді, що сприяє формуванню грубокристалічних осадів, причому чим вища температура розчину, тим більші кристали утворюються в сплавах. Ця тенденція характерна як для сплаву Fe-Co, так і для більшості других сплавів.

Зменшення розмірів кристалів спричиняється через падіння рівнів концентрації та кислотності у розчині електроліту, а також застосуванням поверхнево-активних агентів. Вплив кислотності розчину електроліту особливо суттєвий для процесу структуроутворення в сплавах металів з підгрупи заліза.

Огляд наукових публікацій виявив, що інформація щодо розмірів зерен у сплавах здебільшого базується на даних рентгенівського структурного аналізу, який фіксує не сам розмір зерен, а середній розмір кристалічних доменів.

Складність і різноманітність фазової структури електроосаджених сплавів, часто нерівноважні за термодинамікою через велику кількість неметалевих домішок, різності у складі та структурі, пояснюють відсутність точних даних про розміри кристалів у таких сплавах. Ще одним ускладненням у вивченні фазового складу є те, що розміри зерен часто лежать у діапазоні 0,1-

1 мкм, що виходить за межі звичайного спостереження. Осади металів групи заліза кристалізуються за умов високих перенапруг, що веде до формування мелкокристалічних осадів, структура яких не виявляється при використанні оптичного мікроскопу. Всі ці фактори значно ускладнюють дослідження закономірностей росту електролітичних осадів і сприяють вирішенню задачі створення покриттів з необхідними властивостями.

#### **4.5 Співставна стійкість до зносу покриттів Fe–Co**

Більшість деталей для автотракторної техніки виробляють зі сталі 45, яка підлягає подальшій термообробці, тому для випробувань зносостійкості було обрано саме цей матеріал. Тести зносостійкості виконувалися у парі тертя із чавуном СЧ20.

Здійснені тестування продемонстрували, що найкраща адгезія та мінімальний знос спостерігався у сплаву Fe–Co після термічної обробки, за ним слідує сплав Fe–Co, потім сталь 45, яка була закалена за допомогою високочастотного нагрівання з наступним низькотемпературним відпусканням, та електролітичне залізо (див. рисунок 4.15). Під час тестування в парі з бронзою знос покриттів був більшим, ніж в парі із чавуном.

Експериментальні результати свідчать про доцільність додавання кобальту до електролітичного заліза з наступною термообробкою. Це пояснюється тим, що при крайніх умовах тертя відбувається активне формування оксидних шарів з одночасним швидким їх розпадом. Отже, найбільший знос електролітичного заліза спостерігається при найнижчих температурах і коефіцієнтах тертя.

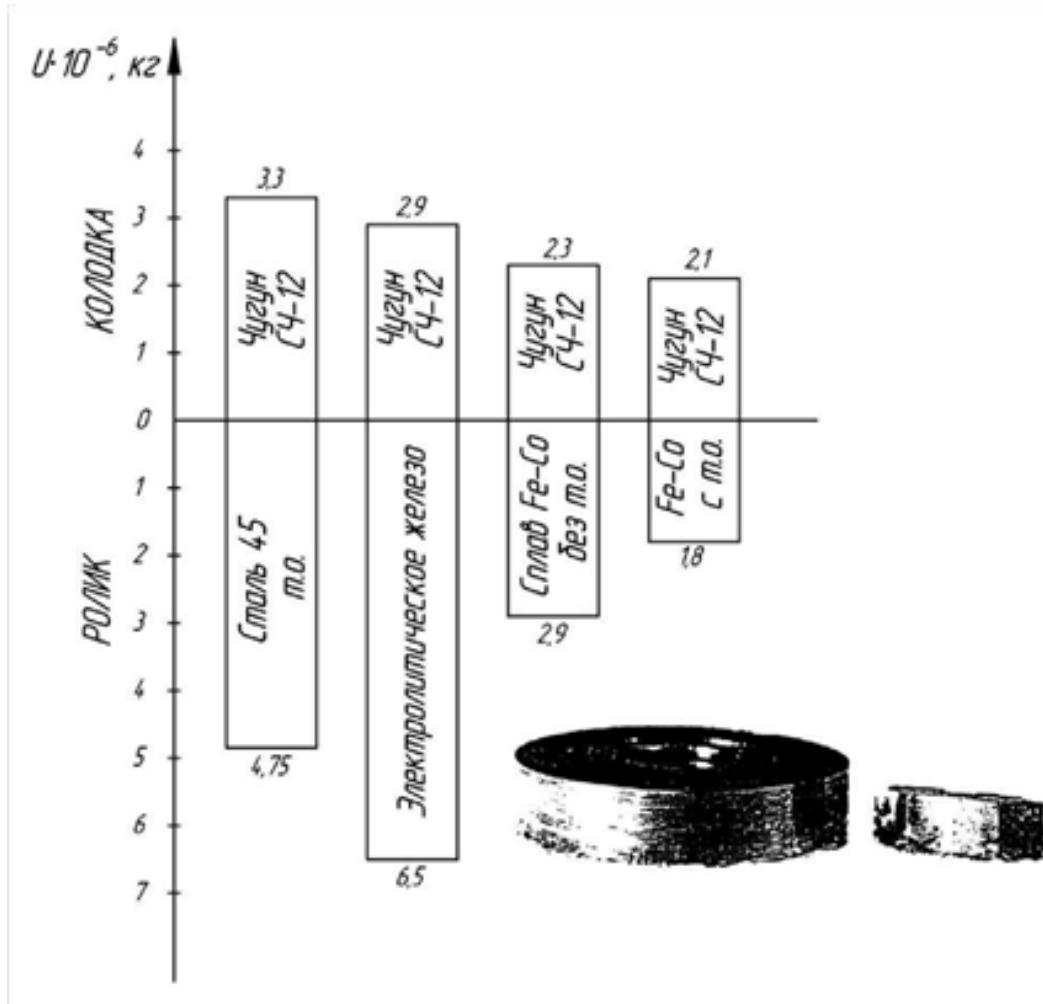


Рис. 4.11. Втрата матеріалу електролітично нанесеного сплаву заліза та кобальту.

У дослідженнях різних науковців, згаданих у джерелах, зазначається, що поверхні, оброблені термічно, показують підвищену стійкість до зношування при сухому терті, на відміну від поверхонь, зміцнених за допомогою інших методик.

Мета цього дослідження була оцінити стійкість до зношування поверхонь аналізованих зразків при варіюванні швидкостей їх сухого ковзання. Зразки тестувались при швидкості ковзання 0,44 м/с та за умови прикладеного навантаження 0,75 МПа. Довжина періоду тестування складала 4800 обертів ролика, з перервами після кожних 800 обертів для зважування зразків. Результати зношування для пар тертя відображено на графіку 4.12.

З аналізу зібраних даних випливає, що електролітичне покриття, яке піддавалося термічній обробці, краще витримує знос під час сухого тертя,

порівняно з покриттям без термічної обробки та з загартованими. З графіку 4.12 зрозуміло, що стійкість до зношування у зразка з термічною обробкою виявилася на 1,5–1,7 рази вищою, ніж у зразка без такої обробки. Варто відмітити, що на початковому етапі тестування, зношування зразка з термічною обробкою перевищувало зношування зразка без неї.

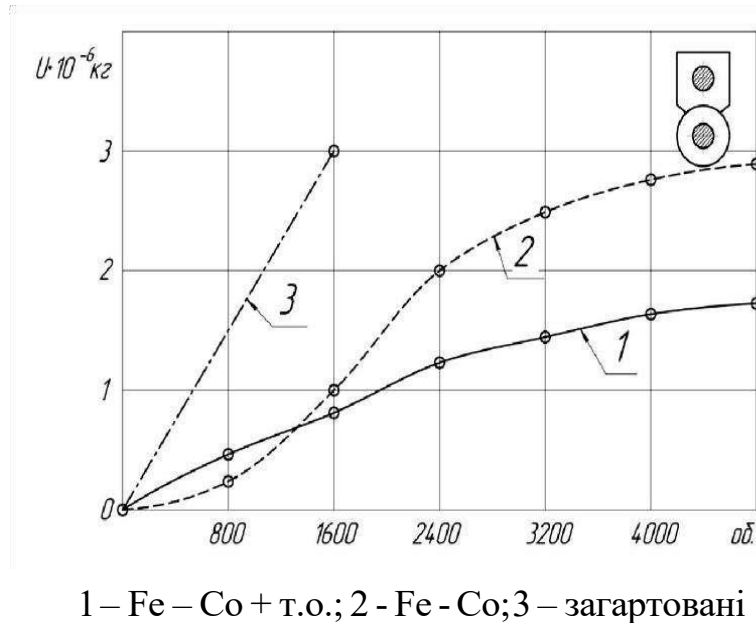


Рис. 4.12. Результати тестування зразків за умов сухого тертя.

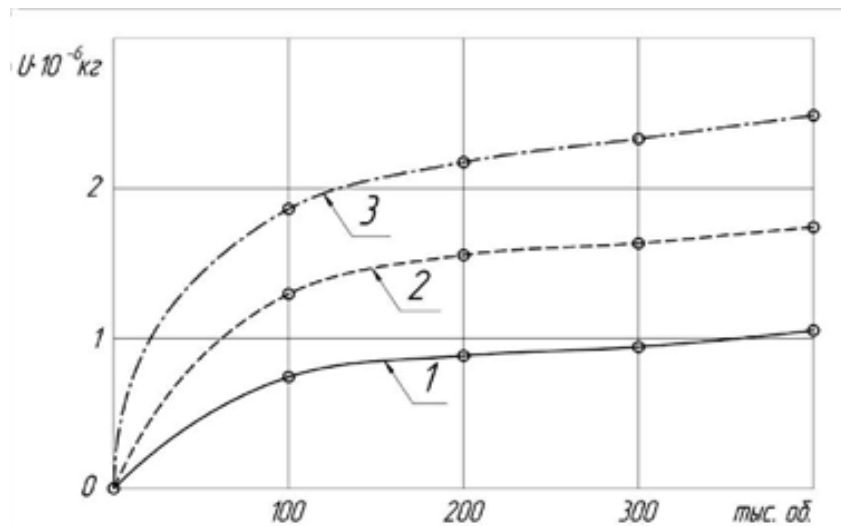
Зразки, які були загартовані, продемонстрували невелику стійкість до зношування під час сухого тертя. Експеримент з цими зразками було зупинено після 1600 обертів через їх перегрів та значне зношування.

Обрана процедура тестування зразків переважно відображає їх здатність опиратися подряпинам, а не стійкість до зношування. Враховуючи це, ми провели експерименти за умов екстремального тертя.

Для оцінки властивостей зразків використовували наступні параметри: рухова швидкість – 1 метр за секунду, вимірюваний тиск – 7,5 мегапаскалів, інтенсивність подачі дизельної олії – 4 краплі за хвилину. Дослідження тривало 15 годин, що становить 400 тисяч циклів обертання ролика. Після кожних 100 тисяч циклів проводилося зважування зразків. Результати цих дослідів відображені на малюнку 4.13.

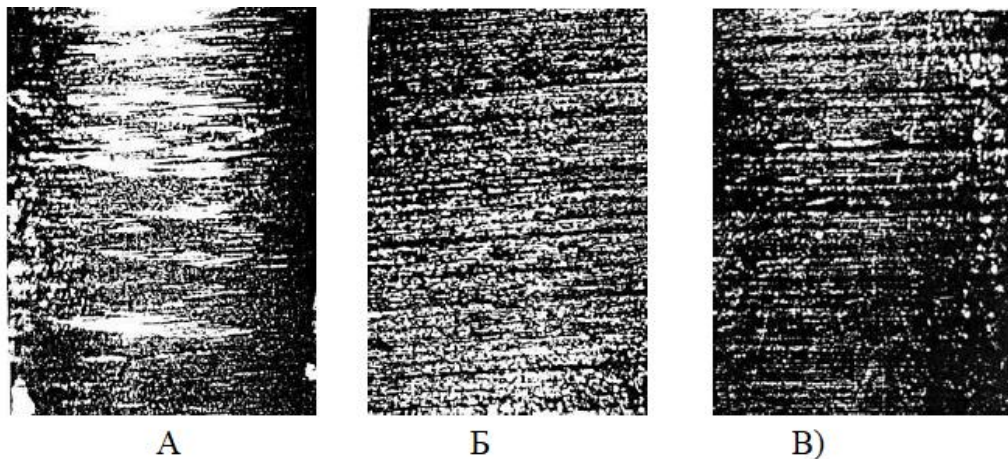
Після тестування при інтенсивному терті, пара з Fe-Co сплавом і вибраними зразками показала найменшу зносостійкість. Аналізуючи мікроскопічні зображення поверхонь тертя тестових зразків різної міцності (як

показано на рисунку 4.14), можна дійти висновку, що зі зростанням мікротвердості електролітичних покриттів, зношення їхніх поверхонь проходить кілька фаз: адгезійний знос (для м'яких покриттів), оксидативний знос (для покриттів до 9200 МПа) та абразивне зношення (для покриттів твердістю понад 9200 МПа). Головним фактором, що збільшує знос твердих шарів цих сплавів, є їх висока ламкість і схильність до утворення тріщин.



1 – Fe – Co т.ч.; 2 – Fe – Co; 3 – загартовані

Рис. 4.13. Відомості щодо вимірювань зразків при екстремальних умовах тертя.



А

Б

В)

а) електролітичне залізо; б) електролітичний метал Fe – Co; в) електролітичний сплав Fe – Co + термообробка

Рис. 4.14. Структури, що втрачають свою інтегритет через дію електролітичного покриття.

В основі електролітичного заліза однорідно розміщені дрібні тверді елементи з Fe-Co сплаву, що забезпечують більшу міцність цього матеріалу порівняно з його чистою базою. Цей сплав вирізняється збільшеним опором до зношування. Є підстави вважати, що ці тверді елементи сплаву Fe-Co, які мають вищі фізичні та механічні характеристики, випинчуються з основи під час зношування, витримуючи велике навантаження. Ці компоненти перешкоджають зчепленню поверхонь під час тертя, а також допомагають рівномірно розподіляти мастило на поверхні трущихся деталей в умовах граничного шару. Це, в свою чергу, сприяє зниженню тертя і підвищенню стійкості до зносу.

#### **4.6 Тестування функціональності відновленого залізо-кобальтовим покриттям вала ротора турбокомпресора було здійснено в лабораторії**

Ці дослідження відбувались на спеціалізованому стенді без двигуна, який імітує стирання високошвидкісних підшипників для будь-якого типу ТКР, використовуючи метод абразивного зносу. Ця установка служить для тестування різних умов експлуатації турбокомпресорів, аналогічних до умов їх роботи в моторі, та для визначення характеристик турбокомпресора в цих умовах згідно з технічними вимогами.

Ця установка включає в себе кілька основних вузлів: систему для роботи з газом та повітрям, мастильну систему, установку для роботи з паливом, а також контрольний пульт з консоллю для здійснення вимірювань різних параметрів.

Турбіна забезпечує обертання компресора, використовуючи як робоче середовище газ з температурним діапазоном 200–800 °С. Опційно, в турбокомпресорі може застосовуватися стисле повітря з температурою від 50...70 °С в якості робочого середовища.

Щоб імітувати прискорений знос турбокомпресора, в систему змащення додавали абразивний порошок. Під час тестувань використовували порошки з гранулометриєю 0,1–0,4 мм, де кожна доза порошку важила 0,25 г і додавалася щогодини.



Етапи лабораторного тестування турбокомпресора на стенді включали:

Промивання системи мастила ТКР маслом під тиском 3 атмосфери.

Процедура обкатки турбокомпресора за допомогою повітря на середній швидкості обертання 20000 обертів за хвилину, яка тривала 15 хвилин.

Додаткове обкатування турбокомпресора з використанням енергії вихлопних газів на середній швидкості обертання 60000 обертів за хвилину протягом 2 годин, з можливістю повторення процедури за потреби.

Виконувалось визначення величин осьових та радіальних відстаней у валу ротора турбокомпресора.

Оглядались та тестувались газодинамічні масляні уплотнення.

Проводилось вивчення та аналіз індикаторів вібраційного прискорення.

Здійснювалось охолодження турбокомпресора за допомогою повітря без використання енергії вихлопних газів.

Згідно з результатами лабораторних тестів, було виявлено, що період експлуатації турбокомпресора з реставрованим валом ротора зріс у 1,6 раза у порівнянні з стандартним валом ротора ТКР. Наприклад, при використанні абразиву з частками розміром 0,1–0,4 мм, тривалість функціонування ТКР з реставрованим валом ротора досягла 12,8 годин, у той час як турбокомпресор зі стандартним валом ротора без зношування працював лише 8,1 години.

#### **4.7 Оперативне тестування функціональності реставрованого валу ротора турбокомпресора з залізо-кобальтовим покриттям**

Проведене на турбокомпресорі Garrett моделі GT2049S, призначеному для двигуна 2.0 TDI DuraTorq автомобіля Ford Transit V, з пробігом 126 535 км було встановлено новий вал ротора турбокомпресора, тоді як на інший автомобіль з пробігом 236 303 км монтували реставрований вал.

Реставрація та підсилення валу ротора турбокомпресора були здійснені відповідно до обраного процесу. В рамках промислового виготовлення здійснювалось електролітичне нанесення покриття у спеціалізованій ванні, а наступне підсилення відбувалося через термообробку в муфельній печі.

Було застосовано шар покриття товщиною 0,4 мм для досягнення стандартних розмірів валу ротора турбокомпресора після його механічної обробки. На етапі реконструкції, деталь спочатку шліфувалась на верстаті для видалення ознак зношування. Перед монтажем реставрованого валу на тестовий автомобіль, здійснювалось його точне вимірювання з максимальною помилкою мікрометра 1 мкм. Протягом 1 року та 6 місяців експлуатації, автомобілі з реставрованим та новим валом ротора накопичили 60 000. км пробігу. Протягом цього періоду тестування жодних зауважень щодо роботи реставрованого валу не виявлено.

Таблиця 4.6. Компоненти, які слід використовувати у процесі проведення тестів експлуатаційної придатності.

Найменування деталі	Кількість відновлених деталей, шт	Кількість нових деталей, шт	Товщина нарощуємого покриття, мм
Вал ротора турбокомпресора фірми Garrett моделі GT2049S для двигуна 2.0 TDI «DuraTorq» автомобіля Ford Transit V	1	1	0,3

Оцінка ефективності роботи реставрованого і нового валу ротора турбокомпресора базувалася на ключовому показнику використання, а саме на ступені зношування компоненту. Завершивши період тестування, турбокомпресори були демонтовані з авто для вилучення випробуваних деталей. Тестові вали ротора були очищені в ацетоні, висушені, після чого проводилося мікрометричне вимірювання їх зносу, досягаючи точності до 1000 мкм.

З аналізу даних оперативних тестів стає очевидним, що ступінь зношування реставрованого валу ротора суттєво менший порівняно з новим, що сприяє подовженню безперервного періоду експлуатації автомобілів.

Таблиця 4.7. Дані, отримані під час аналізу роботи роторного вала під впливом експлуатаційних випробувань.

Деталь	Знос, мкм		
	нова	відновлена	коефіцієнт довговічності
Вал ротора турбокомпресора фірми Garrett моделі GT2049S для двигуна 2.0 TDI DuraTorq автомобіля Ford Transit V	25	15	1,67

Оперативні тести підтвердили ефективність застосування електролітичних залізо-кобальтових нанесень у сфері ремонтного виробництва, особливо в контексті реставрації вала ротора турбокомпресора.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 5.1 Виробничий травматизм на автомобільному транспорті

Виробничий травматизм на автомобільному транспорті включає різноманітні види травм, які виникають під час роботи в галузі автомобільного транспорту. Це може включати, але не обмежується, нещасні випадки під час водіння, обслуговування автомобілів, роботи на складах, завантаження та розвантаження товарів та інші пов'язані з автотранспортом діяльності.

Зазвичай такі травми виникають через зіткнення, перекидання, роботу з важкими предметами, несправність обладнання, вплив хімічних речовин, недотримання правил безпеки, а також через втомленість або неухважність персоналу. Для зниження ризику травматизму на автомобільному транспорті важливо проводити регулярні тренінги з безпеки, оснащувати робочі місця необхідними засобами захисту, дотримуватись нормативів з безпеки праці та забезпечувати правильне обслуговування транспортних засобів та обладнання.

У сфері обслуговування і експлуатації рухомого складу автотранспорту, що є джерелом підвищеної небезпеки, за певних умов можуть виникнути небезпечні фактори, які приводять до нещасних випадків (НВ).

Глибоке вивчення матеріалів про НВ дає можливість виявити загальні закономірності, що дозволяють передбачати подальший перебіг подій, вжити заходів щодо попередження виробничого травматизму.

Відразу слід зауважити, що коефіцієнт смертності через ДТП у 12 разів вищий від коефіцієнта смертності через порушення правил технічної безпеки. Таким чином, ДТП є значним джерелом тяжких нещасних випадків. Але крім ДТП, які дуже ретельно висвітлює служба ДАІ, важливо розглянути інші нещасні випадки, що скоюються на автотранспортному підприємстві. З цього питання дуже скрупульозні дослідження провів В.П. Могила, деякими його результатами ми і скористалися.

Причинами травматизму є організаційні і технічні недоліки виробництва.

Для розроблення ефективних заходів щодо профілактики травматизму доцільно всі НВ умовно розділити на дві основні групи: перша - випадки,

зумовлені організаційними недоліками виробництва; друга - випадки, спричинені технічними недоліками виробництва. Наслідком організаційних недоліків є небезпечні або помилкові дії виконавців робіт через незнання ними інструкцій з техніки безпеки і безпеки руху, встановленого порядку виконання трудових операцій відповідно до технології, виконання невластивої професії роботи.

Дослідження показали, що НВ першої групи з працівниками автотранспорту складають 53%, а другої - 47%. Якщо виключити виробничі травми через ДТП, то НВ першої групи складають 32%, а другої 68%, тобто небезпечні умови праці є однією з головних причин НВ з працівниками автотранспорту (без урахування НВ через ДТП).

Топографія виробничих травм. При дослідженні НВ з працівниками АТП і управління безпекою праці особливу увагу слід приділити питанню топографії НВ. Під топографією НВ слід розуміти місця виникнення НВ при обслуговуванні і експлуатації рухомого складу автотранспорту. Цілеспрямована і ефективна робота з попередження виробничих травм можлива лише за наявності чіткої ясності про місця виникнення НВ. Це дозволяє грамотно планувати комплекс організаційних, технічних та інших заходів, що вживають до таких місць, і здійснювати контроль за їх виконанням.

Автотранспортне виробництво являє собою складну систему, для опису якої з погляду дослідження НВ необхідно розглядати перелік основних операцій, маючи на увазі, що виробничі травми є наслідком виконання цих операцій виконавцями робіт з порушенням вимог безпеки праці. До цих операцій належать: технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання рухомого складу автотранспорту; водіння рухомого складу автотранспорту по вулицях і дорогах; обслуговування і поточний ремонт автомобілів у дорозі; навантаження і розвантажування вантажних автомобілів, посадка і висадка пасажирів на автостанціях і кінцевих зупинках. Таким чином, автотранспортне виробництво можна зобразити як складну систему «автотранспортне підприємство - дорога, вулиця — місця навантаження, розвантаження автомобілів, автостанції» (скорочено АТП — ДВ - МНРА).

Для розроблення і здійснення конкретних заходів щодо боротьби з виробничим травматизмом необхідно знати розподіл кількості НВ за елементами підсистем АТП, ДВ і МПРА, які можна назвати топографічними зонами.

Поглиблений аналіз виробничих травм. Застосування статистичного і топографічного методів аналізу виробничого травматизму дозволяє одержати загальне уявлення про кількість НВ з працівниками автотранспорту, їх розподіл за місцями виникнення, динаміку травм за даний період і основні причини НВ. Проте цього ще не досить для розроблення комплексу заходів щодо профілактики травматизму. Лише проведення поглибленого (монографічного) аналізу виробничих травм дозволяє одержати дані про розподіл за професіями, видами виконуваної роботи, стажем роботи і віком потерпілих, часом доби і року, типом рухомого складу автотранспорту і т.д., необхідні для практичного вирішення питань попередження НВ.

Дані показують, що в загальній кількості НВ виробничі травми водіїв і слюсарів з ремонту автомобілів складають 89,7% при тому, що питома вага цих професій у загальній кількості працівників АТП складає 73,1% . Найвища частота виробничих травм у теслярів, столярів, ковалів, газозварників і електрозварників, слюсарів з ремонту автомобілів, водіїв, мідників і мийників рухомого складу. До інших професій віднесені шиномонтажники, заправники, сантехніки, мастильники, комірники.

Для ефективного впливу на умови і чинники, які призводять до НВ, необхідно знати, при виконанні яких робіт і дій виконавці найчастіше одержують травми. Проведення аналізу НВ дає такі відомості (табл. 1.6).

Оскільки при виконанні робіт з поточного ремонту і технічного обслуговування автомобілів відбувається найбільша кількість НВ, то значний інтерес становлять дані про частоту виникнення травм при обслуговуванні основних агрегатів і механізмах автомобіля.

Дані показують, що найбільш часто НВ трапляються з водіями і слюсарями з ремонту автомобілів з невеликим стажем роботи на АТП, особливо до 1 року. У міру збільшення стажу роботи на АТП імовірність НВ зменшується.

За статистикою НВ на АТП травмування робітників цих професій у віці до 30 років спостерігається рідше, ніж у віці від 30 до 50 років.

Розподіл НВ за часом доби показав, що для сумарного розподілу характерні три періоди: між 8-ю і 12-ю год, між 12-ю і 13-ю год і між 13-ю і 17-ю год. Найбільша кількість НВ відбувається між 8-ю і 12-ю та 13-ю і 17-ю год, що збігається з періодами виконання робіт. Різке падіння кількості НВ у період між 12-ю і 13-ю год пояснюється тим, що на АТП у цей час влаштовуються обідні перерви. НВ в основному відбуваються на вулицях і дорогах, у місцях навантаження і розвантаження автомобілів, на автостанціях. Характерно, що кількість НВ, зокрема зі смертельним наслідком, у другій половині робочої зміни (після обіду) на 13% більша, ніж у першій. Причому, як показує розподіл НВ зі смертельним і тяжким результатом, у період між 15-ю і 16-ю год відбувається більше НВ із тяжкими наслідками (11% від загальної кількості). Значне зростання кількості НВ з тяжкими наслідками після 17-ї год порівняно із сумарним розподілом НВ пояснюється зростанням у цей період кількості ДТП, при яких водії АТП одержують травми.

Розподіл кількості НВ за місяцями. Найбільша кількість НВ відбувається в лютому, вересні і жовтні. Розподіл НВ за кварталами такий: I - 26%, II - 22,5%, III - 26,5%, IV - 25%. Кількість НВ зі смертельним і тяжким результатом у другому півріччі на 12% більша, ніж у першому. Надто високу частоту НВ у травні і листопаді можна пояснити великою кількістю святкових днів у ці місяці. Максимум НВ при ДТП у вересні і жовтні пояснюється погіршенням дорожніх умов, появою туманів, скороченням світлого часу доби і виконанням найбільшого обсягу вантажних перевезень.

Аналіз травмуючих факторів у сфері експлуатації автотранспорту проводився із урахуванням специфіки робіт, що виконуються на АТП. Такий підхід дозволив отримати достовірні результати для профілактики цих факторів.

Оскільки рухомі транспортні засоби та падіння з висоти і на поверхні постраждалих є наймасовішими травмуючими чинниками у сфері обслуговування та експлуатації автотранспорту, то доцільно більш докладно розглянути обставини виникнення цих факторів. При дослідженні чинника

«рухомі транспортні засоби» виявлено розподіл НВ за обставинами травмування.

Травмування іншим транспортним засобом, зокрема при зіткненні транспортних засобів, у більшості випадків відбувається на вулицях і дорогах при ДТП. Сюди належать наїзди інших транспортних засобів на водіїв, які знаходяться біля автомобілів на вулиці чи дорозі або коли виходять із них. Мета зупинки - огляд кріплення вантажу, посадка або висадка пасажирів, перевірка технічного стану автомобіля або причепа, виконання ремонту, доливання води або мастила у двигун та ін. Характерно, що якби автомобілі не знаходились на проїжджій частині, то НВ через наїзди були б попереджені. Найбільша кількість НВ стається через зіткнення транспортних засобів, це найбільш поширений вид ДТП.

Травмування відбуваються при перекиданні транспортних засобів на дорогах і вулицях внаслідок недотримання правил дорожнього руху потерпілими водіями і при наїздах транспортних засобів на дорожні споруди, придорожні дерева і стовпи внаслідок втрати керування автомобілем і подальшого з'їждження з проїжджої частини. Сюди ж віднесені наїзди транспортного засобу на пішоходів на територіях АТП, у місцях навантаження і розвантаження автомобілів, на автостанціях і в інших місцях, де можливий рух транспортних засобів.

Травмування транспортним засобом, що самовільно почав рух, відбувається як на вулицях і дорогах, так і в інших місцях. Причиною мимовільного руху автомобілів і причепів є те, що їх залишають незагальмованими на малих схилах. При цьому характерно, що водії, побачивши початок самовільного руху автомобіля, в більшості випадків прагнуть зупинити його, підкладаючи під колесо який-небудь предмет, або потрапити на робоче місце. Внаслідок таких дій є НВ з тяжким наслідком.

Травмування колесом рухомого транспортного засобу відбувається в основному при поставленні автомобілів на робоче місце або при виїзді з нього (наїзд на ноги виконавця, що лежить під автомобілем), а також при штовханні автомобіля для перестановки його на робоче місце (наїзд на стопу ноги штовхаючого виконавця — переважно при повороті автомобіля) .



Травмування рухомим транспортним засобом після запуску його двигуна заводною рукояткою або стартером при включеній передачі відбувається в основному на територіях і у виробничих приміщеннях АТП. Наслідком є наїзд на виконавця роботи або працівника, який іде або стоїть поруч. Наслідки таких НВ також є надзвичайно тяжкими.

Травмування буксируючим транспортним засобом відбувається в процесі відчеплення гнучкого буксира при буксируючому автомобілі, що стоїть, а також при несправних гальмах буксирного автомобіля. Характерно, що коефіцієнт смертності при таких НВ складає 40-50%.

Другий за масовістю травмуючий чинник - падіння постраждалих з висоти і на поверхні. Проаналізуємо його більш докладно.

У загальній кількості НВ травми через падіння постраждалих з висоти склали 57%, а на поверхні - 43%.

Падіння на території АТП, у місцях навантаження і розвантаження, на автостанціях, дорогах і вулицях, автозаправних станціях відбуваються з причини слизької поверхні (наявність ожеледі, пролитих мастил) і найчастіше в зимовий період, особливо у місцях відкритої стоянки автомобілів, де утворюється ожеледь після зливання води з системи охолодження двигунів.

Травми при падінні з кузова вантажного автомобіля і сходів автопаливозаправника найчастіше відбуваються при перевірці кріплення вантажу, знятті запасного колеса, виконанні вантажно-розвантажувальних робіт, очищенні платформ кузова, різкому гальмуванні при повороті автомобіля, заправці цистерни паливом, при закритті бортів кузова з платформи та ін.

Падіння в оглядову канаву відбуваються при спробі постраждалих переступити або перестрибнути канаву, при запуску двигуна заводною рукояткою безпосередньо на канаві, при слизькій поверхні перехідного містка, при спусканні з буфера автомобіля, що стоїть на канаві. Падіння в оглядову канаву відбувається здебільшого при слизькій підлозі, при зриві гайкового ключа.

При вході або виході з автобуса падіння найчастіше відбувається з лівого боку автобусів марок ЛАЗ і ПАЗ, у яких робоче місце водія розташоване

безпосередньо над колесом, що створює труднощі при посадці. При виході з автобусів з правого боку падіння найчастіше відбувається через попадання ноги постраж-далого на який-небудь предмет (камінь, шматок льоду та ін.).

Падіння в приміщеннях у більшості випадків трапляється через слизькість підлоги внаслідок пролитих на ній мастильних матеріалів, води, гальмівної рідини, захаращеності проходів, відсутність або недостатність освітлення, швидку ходьбу або біг потерпілого, зношення підошви взуття.

Падіння відбувається з вологих, брудних, засніжених, обмерзлих або погнутих підніжок вантажних автомобілів, коли стерті лінії і виступи, а також при закритті або відкритті замків бортів кузова безпосередньо з підніжки кабіни і через незручність посадки на робоче місце вантажних автомобілів марок КАЗ, МАЗ і КамАЗ (робоче місце безпосередньо над колесом).

Падіння з буфера відбувається при заливанні охолоджувальної рідини в радіатор, мастила у двигун, перевірки технічного стану двигуна і в інших випадках.

Падіння з крила автомобіля бувають нечасто. Падіння з коліс вантажних автомобілів (звичайно задніх) відбувається при спробі піднятися в кузов автомобіля, коли нога зісковзує з поверхні шини.

У салоні автобусів найчастіше падають кондуктори - при різкому гальмуванні або прискоренні, а також при крутому повороті автобуса. Падіння водіїв і ремонтних робітників у салоні автобуса, який не рухається, спостерігається рідко, в основному через слизькість підлоги і захаращеність салону.

Падіння з драбин є наслідком застосування непристосованих драбин та слизькості опірної поверхні. Падіння в оглядову канаву з драбин спричинюються слизькістю сходинок через їх зношеність або відсутність чи несправність поручнів. Слизькість і несправність естакад і рамп також приводять до падінь виконавців робіт.

Травми відбуваються при зістрибуванні водіїв з підніжок вантажних автомобілів, з робочих місць автомобілів, у яких робоче місце розташоване безпосередньо над колесом, з кузовів і буферів, з драбин. Звичайно

зістрибування викликає вивих гомілковосто-пного суглоба і травмування інших частин тіла внаслідок наступного падіння.

Травми через падіння в кузовах вантажних автомобілів стаються при очищенні кузова, при навантаженні або розвантаженні вантажів, при різкому гальмуванні або прискоренні руху.

Інші травмуючі чинники складають 6,9% від загальної кількості. До них належать: кузов автомобіля-самоскида, що опустився, оксид вуглецю, електричний струм, дишло причепа, розрив гнучкого зчеплення, жорсткий буксир, шпindel токарного верстата, свердло і оброблювана ним деталь, шина колеса, що лопнула, заточний верстат, пружина, що зірвалася, диск пили, фреза, стенд демонтажу шин, дверці кабіни, багажник автобуса, капот двигуна, рульове колесо, шток гальмівної камери, важіль коробки передач, металева стружка.

## **5.2 Аварії з викидом або загрозою викиду небезпечних хімічних речовин**

Проблема промислової безпеки значно загострилась з появою великомасштабних хімічних виробництв в першій половині нашого сторіччя. Основу хімічної промисловості склали виробництва безперервного циклу, продуктивність яких не має, по суті, природних обмежень. Постійне зростання продуктивності зумовлене значними економічними перевагами великих настанов. Як слідство, зростає зміст небезпечних речовин в технологічних апаратах, що супроводжується виникненням небезпек катастрофічних пожеж, вибухів, токсичних викидів і інших руйнівних явищ.

Аварії з викидом або загрозою викиду небезпечних хімічних речовин – це серйозні інциденти, які можуть мати масштабні наслідки для здоров'я людей, навколишнього середовища та економіки. Такі аварії можуть виникати в різних сценаріях, включаючи промислові катастрофи, дорожньо-транспортні пригоди, техногенні аварії, терористичні атаки або природні катастрофи, такі як землетруси та повені.

Основні аспекти таких аварій включають.

Джерела ризику. Включають хімічні заводи, склади, транспортні засоби, що перевозять небезпечні речовини (наприклад, цистерни з хімікатами), та місця зберігання відходів.

Типи небезпечних речовин. Вони можуть варіюватися від токсичних газів (наприклад, хлору або аміаку) до легкозаймистих рідин (наприклад, бензину або хімічних реактивів).

Механізми викиду. Викиди можуть статися внаслідок вибухів, пожеж, розгерметизації контейнерів, зіткнень транспортних засобів або навіть через людські помилки під час обслуговування обладнання.

Заходи реагування. Включають евакуацію, локалізацію викиду, деактивацію та очищення забруднених територій, медичну допомогу потерпілим та моніторинг рівнів забруднення.

Профілактика та готовність. Охоплює законодавчі заходи, стандарти безпеки, плани аварійної готовності, навчання персоналу та розвиток технологій для запобігання витокам або зменшення їх наслідків.

Екологічний вплив. Викиди небезпечних хімічних речовин можуть спричинити тривале забруднення ґрунтів, водойм, повітря та негативно вплинути на флору і фауну.

Здоров'я людини. Вплив на здоров'я може варіюватися від легких подразнень до серйозних отруєнь та хронічних захворювань, залежно від типу хімічної речовини та рівня впливу.

Аварії такого типу потребують швидкого та ефективного реагування від спеціалізованих аварійних служб, залучення екологів, токсикологів та інших фахівців. Розробка та втілення в життя ефективних стратегій готовності та реагування є ключовими для мінімізації наслідків таких інцидентів.

Аварії (катастрофи) на підприємствах, транспорті та продуктопроводах можуть супроводжуватися викидом (виливом) в атмосферу і на прилеглу територію небезпечних хімічних речовин (НХР), таких як хлор, аміак, синильна кислота, фосген, сірчаний ангідрид тощо. Це являє серйозну небезпеку для населення, адже заражене повітря вражає органи дихання, а також очі, шкіру та інші органи.

За даними ДСНС України: Аварії (катастрофи) на підприємствах, транспорті та продуктопроводах можуть супроводжуватися викидом (виливом) в атмосферу і на прилеглу територію небезпечних хімічних речовин (НХР), таких як хлор, аміак, синильна кислота, фосген, сірчаний ангідрид тощо. Це являє серйозну небезпеку для населення, адже заражене повітря вражає органи дихання, а також очі, шкіру та інші органи.

Фактори небезпеки викиду (розливу) хімічно небезпечних речовин: забруднення навколишнього середовища, небезпека для всього живого, що опинилося на забрудненій місцевості (загибель людей, тварин, знищення посівів та ін.), крім того, внаслідок можливого хімічного вибуху – виникнення сильних руйнувань на значній території.

Небезпечна хімічна речовина (НХР) - хімічна речовина, безпосередня або опосередкована дія якої на людину може спричинити загибель, гостре або хронічне захворювання людей, завдання шкоди навколишньому середовищу.

Класифікація небезпечних хімічних речовин:

Ступінь токсичності при інгаляційному і пероральному надходженні до організму. За ступенем дії на організм людини НХР поділяються на чотири класи небезпеки:

I - надзвичайно небезпечні; II - високо небезпечні;

III - помірно небезпечні;

IV - мало небезпечні.

Ознака переважного синдрому при гострій інтоксикації передбачає поділ НХР на шість груп:

-перша група - речовини з переважно задушливою дією (хлор, трихлористий фосфор, фосген, хлориди сірки тощо) - шляхом вдихання парів через деякий час викликають токсичний набряк легенів;

-друга група - речовини переважно загальної токсичної дії (синильна кислота, оксид вуглецю, акролеїн, динітрофенол тощо) - викликають гострі порушення енергетичного обміну в організмі; у разі потрапляння до організму людини смертельних доз, з'являються клонікотонічні судоми, різкий ціаноз, гостра серцево-судинна недостатність, зупинка дихання;

-третя група - речовини, яким властива задушлива і загально отруйна дія (сірководень, сульфатний ангідрид, оксид азоту тощо) - мають здатність до сильної опікової дії, що значно ускладнює надання допомоги потерпілим; у разі високих концентрацій спостерігаються судоми, знепритомніння, либокий наркоз зі зникненням усіх рефлексів;

-четверта група - нейротропні отрути, що діють на генерацію і передавання нервового імпульсу (фосфорорганічні сполуки, сірковуглець, метилмеркаптан) - діють на нервову систему людини; у разі високих концентрацій - це глибокий наркоз зі зникненням усіх рефлексів, падіння артеріального тиску, порушення серцевого ритму;

-п'ята група - речовини із задушливою і нейротропною дією (аміак, гептил, ацетонітрил тощо) - викликають гіпертонію, кон'юктивіт носоглотки, кашель, блювання; в основі дії на нервову систему лежить вплив на генерацію і передавання нервового імпульсу, що посилює стан гіпоксії, викликаній порушенням зовнішнього дихання;

-шоста група - метаболічні отрути (діоксин, метилбромід, метанол, формальдегід) - втручаються у процес обміну речовин в організмі; отруєння характеризується відсутністю нервової реакції організму на речовину, але поступово уражується багато органів людини.

1. За здатністю до горіння НХР поділяються на:

-горючі - легко займаються від джерела запалювання та продовжують самостійно горіти після його вилучення (аміл, акрилонітрил, гептил, сірковуглець, оксиди азоту тощо);

-важкогорючі - не здатні самостійно горіти після вилучення джерела запалювання (аміак рідкий, ціаністий водень тощо);

-негорючі - не здатні до горіння в атмосфері нормального складу (з концентрацією кисню до 2%) при температурі до 900 град.С (фтористий кисень, фосген, оксид вуглецю, сірчаний ангідрид тощо);

-негорючі пожежонебезпечні - окислювачі (хлор, азотна кислота тощо), що розкладаються при низьких температурах, призводять до займання горючих матеріалів, з якими контактують.

Стан безпеки на хімічно небезпечних об'єктах України розглянуто у другому розділі даного навчального посібника. Безпека функціонування ХНО залежить від багатьох факторів: фізико-хімічних властивостей сировини, напівпродуктів і продуктів, від характеру технологічного процесу і надійності обладнання, умов зберігання і транспортування хімічних речовин, стану контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматизації, ефективності засобів протиаварійного захисту тощо. Крім того, безпека виробництва, використання, зберігання і перевезення НХР в значній мірі залежить від рівня організації профілактичної роботи, своєчасності і якості планових попереджувальних робіт, підготовленості і практичних навиків персоналу, системи нагляду за станом технічних засобів проти аварійного захисту.

Хімічно небезпечна адміністративно-територіальна одиниця (ХАТО) – адміністративно - територіальна одиниця, до якої зараховуються області, райони, а також будь-які населені пункти областей, які потрапляють у ЗМХЗ при аваріях на хімічно небезпечних об'єктах.

Наявність такої кількості факторів, від яких залежить безпека функціонування хімічних небезпечних об'єктів, робить цю проблему надто складною. Як показує аналіз причин виникнення великих хімічних аварій, що супроводжуються викидом (вилівом) НХР, на сьогодні неможливо виключати вірогідність виникнення аварій, які приведуть до ураження виробничого персоналу і населення, яке розташовано в районі функціонування хімічно небезпечного об'єкту.

Аналіз структури підприємств, що виробляють або використовують НХР, показує, що в їх технологічних лініях обертається, як правило, незначна кількість токсичних хімічних продуктів. Значно більша кількість НХР за об'ємом знаходиться на складах підприємств. Це призводить до того, що при аваріях у цехах підприємств в більшості випадків мають місце локальне зараження повітря, обладнання цехів, території підприємств. При цьому ураження в таких випадках може отримати в основному виробничий персонал. При аваріях на складах підприємств, коли руйнуються ємності, НХР розповсюджується за межі підприємства, що призводить до масового ураження

не тільки персоналу підприємства, але і населення, що розташовано в зоні ураження суб'єкта господарської діяльності (СГД).

Місткість складів НХР на будь-якому підприємстві визначається в залежності від необхідного запасу, що забезпечує безперервну роботу підприємства, а також від доцільно допустимого накопичення на виробничій площадці товарної продукції, яка підлягає відправці споживачам. У наслідку норми зберігання НХР на кожному підприємстві визначаються з розрахунком умов їх споживання, вироблення, транспортування, попередження аварійних ситуацій, профілактичних зупинок, сезонних поставок, а також токсичності, пожежної і вибухової безпеки. В середньому на підприємствах мінімальні (не понижуючі) запаси хімічних продуктів створюються на три доби, а для заводів з виробництва окремих хімічних речовин і мінеральних добрив – до 10-15 діб.

В результаті на великих хімічних підприємствах, а також на складах в деяких портах і на транспорті, що перевозить НХР, може одночасно зберігатися тисячі тон різних сильнодіючих отруйних речовин.

На виробничих площадках або на транспорті НХР, як правило, знаходиться в стандартних ємностях. Це можуть бути оболонки з алюмінію, заліза або залізобетону, в яких підтримуються умови, що відповідають заданим режимам зберігання. Форма і тип ємностей вибираються виходячи із масштабів виробництва або використання, умов їх транспортування. Найбільш широке розповсюдження сьогодні отримали ємності циліндричної форми та сферичні резервуари.

Місткість резервуарів буває різною. Хлор, наприклад, зберігається в ємностях місткістю від 1 до 1000 т, аміак – від 5 до 30000 т, синильна кислота – від 1 до 200 т, окисел етилену – в сферичних резервуарах об'ємом 800 м<sup>3</sup> і більше, окисел вуглецю, двоокис сірки, гідразин, тетраетил свинець, сірковуглець – в ємностях місткістю від 1 до 100 т.

Наземні резервуари, як правило, розміщуються групами. В кожній групі передбачається резервна ємність для перекачування НХР на випадок їх вилливу із якогось резервуару. Для кожної групи наземних резервуарів за периметром робиться замкнуте обвалування або загороджувальна стінка з не горючих і стійких до корозії матеріалів висотою не менше 1 м.



Внутрішній об'єм обвалування, розраховується на повний об'єм групи резервуарів. Відстань від резервуарів до підшови обвалування або загороджувальної стінки приймається рівною половині діаметру.

Відстань від складів НЗР об'ємом більше 8000 м<sup>3</sup> до населених пунктів повинна бути не менше 1000 м. Відстань від складів з наземним розташуванням резервуарів до місць масового скупчення людей (стадіонів, базарів, парків і т.д.) збільшується в два рази.

Для зберігання НХР на складах підприємств використовуються наступні головні способи:

- в резервуарах під високим тиском;
- в ізотермічних сховищах при тиску, близькому до атмосферного (низькотемпературне сховище), або до 1 Па (ізотермічне сховище, при цьому використовуються шарові резервуари великої місткості);
- зберігання при температурі навколишнього середовища в закритих ємностях (характерно для високо киплячих рідин).

Спосіб зберігання НХР у більшості визначає їх поведінка при аваріях (розкриття, пошкодження, руйнування оболонок резервуарів).

Аварія з НХР – це подія техногенного характеру, що сталася на хімічно небезпечному об'єкті внаслідок виробничих, конструктивних, технологічних чи експлуатаційних причин або від випадкових зовнішніх впливів, що призвела до пошкодження технологічного обладнання, пристроїв, споруд, транспортних засобів з виливом (викидом) НХР в атмосферу і реально загрожує життю, здоров'ю людей. У випадку руйнування оболонки ємності, що зберігала НХР під тиском, і наступного розливу великої кількості речовини в піддон (обвалування) його попадання в повітря може здійснюватися протягом тривалого часу.

Процес випаровування в даному випадку можна умовно розділити на три періоди.

Перший період – бурне, майже моментальне випаровування за рахунок різниці пружності насиченого пару НХР в ємності і парціального тиску в повітрі. Даний процес забезпечує головну кількість пару НХР, що потрапляє в повітря за цей період часу. Крім того, частина НХР переходить в пар за рахунок

тепло утримання рідини, температури навколишнього повітря і сонцевої радіації. В результаті температура рідини знижується до температури кипіння. Враховуючи, що за даний період часу випаровується значна кількість НХР, то може виникнути хмара з концентраціями НХР, значно перевищуючи смертельні.

Другий період – нестійке випаровування НХР за рахунок тепла піддону (обвалування), зміни тепло утримання рідини і притоку тепла від навколишнього повітря. Цей період характеризується, як правило, різким спадом інтенсивності випаровування в перші хвилини після розливу з одночасним пониженням температури рідкого шару нижче температури кипіння.

Третій період – стаціонарне випаровування НХР за рахунок тепла навколишнього повітря. Випаровування в цьому випадку буде залежати від швидкості вітру, температури навколишнього повітря і рідкого шару. Підведення тепла від піддону (обвалування) практично буде дорівнювати нулю. Тривалість стаціонарного періоду в залежності від типу НХР, його кількості і зовнішніх умов може складати години, добу і більше.

У випадку руйнування оболонки ізотермічного сховища і наступного розливу великої кількості НХР в піддон (обвалування) випарування за рахунок різниці пружності насиченого пару НХР в ємності і парціального тиску в повітрі у зв'язку з малим надмірним тиском майже не спостерігається. Для даного типу ємностей характерні періоди нестационарного і стаціонарного випаровування НХР.

Формування первинної хмари здійснюється за рахунок тепла піддону (обвалування), зміною тепло утримання рідини і притоку тепла від навколишнього повітря.

При цьому кількість речовини, що переходить в первинну хмару, як правило, не перевищує 3-5 % при температурі навколишнього повітря 25-30°C.

При відкритті оболонок з високо кип'яченими рідинами виникнення первинної хмари не спостерігається. Випарування рідини здійснюється за стаціонарним процесом і залежить від фізико-хімічних властивостей НХР і температури навколишнього повітря. Враховуючи малі швидкості

випаровування таких НХР, вони будуть являти собою небезпеку тільки для навколишніх, що знаходяться в районі аварії.

Треба відмітити, що на багатьох об'єктах скупчена значна кількість різних легко горючих речовин, у тому числі НХР (аміак, окисел етилену, синильна кислота, окисел вуглецю та інші). Багато НХР вибухонебезпечні (гідразин, окисли азоту та інші). Цю обставину необхідно враховувати при виникненні пожеж на об'єктах. Більше того, сама пожежа на підприємстві може сприяти виділенню різних отруйних речовин. Так наприклад, горіння поліуретану та інших пластмас приводить до виділення синильної кислоти, фосгену, окислу вуглецю, різних ізоціанатів, іноді діоксану та інших НХР в небезпечних концентраціях, особливо в закритих приміщеннях.

Якщо проаналізувати стан хімічної безпеки в регіонах, то можна зробити висновок про те, що в переліку небезпечних хімічних речовин, які становлять найбільшу загрозу для життєдіяльності людини на першому місці знаходяться аміак і хлор.

Аміачні холодильні установки застосовуються у різноманітних виробництвах, на підприємствах харчової промисловості і сільського господарства, у великих розподільних холодильниках та холодокомбінатах. На даний час значна кількість аміачно-холодильних установок перебуває у незадовільному стані через відсутність в Україні виробництва комплектуючих, фізичне та моральне їх старіння. Холодопродуктивність вітчизняних діючих аміачно-холодильних установок значно нижча, ніж у їх аналогів, що застосовуються в країнах Євросоюзу, та призводить до застосування в технологіях значно більших об'ємів аміаку. Все це зумовлює виникнення аварійних ситуацій та аварій. Аміак є найбільш багатотоннажною сировиною у хімічній промисловості, зберігається у резервуарах з одиничною ємністю в декілька тисяч тон (ізотермічні сховища) і широко використовується у різних технологіях, причому виробничі об'єкти часто розташовані поблизу населених зон. Зазначені сховища аміаку обладнані необхідними системами контролю за станом їх безпечної експлуатації та ліквідації аварійних ситуацій на них згідно з вимогами технічних умов, державних стандартів та інших нормативних документів.

Ділянка траси магістрального аміакопроводу, яку обслуговує державне підприємство «Укрхім» проходить територією восьми областей України. Пропускна спроможність аміакопроводу складає 2,12 млн. тон /рік. Діаметр трубопроводу 355,6 мм. При тиску аміаку трубопроводі 80 кг/см кожний кілометр труби містить до 56 тон аміаку. В зоні можливого ураження при аварії на аміакопроводі може опинитися від 200 до 15000 осіб, залежно від місця виникнення аварії.

Очищення води за нинішніми технологіями в Україні дуже непродуктивне, енергозатратне, матеріалозатратне, не повністю очищує і знезаражує воду та відноситься до хімічно небезпечних процесів.

Знезараження води — санітарно-технічні процеси ліквідації у воді мікроорганізмів (бактерій, вірусів), які перешкоджають її використанню для пиття, господарських потреб і промислових цілей або викиданню в природні водойми.

Знезаражуванню піддається вода, що використовується для господарсько-питних цілей та для підтримування тиску в нафтових покладах. Вміст у питній воді мікробів, який визначається кількістю колоній, після 24- годинного вирощування при температурі 37 °С повинен бути не більше 100 в 1 см<sup>3</sup>, кишкових паличок не більше 3 штук в 1 дм<sup>3</sup> води.

Розрізняють реагентні (хімічні) і безреагентні (фізичні) способи знезараження води.

До безреагентних — знезараження ультрафіолетовим промінням, ультразвуком, йонізуючим випроміненням, фільтруванням і тепловою обробкою. До реагентних належать хлорування, озонування, знезараження йонами міді, срібла та ін. Найбільш поширений спосіб – хлорування.

В Україні підприємства, що використовують хлор, зазнають додаткових витрат на охорону об'єкта, на автоматизовану систему оповіщення, на обладнання для ліквідації викидів, на спеціальні системи вентиляції, спеціальні системи зберігання і нейтралізації пошкоджених контейнерів з хлором.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Висновки кваліфікаційної роботи магістра на тему Удосконалення технологічного процесу відновлення валу ротора турбокомпресора Garrett GT2049S для двигуна 2.0 TDI DuraTorq Ford Transit V з дослідженням технологічного процесу електроосадження покриттів можуть включати наступні пункти:

Робота показує значне вдосконалення у методах відновлення валу ротора, використовуючи електроосаджені залізокобальтові покриття. Це не лише забезпечує міцність відновленої деталі, але й знижує загальні витрати на ремонт.

Результати експериментів вказують на підвищену зносостійкість відновленого валу ротора порівняно з оригінальними валами. Це продовжує термін служби деталі, що є критично важливим для економічності та надійності використання транспортних засобів.

Демонструється, що відновлені вали ротора забезпечують стабільну та ефективну роботу, що підтверджено тривалими експлуатаційними випробуваннями.

У роботі детально описано та аналізовано процес електроосадження, який є ключовим у відновленні валу ротора. Розглядаються технічні аспекти, параметри осадження, а також можливі шляхи оптимізації процесу.

Результати дослідження мають високу практичну цінність, особливо для автомобільної промисловості, з огляду на потенційну економію коштів і ресурсів у процесі ремонту і відновлення турбокомпресорів.

Робота вносить значний внесок у наукові дослідження у галузі відновлення та ремонту ключових компонентів автомобільних двигунів, розширюючи існуючі знання та практики у цій сфері.

Ці висновки вказують на успішність роботи та її значимість для галузі відновлення та обслуговування транспортних засобів.

**БІБЛІОГРАФІЯ**

1. Ляшук О.Л., Гудь В.З., Пиндус Ю.І., Левкович М.Г., Хорошун Р.В. Методичний посібник до виконання кваліфікаційної роботи магістра за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр» галузі знань 27 «Транспорт» спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» – Тернопіль: Видавництво ТНТУ, 2020. – 66 с.
2. Гаркунов, Д. Види тертя та зносу. Експлуатаційні ушкодження деталей машин [Текст]/Д. Гаркунов, П.І Корник // : МСГА, 2003. – 343 с.
3. В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, В.І. Венжега К 17 Відновлення деталей автомобілів: Навчальний посібник.– Чернігів: ЧНТУ, 2013. – 192с.; іл. ISBN 966-311-003-1.
4. Гевко І.Б Техніко-економічне обґрунтування процесу механічної обробки з використанням комбінованого свердла-мітчика / І.Б.Гевко, Р.Я., Лещук, І.І.Стойко, Н.М.Марчук, М.Д.Сіправська // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.–Вип. 40.–Луцьк, 2018. С.21-31.
5. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень на СТО та АТП : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Луциків І.В., Плекан У.М., Клендій В.М. - Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 276 с.
6. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гудь В.З., Левкович М.Г., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. - Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 544 с.
7. Конспект лекцій з курсу «Технології обслуговування автотранспортних засобів». / Р.В. Хорошун, О.Л. Ляшук, Н.Т. Навроцька. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ, 2021. – 194 с.
8. Ляшук О.Л. Конспект лекцій з дисципліни«Технічна експлуатація автомобілів» для студентів спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» / О.Л. Ляшук, В.М.Клендій, Р.В.Хорошун. – Тернопіль: Вид. ТНТУ – 2018. – С. 302.
9. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підручник – К.: Знання. 2003. – 511 с.

10. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: організація і управління: Підручник – К.: Знання. 2004. – 478 с.
11. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів. Технологія [Текст]: Підручник. / О.А. Лудченко. - Київ: Знання-Прес, 2007. - 527с.
12. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Левкович М.Г., Гудь В.З., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 544 с.
13. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2023, 118, 161-172. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.11>.
14. Sokil, B., Lyashuk, O., Sokil, M., Vovk, Y., Lebid, I., Nevko, I., Khoroshun R Matviyishyn, A. (2022). Methodology of Force Parameters Justification of the Controlled Steering Wheel Suspension. Communications, 24(3), B247-B258.
15. Охорона праці в галузі та цивільний захист: навчальний посібник / Ю. А. Гасило, О. А. Крюковська. К. О. Левчук, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2017. — 369 с.
16. Безпека в надзвичайних ситуаціях : навч. посібник для студентів ЗВО України : у 2 ч. Ч. 1: Надзвичайні ситуації / М. Л. Лисиченко, В. В. Вамболь, С. О. Вамболь, М. М. Кірієнко, І. А. Черепньов, В. М. Власовець ; за ред. М. Л. Лисиченка ; ХНТУСГ. – Харків : ТОВ “ПромАрт”, 2021. – 202 с.
17. Охорона праці на автомобільному транспорті : навчальний посібник / Пістун І. П., Хом'як Й. В., Хом'як В. В. - 2-ге вид., стер. - Суми : Університетська книга, 2015. - 374 с.
18. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: Підручник. - К.: Арістей, 2004. - 476 с.
19. Яцковський В. І. Сучасні методи розрахунків ДВЗ / В. І. Яцковський, І. В. Гунько, О. В. Гуцаленко. – Вінниця, РВВ ВНАУ, 2016.-132.

20. О.П. Строков, М.Г. Макаренко, В.Ф.Фролов Технічне обслуговування та ремонт вантажних і легкових автомобілів, автобусів. Підручник: У 2 кн. К.: Грамота, 2005.
21. Технічний контроль стану дорожніх машин / Малишев В., Кущевська Н., Петренко Т, Докуніхін В. - Університет "Україна", 2022. 252 с.
22. Підручник з будови автомобіля. Видання третє. Виправлене й доповнене – Моноліт 2021 – 288 с.
23. Булгаков В. М., Черниш О. М., Адамчук В. В., Березовый М. Г., Яременко В.В ТЕОРІЯ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН - Центр навчальної літератури 2020 – 608 с.
24. Коноваленко О.Д., Черниш А.А. Ідентифікація транспортних засобів: навчальний посібник. – Харків: Мадрид, 2020. – 259 с.
25. Кошель С. О., Березін Л. М., Кошель Г. В. Технічна механіка. Розділ "Теорія механізмів і машин" -Центр навчальної літератури (ЦУЛ) 2020 – 156 с.
26. Кисликов В.Ф., В.В. Лущик Будова і експлуатація автомобілів. Підручник - Либідь м.Київ, 2018 – 400с.
27. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom (2023) Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 118, pp. 161-172. (Scopus).
28. Aulina, V., Kropivnya, V., Kuzyka, O., Lyashuk, O., Bosyia, M., Vovk, Y., Kropivnaa, A., Sokol, M., Senyk, A., Slobodyan, L. The Influence of Titanium as a Desferoidizing Element on the Stability of Production of Magnesium Cast Irons with Compacted Graphite (2021) Tribology in Industry - Kragujevac : University of Kragujevac, 4 (43), pp. 654-666. (Scopus).
29. Яременко В., Черниш О., Березовий М - Теорія механізмів і машин. Навчальний посібник - Центр навчальної літератури, 2018 – 464 с.
30. Кузьмінський Р.Д., Шарибура А.О Технічний сервіс. Ремонт електрообладнання тракторів і автомобілів Львів 2017 – 376 с.
31. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. частина «Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.