

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

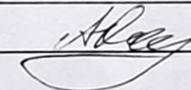
«Удосконалення технології відновлення посадкових місць підшипників в умовах спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService» місто Вінниця»

Виконав: студент 2-го курсу, групи
1АТ-24м спеціальності 274 –

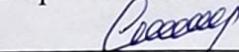
Автомобільний транспорт

Освітньо-професійна програма –

Автомобільний транспорт

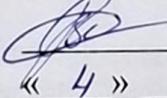
 Андрощук О.С.

Керівник: к.т.н., доцент каф. АТМ

 Смирнов Є.В.

« 27 » / 11 2025 р.

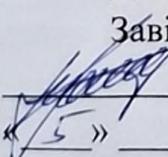
Оponent: к.т.н., доц. каф. АТМ

 Соверьяк В.В.

« 4 » / 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри АТМ

 к.т.н., доц. Цимбал С.В.

« 5 » / 12 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 27 – Транспорт
Спеціальність – 274 – Автомобільний транспорт
Освітньо-професійна програма – Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри АТМ
к.т.н., доцент Цимбал С.В.

« 25 » 09 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Андрощуку Олександрю Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Удосконалення технології відновлення посадкових місць підшипників в умовах спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService» місто Вінниця,

керівник роботи Смирнов Євгеній Валерійович, к.т.н., доцент,
затверджені наказом ВНТУ від «24» вересня 2025 року № 313.

2. Строк подання здобувачем роботи: 30.11.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Вимоги до конструкції та експлуатації автотранспортних засобів (діючі міжнародні, державні, галузеві стандарти та технічні умови заводів-виробників автомобільної техніки); показники ВТБ автосервісного підприємства «StartService» місто Вінниця; спеціалізація – ремонт та реставрація стартерів та генераторів; об'єкт дослідження – процеси функціонування відновлених підшипникових вузлів автотранспортних засобів.

4. Зміст текстової частини:

1 Стан проблеми відновлення підшипникових вузлів автомобілів. Аналіз роботи спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService»

2 Неоретичні передумови відновлення посадкових місць підшипникових вузлів полімерними матеріалами

3 Дослідження працездатності підшипникових вузлів автомобілів, відновлених полімерними композиційними матеріалами

4 технологія відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобільних генераторів

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

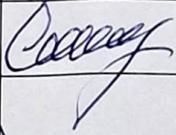
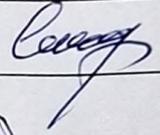
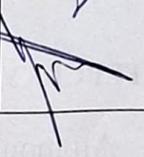
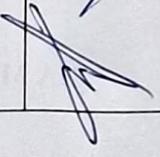
1-3 Тема, мета та завдання дослідження.

4 Способи відновлення посадкових місць підшипникових вузлів

5 Способи нанесення полімерних композицій при відновленні деталей автомобіля

- 6 Характеристика ВТБ спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice»
 7 Математична модель працездатності відновлених підшипникових вузлів автомобілів
 8 Результати дослідження працездатності відновлених підшипникових вузлів (2-3 слайди)
 9 Принципова схема установки нанесення полімерних покриттів
 10 Схема технологічного процесу відновлення посадкових місць підшипникових вузлів кришок генераторів
 11 Типова маршрутна карта відновлення посадочних місць підшипникових вузлів кришок генераторів
 12 Основні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

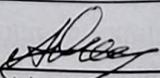
Розділ/підрозділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розв'язання основної задачі	Смирнов Є.В., доцент кафедри АТМ		
Визначення ефективності запропонованих рішень	Буренніков Ю.Ю., професор кафедри АТМ		

7. Дата видачі завдання « 25 » вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

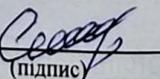
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення об'єкту та предмету дослідження	25.09-29.09.2025	Вик.
2	Аналіз відомих рішень, постановка задач	30.09-20.10.2025	Вик.
3	Обґрунтування методів досліджень	30.09-20.10.2025	Вик.
4	Розв'язання поставлених задач	21.10-10.11.2025	Вик.
5	Формування висновків по роботі, наукової новизни, практичної цінності результатів	11.11-16.11.2025	Вик.
6	Виконання розділу/підрозділу «Визначення ефективності запропонованих рішень»	17.11-24.11.2025	Вик.
7	Нормоконтроль МКР	25.11-30.11.2025	Вик.
8	Попередній захист МКР	01.12-04.12.2025	Вик.
9	Рецензування МКР	05.12-09.12.2025	Вик.
10	Захист МКР	10.12.2025-12.12.2025	Вик.

Здобувач


(підпис)

Андрощук О.С.

Керівник роботи


(підпис)

Смирнов Є.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 629.3

Андрощук О.С. Удосконалення технології відновлення посадкових місць підшипників в умовах спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService» місто Вінниця. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 274 – Автомобільний транспорт, освітня програма – Автомобільний транспорт. Вінниця: ВНТУ, 2025. 83 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 32 назви; рис.: 20; табл. 4.

В магістерській кваліфікаційній роботі пророблено питання удосконалення технології відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів. У розділі 1 проаналізовано способи відновлення посадкових місць підшипникових вузлів та обґрунтовано доцільність відновлення нанесенням порошкових композиційних матеріалів; проаналізовано стан виробничо-технічної бази спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService». В розділі 2 здійснено теоретичні розробки відновлення посадкових місць підшипникових вузлів полімерними композиційними матеріалами. В розділі 3 проведено дослідження працездатності підшипникових вузлів автомобілів, відновлених полімерними композиційними матеріалами. В розділі 4 розроблена технологія відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобільних генераторів та виконано оцінку ефективності впровадження технології на прикладі спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService».

Ілюстративна частина складається з 15 плакатів.

Ключові слова: автомобіль, генератор, підшипниковий вузол, відновлення, композиційні матеріали, покриття.

ABSTRACT

UDC 629.3

Androschuk O.S. Improvement of the technology of restoring bearing seats in the conditions of a specialized car service enterprise "StartService", Vinnytsia. Master's qualification work in the specialty 274 - Motor transport, educational program - Motor transport. Vinnytsia: VNTU, 2025. 83 p.

In Ukrainian Language. Bibliography: 32 titles; Fig.: 20; table 4.

The master's qualification work deals with the issue of improving the technology for restoring the seats of bearing assemblies of automobiles. In section 1, the methods for restoring the seats of bearing assemblies are analyzed and the feasibility of restoration by applying powder composite materials is substantiated; the state of the production and technical base of the specialized car service enterprise "StartService" is analyzed. In section 2, theoretical developments for restoring the seats of bearing assemblies with polymer composite materials are carried out. In section 3, a study of the operability of car bearing assemblies restored with polymer composite materials is conducted. In section 4, a technology for restoring the seats of bearing assemblies of automobile generators is developed and an assessment of the effectiveness of the technology implementation is performed using the example of the specialized car service enterprise "StartService".

The illustrative part consists of 15 posters.

Keywords: car, generator, bearing assembly, restoration, composite materials, coating.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВТОМОБІЛІВ. АНАЛІЗ РОБОТИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО АВТОСЕРВІСНОГО ПІДПРИЄМСТВА «STARTSERVICE».....	7
1.1 Забезпечення надійності на автомобільному транспорті.....	7
1.2. Аналіз причин відмов підшипників вузлів автомобілів	9
1.3. Аналіз способів відновлення посадкових місць підшипників	11
1.4 Аналіз методів відновлення підшипникових вузлів полімерними матеріалами	14
1.5 Загальна характеристика спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService»	21
1.6 Аналіз і оцінка стану виробничо-технічної бази автосервісного підприємства.....	23
1.7 Висновки	24
2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДКОВИХ МІСЦЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ.....	25
2.1 Загальні вимоги до відновлення підшипникових вузлів автомобілів	21
2.2 Модель розвитку втомних тріщин	26
2.3 Модель розвитку втомних макроскопічних тріщин.....	28
2.4 Модель розвитку втомних тріщин з великою зоною передруйнування ...	30
2.5 Теоретичні передумови дослідження впливу ультразвукових полів на адгезійну міцність полімерних покриттів	35
2.6 Висновки	42
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВТОМОБІЛІВ, ВІДНОВЛЕНИХ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОЗИЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ	44
3.1 Фактори, що визначають працездатність відновлених підшипникових вузлів	44

3.2 Зміна адгезійної міцності полімерних покриттів в умовах гідростатичного впливу	48
3.3 Вплив умов навантаження та товщини покриття на довговічність адгезійних металополімерних з'єднань	51
3.4 Вплив посадки на міцність та довговічність з'єднань	54
3.5 Висновки	57
4 ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДКОВИХ МІСЦЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ	59
4.1 Загальна інформація про технологічний процес	59
4.2 Розробка технологічного обладнання для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів	62
4.3 Розробка технологічного процесу відновлення посадкових місць підшипників автомобільних генераторів.....	66
4.4 Економічна оцінка впровадження технологічного процесу в ремонтне виробництво.....	72
4.5 Висновки	77
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина	84
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	100

ВСТУП

Актуальність теми.

Одним із ключових задач сучасного автомобілебудування є забезпечення високої надійності конструктивних елементів, що включає їх довговічність та безвідмовність у процесі експлуатації. Стан підшипникових вузлів суттєво впливає на ресурс автомобілів, оскільки режими їх роботи визначаються специфічними умовами експлуатації та ремонту. У зв'язку з цим перед автосервісними підприємствами постає завдання підвищення якості відновлення посадкових поверхонь під підшипникові вузли, що гарантують працездатність та тривалий термін служби автомобіля.

Відновлені підшипникові вузли повинні забезпечувати можливість багаторазового демонтажу та повторного монтажу в процесі технічного обслуговування та ремонту автомобілів. У зв'язку з цим актуальним є завдання вдосконалення існуючих технологій відновлення посадкових поверхонь під підшипники. Реалізація таких рішень спрямована на підвищення експлуатаційної надійності, довговічності та ремонтпридатності вузлів у складних умовах роботи транспортних засобів.

Використання полімерних матеріалів та композицій на їх основі є одним із ключових напрямів підвищення ефективності процесів відновлення деталей автомобільної техніки. Тому для відновлення посадкових місць під підшипники найбільш перспективним є застосування порошкоподібних полімерних композицій. Проте на жаль у практиці ремонту автомобілів технологія відновлення зазначених деталей порошковими композиціями, сформованими під дією силового впливу, досі не знайшла широкого застосування.

Метою магістерської роботи є розробка високоефективної технології відновлення посадкових поверхонь під підшипникові вузли автомобілів із застосуванням сучасних методів ремонту та полімерних композиційних матеріалів.

Задачі магістерської кваліфікаційної роботи:

– провести аналіз причин відмов підшипникових вузлів автотранспортних засобів та виконати аналіз існуючих методів відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів;

– проаналізувати сучасний стан виробничо-технічної бази спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice»;

– обґрунтувати математичні моделі для дослідження надійності та працездатності відновлених підшипникових вузлів автомобілів із застосуванням композиційних полімерних покриттів;

– виконати дослідження надійності та працездатності підшипникових вузлів автомобілів, відновлених із застосуванням обґрунтованого метода нанесення покриття та полімерних композиційних матеріалів.

– розробити технологічний процес відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів та розробити концептуальну схему для нанесення полімерних покриттів;

– оцінити економічний ефект від впровадження розробок на спеціалізованому автосервісному підприємстві «Startservice».

Об'єктом дослідження є процеси функціонування відновлених підшипникових вузлів автотранспортних засобів.

Предметом дослідження є технологія відновлення посадкових місць підшипникових вузлів із застосуванням композиційних полімерних матеріалів.

Новизна роботи:

– отримали подальший розвиток математичні моделі процесів втомного руйнування поверхонь підшипникових вузлів автомобілів, відновлених полімерними матеріалами;

– обґрунтовано вплив технологічних режимів формування покриттів з полімерної порошкової композиції на якість та стабільність їх властивостей.

Практична цінність роботи полягає у розробці технології відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів, відновлених порошковими

композиціями на основі поліаміду та епоксидного олігомеру в електростатичному та ультразвуковому полі.

Апробація результатів. Основні положення магістерської роботи апробовано на всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)».

Публікації. За результатами виконання магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані 1 тези доповіді [1].



1 СТАН ПРОБЛЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВТОМОБІЛІВ. АНАЛІЗ РОБОТИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО АВТОСЕРВІСНОГО ПІДПРИЄМСТВА «STARTSERVICE»

1.1 Забезпечення надійності на автомобільному транспорті

Експлуатація автотранспортних засобів (АТЗ) є найдовшою фазою їх життєвого циклу. Ефективність використання АТЗ у цей період визначається прийнятою системою технічного обслуговування (ТО) та ремонту (Р), рівнем технологічного оснащення, якістю експлуатаційних матеріалів, кваліфікацією персоналу, а також технологіями відновлення працездатності.

Розробка заходів для забезпечення довговічності АТЗ повинна ґрунтуватися на результатах дослідження процесів, що відбуваються в їхніх елементах під час роботи в умовах експлуатації, а саме:

- процеси зміни геометричних та функціональних параметрів деталей унаслідок зношування;
- старіння матеріалів та розвиток внутрішніх явищ у деталях;
- зміна параметрів деталей під впливом пластичних деформацій;
- модифікація показників фізико-механічних властивостей матеріалів.

Ключовим елементом технічної експлуатації та основним засобом підтримання працездатності рухомого складу є система ТО та Р. Її призначення полягає в управлінні технічним станом автотранспортних засобів протягом усього терміну служби або ресурсу до списання, що забезпечує: заданий коефіцієнт технічної готовності виробів (α_m) до виконання функцій за призначенням, їх працездатність у процесі експлуатації, а також мінімізацію витрат часу, трудових ресурсів і коштів.

У сучасних умовах функціонування підприємств автомобільного транспорту застосовується різноманітний рухомий склад, технічне обслуговування якого регламентується даними сервісних книжок. При цьому не враховуються періоди

простою автомобілів під час проведення ТО та поточного ремонту (ПР). Капітальний ремонт повнокомплектних автомобілів на сьогодні не виконується, що ускладнює розрахунок прогнозованого коефіцієнта технічної готовності [4, 12].

При розрахунку коефіцієнта технічної готовності враховуються простої рухомого складу в ТО та поточному ремонті (ПР). Для автомобіля без планування капітального ремонту за «ідеальних» умов експлуатації (без урахування простою автомобіля з організаційних причин, таких як відсутність водія, замовлення на виконання робіт тощо) коефіцієнт технічної готовності визначається за формулою:

$$\alpha_m = \frac{1}{1 + l_c \cdot (D_{TO-2}^H + D_{PR}^H) / 1000}, \quad (1.1)$$

де D_{TO-2}^H та D_{PR}^H – нормативний показник, що характеризує тривалість простою рухомого складу АТП відповідно в ТО-2 та ПР, дн./1000 км;

l_c – сеоедній пробіг автомобіля за добу, км.

Зважаючи на те, що при цьому збільшується кількість відмов, а отже, і час простоїв у ТО та ремонті рівень технічної готовності визначимо відповідно до рівняння 1.2:

$$\alpha_m = \frac{1}{1 + B_p l_c} = \frac{1}{1 + B_p T_n V_e}, \quad (1.2)$$

де B_p - час знаходження автомобіля в технічних обслуговуваннях та ремонтах за рахунок робочого часу, дн./1000км, $B_p = D_{PC} / L_{СП}$;

D_{PC} - цикловий простий автомобіля, дн., $D_{PC} + D_{PR, TO}$;

$D_{PR, TO}$ - показник простою автомобіля в технічному обслуговуванні та поточному ремонті, дн./1000 км;

$L_{СП}$ - пробіг автомобіля (напрацювання) до списання, км;

T_n - час однієї зміни, год;

V_e - експлуатаційна швидкість, км/год.

Згідно формул (1.1-1.2), рівень технічної готовності автомобіля визначається його працездатністю та довговічністю, що безпосередньо залежать від тривалості простою під час технічного обслуговування і поточного ремонту, а також від величини пробігу до моменту списання. Оскільки ресурс пробігу закладається на етапі проектування та не підлягає зміні в процесі експлуатації, основним завданням технічної служби є мінімізація простоїв шляхом удосконалення існуючих технологій, впровадження нових конструктивних рішень, використання високоефективних матеріалів і методів відновлення деталей та вузлів.

Серед елементів конструкції сучасних транспортних засобів підшипникові вузли займають особливе місце, оскільки вони є одними з найбільш численних і суттєво впливають на загальну довговічність та працездатність автомобіля.

1.2. Аналіз причин відмов підшипників вузлів автомобілів

Практика експлуатації автомобільної техніки та результати численних досліджень, спрямованих на оцінку довговічності й експлуатаційних характеристик підшипникових вузлів, свідчать, що зношування або відхилення лінійних розмірів і геометричної форми посадкових поверхонь від нормативних параметрів призводять до порушення точності взаємного розташування деталей механізмів. Це викликає зростання статичних і динамічних навантажень на елементи, прискорює знос посадкових місць та компонентів підшипників кочення, а також спричиняє зміни залишкових напружень у матеріалі.

Основними факторами, що спричиняють зношування посадкових поверхонь підшипників кочення, є провертання кілець та розвиток фреттинг-корозії [15, 16].

Фреттинг-корозія являє собою специфічний тип зношування номінально нерухомих металевих поверхонь, що знаходяться у контакті. Її виникнення обумовлене зворотно-поступальними мікропереміщеннями з певною амплітудою. Основними чинниками, які спричиняють такі переміщення, є вібраційні впливи,

динамічні навантаження, а також деформації вигину або кручення деталей, що взаємодіють [15, 16, 17, 23].

Інтенсивність руйнування контактних металевих поверхонь при фреттінг-корозії визначається комплексом факторів. До фізичних параметрів належать відносна твердість поверхонь та температурні умови. Серед характеристик зовнішнього механічного впливу ключовими є амплітуда відносного зміщення, величина питомого контактного навантаження, частота коливань та кількість циклів навантаження [16, 23].

Слід підкреслити, що наслідком фреттінг-корозії є істотне зниження втомної міцності матеріалу, що, у свою чергу, призводить до інтенсивного зношування сполучених поверхонь, яке розвивається за параболічною залежністю [15, 16, 23].

Зношування посадкових поверхонь підшипників кочення значною мірою спричиняє утворення зазорів між кільцями підшипників та сполученими поверхнями корпусних деталей і валів, що призводить до зниження ресурсу підшипникового вузла.

Згідно з результатами роботи [21], Встановлено, що при зношуванні отвору на 0,05 мм питоме навантаження на зуби шестерні коробки передач зростає приблизно на 25%, що призводить до кратного зниження ресурсу. Ці дані підтверджуються результатами спостережень за роботою коробок передач, зібраних із нових деталей у корпусах без попереднього ремонту: їхній ресурс становив лише 30–40% від нормативного ресурсу нових агрегатів. Підвищене зношування посадкових поверхонь підшипників призводить до зменшення площі контакту в зачепленні зубчастих коліс, що є однією з причин самовимкнення передач. [21].

Слід зазначити, що наведені в літературних джерелах дані переважно стосуються деталей вузлів трансмісій автомобілів. Водночас у доступних публікаціях відсутня інформація щодо причин пошкоджень, величини та характеру зношування посадкових поверхонь підшипникових вузлів агрегатів електрообладнання автомобілів.

1.3. Аналіз способів відновлення посадкових місць підшипників

Найбільш детальний та ґрунтовний аналіз методів відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів кочення наведено в роботі [3]. У ній представлено класифікацію способів (рисунок 1.1), описано ключові переваги та недоліки кожного методу, а також наведено порівняльні характеристики існуючих технологій відновлення.



Рисунок 1.1 – Класифікація способів відновлення посадкових місць підшипникових вузлів кочення

Більшість методів відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів характеризуються низкою загальних недоліків. Вони потребують використання дорогого технологічного обладнання, відзначаються складністю технологічного процесу та необхідністю механічного впливу на відновлені деталі. Крім того, такі

способи відрізняються високою трудомісткістю, енергоємністю та матеріаломісткістю, що істотно підвищує собівартість операцій.

Використання полімерних матеріалів для відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів дозволяє усунути зазначені вище недоліки традиційних методів [5, 7, 10, 18, 19, 21, 22, 26].

Відновлення нерухомих з'єднань підшипникових вузлів за допомогою ремонтних полімерних матеріалів реалізується двома основними методами. Перший полягає у нанесенні полімерного шару на посадкову поверхню з подальшим формуванням її до номінального розміру. Другий метод передбачає склеювання одного з кілець підшипника з відповідною деталлю [13, 18-25].

Найбільш широке застосування при ремонті посадкових місць отримали епоксидні полімери та композиції на їх основі [13-14]. Такі матеріали виготовляють із використанням епоксидних олігомерів і затверджувачів, а для забезпечення необхідних властивостей до складу композицій вводять наповнювачі, серед яких скляне борошно, залізний порошок, алюмінієва пудра, а також пластифікатори, наприклад, дибутилфталат або діоктилфталат [27].

Епоксидні полімери та композити на їх основі відрізняються високою адгезією, значною механічною міцністю, а також стійкістю до теплових, водних і хімічних впливів [14]. Важливою перевагою цих матеріалів є здатність до отвердіння в широкому діапазоні температур, що забезпечує їх універсальність у ремонтних технологіях.

Один з методів відновлення нерухомого з'єднання підшипника кочення полягає в нанесенні на зношену поверхню корпусу підшипникового вузла шару епоксидної композиції з подальшим калібруванням після часткового затвердіння покриття. Склад полімерної композиції використовується на основі епоксидної смоли ЕД-19, або поліетиленполіаміном (ПЕПА) на основі клею компаунду К-115, скріпленого затверджувачем АФ-2. Запропонований спосіб дозволяє отримувати відновлені місця підшипників з номінальним розміром, що не вимагає механічної обробки [19].

Існує удосконалена технологія формування полімерних покриттів під дією зовнішніх силових полів. Суть методу полягає в нанесенні епоксидної композиції шпателем на зношені посадкові поверхні підшипників кочення з подальшою витримкою протягом однієї години в нормальних умовах при одночасному впливі силових полів. Після цього виконується калібрування отвору шляхом протягування оправки вздовж його осі на свердлильному верстаті. Завершальним етапом є отвердіння покриття за ступінчастим температурним режимом: спочатку при 30 °С протягом двох годин, далі при 100 °С протягом однієї години, і на завершення при 150 °С протягом ще однієї години.

Метод формування полімерної ремонтної композиції на посадкових поверхнях підшипникових вузлів має низку обмежень. Його реалізація потребує застосування розточувального та пресового обладнання, а також відзначається значною тривалістю як процесу формування покриття, так і його остаточного затвердіння. Зазначені недоліки можна усунути шляхом склеювання кільця підшипника з корпусною деталлю, в яку він встановлюється.

Найбільш поширеним методом відновлення нерухомих з'єднань шляхом склеювання є використання анаеробних герметиків. Їх популярність пояснюється високою адгезією до металевих поверхонь та стійкістю до впливу води, мастильних матеріалів, палива, органічних розчинників, кислот, лугів та інших агресивних хімічних середовищ. Після затвердіння ці матеріали зберігають експлуатаційні властивості в широкому температурному діапазоні від 60 до 150 °С [13-24]. На українському ринку найбільш відомим виробником герметиків є герметики вітчизняного виробництва «Анатерм» та «Унігерм», та закордонного виробництва – «LOCTITE» та «THREEBOND».

Під час процесу вклеювання зовнішнього кільця в отвір корпусної деталі застосовуються спеціальні центрувальні пристрої, які забезпечують необхідну співвісність елементів.

Недоліками цього способу, крім необхідності застосування спеціальних центрувальних пристроїв, є вимога вертикального розташування з'єднання та низька стійкість герметиків до циклічних навантажень, що призводить до

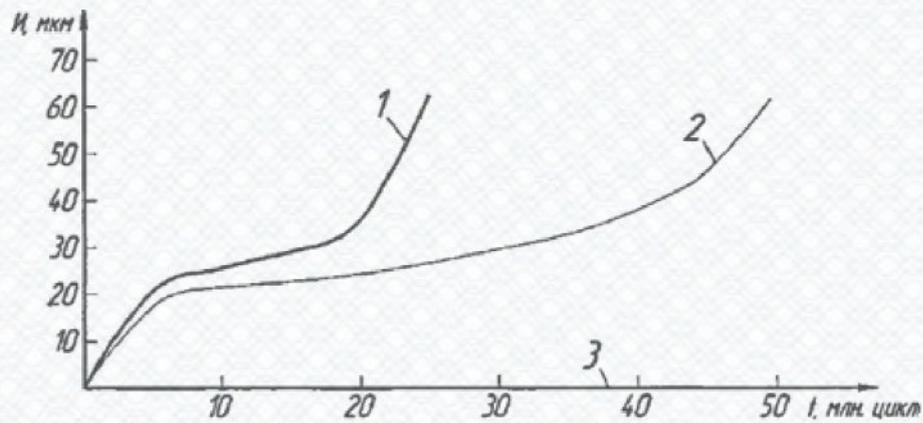
утворення тріщин. Вирішення зазначеної проблеми можливе шляхом введення дисперсних наповнювачів, зокрема нанорозмірних частинок. Додавання таких частинок до складу анаеробних герметиків підвищує їхню міцність і витривалість, скорочує час затвердіння та збільшує ресурс з'єднання приблизно у 1,42 рази порівняно з ненаповненими полімерними матеріалами [29].

1.4 Аналіз методів відновлення підшипникових вузлів полімерними матеріалами

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що найбільш простим і ефективним способом підвищення довговічності зношених посадкових поверхонь підшипникових вузлів під час ремонту рухомого складу є їх відновлення за допомогою ремонтних полімерних матеріалів. Застосування цього методу повністю усуває контакт сполучених поверхонь, що сприяє зниженню динамічних навантажень і запобігає провертання зовнішнього кільця підшипника.

Суттєва різниця між в'язкопружними, фізико-механічними та теплофізичними характеристиками металів і полімерів істотно впливає на характер виникнення та розвиток напружень у нерухомих з'єднаннях із полімерним покриттям під навантаженням [7, 14].

Кількість циклів динамічного навантаження істотно впливає на довговічність підшипникових вузлів. Згідно з даними [23], встановлено, що при посадці підшипника без полімерного покриття найменший ресурс мають з'єднання із зазором 0,02 мм (рис. 1.2, крива 1), тоді як довговічність нерухомого з'єднання з натягом 0,02 мм виявилася приблизно удвічі вищою (рис. 1.2, крива 2). Під час випробувань протягом 270 годин підшипника кочення з полімерним покриттям, сформованим із термообробленого герметика марки 6Ф, зношування посадкового отвору не було зафіксовано.



1 – з'єднання з посадкою із зазором 0,02 мм; 2 – з'єднання з натягом 0,02 мм; 3 – з'єднання з нанесеним на посадкову поверхню полімерним покриттям із термообробленого герметика

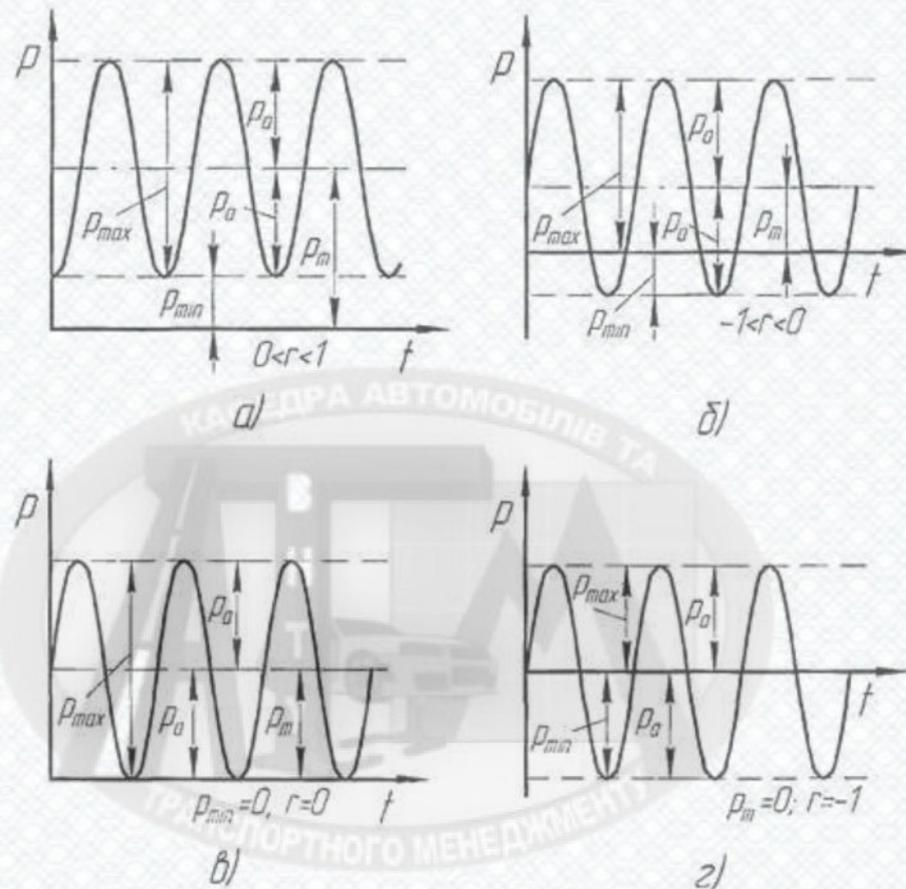
Рисунок 1.2 – Графік, що демонструє залежність інтенсивності зношування посадкових поверхонь від величини напрацювання для різних типів нерухомих з'єднань.

Під час експлуатації автомобіля у його вузлах виникають динамічні навантаження, які змінюються з часом як за величиною, так і за напрямком. Такі навантаження класифікуються як циклічні. Існують різні типи циклів навантаження [22]:

- Цикл зі сталим знаком – напруження змінюється лише за числовим значенням, зберігаючи знак (рис. 1.3, а).
- Знакозмінний цикл – напруження змінюється як за величиною, так і за знаком (рис. 1.3, б).
- Пульсуючий цикл – варіант знакопостійного циклу, де напруження змінюється від нуля до максимального значення (рис. 1.3, в).
- Симетричний цикл – знакозмінний цикл, у якому максимальні значення напруження протилежних знаків є рівними за модулем (рис. 1.3, г).

Під впливом циклічних навантажень у нерухомих з'єднаннях підшипникових вузлів, відновлених полімерними матеріалами, виникають напруження різних типів: стиснення, зсуву та розтягування. Тривала дія таких напружень спричиняє

поступове накопичення пошкоджень у полімерному шарі, що призводить до зародження та розвитку тріщин, а в кінцевому результаті – до руйнування елемента.



а – цикл зі сталим знаком; б - знакозмінний цикл; в – пульсуючий цикл;

г – симетричний цикл

Рисунок 1.3 – Види циклічного навантаження

Концепція руйнування полімерних композиційних матеріалів, що застосовуються для ремонту посадкових поверхонь підшипникових вузлів, описується трьома послідовними стадіями. Структурна схема цієї моделі наведена на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Модель росту тріщини в полімерному матеріалі при циклічних навантаженнях

На початковій стадії відбувається концентрація напружень, що призводить до локального порушення міжмолекулярних зв'язків і формування зародкових мікротріщин. На другому етапі подальший вплив циклічних навантажень спричиняє утворення мікропор, які викликають розпушення структури матеріалу та інтенсивне розростання первинних дефектів. Завершальна стадія характеризується досягненням критичних розмірів тріщини, яка миттєво поширюється через весь переріз зразка, що призводить до його катастрофічного руйнування [16].

Витривалість полімерних композиційних матеріалів, що застосовуються для ремонту, визначається комплексом факторів. На неї впливають температурні умови експлуатації, геометричні параметри клейового шару, амплітуда деформацій при циклічних напруженнях, а також амплітуда самих напружень під час змінних навантажень. Додатково враховуються середні значення напружень і деформацій, а також частота повторення циклів навантаження.

У процесі деградації полімерних матеріалів, спричиненої накопиченням внутрішніх напружень, які трансформуються в мікротріщини, відбувається поступове руйнування деталі. Кількість циклів до настання критичного руйнування визначається фізико-механічними характеристиками матеріалу, режимом прикладених навантажень та величиною максимальних діючих напружень.

Додавання наповнювачів, зокрема нанорозмірних порошків, до складу полімерних композиційних матеріалів забезпечує підвищення їх міцності, стійкості до утворення тріщин та загальної довговічності, що збільшує експлуатаційний ресурс. Аналіз результатів стендових і натурних випробувань підшипникових вузлів, відновлених такими матеріалами, підтвердив, що їхній термін служби значно перевищує показники вузлів, відновлених ненаповненими полімерними системами [8, 9, 11, 19, 20, 21].

Наявні недоліки обмежують можливість широкого використання епоксидних та інших клеєвих композицій для відновлення посадкових поверхонь корпусних деталей.

Найбільш раціональним рішенням для відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів автомобілів є використання термопластичних полімерів та композицій на їх основі [22, 23]. Правильний вибір складу композиції дає можливість формувати покриття з наперед визначеними експлуатаційними характеристиками. Технологія нанесення таких покриттів легко піддається механізації та автоматизації, що забезпечує практично повне використання вихідного матеріалу та реалізацію безвідходного процесу. Отримані шари характеризуються високими фізико-механічними властивостями, допускають формування значної товщини та добре обробляються механічними методами.

На рисунку 1.5 представлено систематичну класифікацію методів нанесення полімерних композицій, що застосовуються у процесах ремонту.



Рисунок 1.5 – Класифікація способів нанесення полімерних композицій при відновленні деталей автомобіля

Серед існуючих методів нанесення термопластичних полімерів та їх композицій найбільш універсальним і перспективним вважається технологія формування покриттів із порошкоподібних композицій. Цей спосіб відрізняється

простотою реалізації та забезпечує рівномірний тонкошаровий розподіл розплавленого полімеру на поверхні деталі.

Суть методу формування покриттів із порошкових композицій полягає в нанесенні частинок полімеру на нагріту або холодну поверхню деталі, де під дією температури вони оплавляються, утворюючи суцільний захисний шар.

Серед методів нанесення порошкових полімерних композицій на посадкові поверхні, що відновлюються під підшипники, найбільш перспективним є електростатичний спосіб. Його принцип ґрунтується на здатності частинок полімерного порошку набувати електричного заряду в полі високої напруги та переміщуватися на поверхню деталі. Метод відрізняється високою продуктивністю, можливістю механізації й автоматизації процесу, а також простотою регулювання товщини покриття, що дозволяє обробляти деталі з різнорідних матеріалів. Комбінування електростатичного та вібровихрвового (камерного) способів дає змогу формувати покриття товщиною 1...2 мм. Водночас існуючі композиційні склади для камерного електростатичного методу не повністю відповідають сучасним вимогам ремонтного виробництва, а наявне обладнання не забезпечує рівномірність покриття внутрішніх поверхонь отворів [25, 29].

Аналіз існуючих технологій нанесення покриттів показав, що для відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів опор кочення найбільш доцільним є застосування камерного електростатичного методу. Водночас результати експлуатаційних спостережень, дослідження характеру зносу та конструктивних особливостей деталей цього класу свідчать про необхідність удосконалення як технології нанесення, так і обладнання, що використовується.

Важливим резервом підвищення якості відновлених деталей є науково обґрунтований вибір складу полімерної композиції для формування покриттів. Разом із тим аналіз літературних джерел свідчить, що наявні порошкові полімерні композиції, призначені для електростатичного напилення, не повністю забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики покриттів.

Для деталей, що працюють під дією коливальних навантажень і експлуатуються в агресивних середовищах, доцільно застосовувати покриття на основі поліаміду [30].

Перспективними вважаються порошкові матеріали на основі поліаміду-12, який характеризується комплексом цінних фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей. Покриття з П-12 демонструють задовільну зносостійкість, широкий діапазон робочих температур (-20...+100 °С) та здатність ефективно поглинати ударні навантаження. Однак при нагріванні частинки поліамідного порошку втрачають електричний заряд через зниження електричного опору, що ускладнює процес формування покриття в електростатичному полі. Крім того, поліамідні покриття характеризуються значною усадкою, високими внутрішніми напруженнями та недостатньою адгезійною міцністю [21,22, 24-27].

Зазначені особливості істотно обмежують застосування поліамідних покриттів для відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів.

На сьогодні промисловість випускає широкий спектр епоксидних порошкових полімерів, що переважно застосовуються для створення захисно-декоративних покриттів. На відміну від поліамідних матеріалів, ці порошки швидше набувають електричного заряду в електростатичному полі та ефективніше його утримують. Покриття, сформовані з епоксидних композицій, характеризуються високою адгезійною міцністю та твердістю. Однак використання їх у чистому вигляді для відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів є неможливим через значну крихкість і недостатню зносостійкість.

Можна припустити, що модифікація властивостей поліамідних покриттів можлива шляхом введення до їх складу епоксидних олігомерів. Такий підхід, з одного боку, сприятиме покращенню процесу електростатичного осадження порошкових частинок та підвищенню адгезійної міцності, а з іншого – забезпечить покриттям ударну в'язкість і гнучкість завдяки поліамідній основі. Додаткове наповнення композиції скляним борошном дозволить збільшити твердість, зносостійкість і стабільність розмірів покриття. Виходячи з наявних даних, можна зробити висновок, що створення композиції на основі поліаміду П-12 та

епоксидного олігомеру з використанням скляного борошна як наповнювача забезпечить формування покриттів на зношених посадкових поверхнях підшипникових вузлів із необхідними фізико-механічними характеристиками.

Таким чином, застосування ремонтних полімерних композиційних матеріалів для відновлення нерухомих з'єднань підшипникових вузлів є актуальною задачею, вирішення якої забезпечить підвищення надійності автотранспортних засобів та зниження витрат на їх технічне обслуговування і ремонт. У цьому контексті необхідно виконати теоретичне обґрунтування шляхів підвищення довговічності таких матеріалів шляхом введення дисперсних наповнювачів, зокрема з метою збільшення несучої здатності полімерних композицій.

1.5 Загальна характеристика спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService»

«StartService» – це вузькоспеціалізоване автосервісне підприємство, яке спеціалізується на ми відновленні стартерів та генераторів автомобілів.

Автосервісне підприємство «StartService» (ФОП Колоссовський В.В.) було засновано в 1998 році. Воно розташоване в м. Вінниця по вул. Праведників світу (колишня Максимовича), 21Б.

На рис. 1.6 наведено зовнішній вигляд спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService».

Основною діяльністю автосервісного підприємства «StartService» є відновлення стартерів та генераторів автомобіля, крім того підприємство здійснює продаж стартерів та генераторів, як нових, так і відновлених. Підприємство має досвід роботи по відновленню електрообладнання уже більше 20 років.

Основні види робіт, які надає підприємство:

- комп'ютерна діагностика автомобіля;
- знаття та встановлення стартера або генератора;



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService».

- діагностування стартера або генератора на спеціалізованому стенді;
- діагностування акумуляторних батарей;
- поглиблене діагностування супутніх елементів систем електропостачання та електричного пуску двигуна;
- ремонт стартера або генератора (розбирання, дефектування, комплектування новими деталями, складання, випробовування після ремонту);
- адаптація нових вузлів та деталей, тощо.

Маючи сучасне обладнання для діагностування та ремонту стартерів та генераторів, фахівці автосервісного підприємства «StartService» здатні вирішити проблеми будь-якої складності, виконуючи повний перелік робіт, більшість з яких іншими автосервісними підприємствами не надається.

Спеціалізоване автосервісне підприємство «StartService» є мультимарочним, здійснює ремонт та реставрацію стартерів та генераторів всі марок автомобілів. Автосервісне підприємство «StartService» надає гарантію на реставровані стартери та генератори, а також на всі інші виконані роботи.

1.6 Аналіз і оцінка стану виробничо-технічної бази автосервісного підприємства

Територія автосервісного підприємства являє собою ділянку, фоною, близькою до прямокутної, розташоване за адресою м. Вінниця, вул. Праведників світу, 21Б. Загальна площа території АТП складає приблизно 0,13 га. Основне покриття земельної ділянки –плитка, рельєф місцевості – рівнинний, наявне озеленення.

На території автосервісного підприємства «StartService» розташовані:

- основна виробнича будівля;
- стоянка для автомобілів;
- додаткова будівля (адміністративно-побутова, склад).

Основна будівля має розміри 15x10 м.

Всі роботи виконуються в спільній залі зони ТО і ПР. В зоні ТО і ПР розташовано 3 тупикових паралельних пости, два з яких обладнані оглядовими канавами, та один – двостійоковим підйомником.

Автосервісне підприємство обладнані сучасним діагностичним та ремонтним обладнанням для ремонту стартерів та генераторів, наявна система вентиляції та видалення відпрацьованих газів. Аналіз переліку обладнання показав повну забезпеченість для виконання робіт з ТО, ремонту та відновлення стартерів та генераторів.

Проаналізувавши стан ВТБ спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService» можна зазначити, що ВТБ придатна для якісного виконання робіт ТО, ПР та реставрації автомобільних стартерів та генераторів. Завантаженість ВТБ висока, відповідно для підвищення її ефективності та якості виконуваних робіт необхідно покращення технологічних процесів підприємства, запровадження більш ефективних технологічних процесів реставрації деталей стартерів та генераторів.

1.7 Висновки

1. Під час експлуатації автомобілів відбувається поступове збільшення зазорів між сполученими поверхнями посадкових місць підшипників вузлів і агрегатів, що негативно позначається на їхній довговічності та надійності автомобіля загалом. Основним чинником цього явища є зношування посадкових поверхонь, спричинене фреттинг-корозією та провертанням кілець підшипників.

2. Одним із перспективних методів відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів опор кочення автомобілів є використання полімерних покриттів на основі порошкових композицій. Проте наявні матеріали не забезпечують формування покриттів на зношених ділянках, здатних функціонувати в умовах підвищених навантажень. Крім того, існуючі технології нанесення порошкових композицій не гарантують отримання покриттів із необхідними характеристиками, насамперед високою адгезією, що є ключовим фактором довговічності відновлених деталей.

3. Виконавши аналіз структури і стану ВТБ спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService», можна зробити висновок, що ВТБ в цілому відповідає поставленим задачам. Наявне спеціалізоване технологічне обладнання для діагностування та реставрації стартерів та генераторів. Проте підвищення ефективності виконання робіт та їх якості можливо шляхом впровадження більш сучасних технологічних процесів відновлення деталей стартерів та генераторів.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДКОВИХ МІСЦЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

2.1 Загальні вимоги до відновлення підшипникових вузлів автомобілів

Посадкові поверхні підшипникових вузлів належать до великої кількості з'єднань у конструкції агрегатів автомобілів. Відхилення їх просторової, геометричної та розмірної точності призводить до порушення точності розмірних ланцюгів, що, у свою чергу, впливає на довговічність і працездатність вузлів. Покриття, призначені для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів, повинні характеризуватися високою адгезією та ударною міцністю, стійкістю до агресивних середовищ, низьким водопоглинанням і стабільністю розмірів при температурних коливаннях.

Аналіз літературних джерел та практичний досвід авторемонтних підприємств свідчать, що протягом експлуатації агрегатів автомобілів виникає необхідність багаторазового монтажу та демонтажу підшипникових вузлів з різних причин, зокрема через проведення ремонтних робіт. Відповідно, покриття, застосовувані для відновлення посадкових поверхонь корпусних деталей, повинні забезпечувати можливість повторного складання та розбирання без втрати функціональних властивостей, тобто характеризуватися високою зносостійкістю як під час складання, так і в процесі експлуатації. Таким чином, показник зносостійкості доцільно розглядати як ключовий критерій якості відновлених посадкових місць, а при оптимізації складу композицій прагнути до його максимізації.

Іншим ключовим критерієм якості відновлених посадкових поверхонь корпусних деталей є здатність протистояти ударним навантаженням, що забезпечує довговічність експлуатації відновленої поверхні.

Суттєва різниця між в'язкопружними фізико-механічними та теплофізичними характеристиками металів і полімерів визначає особливості

виникнення та розвитку напружень у нерухомих з'єднаннях із полімерним покриттям під дією навантаження. Наявна методика оцінювання працездатності таких сполук, що базується на визначенні зусилля випресування підшипника, дозволяє оцінити лише статичну міцність, не враховуючи змін властивостей полімерного матеріалу під впливом циклічних навантажень та зовнішніх факторів, таких як температура, агресивні середовища та тривалість експлуатації.

Вибір оптимального складу полімерних композиційних матеріалів для відновлення підшипникових вузлів має ґрунтуватися на теоретичних положеннях механіки руйнування в'язкопружних тіл під дією механічних навантажень. Проблематика поведінки матеріалів при навантаженні досліджується протягом кількох століть: механіка руйнування пружних тіл та теорія в'язкопружності вже набули класичного статусу, тоді як механіка руйнування старіючих матеріалів, до яких належать полімерні композиції у відновлених підшипникових вузлах автомобільної техніки, перебуває на стадії формування. Це зумовлює необхідність розробки моделі, що описує процес руйнування та розвиток тріщин у ремонтному полімерному матеріалі зі змінними властивостями під дією комбінованого навантаження — постійного та циклічного.

2.2 Модель розвитку втомних тріщин

Під дією повторюваних або циклічних напружень на відновлені посадкові поверхні підшипникових вузлів відбувається процес втомного руйнування, що зумовлений накопиченням пластичних деформацій у зоні вершини тріщини.

На рисунку 2.1 наведено процес росту тріщини в тонкій пластині, виготовленій із ремонтного полімерного матеріалу, фізико-механічні властивості якого змінюються під впливом знакозмінного навантаження. Процес циклічної зміни навантаження можна описати рівнянням:

$$p(t) = p_0 + \Delta p \sin(\omega t), \quad (2.1)$$

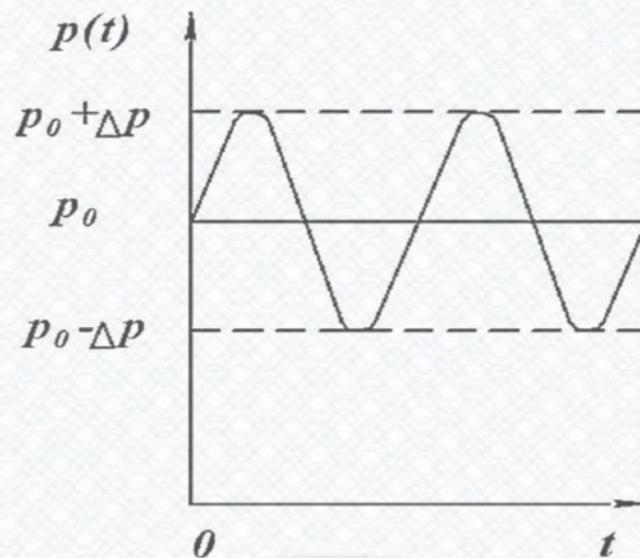


Рисунок 2.1 - Закон дії циклічного навантаження

де p_0 - початкове значення зовнішнього навантаження;

Δp - величина навантаження, що прикладено;

ω - частота циклічного навантаження;

t - час.

Теоретичні та експериментальні дослідження [5-8, 22] встановили, що швидкість росту тріщини за умов сумісного впливу втоми та повзучості, коли частота циклічного навантаження ω є низькою, а локальний розігрів у зоні вершини тріщини незначний, може бути виражена наступною залежністю:

$$\frac{dl}{dN} = f \left[\left(\frac{dl}{dN} \right)_y, \left(\frac{dl}{dN} \right)_n \right], \quad (2.2)$$

де $(dl/dN)_n$ - швидкість зростання тріщини за умов повзучості;

$(dl/dN)_y$ - швидкість зростання тріщини за умов втоми;

N - кількість циклів навантаження.

Проведені для низки ремонтних полімерних матеріалів, експериментальні дослідження [22], показали, що ушкодження від втоми та повзучості в першому

наближенні можна розглядати незалежно одне від іншого. Тоді залежність (2.2) можна так:

$$\frac{dl}{dN} = \left(\frac{dl}{dN} \right)_y + \left(\frac{dl}{dN} \right)_n. \quad (2.3)$$

Як показали дослідження, вираз (2.3) є справедливим при різних співвідношеннях між доданками, включаючи і той випадок, коли вони приблизно рівні один одному."

Приймаючи умову, що один цикл $N = \omega t / 2\pi$ залежність (2.3), набуде вигляду:

$$\frac{dl}{dt} = \left(\frac{dl}{dt} \right)_y + \left(\frac{dl}{dt} \right)_n, \quad (2.4)$$

де $(dl/dt)_n$ - швидкість розвитку тріщини при впливі повзучості та зміни властивостей матеріалів;

$(dl/dt)_y$ – швидкість розвитку тріщини за впливу втоми.

2.3 Модель розвитку втомних макроскопічних тріщин

Відомо, що напруження у вершині макроскопічної тріщини характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень. Для розглянутого випадку при циклічному навантаженні його вираз має такий вигляд:

$$K_I = kp_0(1 + \varphi_1 \sin \bar{\omega}t) \sqrt{\pi l}, \quad (2.5)$$

де k - коефіцієнт апроксимації;

$\bar{\omega}t$ – міра повзучості при чистому зрушенні;

l – довжина тріщини;

$\varphi_1 = \Delta p/p_0$ – амплітуда відносного навантаження.

Швидкість розвитку тріщини внаслідок втомних явищ представимо у вигляді:

$$\left(\frac{dl}{dN}\right)_y = \frac{4\beta K_{I0}^3 \Delta K}{K_c^2 (K_c^2 - K_{I0}^3)}, \quad (2.6)$$

де K_c – коефіцієнт інтенсивності напруження;

K_{I0} – середнє значення коефіцієнта інтенсивності напружень за цикл;

β - стала, що має розмірність довжини і визначається експериментально;

ΔK – зміна коефіцієнта інтенсивності напруги в циклі.

Зробивши в (2.6) перетворення отримаємо:

$$\frac{dl_y}{dt} = \varphi_1 \beta_0 k \frac{y^2}{1-y}, \quad (2.7)$$

де $y = l/l^*$; $\beta_0 = 4\beta \omega/\pi l^*$;

l^* - критична довжина тріщини при $p = p_0$;

ω – частота циклічного навантаження для випадку розрахунку макроскопічних тріщин.

Тоді швидкість розвитку макроскопічної тріщини для ремонтного полімерного матеріалу, що розглядається, визначиться з рівняння виду:

$$\frac{dl_n}{dt} = lq(t), \quad (2.8)$$

де $q(t)$ визначається з рівняння:

$$\frac{dq}{dt} = f(q, t),$$

$$f(q,t) = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{Q_6 + Q_7 + Q_8}, \quad (2.9)$$

де $Q_1, Q_2 \dots Q_8$ - математичні похідні.

Розділивши обидві частини рівнянь (2.4) на l^* та підставивши в нього отримані рівняння (2.7) та (2.9) отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = lq(t) + \varphi_1 \beta_0 k \frac{y^2}{1-y}, \\ \frac{dq}{dt} = f(q,t) \end{cases}, \quad (2.10)$$

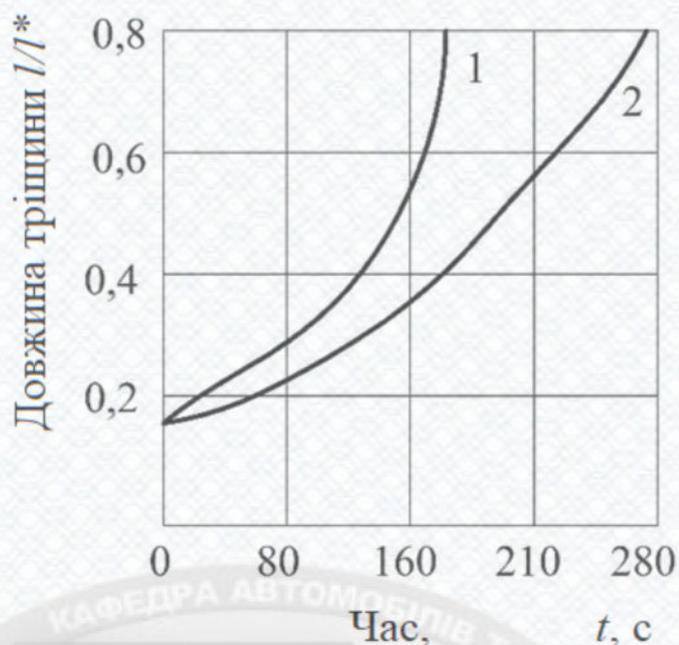
де $f(q, t)$ має вигляд (2.9).

На рисунку 2.2 представлено залежність безрозмірної довжини u від часу t , отриману шляхом чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь (2.10) методом Рунге–Кутта для макротріщини, що розвивається в ремонтному полімерному матеріалі зі змінними властивостями, за умови, що ядро повзучості в інтегральному операторі має наступний вигляд:

$$R_{(t,\tau)} = -\frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \left(C + A e^{-\mu_1 \tau} \right) \left[1 - e^{-\mu_2 (t-\tau)} \right] \right\}. \quad (2.11)$$

2.4 Модель розвитку втомних тріщин з великою зоною передруйнування

Скористаємося рівнянням, що встановлює зв'язок між швидкістю розвитку втомної тріщини і навантаженням, отриманим на основі глобального енергетичного критерію в припущенні сталості питомої енергії руйнування γ^* під час зростання тріщини [31-32]. Рівняння швидкості зростання втомної тріщини має вигляд:



1 – при одночасному впливі постійного та циклічного навантажень;

2 – за відсутності втомної складової навантаження

Рисунок 2.2 – Процес росту втомної макротріщини в ремонтному полімерному матеріалі зі змінними властивостями

$$\frac{d\lambda}{d\beta_1} = \frac{1}{f(\beta_1, \lambda)}, \quad (2.12)$$

де λ - реологічна стала, що входить в міру повзучості, що підбирається для конкретного матеріалу по експериментальним кривим [32].

Приймаючи, що довжина тріщини втоми дорівнює $l = l_0 + t\Delta l$, де Δl – збільшення довжини тріщини за час одного циклу, $N = \omega t / 2\pi$ і приймаючи $\Delta l = \text{const}$, запишемо (2.12) у вигляді:

$$\frac{d\lambda}{dN} = \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \frac{d\beta_1}{f(\beta_1, \lambda)}. \quad (2.13)$$

Представивши діюче навантаження у вигляді:

$$\beta_1 = \frac{\pi p_0}{2\sigma_T} (1 + \varphi_1 \sin \varpi t), \quad (2.14)$$

де, як і раніше, $\Delta p \leq p_0$.

Тоді:

$$\beta_{\max} = \beta_0 (1 + \varphi_1), \quad \beta_{\min} = \beta_0 (1 - \varphi_1). \quad (2.15)$$

Зробивши заміну змінної (2.13) виду:

$$y = \frac{l}{l^*}, \quad \lambda = \frac{y}{2 \ln(\sec \beta_{01})}, \quad \beta_{11} = \frac{\pi p_0}{2\sigma_T}, \quad (2.16)$$

після перетворень отримали:

$$\frac{d\beta_1}{dy} = f_1(\beta_1, y), \quad (2.17)$$

$$\text{де } f_1(\beta_1, y) = \frac{2 \ln(\sec \beta_1) - 2y (\ln(\cos \beta_1) + \beta_1 \tan \beta_1)}{y^2 (\beta_1 \sec^2 \beta_1 - \tan \beta_1)}.$$

Оскільки $N = \frac{\varpi t}{2\pi}$, то (2.15) з урахуванням (2.17) набуло вигляду:

$$\left(\frac{dy}{dt} \right)_y = \frac{\varpi}{2\beta\pi} \int_{\beta_0(1-\varphi_1)}^{\beta_0(1+\varphi_1)} \frac{d\beta_1}{f_1(\beta_1, y)}. \quad (2.18)$$

Швидкість розвитку тріщини, що має чималу зону передруйнування і зростаючу в умовах повзучості в старілому ремонтному полімерному матеріалі під

дією навантаження $p(t) = p_0 + \Delta p \sin \omega t$, у разі в'язкопружного аналога задачі Гриффіта знайшли з рівняння:

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_n = l w(t), \quad (2.19)$$

де $w(t)$ визначили з рівняння типу $\dot{p} = \frac{Q_4}{Q_3}$, $\dot{w}(t) = f_2(w, t)$, з чого виходить, що:

$$f_2(w, t) = \frac{Q_4}{Q_3}, \quad (2.20)$$

де:

$$Q_4 = \frac{\omega}{\psi(\alpha_1)} + Q_1 - \frac{Am \exp(-\mu_1 t)}{\omega} \int_0^1 [\mu_1 Q_{12} + (\mu_2 - \mu_1) G_3] \varphi(s) ds,$$

$$Q_3 = Q_2 - \frac{\mu_2 m C}{\omega^3} \int_0^1 G_2 \varphi(s) ds - Q_5, \quad Q_2 = \frac{1}{p^2} Q_1,$$

$$Q_5 = \frac{Am \exp(-\mu_1 t)}{\omega^3} \left[\mu_1 \int_0^1 Q_1 s \varphi(s) ds + (\mu_2 - \mu_1) \int_0^1 Q_3 s \varphi(s) ds \right],$$

$$Q_1 = \int_0^1 [\mu_2 C G_2 A \exp(-\mu_1 t) (\mu_1 G_{12} + (\mu_2 - \mu_1) G_3)] \varphi(s) ds,$$

$$G_3 = \exp\left(\frac{(\mu_1 - \mu_2)ms}{\omega}\right), \quad \alpha_1 = \frac{\pi p_0}{2\sigma_T} (1 + \varphi_1 \sin \omega t), \quad \psi(\alpha_1) = \frac{m^2}{\ln(\sec \alpha_1)},$$

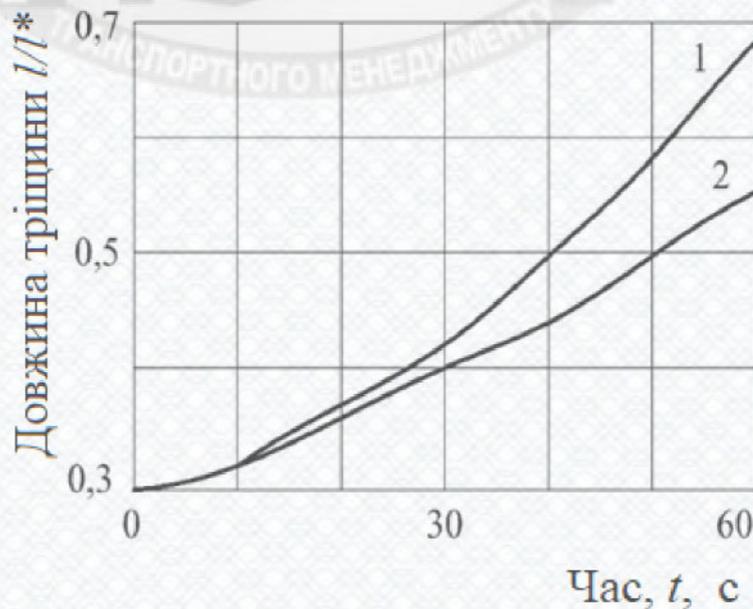
$$m = 1 - \cos \alpha_1.$$

Таким чином, зростання втомної тріщини з великою зоною передруйнування в ремонтному полімерному матеріалі з властивостями, що змінюються опишемо наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = y\omega(t) + \frac{\varpi}{2\pi} \int_{\beta_0(1-\varphi_1)}^{\beta_0(1+\varphi_1)} \frac{1}{f_1(\beta, y)} d\beta, \\ \frac{d\omega}{dt} = f_2(\omega, t) \end{cases}, \quad (2.21)$$

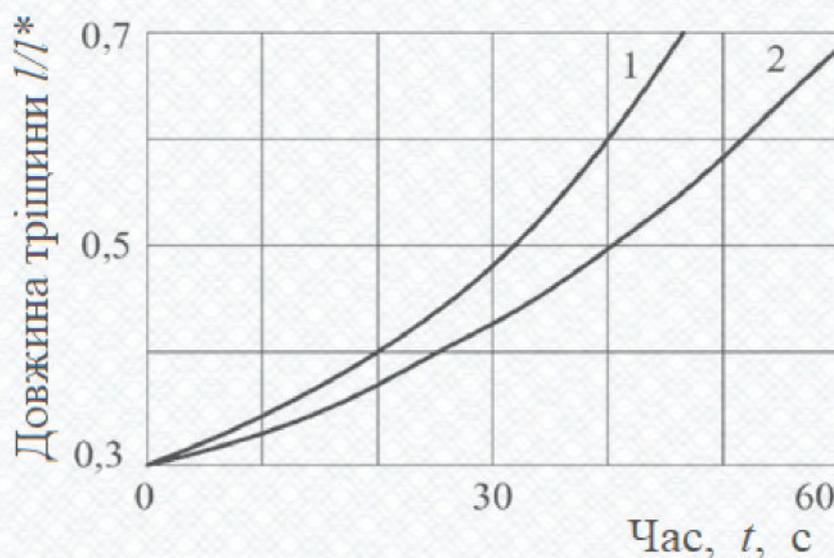
де $f_1(\beta_1, y)$ – з рівняння (2.17), а $f_2(\omega, t)$ – з рівняння (2.18).

В рамках запропонованого підходу розглянули деякі питання розвитку даного типу втомних тріщин у ремонтному полімерному матеріалі з властивостями, що змінюються. Деформування матеріалу описується інтегральними операторами виду: $\sigma B(\tau) = \sigma_B(0)(a - be^{-c\tau})$ з ядром повзучості виду (2.11). На рис. 2.3 наведена залежність безрозмірної довжини від часу t , отримана чисельним рішенням системи (2.21). На рис. 2.4 показано зростання тріщин у тілі з тими самими реологічними параметрами залежно від того, присутня втомна складова або відсутня втомна складова в зовнішньому навантаженні.



1 – $\varphi_1=0,07$; 2 – $\varphi_1=0,03$

Рисунок 2.3 - Зростання втомної тріщини з великою зоною передруйнування ($d < l$) у в'язкопружному матеріалі із змінними властивостями залежно від відношення $\varphi_1 = \Delta p/p_0$



1 – при одночасному впливі постійного та циклічного навантажень;

2 – за відсутності втомної складової навантаження

Рисунок 2.4 - Зростання втомної тріщини з великою зоною передруйнування ($d < l$) у в'язкопружному матеріалі з властивостями, що змінюються в залежності від виду прикладених навантажень

На підставі отриманої системи рівнянь (2.21) можна оцінити вплив реологічних параметрів на розвиток тріщин у ремонтному полімерному матеріалі з властивостями, що змінюються.

2.5 Теоретичні передумови дослідження впливу ультразвукових полів на адгезійну міцність полімерних покриттів

В процесі експлуатації відновлені посадкові поверхні підшипникових вузлів, виготовлені з полімерних композиційних матеріалів, зазнають комплексного впливу статичних і динамічних навантажень, температурних коливань та агресивних середовищ. Під дією цих факторів у ряді випадків відбувається порушення адгезійного зчеплення покриття з основою, що призводить до його відшарування, прогресуючого руйнування та критичного збільшення зазорів у

з'єднанні. Визначальним параметром, що забезпечує працездатність відновленої деталі, є міцність зчеплення, або адгезійна міцність [26].

Адгезійна міцність відображає властивості адгезії, яку слід розглядати як поверхневе явище, що виникає внаслідок фізичної або хімічної взаємодії між фазами новоутвореної гетерогенної системи [26, 30]. Характер цієї взаємодії визначається кількістю та природою адгезійних зв'язків, сформованих на межі розділу фаз.

Нині немає єдиного трактування природи адгезійних зв'язків. Існують численні теорії, що по-різному пояснюють природу адгезії.

Перша гіпотеза про природу адгезії полягає в механічному заклинюванні адгезиву в порах та мікронерівності підкладки. Однак очевидно, що обмеженість врахування низки інших факторів, що мають значний вплив на взаємодію матеріалів, що з'єднуються, робить цю гіпотезу неспроможною.

Сучасні концепції природи адгезії пояснюють зчеплення полімерного покриття з металевою основою як результат специфічної атомно-молекулярної взаємодії. При цьому механічний контакт розглядається лише як додатковий чинник, а не визначальний [32]. Найбільш поширеними є теорії, що описують специфічну взаємодію покриття з підкладкою: молекулярно-адсорбційна, електрична, електронна, дифузійна та мікрорелогічна.

Мікрорелогічна теорія найбільш комплексно пояснює природу адгезії, стверджуючи, що її величина визначається реальною площею контакту адгезиву з основою, а отже – кількістю зв'язків, що припадають на цю площу. У межах цієї концепції робота адгезії (W_A) розглядається як функція енергії адгезійних зв'язків (U_i) та їх кількості (n_i) на одиницю площі адгезиву:

$$W_A = S_{\phi} \sum n_i U_i = \gamma_n \cos \theta + \gamma_m - \gamma_{mn}, \quad (2.22)$$

де γ_n – поверхнева енергія на межі «полімер - повітря», кДж/м²;

γ_m - поверхнева енергія на межі «субстрат - повітря», кДж/м²;

γ_{mn} - поверхнева енергія на межі «субстрат - полімер», кДж/м²;

θ – кут змочування (рис. 2.5).

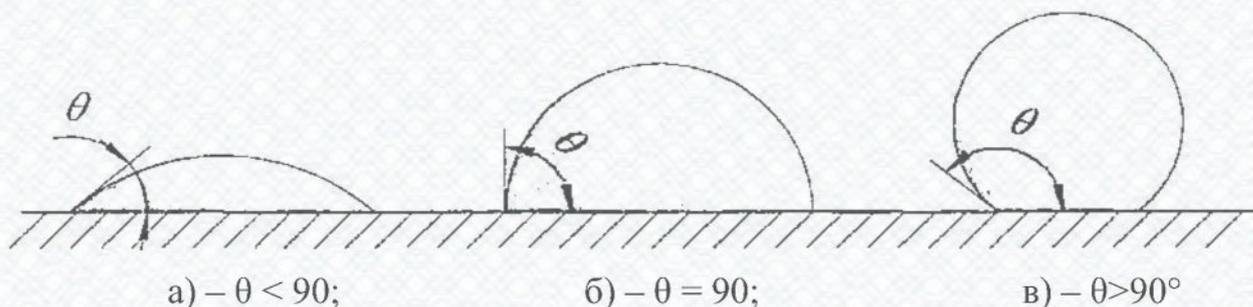


Рисунок 2.5 – Профілі краплі при частковому змочуванні

З наведеної формули випливає, що підвищення адгезійної міцності можливе шляхом збільшення щільності адгезійних зв'язків. Це досягається застосуванням зовнішніх впливів — термодинамічних або силових — у процесі формування покриття, а також за рахунок розширення фактичної площі контакту полімерного шару з основою.

Одним із найбільш результативних силових методів впливу на процес формування покриття є використання вібрацій у широкому діапазоні частот, включно з ультразвуковими.

Для покриттів, отриманих в умовах силового впливу на полімер через деталь, фактичну площу контакту можна визначити за допомогою рівняння:

$$S = 2n_i \frac{h_{icp}}{\cos \alpha} + 2n_i \frac{h_{icp}}{\cos \alpha} n_2 \pi^2 d^2 \sqrt{\frac{Pt}{\eta}}, \quad (2.23)$$

де n_i - число мікронерівностей на одиницю поверхні підкладки;

h_{icp} - середнє значення висоти трикутника, що дорівнює глибині проникнення полімеру;

α - половина кута умовного трикутника перерізу нерівностей поверхні, що покривається;

n_2 - кількість пір на 1см^2 поверхні мікронерівностей;

d - діаметр пір;

P, t, η – відповідно тиск, в'язкість полімеру, час контакту.

Під час формування покриттів у вільному стані полімери схильні до самовільного розтікання, тому ключовою умовою утворення адгезійного з'єднання є забезпечення змочування поверхні підкладки. Чим вищий поверхневий натяг на межі твердої фази з газовим середовищем, тим більшою буде площа, яку покриває рідка фаза. Збільшити цю площу можна також шляхом зниження поверхневої енергії рідкої фази, що узгоджується із законом збереження енергії при адгезії гетерогенних систем (законом Дюпре). Згідно з ним, на роботу адгезії впливають не лише рівноважні значення поверхневої енергії, а й крайовий кут змочування. Крім того, у реальних умовах змочуваність визначається низкою додаткових факторів: багатокомпонентністю адгезиву, шорсткістю поверхні підкладки, наявністю забруднень, присутністю поверхнево активних речовин тощо.

Робота адгезії також залежить від динаміки утворення адгезійної сполуки. Чим швидше відбувається змочування, тим швидше і краще заповнюються мікронерівності підкладки, чого можна досягти впливом ультразвуку. При постійних значеннях шорсткості і показників специфічних властивостей тіл, що контактують, адгезійну міцність і швидкість заповнення мікронерівностей можна збільшити за рахунок зміни крайового кута змочування, поверхневої енергії та параметрів ультразвукового поля.

Якість адгезійних металополімерних покриттів визначається не лише природою та складом адгезиву й підкладки, але й рівномірністю розподілу компонентів у матеріалі, умовами термоокислювальних процесів і релаксації, характером розподілу сил міжфазової взаємодії та фактичною площею контакту полімеру з основою. Ключовим чинником цих умов є масообмін між субстратом і адгезивом. Керування зазначеними параметрами можливе шляхом удосконалення технології нанесення та формування покриттів [22].

Якщо поверхню, що покривається, розглянути, як полікапілярну систему, то глибину затікання рідини в порах підкладки можна визначити за формулою капілярного тиску:

$$h = \frac{k\gamma l \cos \theta}{rg\rho}, \quad (2.24)$$

де k – стала;

γ - рівноважний поверхневий натяг,

θ - рівноважний крайовий кут змочування;

ρ - густина рідкої фази;

r – радіус капіляра (пори);

g – прискорення вільного падіння.

Якщо капіляр має форму вузької щілини з постійною товщиною δ , то глибина затікання рідини в капілярі визначають за формулою:

$$h = \frac{k\gamma l \cos \theta}{\delta g\rho}. \quad (2.25)$$

Підставляючи у відоме рівняння вагу стовпа рідини $p_g = hg\rho$ рівняння (2.24), капілярний тиск дорівнює:

$$P_k = \frac{k\gamma l \cos \theta}{r}. \quad (2.26)$$

З рівняння (2.26) видно, що капілярний тиск знаходиться у прямій залежності від змочуваності.

В умовах ультразвукового впливу капілярний тиск дорівнює:

$$P_k = P_g + \Delta P, \quad (2.27)$$

де ΔP – раціональний тиск у порах.

За експериментальними даними ΔP визначається за формулою:

$$\Delta P = \frac{\rho v_m^2}{4}, \quad (2.28)$$

де ρ – густина розплаву;

v_m = амплітуда коливальної швидкості ультразвукового поля.

Перетворивши рівняння (2.27) з урахуванням (2.24) та (2.28) та підставляючи їх у (2.23) отримаємо рівняння адгезійної міцності:

$$AP = 2A_g n_i \frac{h_{icp}}{\cos \alpha} + (1 + n_2 \pi^2 d^2) \sqrt{\frac{t}{r\eta} \left(\frac{k\gamma l \cos \theta}{r} - \frac{\rho v_m^2}{4} \right)}, \quad (2.29)$$

де A_g - специфічна адгезія, що визначається природою контактуючих тіл.

Для умов формування покриттів із розплавів полімерів важливим фактором, що впливає на адгезійну міцність, є глибина затікання розплаву в мікронерівності.

У свою чергу при формуванні покриттів з розплавів полімерів глибина затікання визначається швидкістю заповнення нерівностей і мікропор.

Час підйому розплаву в капілярі на висоту (h) можна визначити з гідродинамічного розрахунку [18] за формулою:

$$\tau = \frac{8\eta}{(\eta_2 - \eta_1)r^2 g} \left[\frac{2\gamma \cos \theta}{(\rho_2 - \rho_1)rg} \ln \frac{\frac{2\gamma \cos \theta}{(\rho_2 - \rho_1)rg}}{\frac{2\gamma \cos \theta}{(\rho_2 - \rho_1)rg} - h} - h \right]. \quad (2.30)$$

Зі співвідношення (2.30) видно, що гранична висота підняття розплаву в капілярі може бути досягнута через нескінченно великий час. У практичних розрахунках значення висоти підняття розплаву фіксують на певному рівні. Тоді, якщо як рушійну силу прийняти різницю між капілярним тиском і тиском стовпа рідини з урахуванням додаткових сил зовнішнього впливу, швидкість заповнення мікронерівностей можна визначити з:

$$\begin{aligned} \frac{d\tau}{dh} &= \frac{8\eta}{\rho r^2 g} \left[\frac{2\gamma \cos \theta}{\rho r g} \cdot \frac{1}{\frac{2\gamma \cos \theta}{\rho r g} - 1} - 1 \right] = \frac{8\eta}{\rho r^2 g} \left(\frac{2\gamma \cos \theta}{2\gamma \cos \theta - h \rho g} - 1 \right) = \\ &= \frac{8\eta}{\rho r^2 g} \cdot \frac{h \rho g}{2\gamma \cos \theta - h \rho g} = \frac{8\eta}{r} \cdot \frac{h}{2\gamma \cos \theta - h \rho g} \Rightarrow \\ \frac{dh}{d\tau} &= \frac{r}{8\eta} \left(\frac{2\gamma \cos \theta - h \rho g}{h} \right) = \frac{r^2}{8\eta h} \left(\frac{2\gamma \cos \theta}{r} - h \rho g \right). \end{aligned} \quad (2.31)$$

Нехтуючи силою тяжіння отримаємо рівняння:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{2\gamma r \cos \theta}{8\eta h}. \quad (2.32)$$

З рівняння (2.29) і (2.32) випливає, що навіть при постійній шорсткості і A_g адгезійну міцність і швидкість заповнення мікронерівностей можна збільшити за рахунок зміни крайового кута змочування, поверхневої енергії і параметрів ультразвукового поля.

Таким чином, актуальним є дослідження впливу зазначених факторів на зміну адгезійної міцності. Найбільш виражений ефект ультразвукові коливання забезпечують при їх застосуванні безпосередньо в процесі нанесення покриття. При цьому зона ультразвукового впливу повинна бути максимально наближена до межі розділу двох середовищ, оскільки поширення акустичних хвиль супроводжується поглинанням енергії вібрації.

Схема та момент подачі ультразвукових коливань істотно впливають на ефективність їх дії. При цьому необхідно враховувати здатність ультразвукових коливань очищати поверхню від забруднень, а також поглинання енергії середовищем. Під час поширення хвиль у полімерних матеріалах спостерігається зниження інтенсивності коливань, що описується відповідним рівнянням [32]:

$$I_k = I_0 \cdot l^{-2\alpha x}, \quad (2.33)$$

де l_0 – інтенсивність у початковій точці,

α – коефіцієнт загасання.

Якість металополімерних адгезійних систем визначається не лише природою та складом адгезиву й субстрату, але й рівномірністю розподілу компонентів у структурі покриття, умовами термоокислювальних процесів і релаксації, характером розподілу сил міжфазової взаємодії та фактичною площею контакту полімеру з основою. Ключовим чинником цих параметрів є масообмін між субстратом і адгезивом, керування яким можливе шляхом удосконалення технології нанесення та формування покриттів.

Теоретичні положення, наведені в [29], засвідчили, що одним із перспективних напрямів удосконалення технології отримання полімерних покриттів є застосування ультразвукового впливу на процес формування адгезійного контакту. Однак механізм утворення такого контакту між покриттями, сформованими з порошкових композицій у суміщених електростатичних та ультразвукових полях, і підкладками з різних матеріалів, що мають різну шорсткість, залишається недостатньо дослідженим. Відсутність цих даних не дозволяє обґрунтувати оптимальні технологічні режими нанесення покриттів, що визначає необхідність проведення досліджень, спрямованих на встановлення впливу ультразвукових коливань на змочування підкладки розплавом полімеру, аналіз взаємозв'язку технологічних параметрів формування покриттів та характеристик ультразвукового впливу з адгезійною міцністю, а також оцінку зміни адгезійної міцності залежно від матеріалу та шорсткості поверхні підкладки.

2.6 Висновки

1. Сформовано математичні моделі формування втомних тріщин під дією постійних та циклічних навантажень в ремонтному полімерному матеріалі зі змінними властивостями.

2. Теоретично обґрунтовано можливість поліпшення розтікання розплавів з композиційних порошкоподібних полімерів на металевих підкладках шляхом впливу на них ультразвукових коливань, що сприяє підвищенню міцності адгезійного з'єднання.



3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВТОМОБІЛІВ, ВІДНОВЛЕНИХ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОЗИЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

3.1 Фактори, що визначають працездатність відновлених підшипникових вузлів

Відновлення деталей розглядається як економічно обґрунтований процес лише за умови, що після проведення ремонтних операцій вони забезпечують працездатність протягом ресурсу, визначеного нормативними документами. На сучасному етапі експлуатаційний ресурс відремонтованих машин має становити не менше 80 % від ресурсу нових виробів. У цьому контексті особливу наукову та прикладну значущість набувають дослідження стабільності фізико-механічних характеристик покриттів, які застосовуються для відновлення зношених елементів, а також комплексний аналіз надійності та довговічності відремонтованих деталей і вузлів.

Експлуатаційна надійність деталей, відновлених полімерними покриттями, значною мірою визначається адгезійною міцністю цих покриттів [9]. У реальних умовах роботи вона зазнає змін під впливом вологи, температурних коливань та зовнішніх механічних навантажень. Варто підкреслити, що сучасні наукові джерела недостатньо висвітлюють проблематику стабільності адгезійних систем, сформованих із порошкових композицій. Крім того, відсутні обґрунтовані рекомендації щодо оптимальних методів підвищення стійкості фізико-механічних характеристик полімерних покриттів, які застосовуються для відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів автомобільної техніки.

Довговічність посадкових поверхонь під підшипники кочення значною мірою залежить від фізико-механічних процесів, що відбуваються в зоні контакту сполучених елементів. Цілеспрямована технологічна підготовка, яка змінює характер взаємодії контактних поверхонь, дозволяє істотно підвищити

експлуатаційну надійність з'єднання [9]. Визначальними параметрами, що впливають на умови взаємодії, є величина допускового поля деталей та мікрогеометрія поверхонь, які утворюють контакт.

Розмір допускового поля та конфігурація мікрорельєфу поверхонь суттєво залежать від комплексу конструктивних і технологічних факторів. До них належать геометричні параметри з'єднання, товщина нанесеного покриття, характер прикладених навантажень, тип і точність підшипникового вузла, умови експлуатації, а також особливості монтажу та демонтажу підшипників. Важливу роль відіграють фізико-механічні властивості покриттів, що використовуються для відновлення деталей.

У наукових джерелах зустрічаються окремі рекомендації щодо вибору посадок для з'єднань, відновлених полімерними покриттями [11, 13, 15], проте вони здебільшого орієнтовані на конкретні матеріали та не враховують комплекс усіх чинників, що визначають характер взаємодії поверхонь. Це зумовлює необхідність проведення досліджень впливу умов навантаження, товщини покриття, допускових полів та параметрів шорсткості відновлених поверхонь на довговічність підшипникових вузлів після ремонту.

Для створення ефективної технології відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів автомобілів, яка забезпечує високу довговічність відремонтованих з'єднань, необхідно комплексно дослідити низку ключових аспектів. Для цього необхідно вирішити три ключові завдання:

1. Дослідити зміну адгезійної міцності полімерних покриттів під впливом вологи та температурних коливань.
2. Визначити вплив конструктивних і технологічних параметрів з'єднання підшипника кочення з відновленим отвором на ресурс вузла.
3. Розробити науково обгрунтовані технологічні рекомендації щодо відновлення посадкових місць із використанням покриттів на основі спеціально розробленої композиції.

Дослідження проводили у 3 етапи. Перший етап присвячувався вивченню стабільності адгезійної міцності покриттів. Стабільність оцінювали зміною

адгезійної міцності метало-полімерних сполук у гідростатичних умовах.

Для оцінки впливу технологічних і експлуатаційних факторів на довговічність полімерних покриттів було застосовано методи математичного планування експериментів. Дослідження проводили на натурних деталях генератора автомобіля, аналізуючи залежність ресурсу покриттів від умов навантаження та їхньої товщини. Випробування виконували на підшипникових вузлах опор кочення передньої кришки генератора. Номінальний діаметр посадкового отвору прийнято рівним 72 мм.

Критерієм оцінки довговічності слугував часовий інтервал до моменту виникнення провертання зовнішнього кільця підшипника в посадковому отворі.

Випробування виконували відповідно до методики, наведеної в [40]. Режим досліджень та рівні варіювання параметрів були обрані з урахуванням реальних умов експлуатації відновлених деталей. Для забезпечення достовірності результатів прийнято такі значення основних факторів:

- навантаження – радіально-змінне;
- частота обертання валу – 1800 хв^{-1} ;
- товщина покриття $\tilde{x}_1 = 0,5^{\pm 0,4} \text{ мм}$;
- навантаження на опори $\tilde{x}_2 = 4^{\pm 3} \text{ кН}$.

Умови проведення експериментів та отримані результати наведено в таблиці 3.1.

Третій етапі дослідження спрямований на визначення впливу допускового поля з'єднання та параметрів шорсткості відновлених посадкових поверхонь на контактну міцність та довговічність підшипникових вузлів. Паралельно аналізували зміну характеру посадки в залежності від способу складання та кількості циклів монтажу й демонтажу.

Оцінку шорсткості виконували за параметром R_a , що традиційно застосовується. Сукупність цих показників найбільш повно відображає контактну жорсткість пресових з'єднань [19].

Таблиця 3.1 - Результати дослідження довговічності покриттів від товщини та навантаження

№	План у кодованих змінних		План у натуральних змінних		Результати експерименту	
	x_1	x_2	Товщина покриття, мм	Навантаження, кН	без УЗ, L, год	з УЗ, L, год.
1	-1	0	0,1	4	310	465
2	-0,5	-0,87	0,3	1	360	460
3	-0,5	+0,87	0,3	7	75	300
4	0	0	0,5	4	240	410
5	0	0	0,5	4	252	400
6	0	0	0,5	4	252	410
7	0	0	0,5	4	236	412
8	+0,5	+0,87	0,7	7	10	250
9	+0,5	-0,87	0,7	1	270	450
10	+1	0	0,9	4	190	365

Шорсткість визначали за допомогою портативного профілометра (цехового) SM-instruments RT-10, сертифікат ISO 17025:2017.

Різні значення параметрів шорсткості посадкового отвору отримували шляхом зміни режимів механічної обробки та геометрії ріжучого інструменту. Обробку виконували на токарному верстаті моделі 16K20, а за необхідності проводили додаткове шліфування тонкою абразивною шкіркою. Режими різання та геометричні характеристики різців приймали відповідно до встановлених нормативів.

Умови контактування істотно змінюються при багаторазовому складанні з'єднань. Оскільки найбільша деформація мікронерівностей виникає під час механічного монтажу, було проведено дослідження впливу початкового натягу та

кількості циклів складання на зміну натягу і параметрів шорсткості.

План та результати дослідження наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Результати дослідження зміни натягу та шорсткості від початкового натягу та кількості збирань

№	План у кодованих змінних		План у натуральних змінних		Натяг, мкм	t, %
	x ₁	x ₂	Кількість збирань	Початковий натяг, мкм		
1	-0,5	-0,87	3	20	15	35
2	+0,5	-0,87	9	20	10	42
3	-1	0	0	50	50	25
4	0	0	6	50	25	50
5	0	0	6	50	25	50
6	0	0	6	50	30	45
7	0	0	6	50	25	50
8	-0,5	+0,87	3	80	50	60
9	+0,5	+0,87	9	80	30	70
10	+1	0	12	50	20	50

3.2 Зміна адгезійної міцності полімерних покриттів в умовах гідростатичного впливу

Для конкретних умов використання адгезійних сполук зменшення адгезійної міцності призводить до руйнування покриття та, зрештою, до виходу з ладу вузла в цілому. Тому важливо знати дійсний термін експлуатації відновлених деталей та можливості його підвищення.

Дослідження (рисунок 3.1) показали, що покриття, сформовані в ультразвуковому полі, мають більш стабільну адгезійну міцність. Так, покриття,

сформовані в ультразвуковому полі на підкладках з алюмінієвих сплавів, відшарувалися після 340 год витримки в гідростатичній камері при температурі 60°C і відносній вологості повітря 95-100%. Покриття, сформовані без впливу ультразвукових полів, при витримці в аналогічних умовах, відшарувалися після 46 год. Значно більше витримали термостатичний вплив покриття, нанесені на сталевих підкладках (840 год. і 140 год. відповідно, для сформованих під впливом ультразвуку і без відповідно).

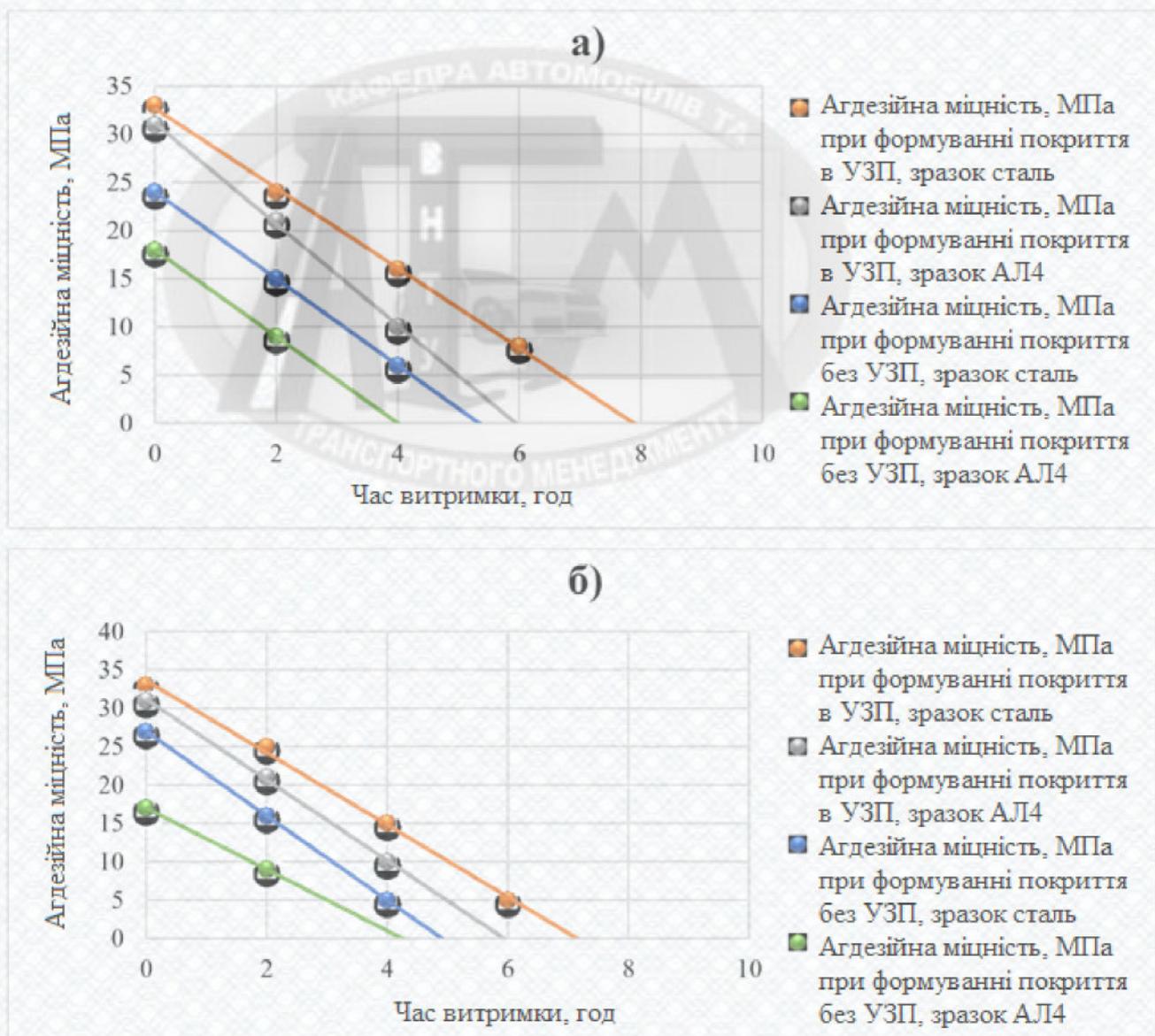


Рисунок 3.1 – Зміна адгезійної міцності полімерних покриттів від тривалості витримки в гідростатичній камері при 40°C (а) та 60°C (б)

Підвищену стабільність адгезійної міцності покриттів, сформованих в ультразвуковому полі, можна пояснити збільшенням числа адгезійних зв'язків між покриттям і підкладкою з одночасним посиленням в результаті ефекту ультразвукового впливу. Очевидно, це досягається тим, що у початковий період утворення адгезійного контакту ультразвукові коливання створюють вимушену конвекцію в розплавленому полімері, руйнують прикордонний шар, інтенсифікують видалення газових включень із поверхні розділу фаз.

У наступному періоді, після встановлення молекулярного контакту, ультразвук сприяє активації дифузії кінців і сегментів макромолекул полімеру з одночасною інтенсифікацією взаємодій функціональних груп адгезиву з іонами металу або оксиду, тобто сприяє інтенсифікації молекул між молекулярними силами.

Можна також припустити, що і наступні стадії формування металополімерної сполуки – утворення хімічних зв'язків між полімерами та підкладкою, формування структури покриття істотно змінюються під впливом радіаційного тиску ультразвуку.

Аналіз результатів досліджень також показав, що з підвищенням температури стабільність адгезійної міцності різко знижується (рисунок 3.1). Так, покриття, сформовані на підкладках з алюмінієвого сплаву, без впливу ультразвукового поля, відшарувалися після 100 год витримки при 40°C, а при температурі 60°C – після 46 год. Аналогічна закономірність спостерігається і для покриттів, сформованих в ультразвуковому полі. Цей факт узгоджується з кінетичною концепцією адгезійної міцності, відповідно до якої під тепловою дією інтенсифікується термофлуктаційний механізм. Внаслідок цього відбувається послаблення молекулярних зв'язків, та відбувається його розрив.

Таким чином, якісні зміни, що мають місце в результаті термічного та ультразвукового впливу, значно впливають на стабільність адгезійної міцності металополімерних систем.

3.3 Вплив умов навантаження та товщини покриття на довговічність адгезійних металополімерних з'єднань

Відомо, що зовнішні навантаження здатні прискорити термофункціональний розрив міжфазних адгезійних зв'язків. Також відомо, що релаксаційні процеси, що протікають в адгезійних металополімерних системах, не однакові за товщиною покриття та залежать від її величини. Ці особливості значно впливають на довговічність адгезійних сполук. Через це було досліджено залежність адгезійної міцності покриттів від умов навантаження та товщини покриття.

На основі регресійного аналізу результатів експериментів (див. таблицю 3.1) отримані поліномінальні моделі, які в кодованих координатах мають вигляд:

$$L = 247,8 - 65,83x_1 - 158,05x_2 - 93,32x_2^2; \quad (3.1)$$

$$L_{y3} = 412,35 - 43,3x_1 - 104,4x_2 - 66,79x_2^2 - 23x_1x_2, \quad (3.2)$$

де L - довговічність покриттів підшипникових вузлів, год. (покриття, сформовані без дії ультразвуку);

L_{y3} - довговічність покриттів підшипникових вузлів, год. (покриття, сформовані під впливом ультразвуку);

x_1 - товщина покриття, мм;

x_2 - навантаження на підшипник.

Ізолінії поверхонь відгуку наведено рис. 3.2.

Дослідження показали, що довговічність деталей, відновлених полімерними покриттями, значною мірою залежить від умов навантаження та товщини покриття. Вплив товщини покриттів, сформованих без впливу ультразвуку, не залежить від впливу навантаження (оскільки $B_{12}=0$) або залежить незначно для покриттів, сформованих в ультразвуковому полі.

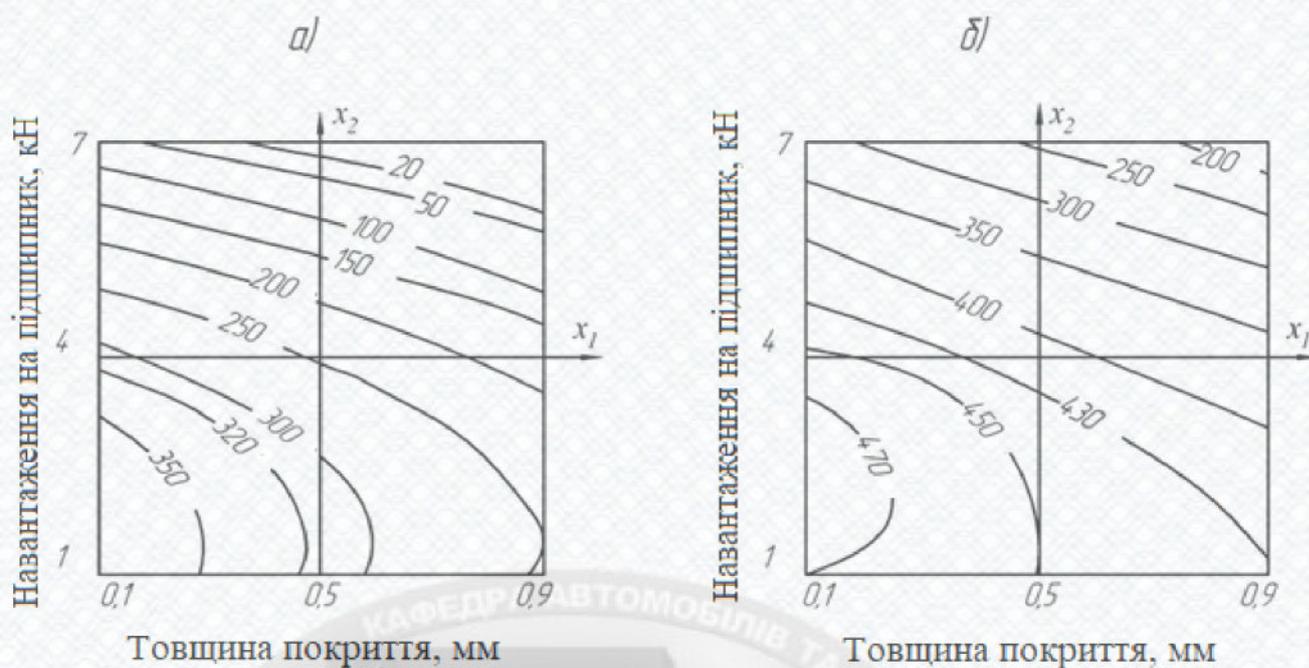


Рисунок 3.2 – Залежність довговічності полімерних покриттів, нанесених на посадкові місця підшипникових вузлів кришок генераторів, від умов навантаження та товщини покриття: а – покриття сформоване без ультразвукового поля; б - в ультразвуковому полі

Збільшення навантаження і товщини покриття призводить до зниження довговічності ($b_1 < 0$ і $b_2 < 0$), причому навантаження має найбільший вплив ($B_1 < B_2$). Максимальна довговічність досягається при мінімальній навантаженні та мінімальній товщині покриття ($b_1 < 0$ та $b_2 < 0$).

Довговічність металополімерних систем, сформованих в ультразвуковому полі, вища, ніж у систем, сформованих без його впливу. Так, при навантаженні 1 кН і товщині покриття 0,1 мм довговічність озвучених систем порівняно з не озвученими вище на 24% і становить відповідно 470 год і 378 год. Це відношення зростає і досягає найбільшого збільшення при максимальній товщині та максимальному навантаженні. За цих умов озвучені покриття пропрацювали близько 170 годин, а неозвучені – не більше 10...20 год. Така поведінка полімерних покриттів узгоджується з сучасними уявленнями про поведінку крихких тіл з позиції теорії адгезійної міцності різних матеріалів.

Хоча з'єднання складаються з різних матеріалів, які мають різну фізико-хімічну природу, процес руйнування підпорядковується існуючим теоріям фізики руйнування полімерів, згідно з якими стабільність матеріалів залежить, головним чином, від опору розповсюдження тріщин, енергії активації термічної деструкції полімеру, внутрішнього напруження та модуля пружності. Зі зміною навантаження на покриття змінюється і кінетика зазначених факторів. Очевидно, що ультразвук сприяє підвищенню опірності матеріалів до утворення концентратів напружень (тріщин), а також зменшенню напружень міжфазних молекулярних сил і внутрішніх напружень у полімерних покриттях.

Неоднакові значення довговічності адгезійних систем за різної товщини полімерних покриттів пов'язані з тим, що збільшення товщини покриття погіршує відведення тепла, що утворюється в процесі експлуатації. Це викликає підвищення температури у робочій зоні, поява термодеструкції, зміна міцності та деформованості покриттів. Одночасне підвищення товщини покриття призводить до зменшення швидкості перебігу релаксаційних процесів у покритті, що погіршує якість адгезійної сполуки.

Ультразвук змінює релаксаційні процеси на межі розділу фаз і в самому покритті, що призводить до впорядкування структури по всій товщині покриття [22, 29].

Таким чином, аналіз результатів досліджень показав, що полімерні покриття, сформовані в полі ультразвуку, здатні витримувати вищі навантаження (до 7 кН) порівняно з аналогічними покриттями, але без озвучення. Довговічність таких покриттів вища і менш залежна від товщини полімерного шару.

При розробці технологічного процесу необхідно враховувати, що покриття, що мають невелику товщину (0,1...0,4 мм) і навантаження до 4 кН, можуть успішно працювати і без їх обробки ультразвуком, тобто при призначенні ультразвукового впливу необхідно враховувати умови експлуатації відновлених деталей.

3.4 Вплив посадки на міцність та довговічність з'єднань

Аналіз отриманих даних показав, що максимальна довговічність підшипникових вузлів, відновлених полімерними покриттями, забезпечується при з'єднанні з мінімальним натягом. У зв'язку з цим виникає необхідність додаткового дослідження залежності ресурсу та міцності з'єднання від величини натягу.

Результати досліджень (рис. 3.3–3.4) свідчать, що максимальна довговічність забезпечується при з'єднанні деталей із посадкою, що має незначний натяг. Зниження ресурсу для сполучень із нульовим натягом або зазором пояснюється тим, що зовнішнє кільце підшипника починає прослизати по посадковій поверхні вже на початку випробувань. Враховуючи низькі пружні властивості пластмас, мікронерівності поверхні швидко згладжуються, що призводить до утворення зазору між підшипником і корпусом.

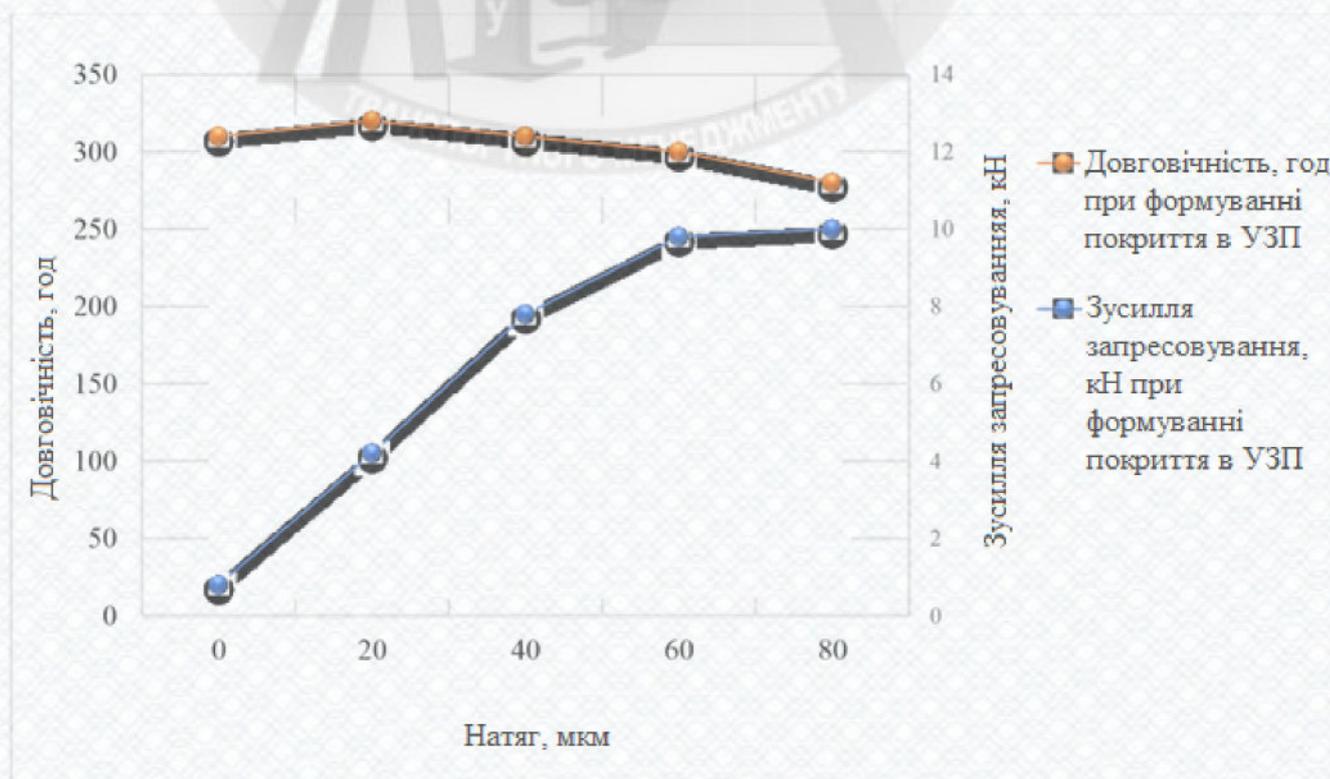
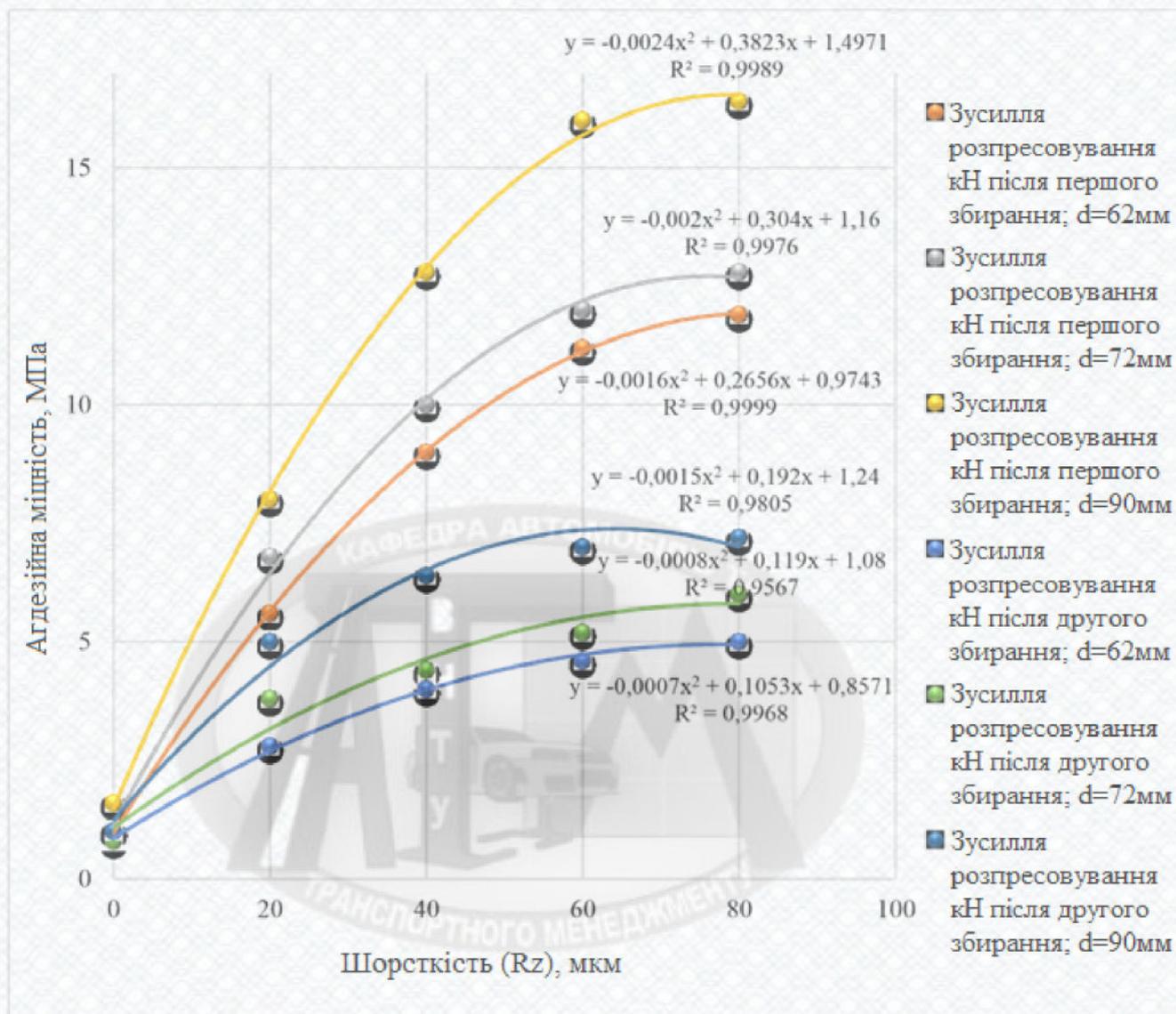


Рисунок 3.3 - Вплив початкового натягу з'єднання на довговічність та зусилля запресування



1 - \varnothing 62 мм; 2 - \varnothing 72 мм; 3 - \varnothing 90 мм; товщина покриття 0,5 мм; навантаження на підшипник 5 кН

Рисунок 3.4 - Вплив початкового натягу на зусилля розпресування при різних діаметрах та способах з'єднання

Внаслідок силових і температурних деформацій, що виникають під дією тертя та ударних навантажень, сили зчеплення між контактними поверхнями поступово зменшуються, що призводить до руйнування поверхневого шару, а згодом і всього покриття. Слід зазначити, що покриття, сформовані в умовах ультразвукової підготовки (УЗП), демонструють значно вищу довговічність навіть при нульовому натягу. Це пояснюється покращеними фізико-механічними

характеристиками таких покриттів порівняно з покриттями, отриманими за традиційних технологічних режимів.

Максимальна довговічність (до 320 год) спостерігається у з'єднаннях із натягом у межах 15...40 мкм. Для з'єднань із натягом 20 мкм (точка на графіку позначена колом) випробування проводилися при двох циклах складання, що було зумовлено значним зносом підшипника та вала. Після розпресування підшипника на настановних поверхнях не виявлено суттєвих змін геометрії посадкового отвору. При натягу 15...40 мкм зона контактування поверхонь збільшується завдяки формуванню рівноважної шорсткості, під якою слід розуміти стан поверхні, що встановлюється на межі контакту внаслідок повзучості та релаксації полімерного матеріалу.

При натягу понад 40 мкм також формується рівноважна шорсткість, однак у цьому випадку спостерігаються значні деформаційні зміни в покритті та на межі розділу фаз у зоні адгезійного контакту. Це пояснюється тим, що під час запресування підшипника виступаючі мікронерівності зрізаються або під дією зсувних зусиль порушують адгезійні зв'язки між підкладкою та адгезивом. При збільшенні натягу понад 70...80 мкм відбувається руйнування суцільності покриття внаслідок зрізу шару полімеру під час монтажу, що унеможлиблює отримання якісного з'єднання (на рис. 3.3 це позначено вертикальною лінією).

Характер залежності зусилля запресування та розпресування від натягу зберігається для різних діаметрів з'єднання. Однак при тому самому натягу зусилля запресування і розпресування змінюється в залежності від діаметра з'єднання. Зі збільшенням діаметра з'єднання зусилля запресування та розпресування ростуть приблизно пропорційно зміні радіусу з'єднання.

У реальних експлуатаційних умовах часто доводиться експлуатувати механізми автомобіля після повторного збирання. Тому для оцінки властивостей відновлених з'єднань важливо знати їхню міцність після повторного складання.

Результати досліджень (рис. 3.4) показали, що міцність з'єднання, визначена за зусиллям розпресування, після повторного складання знижується у кілька разів порівняно з першим монтажем. Це явище пояснюється змінанням

мікронерівностей під час первинного складання та формуванням стабільного характеру контакту. Залежність має майже лінійний характер, при цьому чутливість міцності з'єднання до зміни початкового натягу істотно зменшується.

На основі проведених досліджень можна визначити оптимальні посадки для підшипникових вузлів опор кочення, відновлених полімерними покриттями. Враховуючи, що максимальна довговічність досягається при початковому натягу 15...40 мкм для покриттів, сформованих без ультразвукової підготовки, та 0...60 мкм для покриттів, отриманих із застосуванням ультразвуку, рекомендовано обробляти посадкові місця відповідно за полями допуску Р6 у першому випадку та N7 або Р7 у другому.

Рекомендується обробляти посадкові місця підшипникових вузлів за полем допуску N7 у випадку одноразового складання та за полем Р7 при необхідності багаторазового монтажу й демонтажу вузла.

Таким чином, використання полімерних покриттів, сформованих із застосуванням ультразвукової підготовки, для відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів кришок генераторів автомобілів забезпечує підвищення експлуатаційної надійності та зменшення вимог до точності механічної обробки на один квалітет порівняно з серійними деталями. Зниження трудомісткості та витрат на виготовлення позитивно впливає на економічну ефективність запропонованої технології, що підтверджує її доцільність для впровадження у ремонтне виробництво.

3.5 Висновки

1. Вплив вологи та температури надає менший вплив на стабільність міцності адгезійної покриттів, сформованих в ультразвуковому полі. Довговічність таких покриттів при їх випробуванні в гідростатичних умовах вища у 2...4 рази, ніж покриттів, одержаних у звичайних умовах.

2. Визначено поле допуску та шорсткість посадкових поверхонь, відновлених розробленою композицією, з умов забезпечення найвищої довговічності та найбільшої міцності зчеплення. Рекомендується посадка N7 для деталей, що підлягають одноразовому складанню, та P7 для деталей, що підлягають багаторазовому складанню.

3. Встановлено, що використання для відновлення посадкових поверхонь підшипники кочення полімерних покриттів, сформованих в ультразвуковому полі, дозволяє проводити багаторазовий монтаж та демонтаж підшипникового вузла та експлуатувати його при значних навантаженнях (до 7 кН).



4 ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДКОВИХ МІСЦЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

4.1 Загальна інформація про технологічний процес

У поточних умовах розвитку ремонтного виробництва висуваються підвищені вимоги до технології відновлення та ремонту деталей і агрегатів автомобільної техніки. Технологічний процес має гарантувати відновлення початкових функціональних характеристик деталей при максимальній продуктивності та мінімальних витратах. Досягнення цього можливе шляхом встановлення оптимальної послідовності операцій, вибору раціональних методів і режимів їх виконання, а також застосування відповідного обладнання, оснащення та інструменту.

Проведені дослідження дали змогу обґрунтувати вибір методу та режимів нанесення покриттів із порошкових композицій при відновленні посадкових поверхонь підшипникових вузлів корпусних деталей. Варто зазначити, що специфіка виробничих умов зумовлює необхідність індивідуального підходу до вирішення завдань відновлення конкретних елементів. Попередні результати показали, що під час нанесення покриттів на посадкові поверхні підшипникових вузлів не досягається належна рівномірність шару по довжині та периметру оброблюваної поверхні.

Встановлено, що покращення рівномірності покриття можливе шляхом зміни геометрії та розмірів перехідної насадки дозуючого пристрою (деталі наведено далі), яка виконує функцію демпфера для повітряно-порошкової суміші та частинок порошку, що транспортуються до оброблюваної поверхні.

Для ефективного впровадження технології у виробничий процес необхідно розробити класифікацію деталей, відновлення яких можливе із застосуванням запропонованого методу та композиції, а також виконати техніко-економічний аналіз технології.

У процесі розробки технології відновлення вирішувалися ключові завдання, серед яких створення ефективного обладнання та оснащення для нанесення, формування і подальшої механічної обробки покриття. Крім того, було розроблено технологічний процес відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів кришок генераторів автомобілів, а також виконано роботи, спрямовані на впровадження технології у виробництво та проведення її техніко-економічного обґрунтування.

Реалізація цих заходів здійснювалась у три етапи.

На початковому етапі було створено обладнання та технологічне оснащення, призначене для нанесення покриття, його формування та подальшої механічної обробки.

Було проведено дослідження конструктивних параметрів та виконано аналіз експлуатаційних і техніко-економічних показників впровадження обладнання та оснащення. Для цього оцінювали рівномірність покриттів, отриманих із застосуванням розробленого технологічного обладнання. Потім для насадки, що забезпечує кращу рівномірність покриття, досліджували відношення діаметра отвору, що демпфує, до діаметру відновлюваного посадкового D_x/D_n на рівномірність покриття по периметру і довжині місця під підшипник посадкового отвору. Це дозволило обґрунтувати вибір насадки при відновленні корпусних деталей, що мають різні розміри посадкових місць.

Рівномірність покриттів оцінювали за найбільшим відхиленням від круглості

$\Delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2}$ і найбільшим відхиленням профілю поздовжнього перерізу циліндричної поверхні.

Нанесення покриття здійснювали на сталеві зразки (рисунок 4.1), що мали отвір діаметром 42 мм і глибиною 65 мм. Конфігурація отвору — циліндрична з напівглухим дном. Обробка поверхонь 1 та 2 виконувалася з однієї установки на токарному верстаті, що забезпечувало мінімальні похибки співвісності. Контроль параметрів проводили у двох поясах – а–а та б–б, а також у п'яти перерізах за

допомогою спеціалізованої установки для вимірювання зношування посадкових поверхонь.

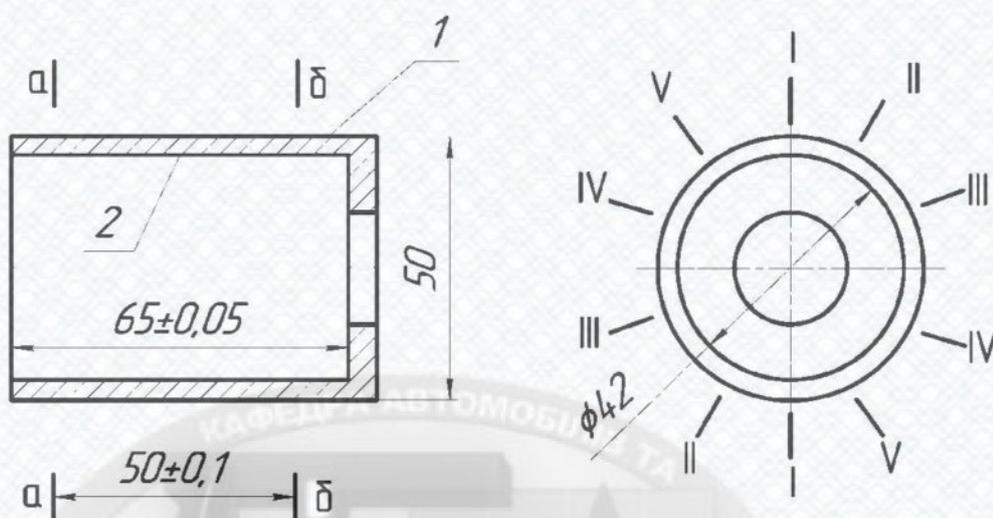


Рисунок 4.1 – Зразок та схема вимірювання відхилень

Базування зразків виконували по зовнішній циліндричній поверхні, орієнтуючи їх шляхом обертання індикаторного нутроміра у напрямку мінімального та максимального відхилення від номінального розміру отвору. Після встановлення положення проводили оцінку рівномірності нанесеного покриття. Визначення товщини покриття здійснювали шляхом обчислення різниці між діаметром отвору після нанесення шару та його початковим значенням.

На другому етапі було сформовано оптимальну структуру технологічного процесу, визначено порядок виконання операцій та розроблено рекомендації щодо вибору параметрів режимів нанесення і формування покриттів. Третій етап передбачав проведення експлуатаційних перевірок відновлених деталей, підготовку виробничих інструкцій для інтеграції технології у ремонтне виробництво та виконання техніко-економічної оцінки результатів впровадження.

4.2 Розробка технологічного обладнання для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів

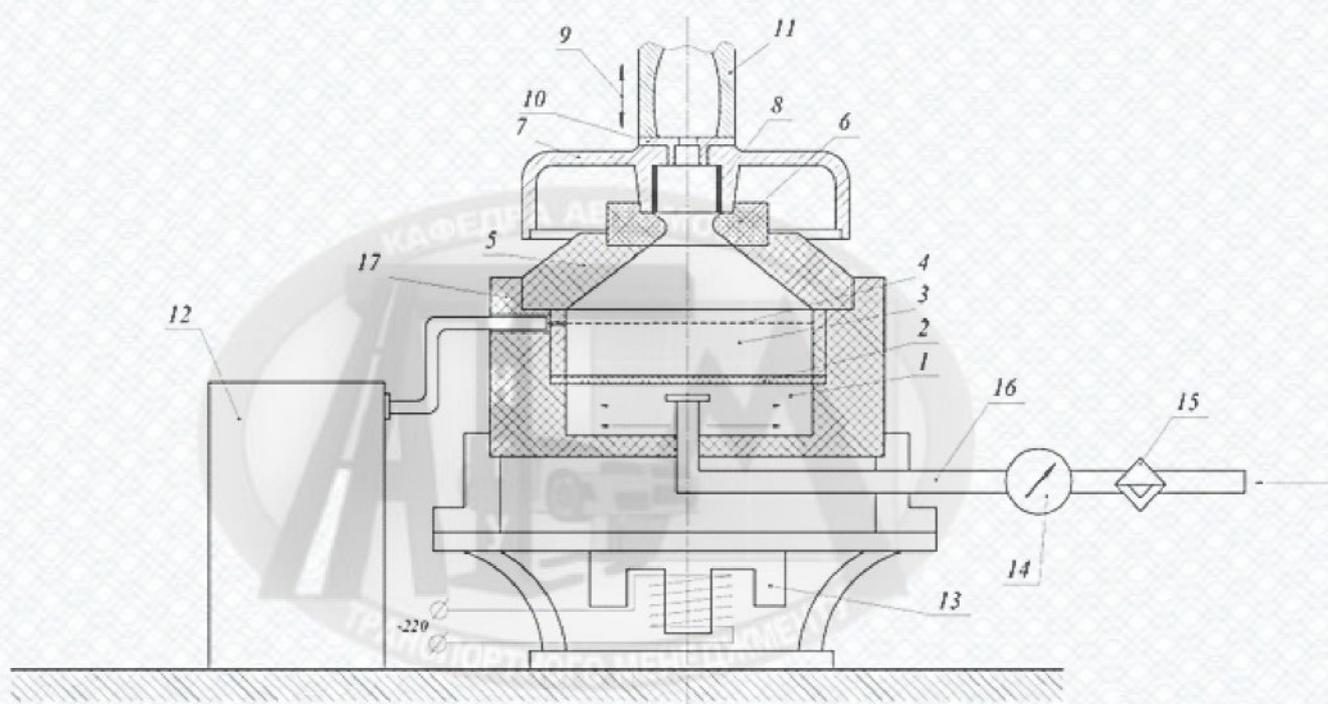
Вибір технологічного устаткування є одним із ключових етапів розробки будь-якого технологічного процесу. Обладнання повинно гарантувати необхідний рівень продуктивності та якості обробки, забезпечувати безпечні та ергономічні умови експлуатації, а також характеризуватися мінімальними приведеними витратами на виконання операцій і скороченим терміном окупності.

Багато досліджень вказують на доцільність розділення операцій нанесення полімерного порошку та його оплавлення. Це обумовлено технологічними труднощами виконання оплавлення безпосередньо на установці для нанесення, а також економічними факторами: тривалість оплавлення значно перевищує час нанесення, що негативно впливає на продуктивність процесу відновлення. З цієї причини була розроблена концепція спеціалізованої установки для нанесення покриттів із подальшим оплавленням у термопечі — у випадку формування покриттів без ультразвукового впливу, а також окрема установка для нагрівання та формування покриття з використанням ультразвуку.

Запропонована така схема установки для нанесення покриттів, яка наведена на рис. 4.2. Установка включає вібровихреву ванну та джерело високої напруги. Вібровихрева ванна являє собою герметичну конструкцію з токонепровідного матеріалу, наприклад склопластику, і складається з повітряної камери (1) та камери напилення (3), розділених пористою перегородкою (2). Під перегородкою розташована електродна сітка (4), підключена до джерела високої напруги (12). Робочий вузол встановлюється на перехідній насадці (6) та фіксується затискачем (9), у якому інтегровано магніострикційний перетворювач із хвилеводом (11).

Полімерний порошок необхідно перевести у псевдозріджений стан за рахунок комбінованого впливу: вібраційного, що створюється електромагнітним вібратором (13), та вихрового, який забезпечується подачею повітря з магістралі (16). Тиск повітря контролювався манометром (14), а його очищення здійснювалося при проходженні через вологовідділювач (1).

У процесі псевдозрідження порошку на електродну сітку подавали напругу 30–60 кВ. Заряджені частинки полімеру осідали на деталі, що мала протилежний електричний потенціал. Доступ порошку обмежувався лише відновлюваною посадковою поверхнею. Вихід матеріалу через верхній отвір блокувався спеціальною перегородкою, яка включала тканинний фільтр (11) та упор (10).



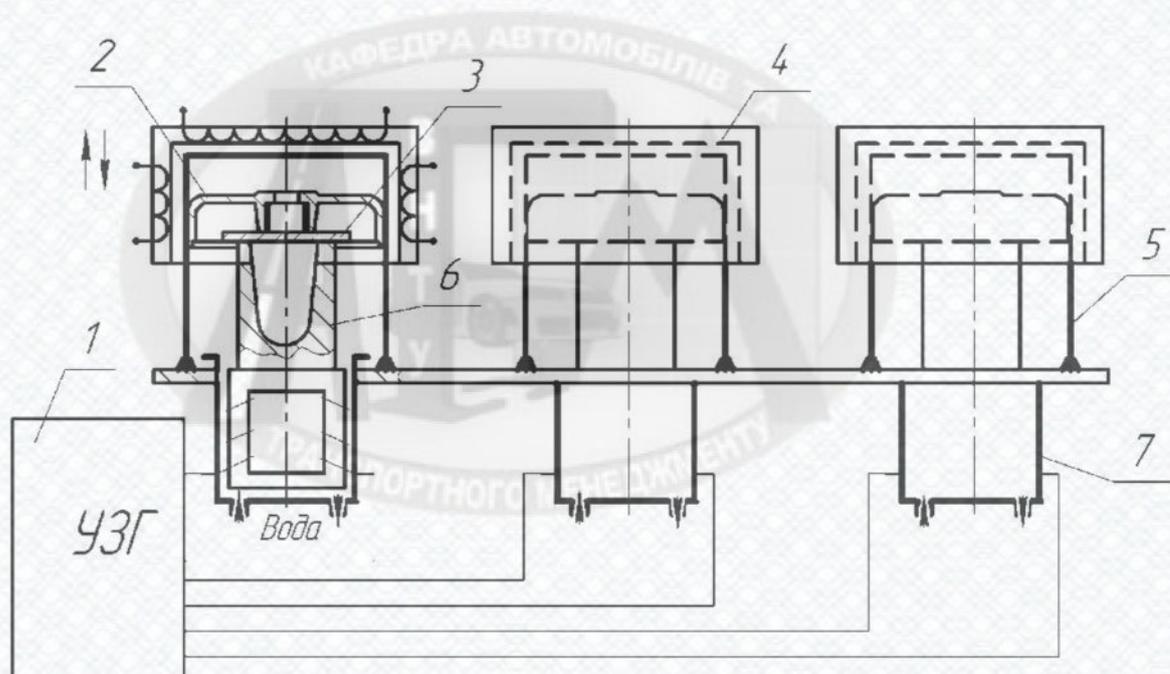
1 – повітряна камера; 2 – порожниста перегородка; 3 – камера наплення порошку; 4 – електродна сітка; 5 – кришка; 6 – насадка; 7 – деталь, що відновлюється; 8 – покриття; 9 – затискач; 10 – упор; 11 – хвилевод; 12 – джерело високої напруги; 13 – вібратор; 14 – манометр; 15 – оливо-волого-відділювач; 16 – повітряна магістраль; 17 – корпус

Рисунок 4.2 – Принципова схема установки нанесення полімерних покриттів

Геометрія та розміри перехідної насадки, через яку проходить полімерний порошок під час його осадження на деталі, мають визначальний вплив на якість і товщину покриття, а отже — на продуктивність процесу. При проектуванні установки демпфуючому отвору насадки необхідно надати гіперболоїдну форму. Мінімальний діаметр цього отвору має становити $(0,4...0,6) D_p$. Дотримання

зазначеного співвідношення забезпечує максимальну продуктивність при мінімальних відхиленнях форми покриття від заданої геометрії.

Для оплавлення полімерного матеріалу була розроблена схема установки, наведена на рисунку 4.3). Конструктивною особливістю установки є застосування ультразвукового впливу на деталь з метою інтенсифікації процесу формування покриття. Нагрівання здійснюється за допомогою трьох індукційних печей, що виконують вертикальний зворотно-поступальний рух, забезпечуючи рівномірний тепловий розподіл.



1 – ультразвуковий генератор; 2 – деталь; 3 – хвилевід; 4 – притиск; 5 – тяги; 6 – підставка; 7 – корпус

Рисунок 4.3 – Принципова схема установки для оплавлення порошку в ультразвуковому полі

Хвилеводи (3) закріплені на жорсткій опорній конструкції (6) та підключені до ультразвукового генератора (1), що забезпечує передачу коливань на деталь. Після нанесення порошкоподібного полімеру деталь (2) встановлюють на хвилевід і фіксують за допомогою затискача (4), який гарантує стабільність положення під час обробки. Далі індукційна піч переміщується у робочу зону, опускається над

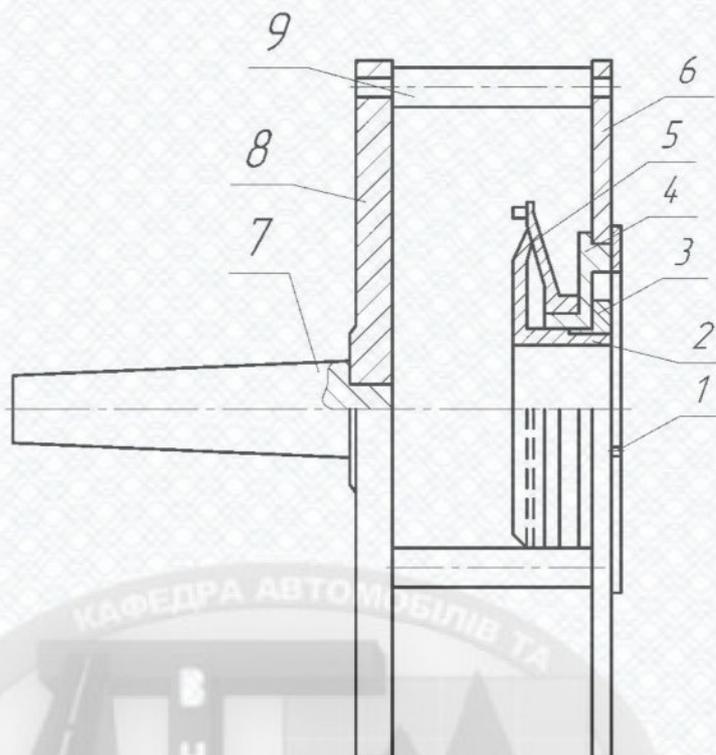
деталлю та утримується до завершення процесу оплавлення. Після досягнення необхідного ступеня формування покриття піч піднімається у вихідне положення, деталь охолоджується та передається на наступний етап — механічну обробку.

Для генерації ультразвукових коливань застосовуються промислові генератори типу УЗГ, що працюють у стабільному режимі подачі ультразвукових коливань. Конфігурація хвилеводів визначається геометричними параметрами та формою деталей, які підлягають відновленню. Для забезпечення максимальної ефективності передачі ультразвукової енергії необхідно гарантувати надійний контакт між хвилеводом і поверхнею деталі, що покривається.

Для механічної обробки посадкових отворів деталей типу «кришка генератора» розроблено спеціалізований пристрій, що забезпечує досягнення необхідної точності (6–7-й квалітет) та співвісності оброблюваних поверхонь (рис. 4.4). Конструкція передбачає використання змінних насадок (5), що значно підвищує універсальність пристрою та дозволяє виконувати обробку широкої номенклатури деталей, включаючи посадкові місця підшипників кришок генераторів і щитів електродвигунів.

Пристрій виконаний у формі мембранного патрона (див. рисунок 4.4) і складається з двох дисків (6 і 8), з'єднаних між собою розпірними елементами (9). Один із дисків оснащений конусною посадкою (7) для кріплення у шпинделі токарно-гвинторізного верстата. На другому диску жорстко закріплена змінна перехідна втулка (4), на якій розташований пакет розтискних мембран (5). Пелюстки мембран мають радіальні та торцеві базові поверхні, що забезпечують точне позиціонування відносно настановних поверхонь оброблюваної деталі.

Внутрішня поверхня перехідної втулки з'єднана з маточиною змінної дискової п'яти (3), диск якої контактує з пакетом тарілчастих мембран. Розтискання мембран під час встановлення та фіксації деталі здійснюється за допомогою гайки (1), яка при закручуванні передає осьове зусилля на упор (2). Упор, у свою чергу, створює тиск на мембрани (5), забезпечуючи їх розтискання та надійне закріплення деталі.



1 – гайка; 2 – упор; 3 – дискова п'ята; 4 – перехідна втулка; 5 – змінна мембрана; 6, 8 – упорні диски; 7 – настановний конус; 9 – розпірка

Рисунок 4.4 – Принципова схема пристосування для механічної обробки підшипникових місць кришок генераторів автомобіля

При відкручуванні гайки (1) упор зміщується у зворотному напрямку під дією пружності мембран, які стискаються та звільняють деталь. Така конструкція пристрою дозволяє обробляти деталі з одностороннім розташуванням базової та оброблюваної поверхні, забезпечуючи точність центрування по діаметру в межах 0,02–0,05 мм та по торцю — 0,01–0,05 мм на довжині 100 мм.

4.3 Розробка технологічного процесу відновлення посадкових місць підшипників автомобільних генераторів

У ремонтному виробництві процес відновлення деталей реалізується через послідовність етапів, що включають очищення та миття, дефектування, вибір технологічних баз, підготовку поверхонь до відновлення, нанесення

відновлювального шару та контроль якості виконаних робіт. Кожен етап складається з окремих операцій, які є ключовими елементами технологічного процесу. Раціональне формування та оптимальний вибір цих операцій визначають продуктивність, точність і економічну ефективність відновлення.

Конструктивні та технологічні характеристики елементів підшипникових вузлів опор кочення визначають вибір технологічного маршруту та послідовність виконання операцій.

На основі аналізу сучасних вискоефективних технологій та відомих наукових досліджень сформовано наступну технологічну схему відновлення посадкових поверхонь підшипникових гнізд кришок генераторів:

1. Очищення та миття деталей.
2. Дефектація деталей відповідно до технологічної документації.
3. Термічна обробка. Операцію виконують для видалення залишків мастильних матеріалів шляхом їх вигорання. Необхідність цього етапу обумовлена тим, що в порах відновлюваної поверхні залишаються включення мастила. Під час процесу оплавлення порошкового покриття мастило розширюється, виходить із пор і, потрапляючи в зону контакту між покриттям та основою, істотно знижує адгезійну міцність з'єднання полімеру з підкладкою.

Альтернативні методи підготовки поверхні (знежирення, хімічне травлення, фосфатування, пасивування) не забезпечують необхідного результату, особливо при відновленні компонентів, виготовлених з алюмінієвих сплавів.

4. Попередня механічна обробка зношених поверхонь. Мета операції полягає у видаленні дефектного шару та відновленні початкової геометрії поверхні, що підлягає ремонту. Виконання цього етапу повинно здійснюватися відповідно до рекомендацій, наведених у розділі 4, тобто посадковий отвір необхідно розточити до повного усунення зносу з досягненням шорсткості $Rz = 15 \dots 30$ мкм. Зазначений рівень шорсткості забезпечується напівчистовим розточуванням.

5. Нанесення та формування покриття. Це основна операція технологічного процесу, від виконання якої залежить якість реставрації кришки.

На основі наукових розробок, виконаних у попередніх розділах магістерської кваліфікаційної роботи, обрано метод нанесення покриттів із порошкових композицій у комбінованому електростатичному та ультразвуковому полі. Як матеріал для формування покриття визначено порошкову композицію наступного складу:

- 1) епоксидний олігомер П-ЕП-219 у кількості 32 .. 40%;
- 2) скляне борошно у кількості 9,8...11,6%;
- в) порошкоподібний поліамід 12 – все інше.

Розміри часток повинні знаходитись в межах 80–200 мкм.

Наукові розробки, проведені у попередніх розділах магістерської кваліфікаційної роботи, дозволили розробити рекомендації вибору технологічних режимів нанесення та формування покриттів, а також параметрів ультразвукових полів. Слід підкреслити, що наведені параметри є орієнтовними та в кожному конкретному випадку потребують індивідуального налаштування. Це обумовлено тим, що процес плівкоутворення залежить від великої кількості факторів, які складно врахувати як у розрахунках, так і в практичних рекомендаціях. До таких факторів належать: геометричні розміри та конфігурація деталей, товщина покриття, теплопровідність матеріалу, тип нагріву, співвідношення маси деталі до площі покриття, гранулометричний склад порошку, вологість та електричний заряд частинок, кількість нанесених шарів тощо.

Орієнтовні технологічні режими формування полімерних покриттів та параметри ультразвукової обробки наведено в таблиці 4.1. Для більш повної реалізації можливостей пропонованої композиції в кожному випадку необхідно прагнути формування покриттів при якомога більш низьких температурах з урахуванням отримання мінімальної термоокислювальної деструкції.

6. Фінішна механічна обробка. Дана операція виконується для забезпечення відновленої поверхні необхідними параметрами шорсткості та геометричними розмірами, що гарантують оптимальні умови взаємодії підшипника кочення з корпусною деталлю. Як завершальний етап обробки застосовується високоточне розточування, яке здійснюється в режимах різання, характерних для кольорових

металів. Такий підхід виключає зміну структури полімерного матеріалу та не погіршує якість поверхні. При цьому посадкове місце підшипникового вузла повинно бути виконане з полем допуску N7 або P7 та шорсткістю $Ra = 2,5 \dots 0,63$ мкм.

Таблиця 4.1 – Технологічні режими нанесення та формування покриттів із порошкових композицій у комбінованому електростатичному та ультразвуковому полі

Показник	Одиниці вимірювання	Значення
1. Напруга на електродній сітці	кВ	40-60
2. Тиск повітря у повітряній камері	МПа	0,03-0,08
3. Тривалість процесу напилення	с	15-60
4. Температура формування покриття	°С	200-220
5. Тривалість формування покриття	хв	16-25
6. Частота ультразвукових коливань	кГц	18-22
7. Амплітуда ультразвукових коливань	мкм	8-13

7. Контрольна. При цій операції необхідно виміряти розміри та шорсткість посадкового місця підшипникового вузла, відхилення від співвісності посадкового місця та замкової поверхні, перевірити якість покриттів.

Схема технологічного процесу представлена рис. 4.5.

Типова маршрутна карта відновлення посадочних місць підшипникових вузлів кришок генераторів наведена в табл. 4.2.

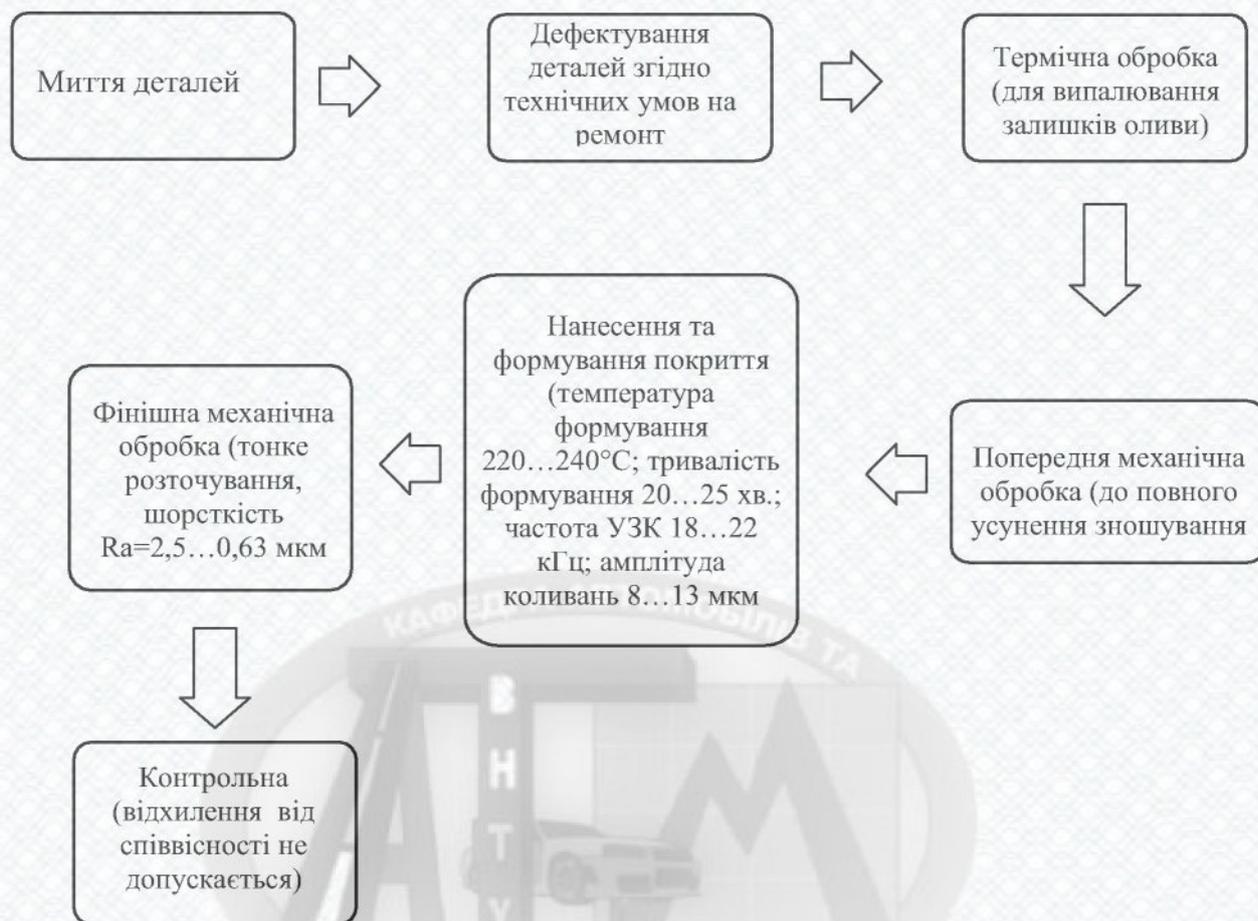


Рисунок 4.5 - Схема технологічного процесу відновлення посадкових місць підшипникових вузлів кришок генераторів

Таблиця 4.2 – Типова маршрутна технологічна карта

№ та назва операції	Зміст операції	Техноогічне обладнання та оснастка	Технічні умови
1	2	3	4
1. Мийна	Промити деталь у 2-2,5% розчині МС-6 або МС-8	Ультразвукова ванна	

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4
2. Дефекту- вальна	Виконати дефектування згідно з технічними умовами на ремонт	Вимірювальний інструмент	
3. Термічна	Термічне видалення залишків оливи та іншого бруду	Термопіч	Нагрівати деталь до температури 150- 200°C, витримати при цій температурі 1,5-2 год.
4. Токарна	Розточити отвір для посадки до повного встановлення зносу	Токарно- гвинторізний верстат	Шорсткість Rz 15...30 мкм.
5. Нанесення покриття	Наносити порошкоподібну композицію на посадкові місця, що відновлюються з попередньою обробкою деталей ультразвуковим полем	Установка для нанесення полімерних покриттів	Частота $\Phi=1822$ кГц, амплітуда, $A=8...13$ мкм, напруга на електродній сітці 40- 60 кВ, тиск повітря в робочій камері 0,02- 0,08 МПа, тривалість напилення 15-60 с.
6. Формування покриття	Формування покриття в ультразвуковому полі.	Установка для формування покриттів в ультразвуковому полі	Частота УЗК 18-22 кГц, амплітуда УЗК 8...13 мкм, температура формування 200-220 °С, тривалість формування 16-25 хв.

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4
7. Токарна (тонке розточування)	Розточити посадковий отвір	Токарно- гвинторізний верстат	Шорсткість Rz 2,5... 0,63 мкм
8. Контрольна	Виконати повний контроль деталі відповідно до технічних умов на ремонт	-	

4.4 Економічна оцінка впровадження технологічного процесу в ремонтне виробництво

Оцінку економічної ефективності впровадження технології відновлення посадкових місць підшипникових вузлів генераторів виконаємо для умов спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice».

В процесі дослідження не вдалося виявити автосервісні підприємства, які здійснюють відновлення посадкових місць підшипників кришок генераторів автомобілів, тому вони виконують заміну зношеної деталі. Економічну ефективність відповідно доцільно визначати шляхом порівняння вартості нової та відновленої деталей в партії відновлених деталей $n=50$ шт.

$$E = \left(C_n - C_v \frac{P_2}{P_1} \right) N_{рем}, \quad (4.1)$$

де C_v - собівартість відновлення деталі за розробленим методом, грн;

C_n – вартість нової деталі;

$N_{рем}$ – кількість ремонтів на рік;

P_1, P_2 – середні міжремонтні ресурси деталей, відновлених розробленим способом та нових деталей.

Відповідно до проведених нами розробок в 2 та 3 розділах, прогнозований міжремонтний ресурс відремонтованих за пропонованою технологією із застосуванням розробленої ремонтної композиції кришок генераторів приблизно дорівнює нормативному ресурсу нової деталі, тобто $P_1 = P_2$.

Вартість відновлення підшипникового вузла кришки генератора знаходимо за формулою:

$$C_v = C_n + H, \quad (4.2)$$

де C_n - собівартість відновлення підшипникового вузла кришки генератора, грн;
 $H = 0,25C_n$ - запланований прибуток підприємства, грн.

$$C_n = C_{np.H} + C_{p.M} + C_{ЗВ} + C_{ЗГ} + C_{нв}, \quad (4.3)$$

де $C_{np.H}$ – заробітна плата робітників, зайнятих відновленням підшипникового вузла кришки генератора, грн;

$C_{ЗВ}, C_{ЗГ}$ та $C_{нв}$ - відповідно, загальновиробничі, загальногосподарські та невиробничі накладні витрати, грн;

$C_{p.M}$ – вартість складових елементів ремонтної композиції, $u\mu$.

Заробітна плата робітників, зайнятих відновленням підшипникового вузла кришки генератора $C_{np.H}$ складається з основної C_{np} , додаткової $C_{доп}$ та нарахувань на фонд заробітної плати C_n , тобто:

$$C_{np.H} = C_{np} + C_{доп} + C_n. \quad (4.4)$$

Основну заробітну плату робітників, зайнятих відновленням підшипникового вузла кришки генератора, обчислюємо за формулою:

$$C_{np} = T_{ш.к} C_2 K_\delta, \quad (4.5)$$

де C_2 – годинна ставка робітників, зайнятих відновленням підшипникового вузла кришки генератора, що відраховується за середнім розрядом, грн;

$T_{ш.к}$ - штучно-калькуляційний час, год;

$K_\delta = 1,025 \dots 1,03$ - коефіцієнт, що враховує доплати до основної заробітної плати.

Штучно-калькуляційний час $T_{ш.к}$ визначали за формулою:

$$T_{ш.к} = \frac{T_{п.з}}{n} + T_{шт}, \quad (4.6)$$

де $T_{шт}$ - штучний час, тобто час виконання всіх операцій процесу відновлення, год.;

n - кількість деталей у партії, шт.;

$T_{п.з}$ – підготовчо-заключний час, визначається підсумовуванням $t_{п.з}$ за всіма операціями маршрутної карти, год.

$$T_{ш.к} = \frac{2,5}{50} + 3,56 = 3,61 \text{ год.}$$

$$C_{np} = 3,61 \cdot 150 \cdot 1,03 = 557,75 \text{ грн.}$$

Додаткова заробітна плата виробничих робітників складає 5...12% від основної:

$$C_{дон} = 0,12 \cdot 557,75 = 66,93 \text{ грн.}$$

Відрахування на фонд заробітної плати в 2025 складають: ЄСВ – 22%. Таким чином:

$$C_n = (C_{np} + C_{дон}) \cdot 0,22 = (557,75 + 66,93) \cdot 0,22 = 137,43 \text{ грн.}$$

Таким чином

$$C_{np.H} = 557,75 + 66,93 + 137,43 = 762,11 \text{ грн.}$$

Питому вартість ремонтних матеріалів визначаємо за такою формулою:

$$C_M = \sum g_i C_i, \quad (4.7)$$

де: g_i – частка матеріалу в композиції в розрахунку на 1 кг матеріалу;
 C_i - ціна матеріалу грн.

$$C_M = 0,35 \cdot 2700 + 0,1 \cdot 13500 + 0,55 \cdot 16400 = 11315 \text{ грн/кг.}$$

Вартість 1 кг композиції склала 11351 грн тоді вартість відновлення однієї деталі за умови потреби в 0,015 кг композиції складе

$$C_{p.M} = 0,015 \cdot 11315 = 169,73 \text{ грн.}$$

Загальногосподарські, загальновиробничі та невиробничі накладні витрати на відновлення підшипникового вузла визначимо згідно:

$$C_{ЗВ} = C_{np} R_{ЗВ} / 100, \quad (4.8)$$

$$C_{ЗГ} = C_{np} R_{ЗГ} / 100, \quad (4.9)$$

$$C_{НВ} = C_{np} R_{НВ} / 100, \quad (4.10)$$

де: $R_{ЗВ}$, $R_{ЗГ}$ та $R_{НВ}$ – відповідно, відсоток загальновиробничих, загальногосподарських та невиробничих накладних витрат.

Згідно даними спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice»:
 $R_{ЗВ} = 12,5\%$; $R_{ЗГ} = 18,7\%$; $R_{НВ} = 0,8\%$. Тоді:

$$C_{ЗВ} = 557,75 \cdot 12,5 / 100 = 69,72 \text{ грн};$$

$$C_{ЗГ} = 557,75 \cdot 18,7 / 100 = 104,3 \text{ грн};$$

$$C_{НВ} = 557,75 \cdot 0,8 / 100 = 4,46 \text{ грн}.$$

Тоді повна собівартість відновлення деталі становитиме:

$$C_n = 762,11 + 169,73 + 69,72 + 104,3 + 4,46 = 1110,32 \text{ грн}.$$

Визначаємо вартість відновлення деталі:

$$C_o = 1110,32 + 0,25 \cdot 1110,32 = 1387,9 \text{ грн}.$$

Аналіз ринку запчастин показав, що придбати нову кришку генератора неможливо, за інструкцією виробників це означає заміну генератора. З урахуванням цього прийmemo середню вартість нової кришки як середню вартість нового генератора з вирахуванням вартості типових деталей, які використовуються при ремонті генератора $C_n = 3000$ грн, тоді:

$$E = (3000 - 1387,9) \cdot 50 \cong 80605 \text{ грн}.$$

За нашими оцінками, орієнтована вартість установки для нанесення полімерних покриттів складе 500000 грн. Визначимо термін окупності технології:

$$T_{ок} = \frac{ПІ}{E} = \frac{500000}{80605} \approx 6,2 \text{ роки}, \quad (4.11)$$

де *III* – обсяг початкових інвестицій, грн.

4.5 Висновки

1. Розроблено технологічний процес відновлення зношених місць підшипникових вузлів кришок генераторів автомобілів порошкоподібними композиціями.

2. Розроблено концептуальну схему обладнання для нанесення полімерного покриття на поверхні підшипникових вузлів автомобільних генераторів. Розроблено рекомендації щодо вибору технологічних режимів та параметрів процесу відновлення: температура формування 200..220°C, тривалість формування покриттів 16..25 хв, частота ультразвукових коливань 18..22 кГц, амплітуда 8..13 мкм.

3. Розрахунок оціночного економічного ефекту від впровадження технологічного процесу відновлення партії (50 кришок генераторів) зношених деталей в умовах спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice» склав 80605 грн. Оціночний термін окупності склав 6,2 роки.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішено питання відновлення посадкових місць підшипникових вузлів на прикладі автомобільних генераторів в умовах спеціалізованого автосервісу.

1. Проведений аналіз існуючих методів відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів на автомобільному транспорті, дозволив встановити, що найбільш перспективним є метод, заснований на використанні полімерних покриттів на основі порошкових композицій. Проте наявні матеріали та існуючі технології нанесення порошкових композицій не гарантують необхідного рівня довговічності і надійності покриттів, який би відповідав ресурсу нової деталі.

2. Аналіз структури і стану ВТБ спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice», дозволив встановити, що наявна ВТБ і цілому відповідає технологічним вимогам. З метою підвищення ефективності виконання ремонтних робіт та їх якості є потреба у впровадженні більш сучасних технологічних процесів відновлення деталей стартерів та генераторів.

3. Для дослідження надійності та довговічності відновлених підшипникових вузлів нанесенням порошкових композицій сформовано математичні моделі формування втомних тріщин під дією постійних та циклічних навантажень в ремонтному полімерному матеріалі зі змінними властивостями. Для підвищення міцності адгезійного з'єднання композиційних порошкоподібних полімерів з металевою основою обґрунтовано доцільність впливу ультразвуковими коливаннями.

4. Визначено поле допуску та шорсткість посадкових поверхонь, відновлених розробленою композицією, з умов забезпечення найвищої довговічності та найбільшої міцності зчеплення. Рекомендується посадка N7 для деталей, що підлягають одноразовому складанню, і P7 для деталей, що підлягають багаторазовому складанню, шорсткість покриття $Ra=2,5...0,63$ мкм. Встановлено, що запропонований склад композиції, нанесений за оптимальних умов на зношені посадкові місця підшипникових вузлів автомобілів, дозволяє проводити

багаторазовий монтаж та демонтаж підшипникового вузла та експлуатувати його за значних навантажень (до 7 кН).

5. Розроблено технологічний процес відновлення зношених місць підшипникових вузлів кришок генераторів автомобілів за допомогою полімерного матеріалу, що рекомендується.

6. Розроблено концептуальну схему обладнання для нанесення полімерного покриття на поверхні підшипникових вузлів автомобільних генераторів. Розроблено рекомендації щодо вибору технологічних режимів та параметрів процесу відновлення: температура формування 200..220°C, тривалість формування покриттів 16..25 хв, частота ультразвукових коливань 18..22 кГц, амплітуда 8..13 мкм.

7. Розрахунок оціночного економічного ефекту від впровадження технологічного процесу відновлення партії (50 кришок генераторів) зношених деталей в умовах спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice» склав 80605 грн. Оціночний термін окупності склав 6,2 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрощук О.С., Смирнов Є.В. Аналіз доцільності відновлення посадкових місць підшипників кочення вузлів автомобілів полімерними матеріалами // Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», [Електронний ресурс], Вінниця: ВНТУ, 2026, Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/schedConf/presentations>
2. Біліченко В. В., Крещенецький В. Л., Варчук В. В.. Автомобілі та автомобільне господарство. Дипломне проектування : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 171 с.
3. Відновлення деталей автомобілів : навчальний посібник / В.І. Кальченко та ін. Чернігів, 2013. 192 с.
4. Виробничо-технічна база підприємств автомобільного транспорту. Навчальний посібник / [В.В. Біліченко, В.Л. Крещенецький, С.О. Романюк, Є.В. Смирнов]. Вінниця, ВНТУ, 2013. Режим доступу : <http://posibnyky.vntu.edu.ua/newauto/5/index.html>.
5. Герук С. М., Федірко П. П., Борковський С. М. Застосування методу металоконпаундної аплікації для відновлення внутрішніх циліндричних поверхонь. Вісник державного агроєкологічного університету : зб. наук. пр. Житомир : Вид-во ДАУ, 2005. № 1. С. 220–224.
6. Гончаренко В.В., Коваленко І.В. Технологія композиційних матеріалів : навчальний посібник. Київ, 2007. 131 с.
7. Джурка Г.Ф. Полімерні композиційні матеріали. Полтава, 2008. 58 с.
8. Дудніков А. А., Горбенко О. В., Келемеш А. О., дудник В. В. Технологічні методи підвищення експлуатаційної надійності машин. Наукові нотатки. 2018. Вип. 64. С. 44–47.

9. Іванкова О. В., Гаращук О. В., Куценко В. І., щербина В. В., Чижевський Д. В., Бабич Я. В., Тіхонов М. О. Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. Вісник ПДАА. 2022. № 4. С. 33–42.

10. В. Копань. Композиційні матеріали: Навчальний посібник. К.: Університетське видавництво ПУЛЬСАРИ, 2004, 200 с., з іл.

11. Кривий П. Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищеної якості згортих втулок : монографія / Кривий П. Д., Сенік А. А. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 232 с.

12. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів: Технологія: [підручник для студентів вузів] / О.А. Лудченко. – К.: Вища школа, 2007. – 527с.

13. Матвійчук А. В., Гевко І. Б. Технологія відновлення і розточування кільцевих канавок в корпусних деталях. Вісник Харківського технічного університету с.г. Вип. 17. Підвищення надійності відновлюваних деталей машин. Харків, 2003. С. 58–61.

14. Матеріали та матеріалознавство в автомобільному транспорті. Навчальний посібник / В. А. Косенко, Н. Ф. Кущевська, О.Г. Добровольський, В.В. Малишев. К.: Університет «Україна», 2015 р. 313 с.

15. Практикум з ремонту машин. Загальний технологічний процес ремонту та технології відновлення і зміцнення деталей машин : навчальний посібник / О.І. Сідашенко та ін. ; за ред. О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. Харків : Пром-Арт, 2018. Т. 1. 416 с.

16. Ремонт автомобілів: Навчальний посібник. / Упор. В.Я. Чабанний. Кіровоград: Кіровоградська районна друкарня, 2007. 720 с.

17. Ремонт машин та обладнання / О.І. Сідашенко та ін. Київ, 2014. 665 с.

18. Технологічне забезпечення якості відновлення посадочних отворів корпусних деталей : монографія / І. О. Хітров, В. С. Гавриш, ю. А. Кононогов, П. М. Фастовець. Рівне : НУВГП, 2013. 127 с.

19. Сайчук О., Потоскаєв О. Особливості застосування полімерних композиційних матеріалів для відновлення підшипникових гнізд корпусних деталей // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 1 / 2024 (144). С. 190-195.

20. Федірко П. П., Борковський С. М. Спосіб відновлення посадочних поверхонь під підшипники в корпусних деталях. Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства : зб. наук. пр. Харків : ХдТУСГ, 2001. Вип. 8. Т. 1.

21. Хітров І. О., Кононогов Ю. А. Технологічний процес та оснащення для подовження ресурсу роботи корпусних деталей транспортних засобів. Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2022. Вип. 2 (98). С. 288–296. <https://ep3.nuwm.edu.ua/24972/1/Vt9825%20%281%29.pdf>.

22. Хітров І. О. Застосування полімерних матеріалів при ремонті машин [Текст] / І. О. Хітров, Р. О. Луцан / Збірник наукових праць. Вісник НУВГП. Вип. 4 (60), серія «Технічні науки». Рівне, 2012. С. 123–128.

23. Чередніков О.М. Технологічні основи ремонту машин і відновлення деталей : навчальний посібник. Чернігів, 2008. 212 с.

24. Anthony L.A. Science and technology of polymer nanomer nanofibers. New Jersey, USA : Hoboken ; John Wiley & Sons, 2008. 424 p

25. Іє. Konoplianchenko, V. Tarellyk, Vas. Martsynkovskyy, O. Gaponova, A. Lazarenko, A. Sarzhanov, M. Mikulina, Zh. Zhengchuan, V. Pirogov. New technology for restoring Babbitt coatings. Journal of Physics: Conference Series. 1741 (2021), pp. 012040-1–012040-15. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012040>.

26. V. V. GribV. A. ZorinN. I. Baurova. Determination of the Resources of Machine Components Made of Polymeric Composite Materials on the Basis of Cumulative Evidence // Polymer Science, Series D. October 2018. Vol. 11. No. 4. pp. 431–435.

27. R.N. Haward, R.J. Young. The physics of glassy polymers. 2nd ed. L: Chapman & Hall, 1997. 508 pp.

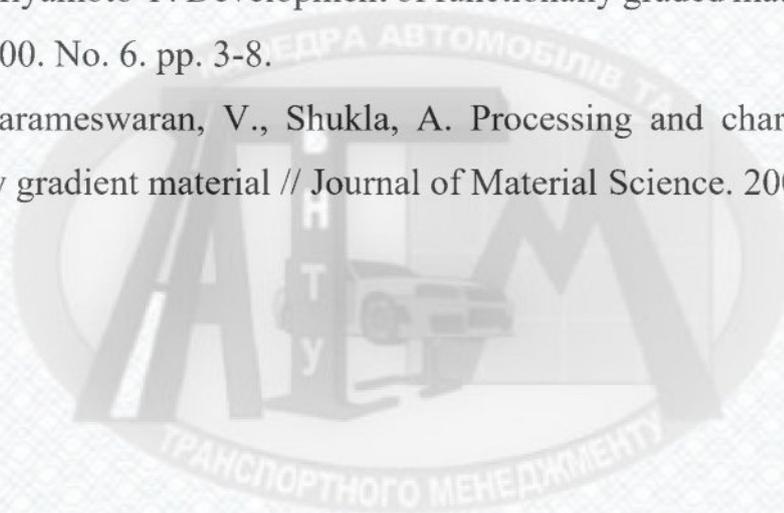
28. Hurlbut G.S., Jr. Dana's. Manual of Mineralogy. 21st ed. New York: John Wiley a, Sons, 1998.

29. Lyakhov, E. Yu. Mixture substantiation of the powder composition for bearing units seats restoring of rolling bearings/ E.Yu. Lyakhov, V.A. Zorin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1159.

30. Lugscheider, E., Bobzin, K., Beckers, M., Burckhardt, M. Gradierte Kohlenstoffschichten für Bauteile und Komponenten // In Tagungsband "GfT Jahrestagung 2001" Göttingen, Deutschland. 2001. pp. 23/1-23/10.

31. Miyamoto Y. Development of functionally graded materials by HIP // Mat. Sci. Res. Int. 2000. No. 6. pp. 3-8.

32. Parameswaran, V., Shukla, A. Processing and characterization of a model functionally gradient material // Journal of Material Science. 2000. No. 35. pp. 21-29.



Додаток А
(обов'язковий)



ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДКОВИХ МІСЦЬ
ПІДШИПНИКІВ В УМОВАХ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО АВТОСЕРВІСНОГО
ПІДПРИЄМСТВА «STARTSERVICE» МІСТО ВІННИЦЯ

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Ілюстративний матеріал до
магістерської кваліфікаційної роботи
на тему:

**Удосконалення технології відновлення посадкових місць
підшипників в умовах спеціалізованого автосервісного
підприємства «StartService» місто Вінниця**

Розробив: ст. гр. 1АТ-24м
Андрощук О.С.
Керівник: к.т.н., доцент
Смирнов Є. В.

Мета роботи – розробка високоефективної технології відновлення посадкових поверхонь під підшипникові вузли автомобілів із застосуванням сучасних методів ремонту та полімерних композиційних матеріалів.

Завдання дослідження

- провести аналіз причин відмов підшипникових вузлів автотранспортних засобів та виконати аналіз існуючих методів відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів;
- проаналізувати сучасний стан виробничо-технічної бази спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice»;
- обґрунтувати математичні моделі для дослідження надійності та працездатності відновлених підшипникових вузлів автомобілів із застосуванням композиційних полімерних покриттів;
- виконати дослідження надійності та працездатності підшипникових вузлів автомобілів, відновлених із застосуванням обґрунтованого метода нанесення покриття та полімерних композиційних матеріалів.
- розробити технологічний процес відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів та розробити концептуальну схему для нанесення полімерних покриттів;
- оцінити економічний ефект від впровадження розробок на спеціалізованому автосервісному підприємстві «Startservice».

Об’єкт дослідження – процеси функціонування відновлених підшипникових вузлів автотранспортних засобів.

Предмет дослідження – технологія відновлення посадкових місць підшипникових вузлів із застосуванням композиційних полімерних матеріалів.

Новизна отриманих результатів

- отримали подальший розвиток математичні моделі процесів втомного руйнування поверхонь підшипникових вузлів автомобілів, відновлених полімерними матеріалами;
- обґрунтовано вплив технологічних режимів формування покриттів з полімерної порошкової композиції на якість та стабільність їх властивостей.

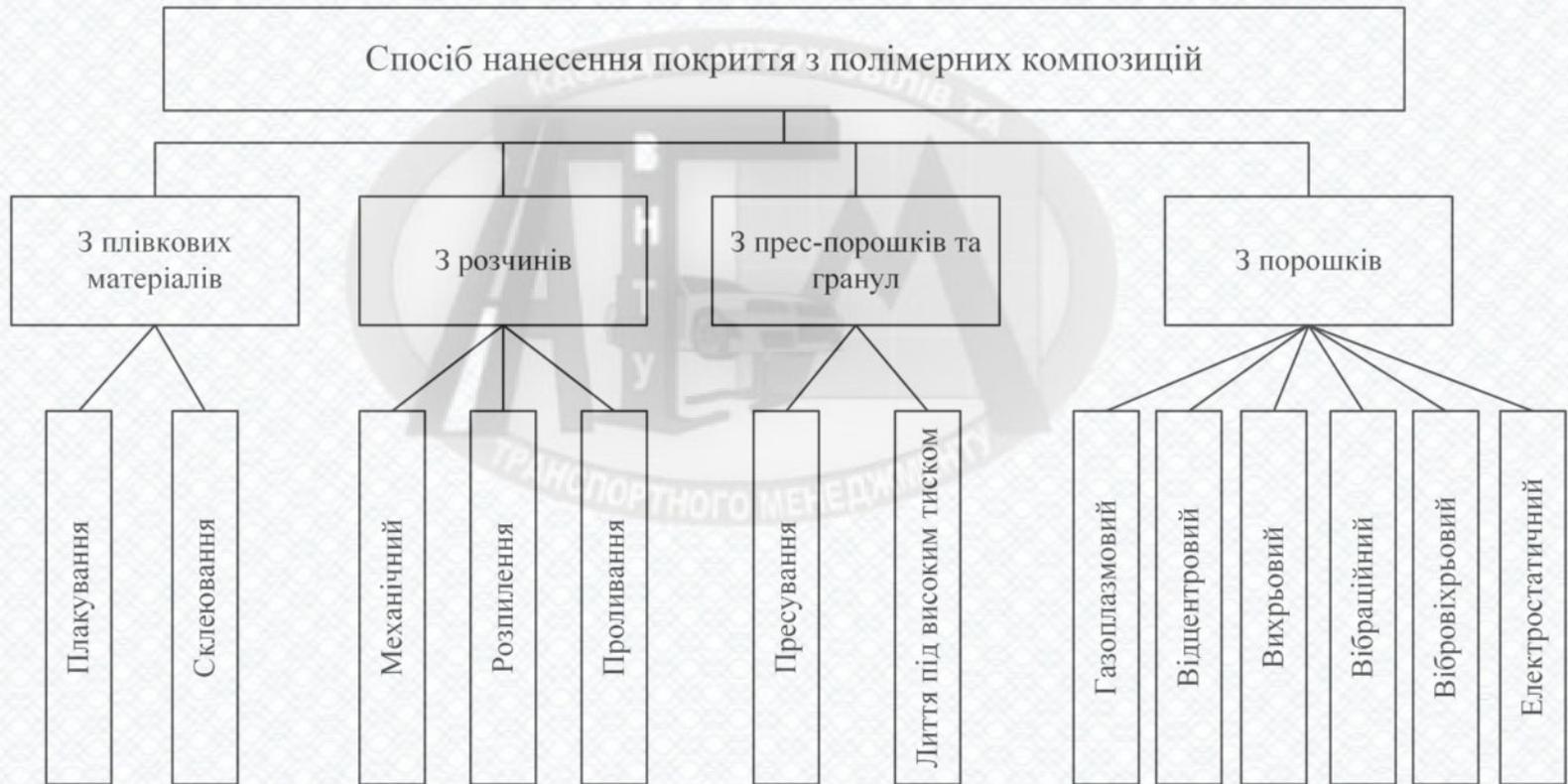
Практичне значення отриманих результатів

полягає у розробці технології відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів, відновлених порошковими композиціями на основі поліаміду та епоксидного олігомеру в електростатичному та ультразвуковому полі.

Способи відновлення посадкових місць підшипникових вузлів



Способи нанесення полімерних композицій при відновленні деталей автомобіля



Характеристика ВТБ спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice»



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService».

Основні види робіт:

- комп'ютерна діагностика автомобіля;
- знаття та встановлення стартера або генератора;
- діагностування стартера або генератора на спеціалізованому стенді;
- діагностування акумуляторних батарей;
- поглиблене діагностування супутніх елементів систем електропостачання та електричного пуску двигуна;
- ремонт стартера або генератора (розбирання, дефектування, комплектування новими деталями, складання, випробовування після ремонту);
- адаптація нових вузлів та деталей, тощо.

Математична модель працездатності відновлених підшипникових вузлів автомобілів

Швидкість росту тріщини за умов сумісного впливу втоми та повзучості

$$\frac{dl}{dN} = f \left[\left(\frac{dl}{dN} \right)_y, \left(\frac{dl}{dN} \right)_n \right]$$

де $(dl/dN)_n$ – швидкість зростання тріщини за умов повзучості;
 $(dl/dN)_y$ – швидкість зростання тріщини за умов втоми;
 N – кількість циклів навантаження.

Система диференціальних рівнянь розвитку тріщини внаслідок втомних руйнувань

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = lq(t) + \varphi_1 \beta_0 k \frac{y^2}{1-y}, \\ \frac{dq}{dt} = f(q, t) \end{cases}$$

де $y=l/l^*$; $\beta_0=4\beta \varpi/\pi l^*$;
 l^* – критична довжина тріщини при $p = p_0$;
 k – коефіцієнт апроксимації;
 l – довжина тріщини;
 $\varphi_1 = \Delta p/p_0$ – амплітуда відносного навантаження.

Система диференціальних рівнянь зростання втомної тріщини з великою зоною передруйнування в ремонтному полімерному матеріалі з властивостями, що змінюються

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = y\omega(t) + \frac{\varpi}{2\pi} \int_{\beta_0(1-\varphi_1)}^{\beta_0(1+\varphi_1)} \frac{1}{f_1(\beta, y)} d\beta \\ \frac{d\omega}{dt} = f_2(\omega, t) \end{cases}$$

Швидкість заповнення мікронерівностей покриттям при відновленні підшипникових вузлів

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{2\gamma r \cos \theta}{8\eta h}$$

де γ – рівноважний поверхневий натяг, θ – рівноважний крайовий кут змочування;
 r – радіус капіляра (пори); g – прискорення вільного падіння.
 η – в'язкість полімеру

Результати дослідження працездатності відновлених підшипникових вузлів (1)

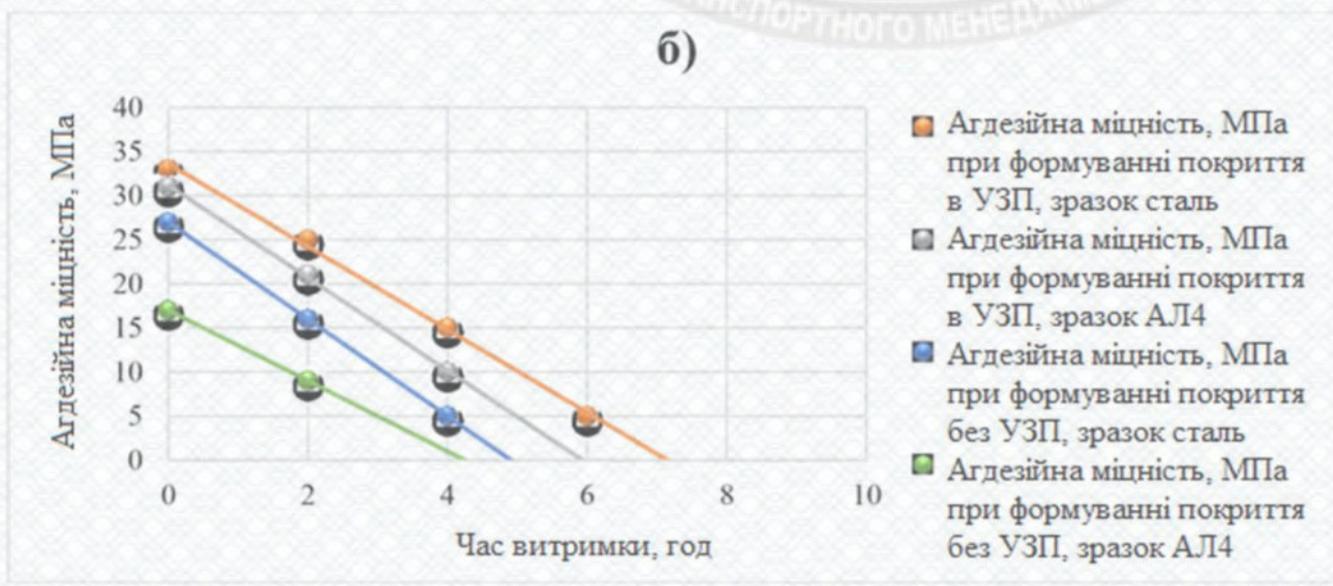
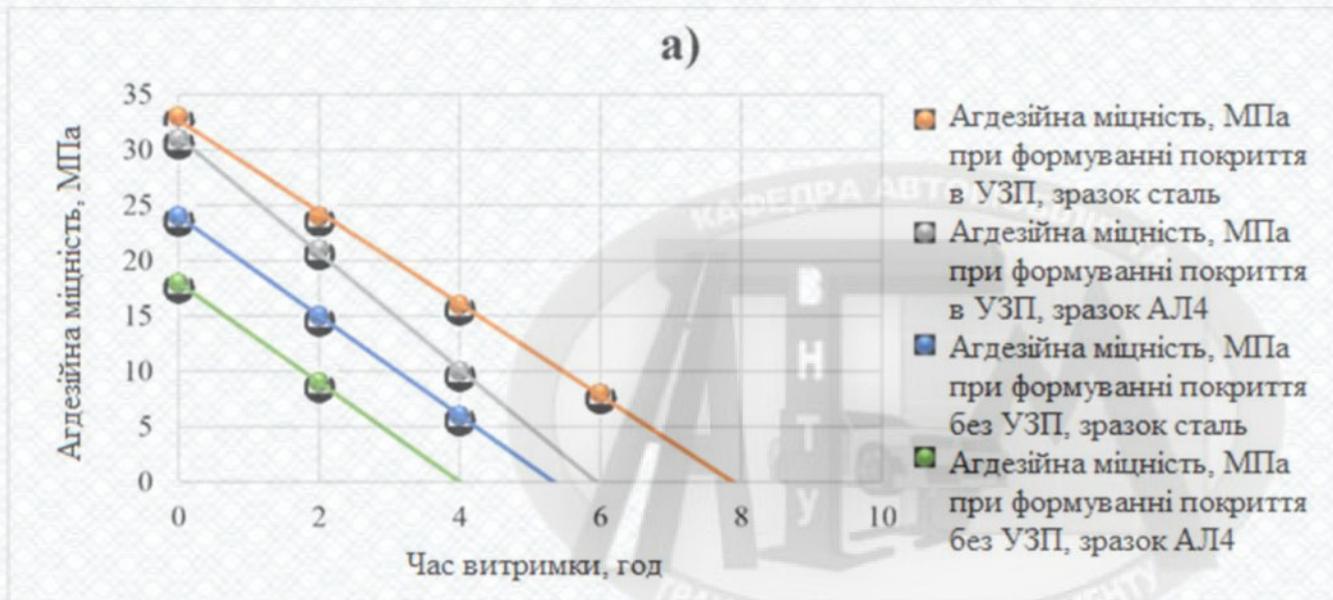


Рисунок 1 – Зміна адгезійної міцності полімерних покриттів від тривалості витримки в гідростатичній камері при 40°C (а) та 60°C (б)

Результати дослідження працездатності відновлених підшипникових вузлів (2)

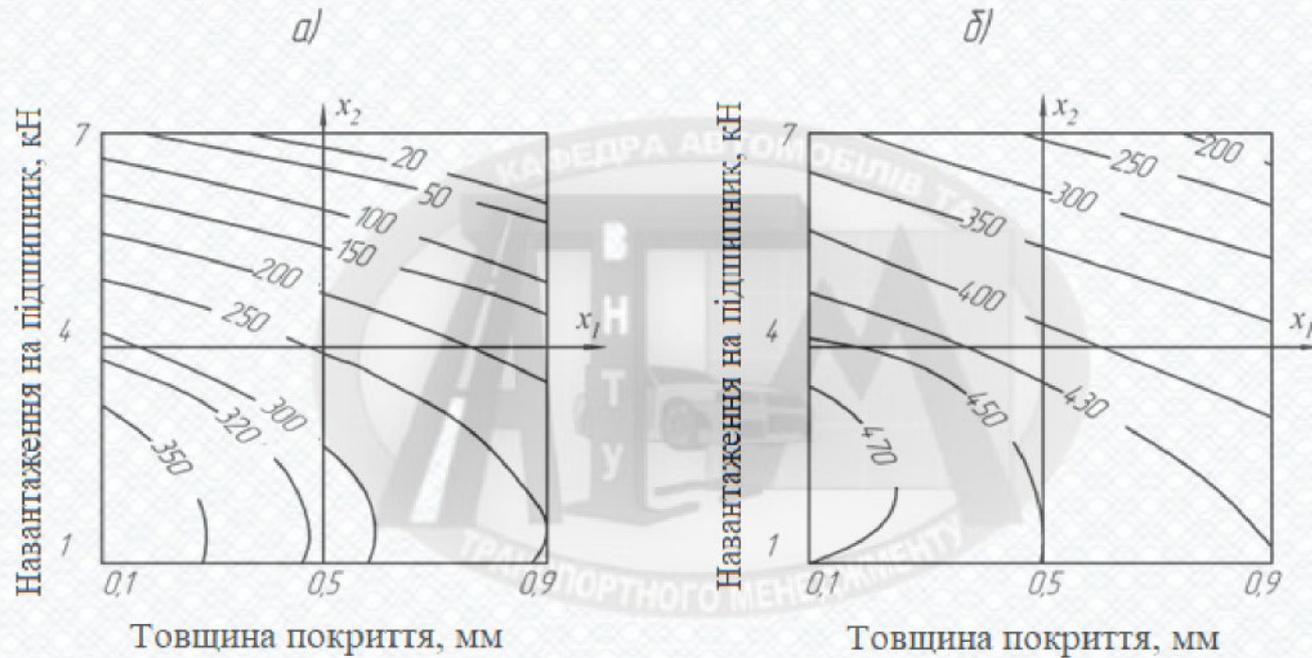


Рисунок 2 – Залежність довговічності полімерних покриттів, нанесених на посадкові місця підшипникових вузлів кришок генераторів, від умов навантаження та товщини покриття: а – покриття сформоване без ультразвукового поля; б - в ультразвуковому полі

Результати дослідження працездатності відновлених підшипникових вузлів (3)

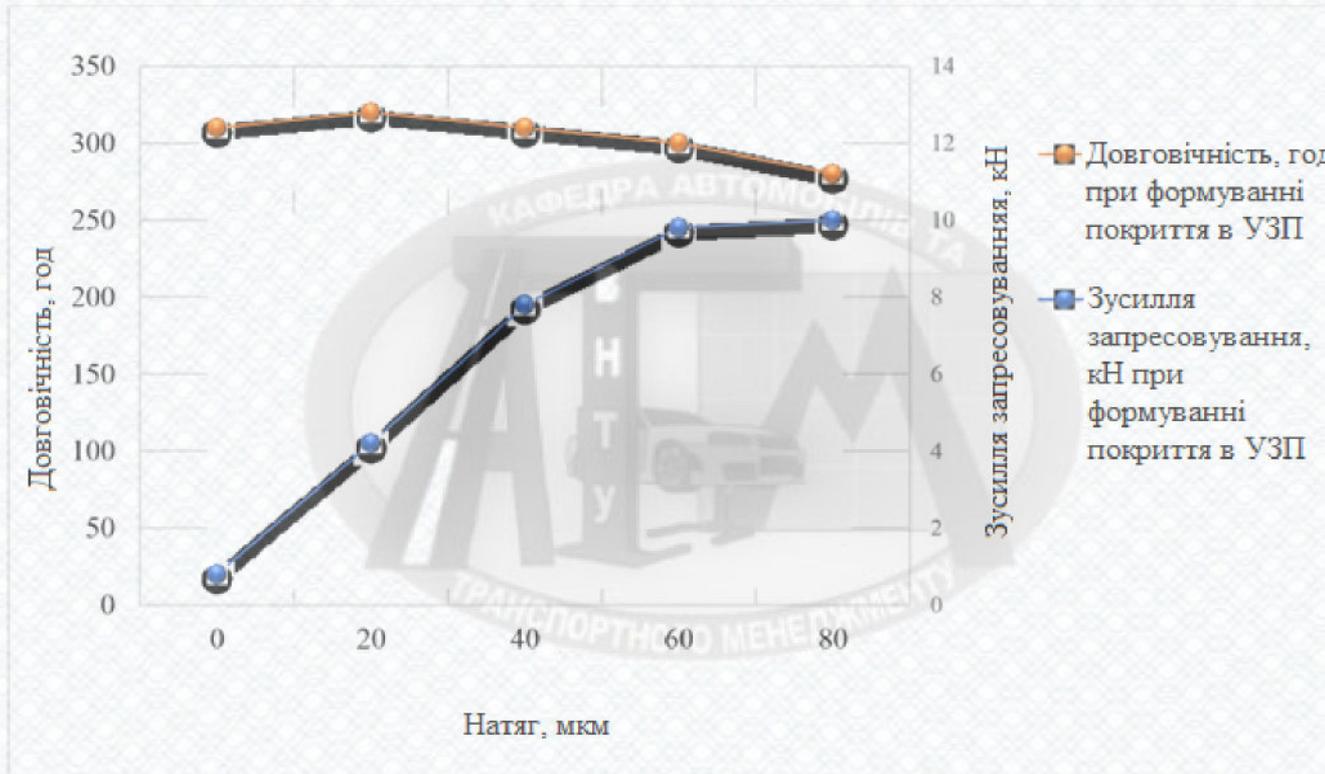


Рисунок 3 - Вплив початкового натягу з'єднання на довговічність та зусилля запресування

Результати дослідження працездатності відроджених підшипникових вузлів (4)

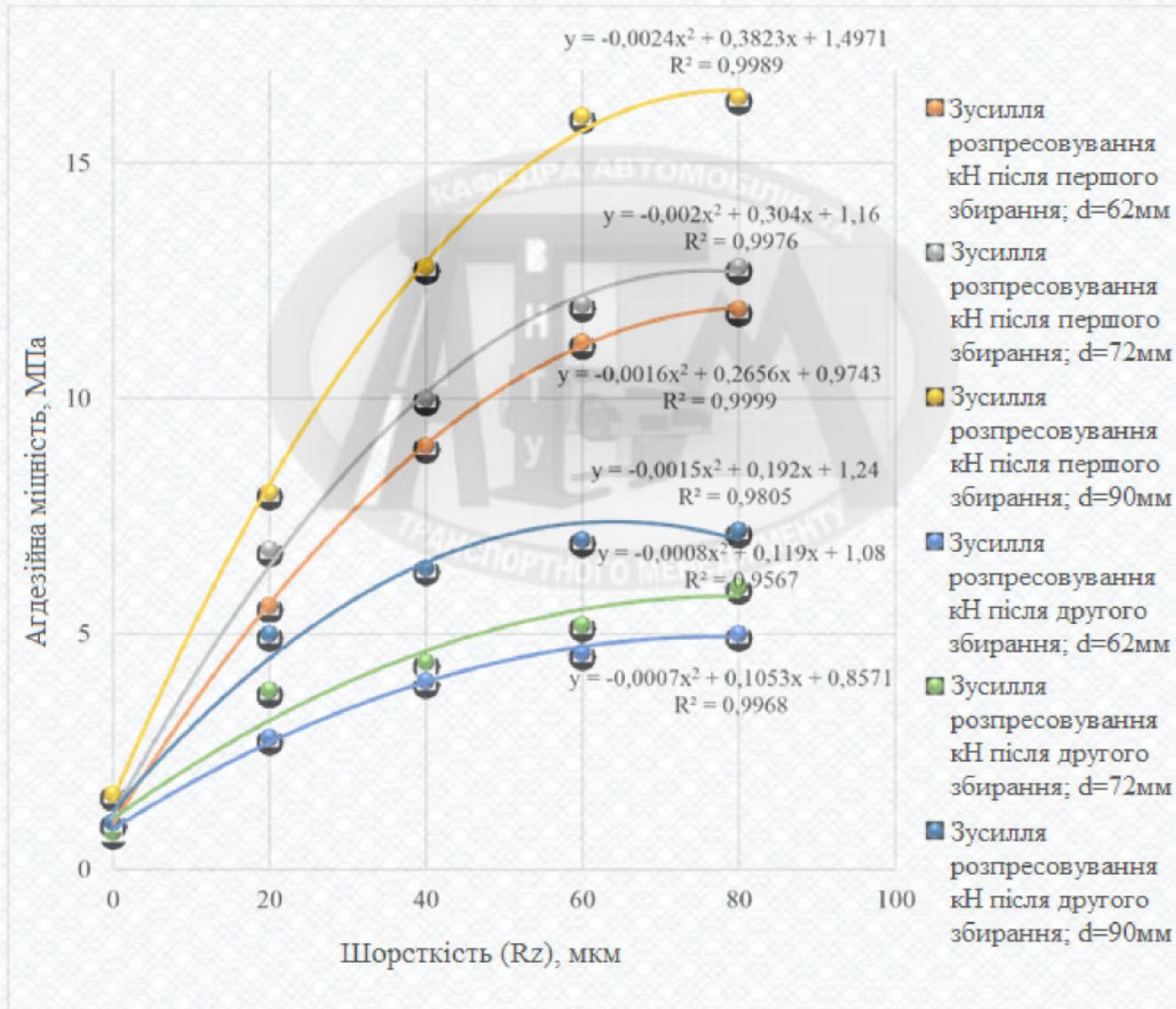
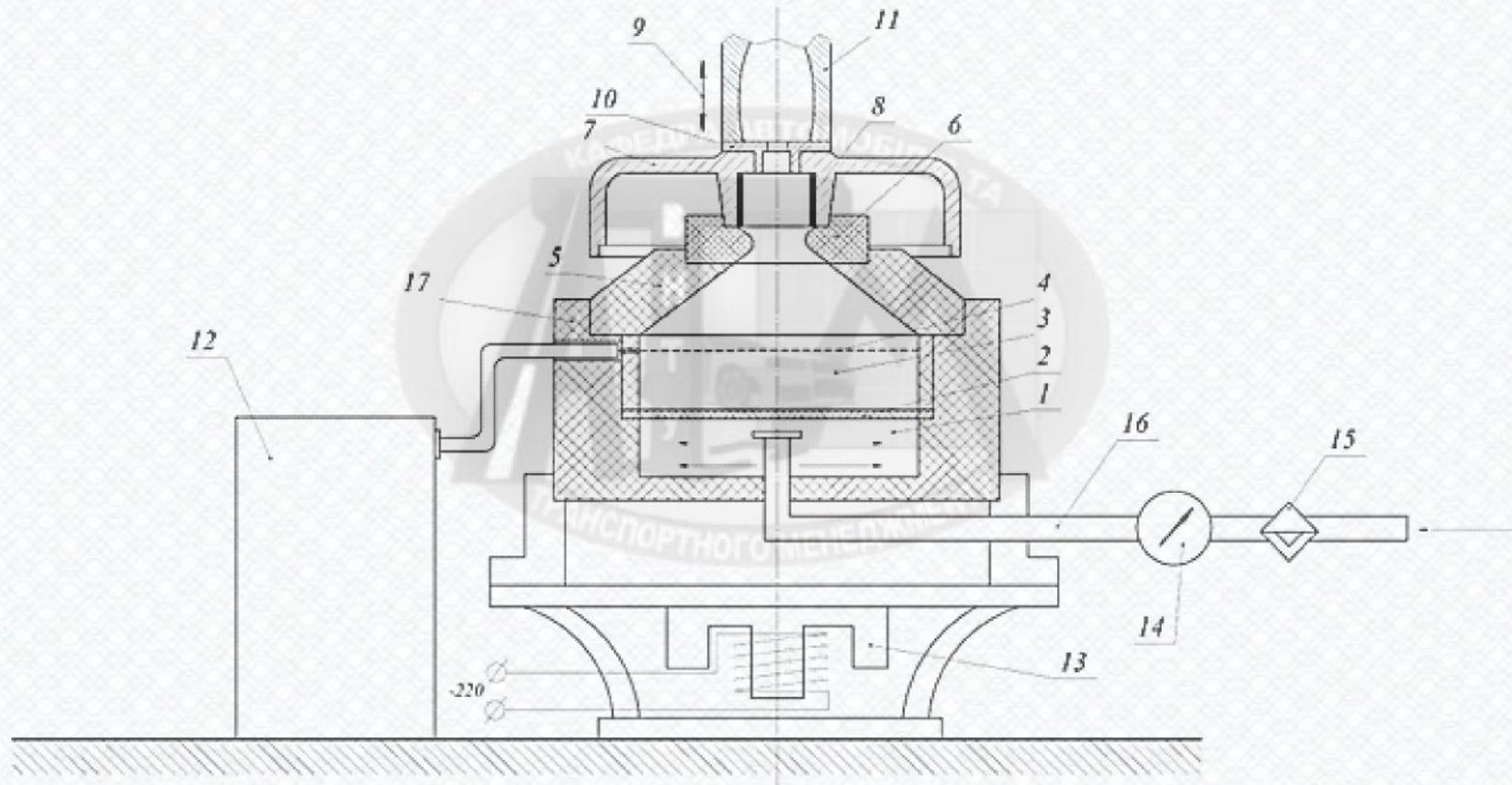


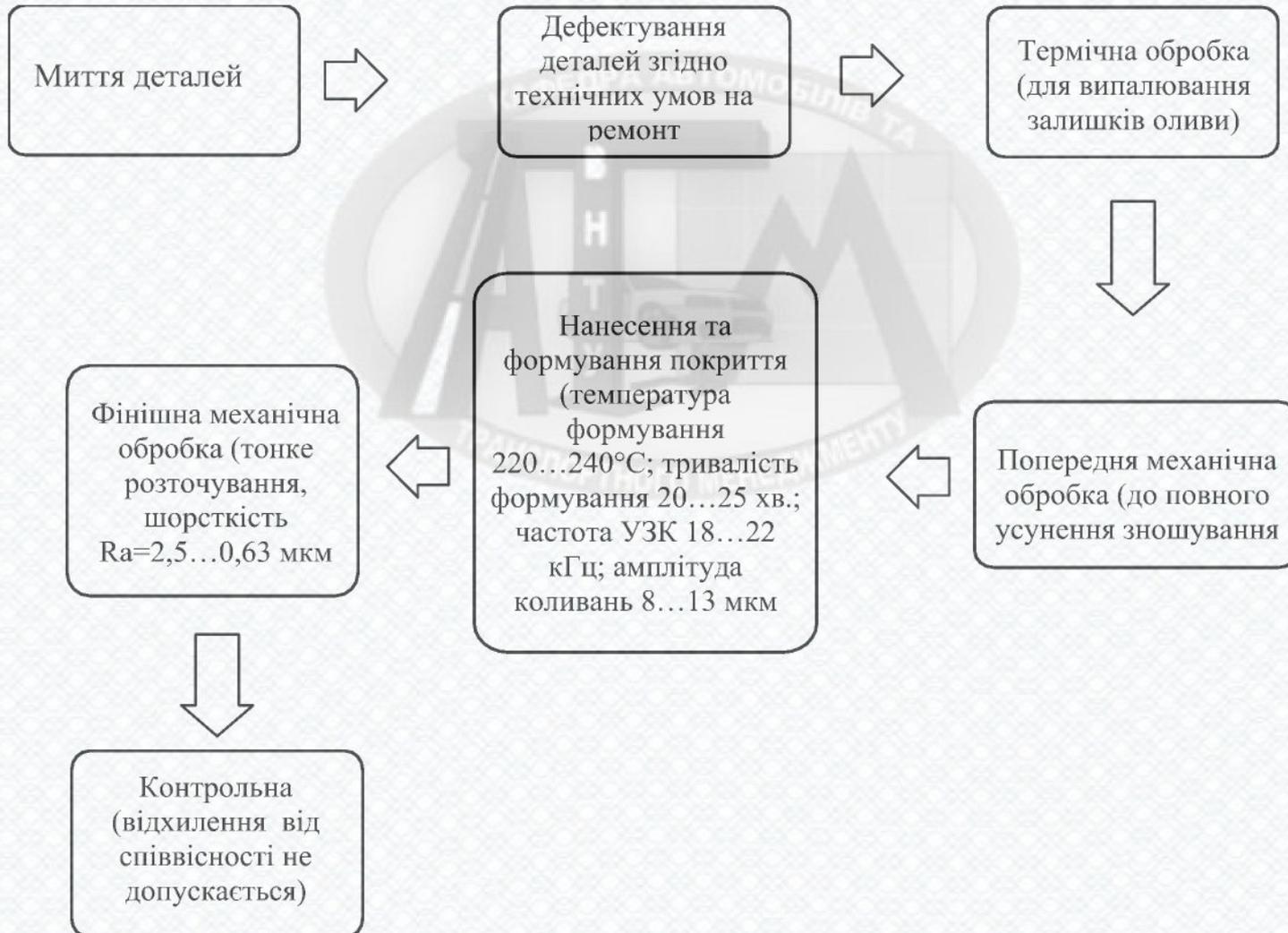
Рисунок 4 - Вплив початкового натягу на зусилля розпресування при різних діаметрах та способах з'єднання

Принципова схема установки нанесения полімерних покриттів



1 – повітряна камера; 2 – порожниста перегородка; 3 – камера наплення порошку; 4 –електродна сітка; 5-кришка; 6 – насадка; 7 - деталь, що відновлюється; 8 –покриття; 9 – затискач; 10 - упор; 11 – хвилевод; 12 – джерело високої напруги; 13 – вібратор; 14 – манометр; 15 – оливо-волого-відділювач; 16 – повітряна магістраль; 17 – корпус

Схема технологічного процесу відновлення посадкових місць підшипникових вузлів кришок генераторів



Типова маршрутна карта відновлення посадочних місць підшипникових вузлів кришок генераторів

№ та назва операції	Зміст операції	Техноогічне обладнання та оснастка	Технічні умови
1	2	3	4
1. Мийна	Промити деталь у 2-2,5% розчині МС-6 або МС-8	Ультразвукова ванна	
2. Дефекту-вальна	Виконати дефектування згідно з технічними умовами на ремонт	Вимірювальний інструмент	
3. Термічна	Термічне видалення залишків оливи та іншого бруду	Термопіч	Нагрівати деталь до температури 150-200°C, витримати при цій температурі 1,5-2 год.
4. Токарна	Розточити отвір для посадки до повного встановлення зносу	Токарно-гвинторізний верстат	Шорсткість Rz 15...30 мкм.
5. Нанесення покриття	Наносити порошкоподібну композицію на посадкові місця, що відновлюються з попередньою обробкою деталей ультразвуковим полем	Установка для нанесення полімерних покриттів	Частота $F=1822$ кГц, амплітуда, $A=8...13$ мкм, напруга на електродній сітці 40-60 кВ, тиск повітря в робочій камери 0,02-0,08 МПа, тривалість напилення 15-60 с.
6. Формування покриття	Формування покриття в ультразвуковому полі.	Установка для формування покриттів в ультразвуковому полі	Частота УЗК 18-22 кГц, амплітуда УЗК 8...13 мкм, температура формування 200-220 °С, тривалість формування 16-25 хв.
7. Токарна (тонке розточування)	Розточити посадковий отвір	Токарно-гвинторізний верстат	Шорсткість Rz 2,5...0,63 мкм
8. Контрольна	Виконати повний контроль деталі відповідно до технічних умов на ремонт	-	

Висновки

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішено питання відновлення посадкових місць підшипникових вузлів на прикладі автомобільних генераторів в умовах спеціалізованого автосервісу.

1. Проведений аналіз існуючих методів відновлення посадкових поверхонь підшипникових вузлів на автомобільному транспорті, дозволив встановити, що найбільш перспективним є метод, заснований на використанні полімерних покриттів на основі порошкових композицій. Проте наявні матеріали та існуючі технології нанесення порошкових композицій не гарантують необхідного рівня довговічності і надійності покриттів, який би відповідав ресурсу нової деталі.

2. Аналіз структури і стану ВТБ спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice», дозволив встановити, що наявна ВТБ і цілому відповідає технологічним вимогам. З метою підвищення ефективності виконання ремонтних робіт та їх якості є потреба у впровадженні більш сучасних технологічних процесів відновлення деталей стартерів та генераторів.

3. Для дослідження надійності та довговічності відновлених підшипникових вузлів нанесенням порошкових композицій сформовано математичні моделі формування внутрішніх тріщин під дією постійних та циклічних навантажень в ремонтному полімерному матеріалі зі змінними властивостями. Для підвищення міцності адгезійного з'єднання композиційних порошкоподібних полімерів з металевою основою обґрунтовано доцільність впливу ультразвуковими коливаннями.

4. Визначено поле допуску та шорсткість посадкових поверхонь, відновлених розробленою композицією, з умов забезпечення найвищої довговічності та найбільшої міцності зчеплення. Рекомендується посадка N7 для деталей, що підлягають одноразовому складанню, і P7 для деталей, що підлягають багаторазовому складанню, шорсткість покриття $Ra=2,5\text{...}0,63$ мкм. Встановлено, що запропонований склад композиції, нанесений за оптимальних умов на зношені посадкові місця підшипникових вузлів автомобілів, дозволяє проводити багаторазовий монтаж та демонтаж підшипникового вузла та експлуатувати його за значних навантажень (до 7 кН).

5. Розроблено технологічний процес відновлення зношених місць підшипникових вузлів кришок генераторів автомобілів за допомогою полімерного матеріалу, що рекомендується.

6. Розроблено концептуальну схему обладнання для нанесення полімерного покриття на поверхні підшипникових вузлів автомобільних генераторів. Розроблено рекомендації щодо вибору технологічних режимів та параметрів процесу відновлення: температура формування $200\text{..}220^{\circ}\text{C}$, тривалість формування покриттів 16..25 хв, частота ультразвукових коливань 18..22 кГц, амплітуда 8..13 мкм.

7. Розрахунок оціночного економічного ефекту від впровадження технологічного процесу відновлення партії (50 кришок генераторів) зношених деталей в умовах спеціалізованого автосервісного підприємства «Startservice» склав 80605 грн. Оціночний термін окупності склав 6,2 роки.

Додаток Б
(обов'язковий)

**Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових
запозичень**



ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Удосконалення технології відновлення посадкових місць підшипників в умовах спеціалізованого автосервісного підприємства «StartService» місто Вінниця

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КПІ) 0,5 %

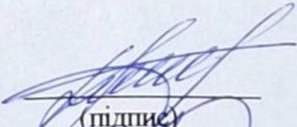
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

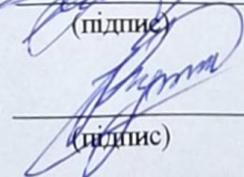
Цимбал С.В., завідувач кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)

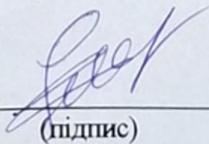

(підпис)

Кужель В.П., доцент кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

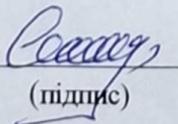
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Цимбал О.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

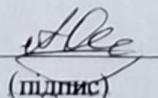
Керівник


(підпис)

Смирнов Є.В., доцент кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Андрощук О.С.

(прізвище, ініціали)