

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»


Освітньо-професійна програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»


на тему: «Відновлення посадкових місць під підшипники автомобілів із
застосуванням полімерних композиційних матеріалів»

Шифр: МРТАМ 22.171221.000. ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група МТВАм -21-1  Ю.М. Голянтус

Керівник

 д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ  Диха О.В.
1 17 2022 р.

Хмельницький, 2022 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»
Спеціалізація: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедрою ТАМ
 Диха О.В.
" 15 " жовтня 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ

Голянтус Юрію Миколайовичу

1. Тема проекту:

«Відновлення посадкових місць під підшипники автомобілів із застосуванням полімерних композиційних матеріалів»

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 01 липня 2022р. № 83

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 15.12.2022 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) Технічні умови на технологію виготовлення виготовлення підшипникових вузлів підвіски автомобіля.
- 2) Річна програма ремонту деталей.
- 3) Матеріали переддипломної практики.
- 4) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

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

1. Аналіз технологій відновлення полімерними матеріалами підшипникових вузлів автомобіля
2. Матеріали, технологічне та лабораторне устаткування
3. Моделювання міцнісних властивостей поверхонь, відновлених полімерними матеріалами
4. Вплив технологічних режимів на фізико-механічні властивості покриттів
5. Розробка технології відновлення посадочних місць підшипникових вузлів камерним електростатичним способом

5. Консультанти розділів роботи

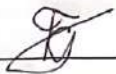
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

6. Дата видачі завдання: 15 жовтня 2022р.

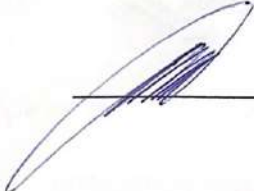
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту (роботи) | Строк виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| 1 | Аналіз технологій відновлення полімерними матеріалами підшипникових вузлів автомобіля | 1.11.2022 | |
| 2 | Матеріали, технологічне та лабораторне устаткування | 15.11.2022 | |
| 3 | Моделювання міцнісних властивостей поверхонь, відновлених полімерними матеріалами | 1.12.2022 | |
| 4 | Вплив технологічних режимів на фізико-механічні властивості покриттів | 5.12.2022 | |
| 5 | Розробка технології відновлення посадочних місць підшипникових вузлів камерним електростатичним способом | 15.12.2022 | |
| 6 | Оформлення презентаційних матеріалів | 15.12.2022 | |

Студент

 Голянтус Ю.М.

Керівник роботи

 Диха О.В.

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 105 сторінок, кількість рисунків – 29, таблиць – 7, додатків – 2, кількість джерел згідно із переліком посилань – 77.
Студент гр. МТВАм-21-1 Голянтус Ю.М.

Тема «Відновлення посадкових місць під підшипники автомобілів із застосуванням полімерних композиційних матеріалів»

Дана магістерська дипломна робота спрямована на розробку ефективної технології відновлення посадкових місць під підшипники автомобілів із застосуванням способів відновлення та полімерних композиційних матеріалів.





Відповідно до мети вирішувались завдання:

1. Визначення причини відмов та їх вплив на довговічність підшипникових вузлів автотранспортної техніки.
2. Проведення оптимізації складу ремонтної порошкової композиції для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів у поєднаному електростатичному та ультразвуковому полі (УЗП).
3. Визначення впливу технологічних режимів на фізико-механічні властивості покриттів із розробленої ремонтної порошкової композиції.
4. Дослідження працездатності підшипникових вузлів автомобілів, відновлених із застосуванням технології та розроблених полімерних композиційних матеріалів.
5. Розробка технологічного процесу нанесення нового полімерного матеріалу на зношені поверхні вузлів підшипникових автомобілів.

Перелік ключових слів: підшипник, автомобіль, полімерні композити, ультразвукове поле

ЗМІСТ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП..... | 6 |
| 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВТОМОБІЛЯ..... | 8 |
| 1.1. Аналіз довговічності підшипникових вузлів автотранспортної техніки..... | 8 |
| 1.2. Аналіз причин відмов підшипникових вузлів автотранспортної техніки..... | 11 |
| 1.3. Аналіз способів відновлення нерухомих з'єднань підшипників..... | 14 |
| 1.4. Аналіз довговічності полімерних матеріалів та відновлених ними зношених підшипникових вузлів..... | 17 |
| 2. МАТЕРІАЛИ, ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ЛАБОРАТОРНЕ УСТАТКУВАННЯ..... | 26 |
| 2.1. Аналіз використаних конструкційних матеріалів..... | 26 |
| 2.2. Технологічне і лабораторне устаткування для відновлення підшипників..... | 29 |
| 2.3. Планування експерименту та оцінка достовірності результатів досліджень..... | 37 |
| 3. МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ, ВІДНОВЛЕНИХ ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ..... | 39 |
| 3.1. Модель розвитку втомних тріщин у старіючих матеріалах..... | 39 |
| 3.2. Дослідження адгезійної складової міцності полімерних матеріалів при формуванні покриттів..... | 43 |

| | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| МРТАМ 22. 171221.000. ПЗ | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |
| | | Гольягус |  | |
| | | Диха |  | |
| | | Бабак |  | |
| | | Диха |  | |
| Відновлення посадкових місць під підшипники автомобілів із застосуванням полімерних композиційних матеріалів | | | | |
| | | Літ. | Аркуш | Аркушів |
| | | 4 | 105 | |
| ХНУ, гр. МТВАм-21-1 | | | | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 4. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ..... | 60 |
| 4.1. Вимоги до покриття при відновленні посадкових місць підшипникових вузлів..... | 60 |
| 4.2.Вплив умов формування на волого-, маслопоглинання та щільність покриттів..... | 62 |
| 4.3.Чинники, що впливають на працездатність підшипникових вузлів автомобілів..... | 66 |
| 5.РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДОЧНИХ МІСЦЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ КАМЕРНИМ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИМ СПОСОБОМ..... | 73 |
| 5.1.Загальний опис технологічного процесу..... | 73 |
| 5.2.Розробка технологічного обладнання та оснащення..... | 75 |
| 5.3.Розробка технологічного процесу..... | 80 |
| ВИСНОВКИ..... | 86 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ..... | 87 |
| Додатки..... | 95 |

ВСТУП

Підвищення ефективності використання автотранспортної техніки є найважливішою економічною проблемою. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити нові конструкційні матеріали та технологічні процеси ремонту автомобілів за умов експлуатації.

Однією з основних завдань у автомобілебудуванні є підвищення надійності (довговічності та безвідмовності) конструктивних елементів.

Значний вплив на довговічність автомобільної техніки має стан підшипникових вузлів опор кочення, режими, роботи яких характеризуються специфічними умовами експлуатації та ремонту. Відповідно до цього перед ремонтним виробництвом ставиться завдання покращення якості відновлення посадкових місць під підшипникові вузли, що забезпечують працездатність та довговічність автомобіля. Спосіб відновлення повинен забезпечити високу надійність та довговічність відремонтованих конструктивних елементів автомобілів при експлуатації у важких транспортних режимах за нерівномірних навантажень та впливу несприятливих кліматичних умов.

Відновлені підшипникові вузли повинні мати можливість багаторазового демонтажу та монтажу при технічному обслуговуванні та ремонті автомобілів. Тому завдання вдосконалення існуючих та створення нових конструкційних матеріалів та технологічних методів відновлення посадкових місць під підшипники автомобілів є дуже актуальним.

Вирішальне значення при цьому набуває використання полімерних матеріалів та композицій на їх основі. Розробка складу полімерного композиційного матеріалу дозволяє отримати покриття пошкоджених поверхонь деталей автомобіля із заздалегідь заданими властивостями. Розроблений процес нанесення полімерного шару на зношені поверхні легко піддається механізації та автоматизації, забезпечує безвідходну технологію; поверхні, покриті полімерами, не піддаються корозії, можуть

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 6 |

експлуатуватися у важких динамічних режимах роботи у агресивних середовищах.

Аналіз даних літератури показує, що для відновлення посадкових місць під підшипники найбільш прийнятними є порошкоподібні композиції, а спрямована зміна властивостей полімерів під час їх переробки шляхом оптимізації складу композиції, інтенсифікації процесу формування адгезійних сполук є одним з найбільш доцільних шляхів створення покриттів з високими та стабільними фізико-механічними властивості. Однак у практиці ремонту автомобілів відновлення зазначених деталей порошкоподібними композиціями, сформованими за умов силового впливу, досі не застосовувалося.

Метою магістерської роботи є розробка ефективної технології відновлення посадкових місць під підшипники автомобілів із застосуванням способів відновлення та полімерних композиційних матеріалів.

Відповідно до мети поставлено такі основні завдання:

1. Визначити причини відмов та їх вплив на довговічність підшипникових вузлів автотранспортної техніки.
2. Провести оптимізацію складу ремонтної порошкової композиції для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів у поєднаному електростатичному та ультразвуковому полі (УЗП).
3. Визначити вплив технологічних режимів на фізико-механічні властивості покриттів із розробленої ремонтної порошкової композиції.
4. Дослідити працездатність підшипникових вузлів автомобілів, відновлених із застосуванням нової технології та розроблених полімерних композиційних матеріалів.
5. Розробити технологічний процес нанесення нового полімерного матеріалу на зношені поверхні вузлів підшипникових автомобілів.

| | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|-------------------------|------|
| | | | | | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | | 7 |

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВТОМОБІЛЯ

1.1. Аналіз довговічності підшипникових вузлів автотранспортної техніки

Ускладнення конструкції автомобілів, посилення вимог до їх робочих характеристик разом із вимогами щодо зниження металоємності та економічності пред'являють нові вимоги щодо забезпечення надійності та довговічності.

Як відомо, довговічність автомобільної техніки закладається на стадії конструювання, забезпечується на стадії виробництва і реалізується при експлуатації.

Для забезпечення довговічності автомобілів потрібне проведення комплексу відповідних заходів на всіх трьох стадіях її існування [1].

Експлуатація автомобільної техніки є найбільш тривалим періодом життєвого циклу виробу, повнота реалізованих можливостей у процесі експлуатації автомобілів визначається прийнятою системою технічного обслуговування та ремонту (ТОiP), технологічним обладнанням, якістю експлуатаційних матеріалів, кваліфікацією та мотивацією обслуговуючого персоналу, прийнятими технологічними процесами відновлення працездатності.

Розробка заходів щодо забезпечення довговічності автомобільної техніки повинна базуватись на результатах досліджень процесів, що відбуваються у її елементах у період роботи в умовах експлуатації. До таких процесів входять:

- процеси зміни параметрів деталей внаслідок зношування;
- старіння та втома матеріалів деталей;
- процеси зміни параметрів деталей внаслідок пластичних-деформацій;
- процеси зміни показників фізико-механічних властивостей

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 8 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

експлуатаційних матеріалів та матеріалів деталей під впливом навколишнього середовища у період експлуатації автомобілів.

Усі ці процеси ведуть до зниження працездатності та є причинами відмов.

Найважливішою складовою технічної експлуатації та інструментом підтримки працездатного стану рухомого складу є система ТО та ремонту.

Метою системи ТО та ремонту відповідно до ГОСТ 28.001-83 є управління технічним станом виробів протягом їх терміну служби або ресурсу до списання, що дозволяє забезпечити: заданий рівень (коефіцієнт) готовності виробів (α_T) до використання за призначенням та їх працездатність у процесі експлуатації ; мінімальні витрати часу, праці та коштів.

Таким чином, рівень (коефіцієнт) готовності є як показником ефективності роботи рухомого складу, так і - роботи технічної служби підприємств.

У сучасних умовах розвитку підприємств автомобільної галузі використовується рухомий склад як вітчизняного виробництва так і країн далекого зарубіжжя, технічне обслуговування яких регламентується за наведеними в сервісних книжках даними, в яких не вказуються дні простою автомобілів в ТО та ТР. Капітальний ремонт повнокомплектних автомобілів так само не проводиться, тому розрахувати величину прогнозованого рівня (коефіцієнта) технічної готовності за раніше відомими нормативами неможливо.

При розрахунку рівня (коефіцієнта) технічної готовності враховуються простої рухомого складу, що з виведенням автомобіля з експлуатації тобто. простої в ТО-2 та ТР.

Таким чином, на рівень технічної готовності впливають такі фактори.

як:

- інтенсивності експлуатації (пробіг автомобіля на добу);

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 9 |

- термін служби автомобіля.

Очевидно, що працездатність і довговічність автомобіля як складові показники рівня технічної готовності залежать від простою автомобіля в технічному обслуговуванні та поточному ремонті, а також пробігу автомобіля (напрацювання) до списання. Оскільки величина пробігу до списання закладається при конструюванні та не може змінюватися на стадії експлуатації, першочерговим завданням технічної експлуатації є зниження простоїв у ТО та ремонті шляхом удосконалення існуючих та створення нових технологічних та конструкторських розробок, застосування ефективних матеріалів та способів відновлення деталей та вузлів автомобілів. Підшипникові вузли відносяться до категорії найбільш численних елементів конструкції сучасної автотранспортної техніки, та до значної ступеня впливають на її довговічність та працездатність.

Напрацювання вцент підшипникових вузлів опор кочення залежить від посадки зовнішнього кільця в поєднанні корпусних деталей і на осях сполучень внутрішнього кільця підшипника.

Утворення зазору в поверхнях, що сполучаються підшипникових улов призводить до перерозподілу навантаження в опорах кочення, і як наслідок зниження довговічності підшипникового вузла.

Чинники, що впливають на довговічність підшипникового вузла, можна умовно поділити на дві групи:

- експлуатаційні;
- конструкторсько-технологічні.

Класифікація чинників, які впливають довговічність підшипникового вузла наведено рисунку 1.1.

До конструктивно-технологічних факторів, що впливають на довговічність підшипникового вузла, можна віднести:

- технологію виготовлення;
- досконалість конструкції.

До експлуатаційним факторів, що впливає на довговічність

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 10 |

підшипникового вузла можна віднести:

- дотримання правил експлуатації;
 - дотримання системи планово-попереджувальних ТО та ремонтів.
- Недотримання системи ППР в частини мастильно-заправних робіт, збільшення пробігів до заміни фільтруючих елементів і несвоєчасне регулювання опор кочення призводить до інтенсифікації процесу накопичення абразивних частинок, перегріву підшипникових вузлів, зміни фізико-механічних властивостей масел і як наслідок різкого збільшення зносу підшипникового вузла.

Відмінності від технології виробництва та ремонтних робіт призводять до дефектів посадкових місць підшипникових вузлів, таких як конусність та овальність, що є наслідком нерівномірного розподілу навантаження між тілами кочення та сприяють втомному руйнуванню поверхонь кочення. Недотримання співвісності посадкових місць і шийок валів призводить до перекосу кілець, затискання тіл кочення та поломки деталей підшипників.

Довговічність підшипникових вузлів більшою мірою залежить від якості складання, яка забезпечується підбором оптимальної посадки деталей, що сполучаються.

Ослаблення посадок деталей, що сполучаються, підшипників у підшипникових вузлах призводить до прокручування кілець і як наслідок інтенсифікації процесу зношування посадкових місць підшипникового вузла [2].

1.2. Аналіз причин відмов підшипникових вузлів автотранспортної техніки

Досвід використання автомобільної техніки, численні дослідження проведені в галузі вивчення довговічності та різних експлуатаційних властивостей, підшипникових вузлів показують, що зношування або невідповідність лінійних розмірів та геометричної форми посадкових місць нормативним вимогам призводять до порушення скоординованого

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 11 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

розташування всіх деталей механізмів. В результаті цього збільшуються статичні та динамічні навантаження на деталі механізмів, підвищується інтенсивність зносу посадкових місць та елементів підшипників кочення. зміни залишкових лінійних напруг.

Лангертом В.А. одночасно зазначається, що зношування посадкового місця підшипникового вузла має, переважно, правосторонню асиметрію, підпорядковується закону розподілу Вейбулла з гарним узгодженням за критерієм Пірсона.

Відповідно до [3] основними причинами зношування посадкових місць підшипників кочення є проворот кілець і фреттинг-корозія.

Фреттинг-корозія є особливим видом зношування номінально нерухомих, сполучених між собою металевих поверхонь виявляється в результаті зворотно-поступальних переміщень із певною амплітудою. Причинами переміщення є: вібрація, динамічні навантаження, вигин або скручування деталей, що контактують [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Інтенсивність руйнування сполучених металевих поверхонь при фреттинг-корозії залежить від фізичних (відносна твердість поверхонь, температура тощо), параметрів зовнішнього механічного впливу (амплітуда відносного зміщення, питома контактне навантаження, частота коливань, кількість циклів навантаження), 9].

Слід зазначити, що результат фреттинг-корозії призводить до значного зниження міцності втоми і як наслідок збільшення зносу сполучених поверхонь по параболічній залежності [9, 10, 11].

Згідно з проведеними дослідженнями [12, 13] відомо, «що обсяг матеріалу, що видаляється, можна вважати пропорційним числу циклів навантаження, при цьому максимальне зношування контактуючих поверхонь спостерігається при частоті 10...25 Гц, а зі збільшенням понад 25 Гц величина зносу знижується і знаходиться певному рівні» [11, 14].

Зі збільшенням кількості циклів навантаження знос зростає за лінійною залежністю [8, 15].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 12 |

Знос посадкових місць підшипників кочення значною мірою обумовлює появу зазору між кільцями підшипників і поверхнями, що сполучаються корпусних деталей і валів, що призводить до зниження ресурсу підшипникового вузла.

Згідно з результатами роботи [16], виявлено, що «при зносі отвору на 0,05 мм питоме навантаження на зуб шестірні коробки зміни передач збільшується на 25%, а ресурс знижується в рази. Ці факти підтвердили спостереження за роботою коробок передач, зібраних із нових деталей у невідремнтованому корпусі. Ресурс таких агрегатів становив 30...40% до ремонтного ресурсу нових коробок передач».

Підвищений знос посадкових місць підшипникових вузлів причиною зменшення плями контакту в зачепленні зубчастих коліс та причиною самовимкнення передач.

За результатами досліджень [17, 18, 19] показано «що зношування посадкових місць під підшипники в корпусах коробок передач ЗІЛ-130 становить 0,08...0,18 мм, а овальність і конусність - 0,01...0,03 мм, внаслідок чого до 90% корпусів коробок вимагають відновлення».

Слід зазначити, що дані, наведені в літературних джерелах, належать в основному до деталей вузлів трансмісій автомобільної техніки. У літературі відсутні дані про причини пошкоджень, величину та характер зносу посадкових місць підшипникових вузлів агрегатів електрообладнання автомобілів.

У зв'язку з чим проведено аналіз ремонтного фонду та характеру зношування посадкових місць під підшипники кришок генераторів на транспортних підприємствах України. Аналіз результатів вимірювань показав, що найбільша подібність розподілу зносу забезпечується законом розподілу Вейбулла, у якого всім партій деталей $P(x_2) > P(0,1)$. Це стало основою прийняття закону розподілу Вейбулла як теоретичного закону розподілу.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 13 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

З гістограми розподілу видно, що атними для подальшої експлуатації є 36% кришок генераторів автомобілів через знос посадкових місць під підшипники.

Таким чином, підлягають відновленню 64% кришок генераторів автомобілів, відправлених на ремонт (з них 54% мають зношування менше 0,12 мм). Максимальний знос становить $U_{\max} = 0,24$ мм.

1.3. Аналіз способів відновлення нерухомих з'єднань підшипників

Найбільш докладний та глибокий аналіз способів відновлення посадкових місць підшипникових вузлів кочення представлений у роботі [20]. Дана класифікація способів рисунок 1.3, описані основні переваги та недоліки, наведено порівняльні характеристики існуючих способів відновлення.

Більшість способів відновлення посадкових місць підшипникових вузлів мають загальні недоліки:

- потреба у дорогому технологічному обладнанні;
- складність технологічного процесу;
- необхідність механічних впливів на відновлені деталі;
- висока трудо-, енерго- та матеріаломісткість і як наслідок собівартість операції.

Відповідно до [21] трудомісткість відновлення становить 10...120 год/м², енергоємність 100...256 кВт×ч/м³, витрата матеріалу 1,5...50 кг/м², а основну причину зношування посадкових місць підшипників кочення – фреттинг-корозію не запобігають.

Застосування полімерних матеріалів при відновленні посадкових місць підшипникових вузлів виключають перелічені вище недоліки [3, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

Відновлення нерухомих з'єднань підшипникових вузлів ремонтними полімерними матеріалами здійснюється двома способами:

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 14 |

- нанесенням полімерного покриття на посадкове місце з подальшим формуванням під номінальний розмір;

- склеюванням одного з кілець підшипника з деталлю, що сполучається [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38].

Найбільш масове використання при відновленні посадкових місць підшипникових вузлів отримали епоксидні полімери та композиції на їх основі [39], які готують на основі епоксидних олігомерів та затверджувачів. Як складові елементи композиції використовуються наповнювачі (скляне борошно, залізний порошок, алюмінієва пудра та ін) і пластифікатори (дибутилфталат, діоктилфталат та ін) [40].

Епоксидні полімери та композиції на їх основі мають високі адгезійні властивості, механічну міцність, тепло-, водо-, і хімічну стійкість [14], вони здатні отверждатися при широкому спектрі температур.

Гаджієвим А.А. розроблений удосконалений спосіб формування покриттів під впливом зовнішніх силових полів, що полягає в тому, «що епоксидна композиція наноситься шпателем на зношені посадкові місця під підшипники кочення, витримується протягом 1 години на повітрі за нормальних умов з впливом на них силових полів, після чого проводиться шляхом протягування калібруючої оправки вздовж осі отвору на свердлильному верстаті. Далі проводиться затвердіння епоксидного покриття за ступінчастим режимом при температурах 30°C протягом двох годин,

100°C і 150°C, однієї та однієї години відповідно». Склад ремонтної полімерної композиції: ЕД-16 – 100 частин, АСТ-Т – 35 частин, дибутилфталат – 20 частин, АФ-2 – 10 частин, 6Ф – 15 частин, алюмінієва пудра – 10 частин, у поєднанні з ультрозвуковою та електромагнітною обробкою дозволив значно покращити її деформаційно-міцнісні властивості.

Спосіб формування полімерної ремонтної композиції на посадочних

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 15 |

місцях підшипникових вузлів має наступні недоліки: потреба в розточувальному та пресовому устаткуванні, тривалість формування та затвердіння нанесеного покриття.

Зазначені недоліки вищенаведеного способу відновлення усуваються шляхом склеювання кільця підшипника з корпусною деталлю опори кочення.

Найбільшого поширення за відновлення нерухомих сполук шляхом склеювання отримали анаеробні герметики, т.к. вони мають хорошу адгезію до металів, стійкістю до дії води, олії, палива, органічних розчинників, кислот, лугів та інших хімічних речовин, зберігаючи свої споживчі властивості після затвердіння в інтервалі температур 60-150°C. [42, 43, 44]. На вітчизняному ринку найпоширенішим виробником герметиків є ФДУП «НДІ полімерів ім. академіка Каргіна», що випускає велику кількість герметиків марок «Анатерм» та «Унігерм», з імпортних постачальників герметиків найпоширенішими фірмами є «LOCTAIT» та «THREEBOND».

При вклеюванні зовнішнього кільця в отвір корпусної деталі використовуються спеціальні центруючі пристрої, що дозволяють забезпечити необхідну співвісність. Найбільшого поширення при використанні зазначеної технології набули анаеробні герметики серії АН та УГ [20, 21, 36, 37, 11, 14, 40].

Анаеробні герметики, що застосовуються при відновленні підшипникових вузлів опор кочення, підвищують довговічність у 3,6 рази порівняно з новими [36] завдяки перерозподілу навантаження між тілами кочення [45].

Недоліком способу є потреба в спеціальних центруючих пристосуваннях, необхідність вертикального розташування з'єднання, низька стійкість герметиків до циклічних навантажень, що призводить до утворення тріщин.

Зазначений недолік вирішується запровадженням дисперсних

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 16 |

наповнювачів, у тому числі нанорозмірних частинок. Введення нанорозмірних частинок в анаеробні герметики підвищує їхню міцність і витривалість, скорочує час затвердіння, підвищує ресурс до 1,42 рази порівняно з ненаповненими полімерними матеріалами [46].

1.4. Аналіз довговічності полімерних матеріалів та відновлених ними зношених підшипникових вузлів.

Згідно з наведеним вище аналізом, найпростішим способом підвищення довговічності зношених місць підшипникових вузлів при ремонті рухомого складу є їх відновлення ремонтними полімерними матеріалами. Цей спосіб повністю виключає контакт сполучених поверхонь, що сприяє зниженню динамічних навантажень і запобігає повертанням зовнішнього кільця підшипника.

Різка відмінність в'язкопружних фізико-механічних та теплофізичних властивостей металів та полімерів впливає на характер прояву та розвитку напруг у нерухомому поєднанні з полімерним покриттям у навантаженому стані [3].

Число циклів при динамічному навантаженні впливає на довговічність підшипникових вузлів, так згідно робіт [20], виявлено, «що при динамічному навантаженні та посадці підшипника без полімерного покриття найменшою довговічністю мають з'єднання із зазором у поєднанні 0,02 мм (рисунок 1.1, крива 1 а довговічність нерухомого з'єднання з натягом 0,02 мм в 2 рази вище (рисунок 1.1 крива 2). При випробуванні протягом 270 годин підшипника кочення з полімерним покриттям з термообробленого герметика 6Ф зношування посадкового отвору не виявлено».

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 17 |

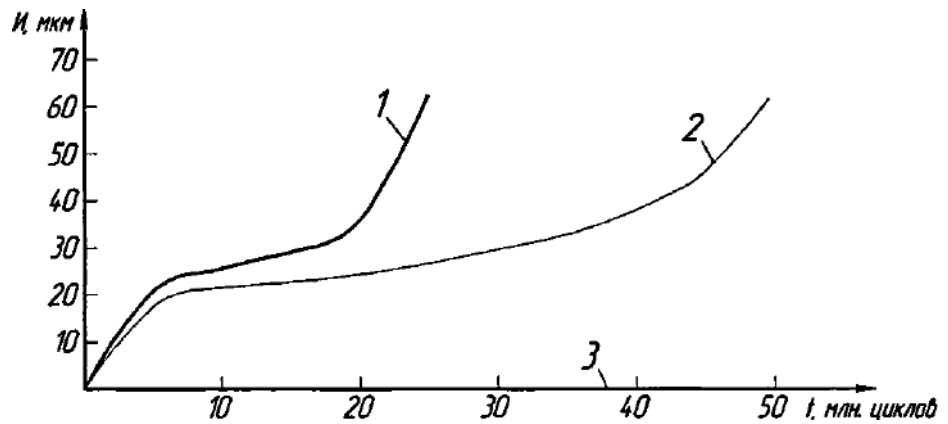


Рисунок 1.1 - Залежність зношування посадкових місць від напрацювання при різних видах нерухомих з'єднань: 1 - посадка із зазором 0,02 мм; 2 посадка з натягом 0,02 мм; 3 з покриттям посадкового місця підшипника кочення термообробленим герметиком 6Ф

Динамічні навантаження, що виникають у вузлах автомобілів, при його експлуатації змінюються з часом за знаком і значенням. Такий вид навантаження називається циклічним. Розрізняють такі види циклів навантаження: знак постійний цикл (рис. 1.2. а) - напруга змінює лише числове значення; знакозмінний цикл (рис. 1.2. б) - цикл, в якому напруга змінюється за знаком і значенням; пульсуючий цикл (рис. 1.2. в) - знакопостійний цикл, у якому напруга змінюється від нуля до максимального значення; симетричний цикл (рис. 1.2. г) - знакозмінний цикл, у якому абсолютні значення максимальної напруги різного знака рівні [47].

Під дією циклічних навантажень у нерухомих з'єднаннях підшипникових вузлів, відновлених полімерними матеріалами, виникають напруження стиснення, зсуву та розтягування. Тривале вплив цих напруг призводить до поступового накопичення пошкоджень у шарі полімерного матеріалу, що призводить до утворення та розвитку тріщин і як наслідок руйнування деталі.

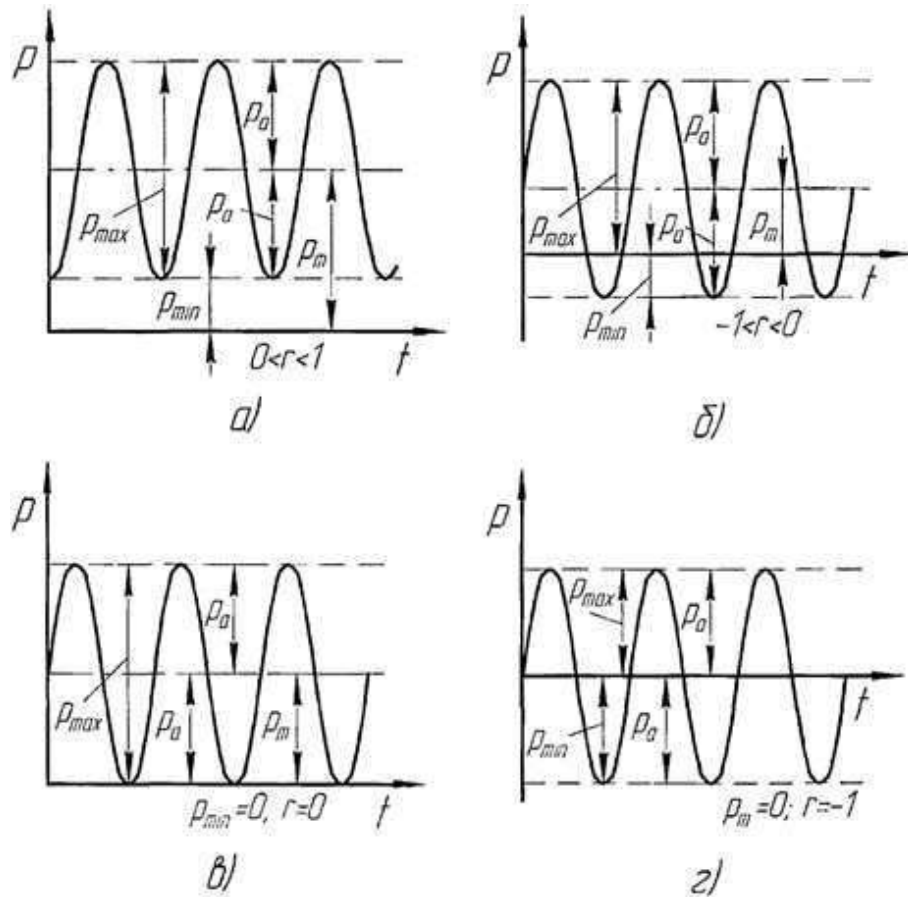


Рисунок 1.2 – Види циклічного навантаження: а – знакопостійний цикл; б - знакозмінний цикл; в – пульсуючий цикл; г – симетричний цикл.

Модель руйнування ремонтних полімерних композиційних матеріалів, що використовуються при відновленні посадкових місць підшипникових вузлів, складається з трьох етапів і представлена на рисунку 1.6 [48, 49, 50].

На першому етапі відбувається накопичення напруги, які сприяють появі локальних розривів міжмолекулярних зв'язків, що призводить до зародження мікротріщин. На другому етапі подальша дія циклічних навантажень сприяє накопиченню мікропор, що веде до розпушування матеріалу та подальшого зростання первинної мікротріщини.

На третьому етапі згідно [14] мікротріщина досягає мікроскопічних розмірів, миттєво проростаючи через весь переріз зразка та викликаючи його руйнування.

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|-------------------------|------------|
| | | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. 19 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | |

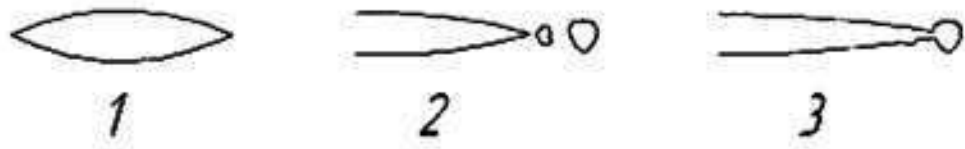


Рисунок 1.3— Модель зростання тріщини полімерному матеріалі при циклічному навантаженні.

Для визначення циклів навантаження до руйнування полімерного матеріалу при циклічному навантаженні в аналітичній формі можна застосувати залежність [51]:

$$N = K(\sigma - \sigma_v)^{-m}, \quad (1.1)$$

де N - Число циклів навантаження до руйнування; σ - напруга; σ_v - межа витривалості;

K, m - коефіцієнти, що залежать від властивостей полімерних матеріалів та режиму навантаження відповідно.

З виразу (1.1) можна подати типову залежність (рис. 1.4).

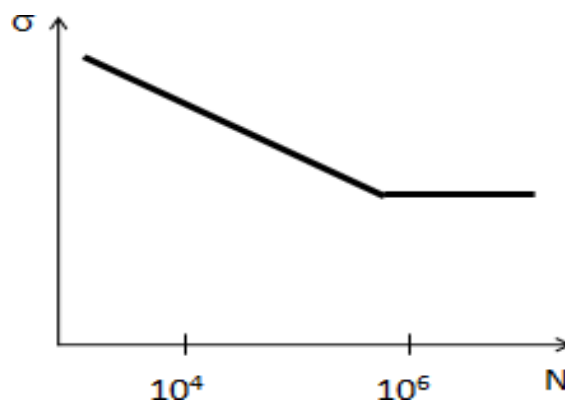


Рисунок 1.4 - Типова залежність між амплітудою напруги і логарифмом числа циклів N навантаження до руйнування ПКМ

Витривалість ремонтних композиційних полімерних матеріалів

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 20 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | |

залежить від: температурних факторів; товщини клейового шва; амплітуди деформації при циклічній нарузі та амплітуди напружень при циклічному навантаженні; середньої напруги та середньої деформації; частоти циклів навантаження.

У міру погіршення властивостей полімерних матеріалів через накопичення внутрішньої напруги, що переходять потім у мікротріщини, відбувається руйнування деталі, при цьому з виразу 1.3 видно, що кількість циклів до руйнування матеріалу залежить від його властивостей, режиму навантаження і максимальних діючих напруг.

Введення наповнювачів у тому числі нанорозмірних порошоків до складу ПКМ підвищує їхню міцність, тріщиностійкість та витривалість, збільшує їх ресурс [52]. Так порівняльний аналіз результатів стендових та експлуатаційних випробувань підшипникових вузлів, відновлених полімерними композиційними матеріалами показав, що довговічність їх вища порівняно з ненаповненими полімерними матеріалами [3, 21, 37].

Перераховані недоліки стримують широке застосування епоксидних та інших склеювальних композицій для відновлення посадкових поверхонь корпусних деталей.

Найбільш ефективно для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів є застосування термопластичних полімерів і композицій на їх основі [53]. Вибираючи той чи інший склад композиції, можна отримати покриття із заздалегідь заданими властивостями. Процес нанесення покриття легко піддається механізації та автоматизації, що практично дозволяє використовувати весь вихідний матеріал, тобто. забезпечити безвідходну технологію. Нанесені покриття мають високі фізико-механічні властивості, дозволяють отримати більшу товщину, легко піддаються механічною обробкою.

На рисунку 1.5 наведено класифікацію способів нанесення полімерних композицій, що застосовуються в ремонтному виробництві.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 21 |

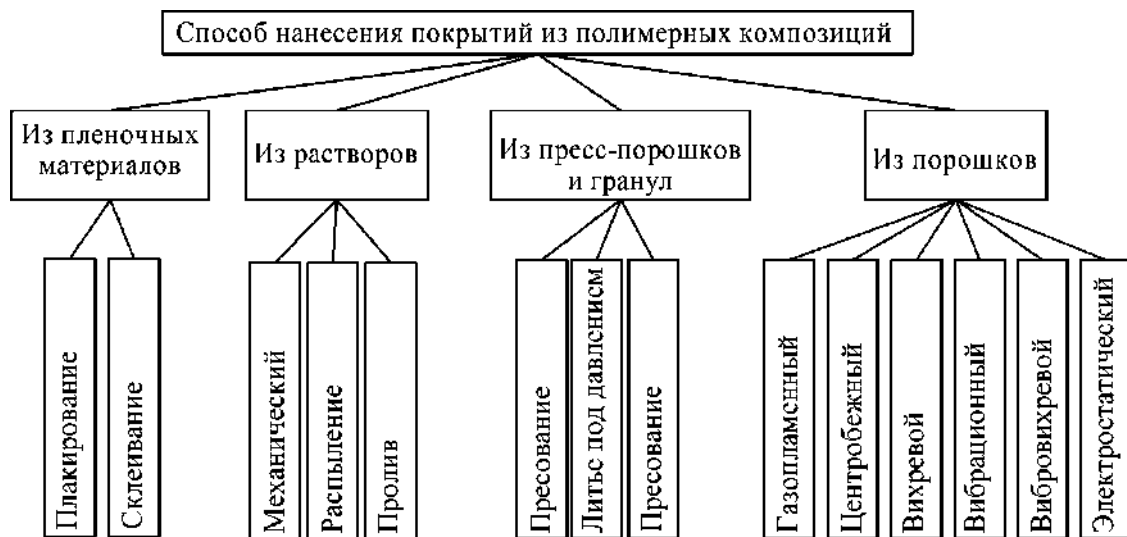


Рисунок 1.5 – Класифікація способів нанесення полімерних композицій відновлення деталей машин

З наявних способів нанесення термопластичних полімерів та їх композицій найбільш перспективним є спосіб отримання полімерних покриттів з порошкоподібних композицій, так як він є найбільш універсальним і характеризується легкістю нанесення та здатністю до тонкошарового розподілу розплаву полімеру на поверхні, що покривається.

Сутність способу отримання покриттів із порошків полягає в тому, що частинки полімеру наносяться на горючу або холодну деталь, де під дією температури оплавляються, утворюючи суцільне покриття.

Найбільш перспективним способом нанесення порошків на поверхні посадкових місць, що відновлюються, під підшипники є електростатичний. Він заснований на здатності полімерних порошків набувати електричного заряду при розміщенні їх в електростатичне поле високої напруги з подальшим їх перенесенням на деталь, що покривається [54]. Спосіб відрізняється можливістю механізації та автоматизації технологічного процесу, високою продуктивністю, легкістю регулювання товщини покриття, що дозволяє покривати вироби, виготовлені з неоднорідних матеріалів. При поєднанні електростатичного та вібровихревого (камерного)

способів можна отримати покриття завтовшки 1...2 мм [55]. Однак існуючі склади композицій для камерного електростатичного способу не забезпечують вимог сучасного ремонтного виробництва, що пред'являються до покриття, що застосовується для відновлення посадкових місць під підшипники кочення, а існуюче обладнання не дозволяє отримувати рівномірні покриття по поверхні отвору.

Аналіз існуючих способів нанесення покриттів показав, що найбільш прийнятним відновлення посадкових місць підшипникових вузлів опор кочення є камерний електростатичний спосіб. При цьому, з досвіду експлуатації, аналізу зносу посадкових місць та конструктивних особливостей зазначеного класу деталей встановлено, що потрібно вдосконалення як самого способу, так і обладнання, що застосовується.

Істотним резервом підвищення якості відновлених деталей є обґрунтування складу полімерної композиції на формування покриттів. Поряд з цим аналіз даних літератури показав, що відомі порошкоподібні полімерні композиції для електростатичного напилення не повною мірою забезпечують необхідні властивості покриттів.

Для відновлення деталей, що сприймають коливальні навантаження та працюють в агресивних середовищах, рекомендується застосовувати поліамідні покриття [56].

Перспективними є порошки на основі поліаміду 12 - полімерний матеріал, що відрізняється комплексом цінних фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей.

Покриття, отримані з П-12 мають задовільну зносостійкість, широким інтервалом температур експлуатації (-20 ... +100 ° С), добре поглинають ударні навантаження [57]. Однак частинки поліамідних порошоків при нагріванні погано зберігають електричний заряд через зниження електричного опору, що ускладнює процес отримання покриттів електричного поля. Покриття з поліамідів мають значне усадження і великі внутрішні напруги, а їх адгезійна міцність недостатня [58].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 23 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Ці особливості обмежують можливість їх використання як покриття для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів.

В даний час промисловістю освоєно випуск різних епоксидних порошкових полімерів, які використовуються в основному для створення захисно-декоративних покриттів. Зазначені порошки на відміну від поліамідних, швидше заряджаються в електричному полі та повніше концентрують заряд. Покриття, отримані з них, мають гарну адгезійну міцність і твердість [58], але застосовувати ці покриття в чистому вигляді для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів неможливо, через їхню велику крихкість і низьку зносостійкість.

Можна припустити, що властивості поліамідних покриттів можна цілеспрямовано змінювати введенням у них епоксидних олігомерів. Це має сприяти, з однієї сторони, покращення електроосадження порошкоподібних частинок композиції, підвищення адгезійної міцності, з іншого боку, поліамід повинен надати покриттям підвищену ударну міцність та гнучкість [58]. Твердість, зносостійкість та стабільність розмірів покриттів можна підвищити шляхом наповнення композиції скляним борошном [52]. Грунтуючись на апріорних даних, можна, можливо укласти, що створіння полімерної композиції на основі поліаміду П-12 та епоксидного олігомеру з використанням як наповнювач скляного борошна дозволить отримати покриття на зношених поверхнях посадкових місць підшипникових вузлів з необхідними фізико-механічними властивостями.

Таким чином, використання ремонтних композиційних полімерних матеріалів при відновленні нерухомих з'єднань підшипникових вузлів є актуальним завданням, рішення якої дозволить підвищити надійність автотранспортної техніки і знизити витрати на її технічне обслуговування і ремонт. У зв'язку з цим необхідно провести теоретичне обґрунтування підвищення довговічності ремонтних композиційних полімерних матеріалів при введенні дисперсних наповнювачів, зокрема в питанні підвищення

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

несучої здатності полімерних композицій [47].

Аналіз даних наведених у літературі та результати попередніх експериментів показав, що довговічність підшипникового вузла залежить від посадок кілець у корпусних деталях. Під час експлуатації автотранспортної техніки в підшипникових вузлах агрегатів спостерігається збільшення зазорів між сполученими поверхнями посадкових місць підшипників, що впливає на довговічність підшипникових вузлів і автомобіля в цілому. Основною причиною збільшення зазорів є зношування посадкових місць підшипників в результаті фреттинг-корозії та провертання кілець підшипників.

Перспективним напрямом відновлення посадкових місць підшипникових вузлів опор кочення автомобільної техніки є застосування полімерних покриттів з порошкоподібних композицій, проте існуючі матеріали не забезпечують отримання покриттів на зношених місцях підшипникових вузлів, здатних працювати у важких умовах.

Існуючі способи нанесення покриттів з порошкоподібних композицій не забезпечують отримання якісних покриттів, в першу чергу з високими властивостями адгезійними, що надає вирішальний вплив на довговічність відновлених деталей.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 25 |

2. МАТЕРІАЛИ, ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ЛАБОРАТОРНЕ УСТАТКУВАННЯ

2.1. Аналіз використаних конструкційних матеріалів

В роботі були досліджені: порошкоподібна композиція, спосіб отримання полімерних покриттів, фізико-механічні та експлуатаційні властивості покриттів відновлених підшипникових вузлів опор кочення, а також реологічні властивості полімерних композицій.

У зв'язку з тим, що полімерна композиція призначена для відновлення вузлів опор кочення автомобільної техніки, склад композиції обраний з урахуванням експлуатації відновлених деталей у важких експлуатаційних умовах.

Покриття, що застосовуються для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів опор кочення, повинні мати високу адгезійну і ударну міцність, стійкість до агресивних середовищ і високу стабільність розмірів при температурних змінах. Крім цього покриття, що використовуються для відновлення посадкових місць корпусних деталей, повинні забезпечити можливість багаторазового монтажу та демонтажу відновлених підшипникових вузлів (тобто мати високу зносостійкість при складанні, експлуатації та розбиранні). Таким чином, зносостійкість доцільно вважати домінуючим показником якості відновлених посадкових місць корпусних деталей та при оптимізації складу композиції прагнути досягнення її максимального значення.

Другим важливим показником якості відновлених місць корпусних деталей є можливість протистояти ударним навантаженням. Встановлено, що нормальні умови експлуатації підшипникових вузлів забезпечуються при ударній міцності покриттів щонайменше 4,6 Н·м. [59].

Слід зазначити, що важливим показником є властивості самих порошків, й у першу чергу - здатність до електроосадження. Для забезпечення нормальних умов нанесення покриттів граничне

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 26 |

електроосадження порошкоподібних композицій, призначених для нанесення в електростатичному полі, повинно бути не нижче 150 г/м².

Таким чином, полімерна композиція, що застосовується для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів, повинна забезпечити електроосадження порошкоподібної композиції не менше 150 г/м², максимальну зносостійкість при монтажі, експлуатації та демонтажі підшипникових вузлів ударну міцність покриття не менше 4,6 Н·м. Ці показники прийняті основними критеріями оптимізації складу композиції.

Інші властивості композиції можуть мати компромісні значення, але не нижче, ніж у покриттів, отриманих з чистого компонента з найгіршими показниками.

Оптимальний склад композиції визначали у два етапи. На першому етапі вибрали складові композиції та вивчали залежність фізико-механічних властивостей від процентного вмісту компонентів. З другого краю етапі здійснювали пошук оптимального складу композиції.

Вплив наповнювача на якість композиції найменш передбачуваний. Тому дослідження проводили для п'яти рівнів вмісту наповнювача.

Як критерії оптимізації складу композиції прийняті граничне електроосадження порошку, ударна міцність покриття та зносостійкість відновлених посадкових місць підшипникових вузлів при монтажі та демонтажі підшипників.

Порошкову композицію готували шляхом сухого змішування в кульовому млині протягом 1 год. при швидкості обертання барабана 80...100 м-1 з наступним просіванням через вібросито з сіткою № 0,2.

Склад композиції: поліамід 12, епоксидний олігомер П-ЕП-219 та скляне борошно.

Композицію наносили камерним електростатичним способом (рисунок 2.1) з подальшим оплавленням термопечі при температурі 220°C протягом 10 хв.

Адгезійну міцність визначали для покриттів, нанесених на зразки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 27 |

із сталі 45 та АЛ-4 за методикою, наведеною на рисунку 2.4, ударну міцність - для покриттів, нанесених на плоскі зразки. Зносостійкість посадкових з'єднань оцінювали за кількістю циклів складання-розбирання сполучень з початковим натягом 20 мкм до досягнення нульового положення випробуваних сполучень, тобто. до досягнення постійного розміру посадкового місця підшипника.

В результаті аналізу експериментальних даних отримано результати, що описують залежність фізико-механічних властивостей від процентного вмісту складових композицій:

- з збільшенням кількості П-ЕП-219 збільшується адгезійна міцність та електроосадження порошку інші показники зменшуються;
- зі збільшенням кількості пилоподібного скловолокна зростає зносостійкість при складанні, експлуатації та розбиранні;
- для аналізу ударної міцності склад композиції змінюється неоднозначно.

Пошук оптимального співвідношення компонентів, композиції показав, що максимальне значення циклів складання і розбирання з'єднань з початковим натягом 20 мкм до досягнення нульового положення дорівнює 8, а ударна міцність при цьому не знизилася нижче значення 4,6 Н·м. Таким чином, оптимальний склад композиції є: епоксидний олігомер – 32...40%, скляне борошно – 9,8...11,6%, поліамід 12 – інше.

Фізико-механічні властивості композиції для умов граничного змісту складових наведені у таблиці 2.1.

Таким чином, розроблена композиція забезпечує отримання покриттів з високою зносостійкістю ($n=8$), гарною електроосаджуваністю порошку (ЕОП - 162-174 г/м²) та високою ударною міцністю ($y = 4,6-4,9$ Н·м). Ці показники уможливають застосування композиції для відновлення зношених посадкових місць підшипникових вузлів. Однак слід зазначити, що покриття, отримані із зазначеної композиції на підкладках із сплавів

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 28 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

алюмінію, мають недостатню адгезійну міцність. Тому пошук шляхів її підвищення є актуальним, а вирішення цього питання дозволить створити надійну технологію відновлення посадкових місць підшипникових вузлів опор кочення

Таблиця 2.1 - Фізико-механічні властивості порошків та покриттів, отриманих з рекомендованої композиції

| склад композиції | | | Фізико-механічні властивості | | | | |
|------------------|------------------|-----------------------|------------------------------|---|-----------|----------------------------|-------|
| поліамід 12 | П- ЕП- 219 | скляне борош но | ЕОП, г/м ² | n | у, Н·м | адгезійна міцність, МПа | |
| | | | | | | сталь 45 | АЛ4 |
| 66,4 | 32 | 11,6 | 162 | 8 | 4,77 | 29,2 | 18,16 |
| 58,4 | 40 | 11,6 | 174 | 8 | 4,6 | 29,35 | 18,15 |
| 68,2 | 32 | 9,8 | 162 | 8 | 4,9 | 28,86 | 20,16 |
| 60,2 | 40 | 9,8 | 174 | 8 | 4,73 | 30,85 | 21,07 |

ЕОП - електроосадження порошку, г/м²;

n - кількість циклів збірок і розбирань з'єднань з початковим натягом 20 мкм до досягнення нульового положення;

у – ударна міцність Н·м;

2.2. Технологічне і лабораторне устаткування для відновлення підшипників

Процес нанесення та формування покриттів у лабораторних умовах виробляли на двох установках, одна – для нанесення та формування покриттів, інша – для вивчення розтікання розплавів полімерів.

Установка для нанесення та формування покриттів (рисунок. 2.1) складається з ванни киплячого шару 4, джерела високої напруги 13, джерела УЗК 11, коливальної системи 10 та приладів реєстрування та налагодження технологічних режимів та параметрів УЗК.

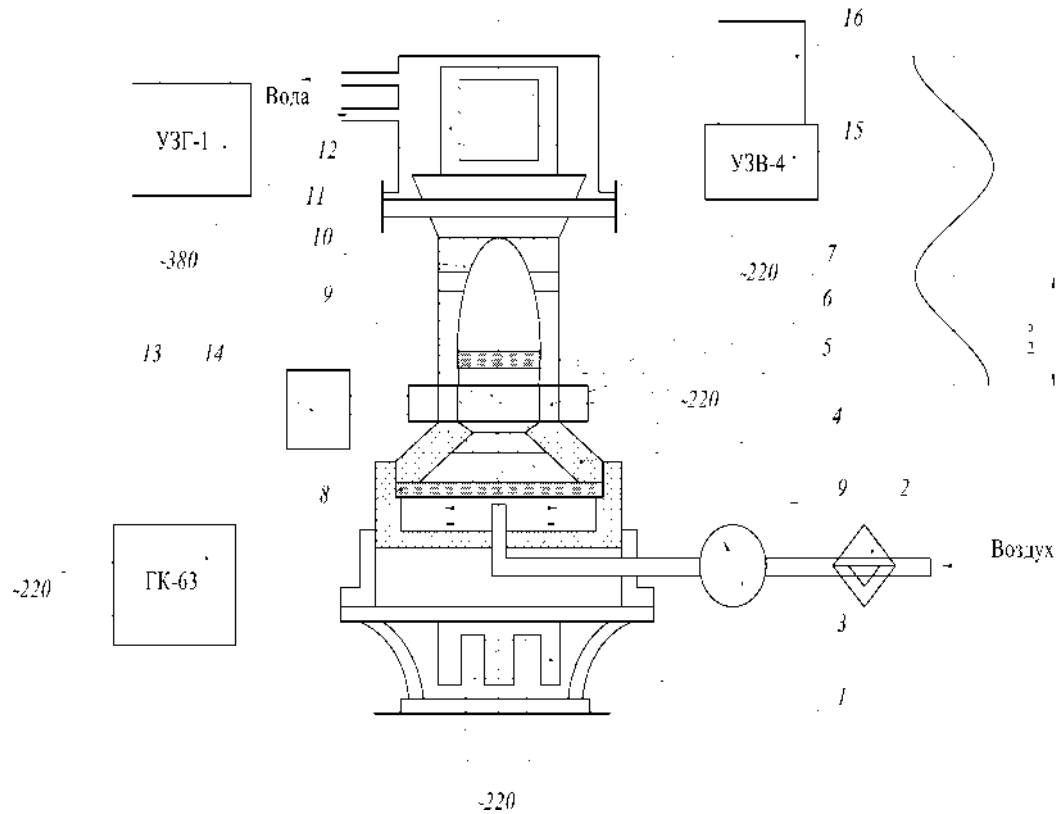


Рисунок 2.1 – Схема лабораторної установки для нанесення та формування покриттів: 1 – електромагнітний вібратор; 2 – фільтр-вогловідділювач; 3 – манометр; 4 - ванна киплячого шару; 5 – нагрівач; 6 - деталь, що покривається; 7 – полімерне покриття; 8 – кільце з електродною сіткою; 9 – пориста перегородка; 10 - хвилевід; 11 – генератор ультразвуковий; 12 - магнітострикційний перетворювач; 13 – каскадний генератор; 14 – терморегулятор; 15 – віброметр; 16 – осцилограф.

Ванна складається з трьох камер: нижня – повітряна камера, верхня – камера збору зайвого порошку та передачі ультразвукових коливань, середня – робоча камера. Ванна встановлена на електромеханічному вібраторі 1 за допомогою трьох пружних опор.

Нижня та середня камери розділені пористою перегородкою 9. Над перегородкою встановлено кільце з електродною сіткою 8, яке підключено до

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 30 |

джерела високої напруги. Зразки, що покриваються, встановлюються над робочою камерою і притискаються хвилеводом 10.

Джерелом ультразвукових коливань є широкопasmовий ультразвуковий генератор УЗГ-1 з частотою діапазоном від 10 до 40 кГц.

Колівальна система установки складається з двох елементів: активного та пасивного.

Активними елементами є серійні магнітострикційні перетворювачі типу ПМС-15А-18.

Як пасивний елемент використаний спеціальний акустичний трансформатор коливань – експоненційний хвилевід, який одночасно служить і пристроєм збору надлишків порошку.

Елементи колівальної системи суворо пов'язані між собою за акустичною та механічною параметрами. Як матеріал для їх виготовлення використані сталь 45 і алюмінієвий сплав Д-16Т.

Резонансну частоту колівальної системи визначали за допомогою електронно-лічильного частотоміра ЧЗ-35А, амплітуду механічних коливань наконечника хвилеводу - віброметр УЗВ-4.

Як джерело високої напруги використовували каскадний генератор КГ-63. Величину напругу регулювали автотрансформатором ЛАТР-2М і контролювали показанням вольтметра, розташованого на панелі управління.

Вимірювання та налагодження технологічних режимів та параметрів УЗК здійснювали за допомогою електронно-променевого осцилографа ОЕШ-70, частотоміра електронно-лічильного ЧЗ-35А, звукового генератора ЗГ-14, потенціометра.

Принцип роботи установки ґрунтується на суміщенні камерного електростатичного способу нанесення покриття з активним впливом на процес формування покриття УЗК.

Полімерний порошок дисперсністю 80...200 мкм, псевдозрідженим вібро-вихровим способом, під дією електростатичних сил переноситься на

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 31 |

заземлену деталь. Електризація порошку відбувається внаслідок дії на нього електростатичного поля.

Деталь, що осів на ній полімерним порошком, нагрівається до сплавлення частинок полімеру та утворення суцільної плівки. Під час формування покриття деталь впливають УЗК.

Установка для вивчення розтікання розплаву полімерів (рис. 2.2) була скомпонована на базі ультразвукового диспергатора УЗДН-2Т. Конструкція установки дозволяє одночасно спостерігати за формуванням краплі полімеру в УЗП та у звичайних умовах. Динаміку формування краплі фіксували за допомогою мікроскопа електричного моделі ММУ-3 модернізованого цифровим відеоокуляром з підключенням до персонального комп'ютера. Кінцеве збільшення із цифровим окуляром x1000 разів. Програмне забезпечення S-EYE версія 1.6.0.11 від 24 квітня 2020 року.

Температурні режими обох зразків підтримували на рівні за допомогою двох терморегуляторів.

Аналіз розподілу зношування посадочних місць під підшипники в кришках генераторів проводили на спеціальній установці (рисунок 2.3).

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 32 |

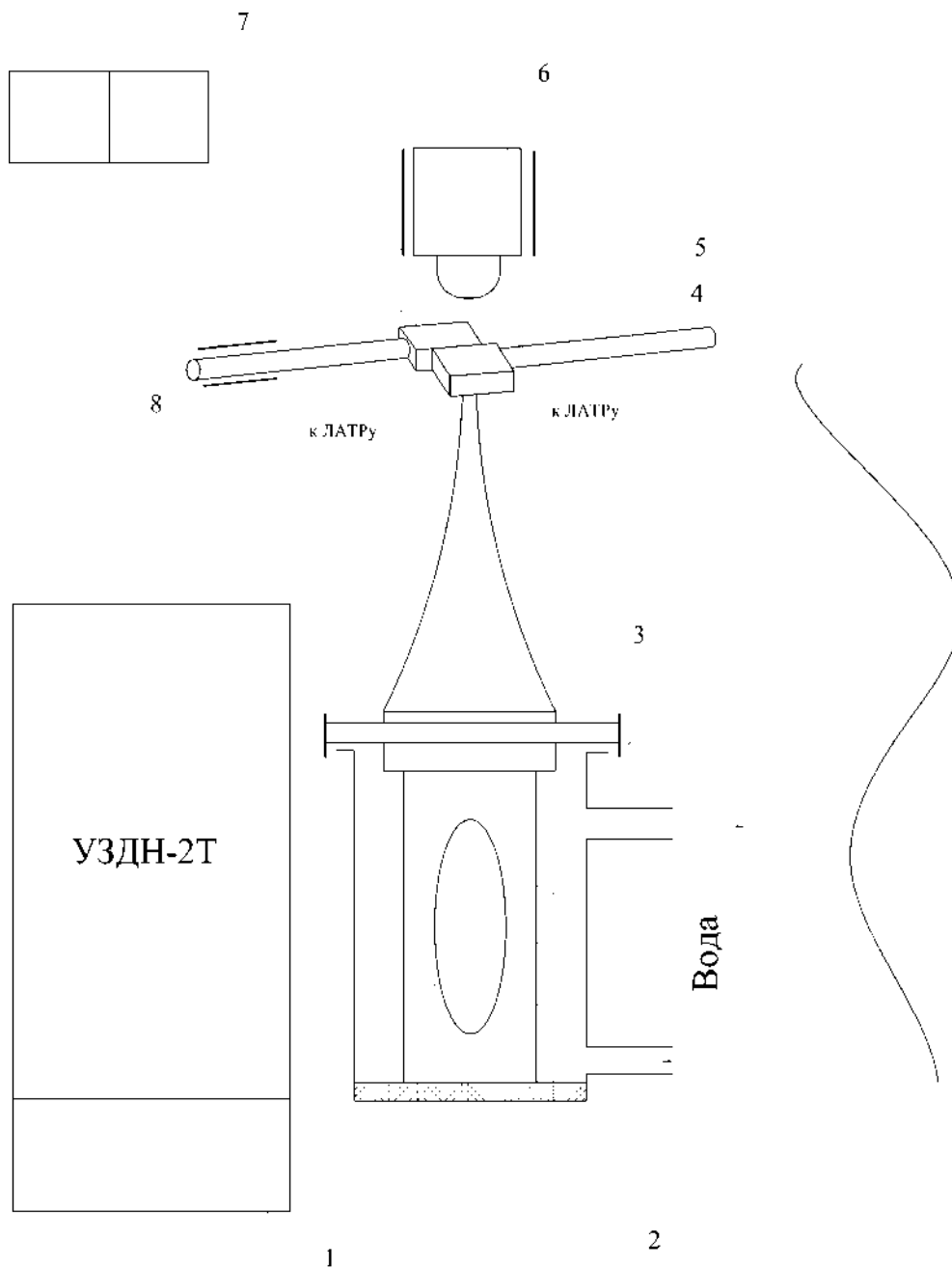


Рисунок 2.2 – Схема установки вивчення динаміки розтікання розплавів полімерів: 1 – ультразвуковий диспергатор; 2 – магнітострикційний перетворювач; 3 – хвилевід; 4, 5 – зразки; 6 – електронний мікроскоп; 7 – терморегулятори; 8 – нагрівачі.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 33 |

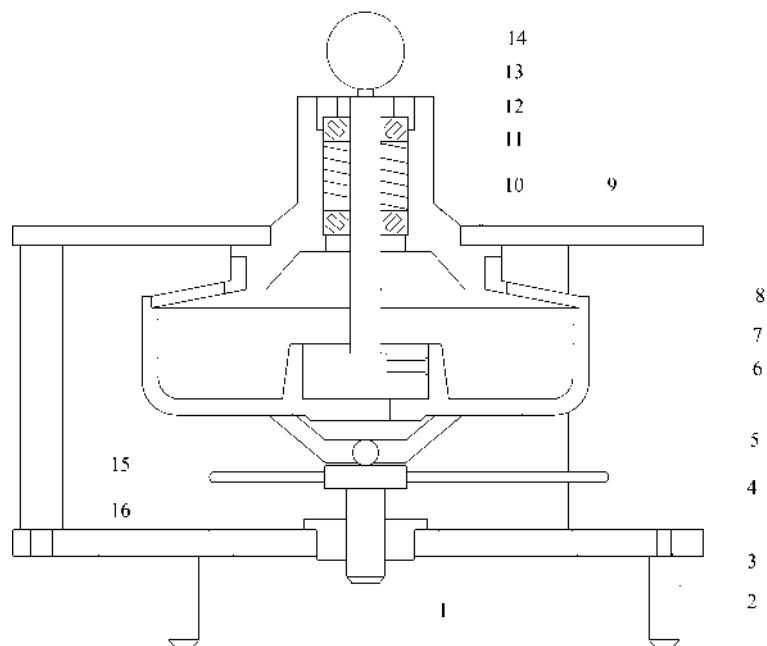


Рисунок 2.3 – Схема установки для вимірювання зношування посадочних місць підшипників кришок генераторів: 1 – гайка; 2 – опори; 3 – нижній диск; 4 – ходовий гвинт; 5 – перегородка; 6 – контрольована деталь; 7 – настановні мембрани; 8 – верхній диск; 9 – штанга нутроміра; 10 – корпус; 11 – пружина; 12 - конічні роликові підшипники; 13 – регульовальний диск; 14 – індикаторна головка; 15 – п'ята; 16 – притискний механізм

Принцип роботи установки ґрунтується на побудові круглограм зносу посадкових місць по відношенню до базової поверхні. Відхилення вимірювали індикаторним нутроміром ГОСТ 9244-75. з ціною розподілу 0,002 мм.

Установка складається з нижнього 3 і верхнього 8 дисків, з'єднаних між собою трьома стійками 5. На верхньому диску встановлений обертовий у двох конічних підшипниках індикаторний нутромір 9. Підшипники встановлені в корпусі 10, на якому запресована тарілчаста мембрана 7. із корпусом. При цьому базування виконано по отворах під конічні підшипники. Це забезпечує точне розташування настановної поверхні тарілчастої пружини щодо центру обертання вимірювального нутроміра.

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|-------------------------|------|
| | | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | 34 |

Вимірювана деталь 6 встановлюється замковою поверхнею на тарілчасту мембрану і фіксується притискним механізмом через 16 п'яту 15, яка розташована на нижньому диску.

У ході проведення досліджень на установці вимірювали зношування посадочних місць під підшипники в кришках генераторів. Аналіз розподілу зносу проводили для отворів у кришках, виготовлених з алюмінієвих сплавів і сталі з номінальним розміром отвору посадкового 72 мм. Кількість кришок кожної партії приймали по 100 прим. В якості інформації для побудови кривих розподілу приймали різницю між номінальним діаметром отвору посадкового і показанням індикатора. Значення зносу визначали, як позитивну різницю між допустимим граничним значенням отвору посадкового і дійсним максимальним розміром зношеного посадкового отвору. Адгезійну міцність визначали на зразках, що мають форму втулки та виготовлених із сталі та алюмінієвих сплавів. У зразках було висвердлено п'ять конічних отворів, в які вставляли конічні штифти з подальшим притиранням за місцем (див. рис. 2.4).

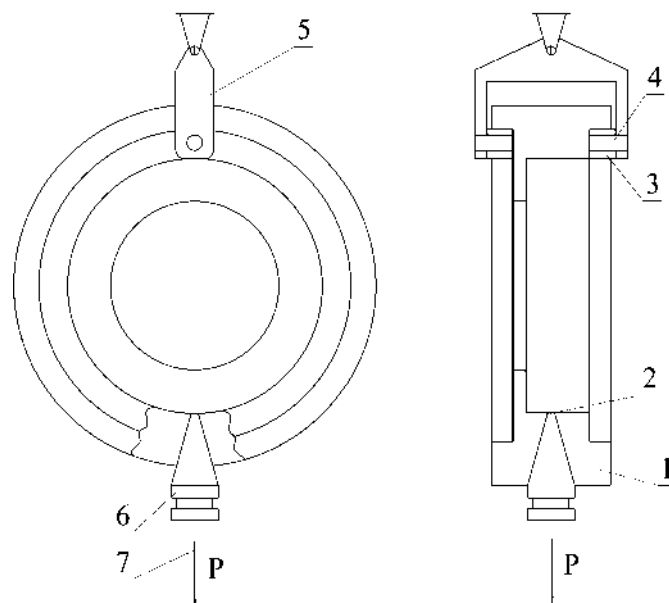


Рисунок 2.4 – Схема пристосування визначення адгезійної міцності методом штифтів: 1 – зразок; 2 – ПКМ; 3 – ролик; 4 – вісь ролика; 5 – механізм самоцентрування; 6 – штифт; 7 – зусилля розриву.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 35 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

Реологічні властивості композиційних полімерних матеріалів зразка у відновленому підшипниковому вузлі визначали методом динамомеханічного аналізу (ДМА) (рисунок. 2.5) [60].

Типовий прилад ДМА (DMA 242 E Artemis) складається з вимірювальної частини, систем нагрівання та охолодження, а також контролерів. Порядок проведення випробувань регламентований міжнародними стандартами: DIN 53513, DIN 53440, ASTM D 4065, ASTM D 4092) [61].

При використанні методу ДМА застосовували плоскі прямокутні зразки, до яких прикладали навантаження, що осцилює, амплітуду і частоту яких задавали в широкому діапазоні.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд приладу DMA 242 E Artemis

Проводячи експеримент, дотримувалися рекомендацій авторів роботи [62], застосовуючи такі режими випробувань: частота коливань 1 Гц; амплітуда 60 мкм; динамічна сила 7 Н; статична сила 0,5 Н; коефіцієнт пропорційності 1,1; швидкість підйому температури 2 К/хв.

В'язкопружні та термомеханічні властивості полімерних матеріалів досліджували на полімерному зразку, що є плоским прямокутником

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 36 |

розмірами $12 \pm 0,1$ мм і висотою $15 \pm 0,1$ мм.

Після закінчення заданого часу випробування зразок витягувався з приладу та після відпочинку протягом 12 годин його висота вимірювалася повторно.

За отриманими на приладі DMA 242 E Artemis даними визначали миттєвий модуль пружності, значення початкової та кінцевої в'язкості, часу релаксації, константи старіння, в'язкої течії та ін.

2.3. Планування експерименту та оцінка достовірності результатів досліджень

Математичне планування експериментів та обробку отриманих даних виконували з використанням програмного продукту StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10 та програми Microsoft Office Excel 2013.

Застосування статистичних методів планування експериментів дозволило значною мірою унеможливити інтуїтивний підхід до питання; постановки дослідів. Більшість експериментів проводили за науково обґрунтованою програмою, що включає об'єктивну оцінку результатів досліджень. При цьому здійснювалася реалізація мінімально можливої кількості дослідів без зменшення точності результатів.

Всі однофакторні експерименти планувалися в програмі Microsoft Office Excel 2013, де проводився аналіз отриманих результатів з метою підбору рівнянь регресії, що найкраще описують закономірність, що вивчається.

Підбір рівнянь регресії здійснювали за індексом кореляції та помилки рівняння. Достовірність індексу кореляції (t_i) порівнювали зі стандартним значенням критерію Стюдента (t_{st}). У випадку, якщо $t_i > t_{st}$, індекс кореляції

достовірний. Якщо $t_i < t_{st}$, індекс кореляції недостовірний, тобто. теоретична залежність не визначає з необхідною достовірністю результати

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 37 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

експериментальних даних.

Планування та аналіз багатофакторних експериментів проводили за допомогою програмного продукту StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10. Перевірка адекватності моделі виконувалася при ризику $\alpha=0,05$, для цього послідовно розраховували: суму квадратів, пов'язану з неадекватністю моделі, дисперсію неадекватності та критерію Фішера, які порівнювали з табличним [63].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 38 |

3. МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНІСТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ, ВІДНОВЛЕНИХ ПОЛІМЕРНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

3.1. Модель розвитку втомних тріщин у старіючих матеріалах

Посадкові місця підшипникових вузлів є одними із численних з'єднань в агрегатах автомобільної техніки. Зміна їх просторової, геометричної та розмірної точності впливає на точність розмірних ланцюгів і як наслідок на довговічність та працездатність.

Експлуатаційні вимоги до підшипникових вузлів автомобілів мають визначальний вплив на вибір матеріалу для покриттів та його фізико-механічних властивостей.

Покриття, що застосовуються для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів, повинні мати високу адгезійну і ударну міцність, стійкість до агресивних середовищ, низьку вологопоглинання і високу стабільність розмірів при температурних змінах.

Дані літератури та досвід ремонтних підприємств показують, що за період експлуатації агрегатів та вузлів автомобільної техніки доводиться багаторазово проводити монтаж та демонтаж підшипникових вузлів внаслідок різних причин (тривалі навантаження, технічне обслуговування, ремонт та ін.). Тому покриття, що використовуються для відновлення посадкових місць корпусних деталей, повинні забезпечити можливість багаторазового монтажу і демонтажу відновлених підшипникових місць (тобто мати високу зносостійкість при складанні, експлуатації та розбиранні). Таким чином, зносостійкість доцільно вважати домінуючим показником якості відновлених посадкових місць корпусних деталей та при оптимізації складу композиції прагнути досягнення її максимального значення.

Другим важливим показником якості відновлених посадкових місць корпусних деталей є можливість протистояти ударним навантаженням та

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 39 |

забезпечувати довговічність відновленої поверхні [3].

Слід зазначити, що важливим показником є властивість самих порошоків, й у першу чергу - здатність до електроосадження. Для забезпечення нормальних умов нанесення покриттів граничне електроосадження порошкоподібних композицій, призначених для нанесення в електростатичному полі, повинно бути не нижче 150 г/м², ударну міцність покриття не менше 4,6 Н.м, можливість багаторазового монтажу та демонтажу відновлених підшипникових вузлів з мінімальним зношуванням покриття. [58].

Як говорилося вище різка відмінність в'язкопружних фізико-механічних та теплофізичних властивостей металів і полімерів впливає на характер прояву та розвитку напруг у нерухомому з'єднанні з полімерним покриттям у навантаженому стані.

Існуюча методика оцінки працездатності нерухомих сполук, відновлених полімерними матеріалами, шляхом визначення зусилля випресування підшипника, дозволяє оцінити тільки їхню статичну міцність без урахування змін властивостей полімеру під впливом циклічних навантажень і зовнішніх факторів (температура, агресивне середовище, час та ін.).

Таким чином вибір оптимального складу ПКМ для відновлення підшипникових вузлів повинен спиратися на теоретичні основи процесів руйнування в'язкопружних тіл під дією механічних навантажень.

Проблематика поведінки матеріалів під впливом навантаження вивчалася протягом кількох століть, механіка руйнування пружних і теорія в'язкопружності, які давно стали класичними, третя, механіка руйнування старіючих матеріалів, до яких можна віднести ПКМ у відновлених підшипникових вузлах автомобільної техніки, ще тільки складається. Тому є необхідність описати процес руйнування та розвитку зростання тріщин у ремонтному полімерному матеріалі із змінними властивостями, коли на

| | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | | 40 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | | |

нього спільно діють постійне та циклічне навантаження.

При дії на відновлені місця підшипникових вузлів, що повторюються або циклічних напруг, виникає втомливе руйнування, внаслідок пластичних деформацій, що повторюються, в кінцевій зоні тріщини [47].

Зростання тріщини в тонкій пластині з ремонтного полімерного матеріалу з властивостями, що змінюються під дією знакозмінного навантаження, показаний на рисунку 3.1.

$$p(t) = p_0 + \Delta p \sin \omega t, \quad (3.1)$$

де p_0 - Початкове значення зовнішнього навантаження;

Δp – величина прикладеного навантаження; ω – частота циклічного навантаження;

t - Час; $p_0, \Delta p, \omega$, не залежать від часу, а $\Delta p \ll p_0$.

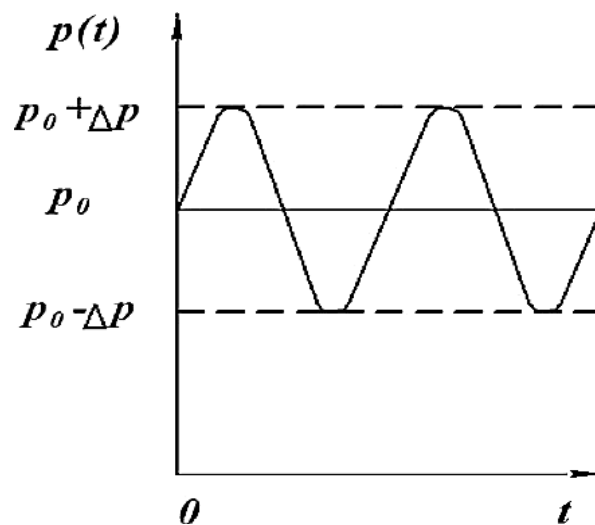


Рисунок 3.1 - Закон зміни циклічного навантаження

Проведені теоретичні [64] та експериментальні [65] дослідження показали, що швидкість зростання тріщини при спільній дії втоми та повзучості, за умови, що частота циклічного навантаження ω невелика і в процесі руйнування розігрів наприкінці тріщини незначний

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|-------------------------|------|
| | | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | 41 |

Як відомо, напруга у вершині макроскопічної тріщини, можна охарактеризувати коефіцієнтом інтенсивності напруг [67], який для випадку, що розглядається, при циклічному навантаженні, має вигляд:

$$KI = kp_0(1 + \varphi_1 \sin \omega t) \sqrt{\pi l}, \quad (3.2)$$

де k - Коефіцієнт апроксимації;

αt - міра повзучості при чистому зрушенні;

l - довжина ріщини; $\varphi_1 = \Delta p/p_0$.

На рисунку 3.2 позначені залежність безрозмірної довжини у від часу t , отримана чисельним рішенням системи диференціальних рівнянь (3.10) методом Рунге-Кутта для макротріщини, що росте в ремонтному полімерному матеріалі з властивостями, що змінюються, коли ядро повзучості в інтегрально.

Реологічні параметри ремонтного полімерного матеріалу $A=6,94=8.64$, $\mu_1 = 0.014$ 1/добу. $\mu_2 = 0,1$ 1/добу, при $\beta_0 = 0,2$ с $^{-1}$, $p/\sigma_m = 0.1$, $k=1$, $\omega = 1$ Гц, $\varphi_1 = 0.05$. На рисунку 3.2 крива 2 відповідає зростанню тріщини, коли відсутня складова втоми зовнішнього навантаження.

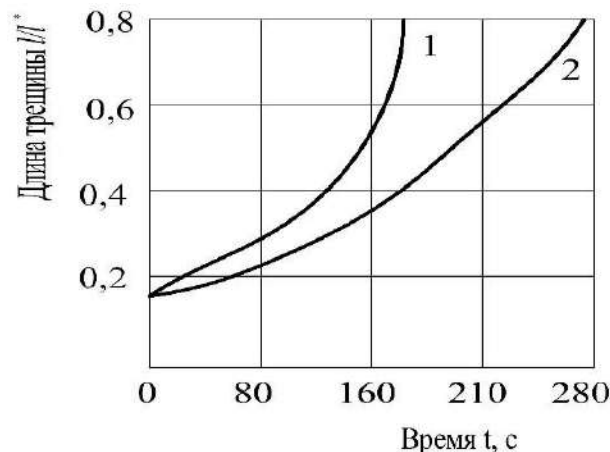


Рисунок 3.2 - Зростання втомної макроскопічної тріщини в ремонтному полімерному матеріалі з властивостями, що змінюються.

1 – при спільній дії постійного та циклічного навантажень;

2 – за відсутності втомної складової навантаження

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 42 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

3.2. Дослідження адгезійної складової міцності полімерних матеріалів при формуванні покриттів

У процесі експлуатації полімерні композиційні матеріали у відновлених посадкових місцях підшипникових вузлів зазнають статичних та динамічних навантажень, температурних перепадів, впливу агресивного середовища тощо. [71]. При вплив зазначених факторів у ряді випадків відбувається відшарування покриттів з ПКМ від підкладки, що надалі веде до поступового руйнування та неприпустимого збільшення зазору у з'єднанні підшипникових вузлів.

Міцність зчеплення (адгезійна міцність) є здебільшого фактором, що визначає працездатність відновленої деталі [72].

Адгезійна міцність є характеристикою самої адгезії, яку слід розуміти як поверхнєве явище, що полягає у виникненні фізичної чи хімічної взаємодії між різними фазами нової гетерогенної системи [73, 74]. Ця взаємодія визначається кількістю та якістю адгезійних зв'язків, що виникають на межі розділу фаз.

Сучасні теорії природи адгезії розглядають зв'язок полімеру з металевою підкладкою як результат специфічної атомно-молекулярної взаємодії. У цих теоріях механічне взаємодія сприймається як можливе, але з визначальне [75].

Найбільшій популярності набули такі теорії специфічної взаємодії покриття з підкладкою: молекулярно-адсорбційна, електрична, електронна, дифузійна та мікрорелогічна.

Перші уявлення про адсорбційну взаємодію належать Г. Бехгольту, С. Нейману та М. Бакрофту. Роботи цих вчених отримали розвиток у дослідженнях Н.А.Дебройна і А.Д.Мак-Ларена. Великий внесок у розробку та обґрунтування основних положень молекулярної теорії зробили

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 43 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

дослідження А.А.Берліна та В.Є.Басіна [72, 76, 77].

Згідно з адсорбційно-молекулярною теорією основною причиною адгезії є міжфазні молекулярні сили. Це, насамперед, сили Ван-дерваальса, орієнтаційні, дисперсійні, індукційні та ін. Адсорбційна взаємодія може бути досягнута двома шляхами: підвищенням полярності субстрату за рахунок його хімічної модифікації активно функціональними групами або модифікуванням самого полімеру. Однак ця теорія не пояснює високу міцність адгезійної неполярних адгезивів до полярних субстратів.

Електрична та електронна теорії адгезійної взаємодії ґрунтуються на дослідженнях Б.В.Дерягіна, Н.А.Кротова та В.П.Смілга. Незважаючи на серйозне теоретичне обґрунтування адгезійної взаємодії досі повністю не пояснено причин збереження адгезійної міцності при електризації та опроміненні покриттів пучком прискорених електронів, не пояснено різні значення адгезійної міцності при нанесенні покриттів на підкладки з різних металів [72]. Також не доведено, що заряджені поверхні (підкладка та покриття) до руйнування ідентичні з поверхнями після руйнування [76].

Деякі теорії визначають величину адгезійної міцності числом та природою зв'язку покриття та підкладки. Це, в першу чергу, дифузійна теорія, згідно з якою адгезійний зв'язок забезпечується дифузією кінців або сегментів макромолекул полімеру та підкладки. Очевидно, ця теорія більш прийнятна для з'єднань з однорідних матеріалів, бо важко допустити істотне значення дифузії макромолекул та сегментів при контакті полімеру з металом та інших неактивних у дифузійному відношенні підкладок [77].

Більш комплексно пояснює природу адгезії мікрореологічна теорія, згідно з якою величина адгезії залежить від площі фактичного контакту адгезиву з підкладкою, а значить і від числа зв'язків, що припадають на цю площу. Ця теорія представляє роботу адгезії (W_a), як складову енергій адгезійних зв'язків та числа зв'язків (n_i) у розрахунку на одиницю площі

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 44 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

адгезиву:

$$WA = S\phi \sum niUi = \gamma n \cos \theta + \gamma m - \gamma mn, (3.3)$$

Де поверхнева енергія на межі «полімер - повітря», кДж/м²;

γm - Поверхнева енергія на межі «субстрат - повітря», кДж/м²;

γmn - поверхнева енергія на межі «субстрат - полімер», кДж/м²;

θ - Кут змочування (рисунок 3.3).

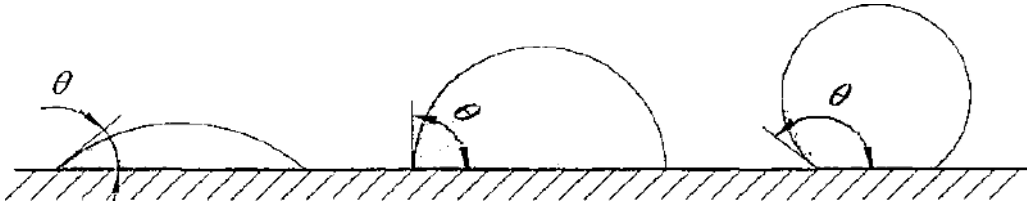


Рисунок 3.3 – Профілі краплі при обмеженому змочуванні: а - $\theta < 90$; б - $\theta = 90$; в- $\theta > 90$ °

З формули видно, що адгезійну міцність можна підвищити за рахунок збільшення щільності адгезійних зв'язків шляхом застосування різних зовнішніх впливів (термодинамічного або силового) на процес формування покриття, а також за рахунок збільшення площі фактичного контакту полімеру з основою.

Одним із найбільш ефективних силових впливів є вплив на процес формування покриття вібраціями різних частот аж до ультразвукового діапазону.

При формуванні покриттів у вільному стані відбувається мимовільне розтікання полімеру, тому обов'язковою умовою утворення адгезійної сполуки є змочування поверхні підкладки [75]. Чим більший поверхневий натяг на межі твердої фази з повітряною, тим більша площа, що змочується рідкою фазою. Цю площу також можна збільшити, якщо зменшити поверхневу енергію рідкої фази, яка відображається законом збереження енергії при адгезії гетерогенних систем (закон Дюпре), виходячи з якого на роботу адгезії, поряд з рівноважною поверхневою енергією, впливає і

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 45 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | |

крайовий кут змочування. Крім цього, в реальних умовах на змочуваність впливають фактори багатокomпонентності адгезиву, шорсткість підкладки, наявність забруднень, ПАР та ін.

Робота адгезії також залежить від динаміки утворення адгезійної сполуки. Чим швидше відбувається змочування, тим швидше і краще заповнюються мікронерівності підкладки, чого можна досягти впливом УЗП. 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 УЗП.

Таким чином якість адгезійних металополімерних покриттів визначається, поряд з природою та складом адгезиву та субстрату, рівномірністю розподілу компонентів в обсязі матеріалу, умовами термоокислення та релаксації, характером розподілу сил взаємодії та, зрештою, фактичною площею контакту полімеру з підкладкою. В основу цих умов покладено процес масообміну між субстратом та адгезивом. Керувати цими умовами можна шляхом удосконалення технології нанесення та формування покриттів [78].

Тому виникла необхідність вивчити питання змочування підкладки розплавом полімерів для умов отримання покриттів камерним способом з силовим впливом на формування адгезійного з'єднання.

Таким чином, представляє інтерес дослідити зміни адгезійної міцності від зазначених факторів. Найбільший ефект ультразвукових коливань мають при дії безпосередньо під час нанесення покриття. При цьому зону ультразвукового впливу необхідно наблизити якомога ближче до розділу двох середовищ, оскільки поширення акустичних коливань серед супроводжується поглинанням енергії вібрації [80].

Значний вплив на ефект впливу УЗК має схема та момент подачі коливань [81]. При цьому слід враховувати властивості УЗК очищати

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 46 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

поверхню, що покривається, від забруднень, а також здатність середовища поглинати енергію. При поширенні хвиль у полімерних матеріалах відбувається зменшення інтенсивності хвилі, яке описується рівнянням [82].

$$I_k = I_0 \cdot l - 2\alpha x, \quad (3.4)$$

де I – інтенсивність у початковій точці, α – коефіцієнт загасання.

Якість адгезійних металополімерних систем визначається, поряд з природою та складом адгезиву та субстрату, рівномірністю розподілу компонентів в обсязі покриття, умовами термоокислення та релаксації, характером розподілу сил взаємодії та, зрештою, фактичною площею контакту полімеру з підкладкою [51]. В основу цих умов покладено процес масообміну між субстратом та адгезивом. Управляти цими умовами можна шляхом удосконалення технології нанесення та формування покриттів.

Теоретичні передумови, наведені в [78] показали, що перспективним напрямком удосконалення технології отримання полімерних покриттів є вплив на процес формування адгезійного контакту УЗК, але не з'ясовані питання пов'язані з механізмом утворення адгезійного контакту між покриттями, сформованими з порошкоподібних композицій у суміщеному електростатичному і ультра , та підкладками з різних матеріалів з різною шорсткістю. Це не дає можливості обґрунтувати технологічні режими формування покриттів, у зв'язку з чим ставили першочергове завдання вивчити такі питання:

- 1) вплив УЗП на змочування підкладки розплавом полімеру;
- 2) вплив технологічних режимів формування покриттів та параметрів УЗП на адгезійну міцність;
- 3) Зміна адгезійної міцності полімерних покриттів залежно від матеріалу та шорсткості підкладки.

Дослідження проводили у три етапи. На першому етапі досліджували

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 47 |

вплив умов формування покриттів на динаміку розтікання розплавленого полімеру.

Площу визначали аналізом даних мікрозйомки.

На другому етапі досліджень вивчали вплив схеми впливу УЗК та технологічних режимів формування покриттів на адгезійну міцність сполук. Для цього досліджували 12 схем подачі УЗК за фазами формування покриттів (рисунок 3.6). Ефективність впливу оцінювали за значенням адгезійної міцності сполуки. Адгезійну міцність визначали методом штифтів (див. 2.2). Покриття наносили на підкладках АЛ4, оброблених на токарному верстаті з шорсткістю $Rz = (20 \pm 10)$ мкм. Температура формування (190-250) ° С та тривалість формування (15±7) хв.

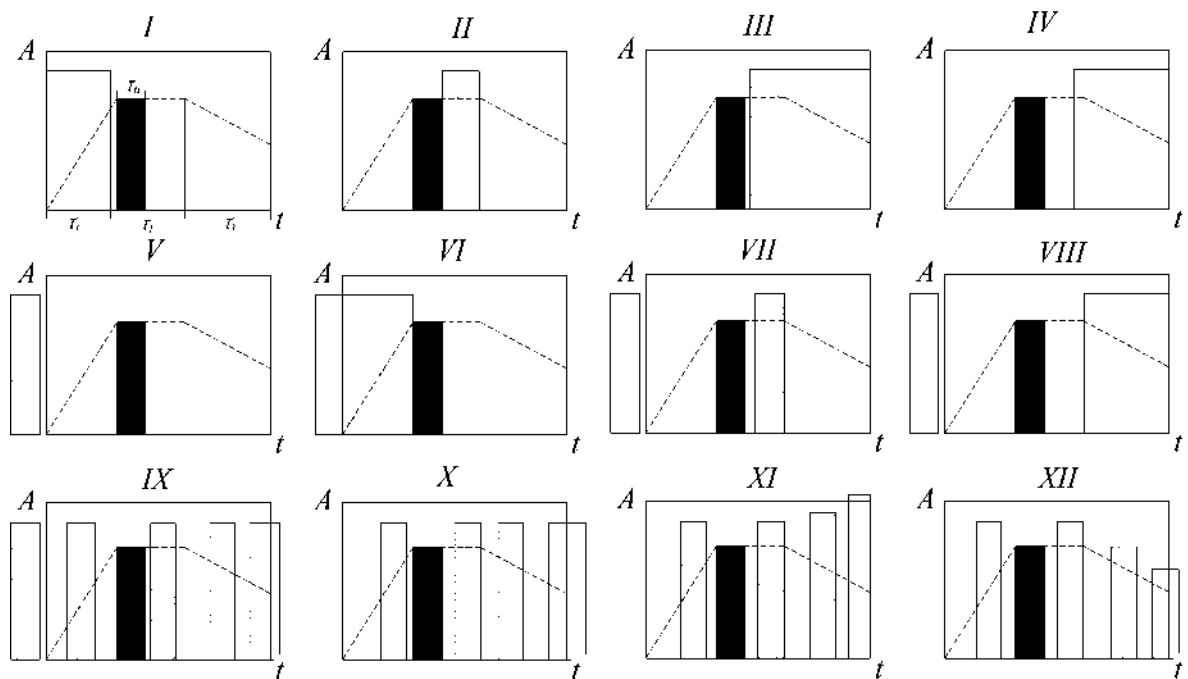


Рисунок 3.4 – Схеми впливу УЗК за фазами формування покриттів:
 τ_1 – нагрівання підкладки; τ_2 – витримка за постійної температури;
 τ_3 – охолодження покритої деталі; τ_n – нанесення порошку на деталь;
 А – амплітуда УЗК; t – тривалість впливу УЗК; ▨ - сфера впливу
 УЗК.

Вивчення впливу технологічних режимів формування покриттів на адгезійну міцність проводили для з'єднань, сформованих за схемою, що забезпечує найкращі умови формування адгезійного контакту [83].

Відомо, що найбільше впливають на якість покриттів надають температурно-часові умови формування покриття, частота та інтенсивність УЗК [84]. Ці чинники впливають на процес формування покриття в сукупності і тією чи іншою мірою залежить один від одного.

При недогріві підкладки та незначної тривалості формування розплавлений полімер швидко твердне і не встигає заповнити всі нерівності підкладки. Це призводить до того, що різномірні фази не встигають досить близько наблизитися для утворення надійного адгезійного контакту, а сили взаємодії між ними не виявляються повною мірою.

Перегрів полімеру призводить до інтенсифікації термоокислювальної деструкції макромолекул. Зазначене явище ускладнює процес формування адгезійних зв'язків між адгезивом та підкладкою, а за певних умов сприяє руйнуванню раніше утворених зв'язків [85].

Для виявлення оптимальних технологічних режимів проводили планування експериментів з метою побудови математичної моделі залежності адгезійної міцності покриттів $y_1...y_3$ від температури (x_1) та тривалості формування покриттів (x_2), частоти (x_3) та амплітуди (x_4) ультразвуку. Рішення про вибір моделі приймали експертним шляхом для мінімізації кількості експериментів, що проводяться. Враховуючи викладене дослідження проводили із застосуванням 3 ($k \cdot P$) експерименту, варіювали 4 фактори на трьох рівнях кожен, після чого проводили експеримент і здійснювали його статистичну обробку. Усього було проведено 27 дослідів у різних точках факторного простору.

Матриця планування та розрахунку моделі наведена у додатку А. Обробку експериментів проводили за допомогою програмного продукту StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10 та

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 49 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

програми Microsoft Office Excel 2013 [86].

На третьому етапі вивчали залежність адгезійної міцності покриттів від матеріалу (сталь, алюмінієвий сплав) та стану (шорсткість, вид модифікацій) підкладки.

Модифікацію здійснювали фосфатуванням зразків з алюмінієвих сплавів цинкофосфатним розчином КФ-2, а сталі залізофосфатним концентратом КФА-1.

Дослідження проводили за однофакторною схемою. Отримані результати обробляли та порівнювали з даними покриттів, отриманих за ідентичних умов без впливу на підкладку УЗК.

Процес формування ремонтного полімерного покриття можна умовно поділити на три стадії. На першій стадії відбувається зближення молекул розплавленого полімеру до поверхні, підкладки з одночасним орієнтуванням в самому покритті так і на межі розділу фаз.

На другій стадії відбувається безпосередня взаємодія між полімером, що твердне, і підкладкою. Інтенсивність їх взаємодії визначається відстанню між фазами, що з'єднуються. У реальних умовах ця відстань залежить багатьох чинників. До них слід віднести наявність забруднень на поверхні, що покривається, газових включень в мікропорах і мікротріщинах, повітряної мікроплівки на межі розділу фаз.

На третій стадії відбувається утворення хімічних зв'язків між полімером та підкладкою та формування структури покриття.

Таким чином, технологічні режими формування покриттів повинні забезпечити максимальне зближення фаз першої стадії формування покриття, тобто повинні забезпечити найкращу змочуваність підкладки полімером. На другій стадії утворення адгезійного контакту слід враховувати, що надмірне нагрівання деталі сприяє утворенню газових включень в результаті термоокислювальної деструкції, що погіршує якість адгезійної сполуки. І зрештою, технологічні режими мають забезпечити

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 50 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

оптимальні умови структуроутворення покриття.

Дослідження показали, що ультразвукова дія на підкладку сприяє кращому розтіканню розплавів полімерів. Так, аналіз зростання краплі розплаву полімеру від тривалості експозиції за певної температури показав, що відносний приріст площі краплі, сформованої в УЗП, у 2,6...3,2 рази вище, ніж краплі, сформованої без впливу УЗП (рисунок 3.7) [86] .

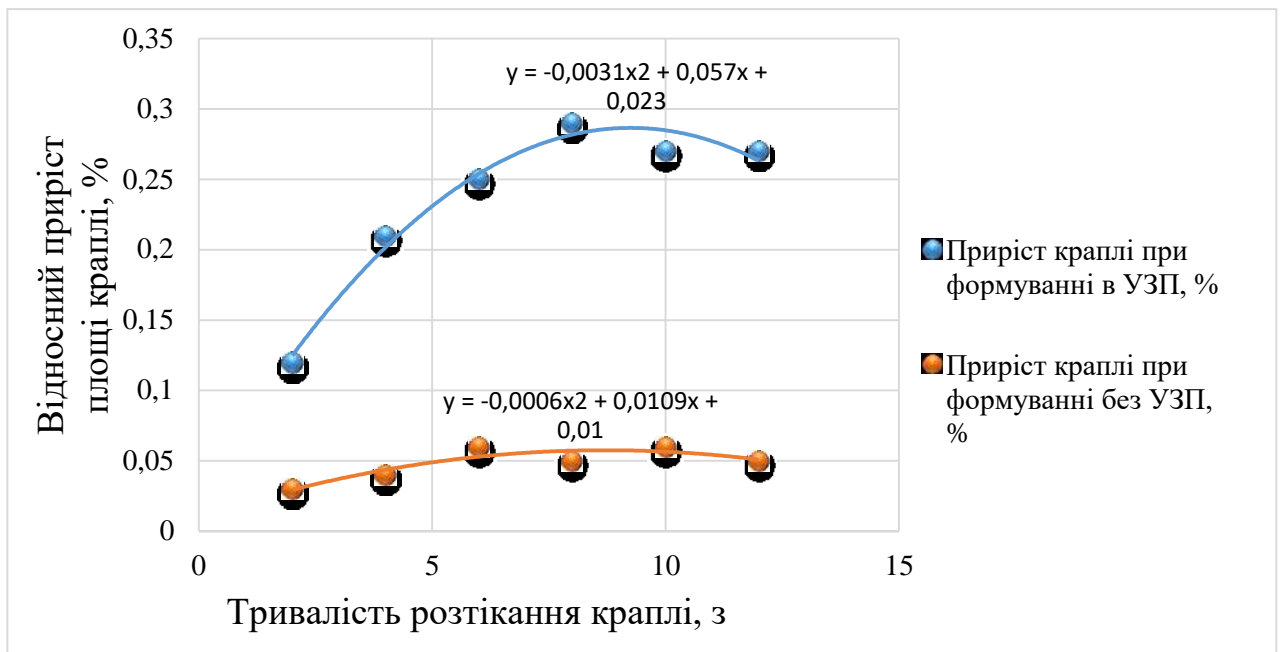


Рисунок 3.5 – Динаміка розтікання краплі розплаву полімеру за температури формування краплі (180±3)°C.

Крапля, сформована в УЗП, досягає максимального приросту площі контакту полімеру з підкладкою після експозиції при постійній температурі протягом 8 с, а крапля, сформована без впливу УЗП, після 10 с.

На рисунку 3.6 показані краплі у початковий період їх утворення (а, б) та після їх формування (в, г). Крапля, розташована на лівому зразку, формувалася без УЗП, а правому - з впливом УЗП (велика початкова площа краплі, показаної позиції (а) проти (б) пояснюється полідисперсністю твердих частинок, у тому числі формували краплі, тобто. початковий обсяг першої краплі був більшим, ніж у другій).

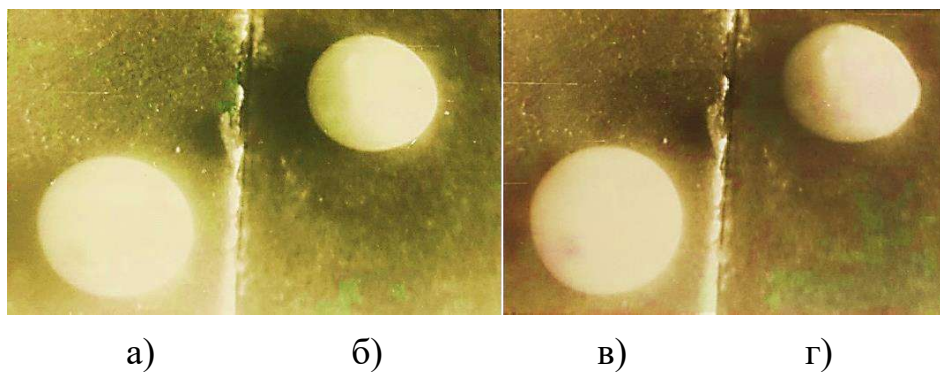


Рисунок 3.6 – Розтікання краплі з розплавів полімерів: а,б - у початковий період розтікання; в, г – наприкінці формування краплі; а,в - без УЗП; б, г - в УЗП.

Вивчення геометрії сформованих крапель в осьовому перерізі перпендикулярному до підкладки (рисунок 3.9) показало, що обидві краплі мають форму кульового сегмента, але з різними крайовими кутами θ . Так, кут у краплі, сформованої в УЗП, на 20...28% менше, ніж у краплі, сформованої без УЗП.

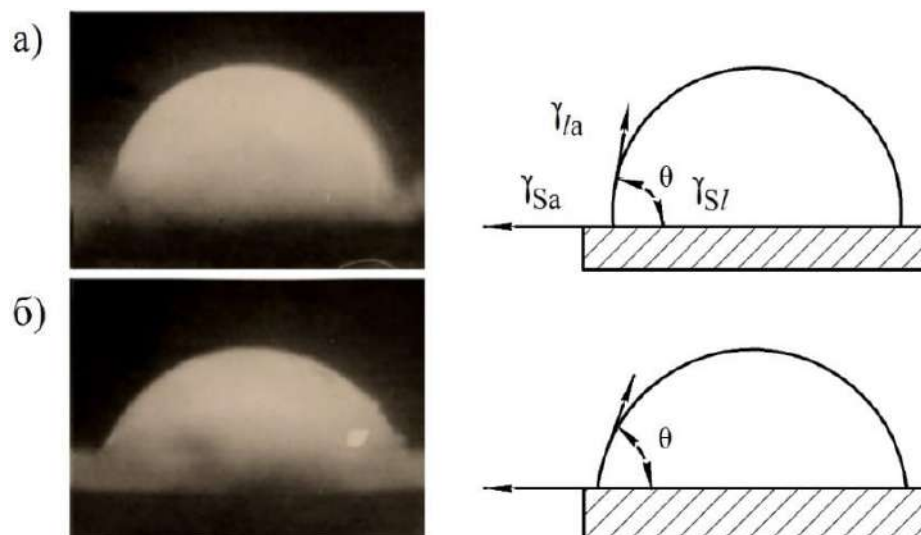


Рисунок 3.7 - Профіль краплі розплаву полімеру, сформованої в звичайних умовах (а) і в УЗП (б)

Як говорилося вище, технологічні умови формування покриттів впливають на адгезійну міцність у сукупності і є головними факторами, що

визначають повноту адгезійного контакту покриття з підкладкою. Аналіз результатів впливу умов впливу УЗК на адгезійну міцність (рисунок 3.4) показав, що найкращі умови формування адгезійного контакту досягаються при озвучуванні підкладки за схемами II, IX, X та XII (рис. 3.8). Характерним всім цих схем є вплив УЗП після нанесення порошкоподібної композиції в початковий період оплавлення порошку. Це, ймовірно, сприяє збільшенню фактичної площі контакту адгезиву з підкладкою за рахунок більш повного заповнення мікронерівностей і пор підкладки розплавленим полімером, кращої дифузії сегментів макромолекул кристалічну решітку металу, інтенсифікації видалення газових включень із зони контакту полімеру з підкладкою в початковий період формування.

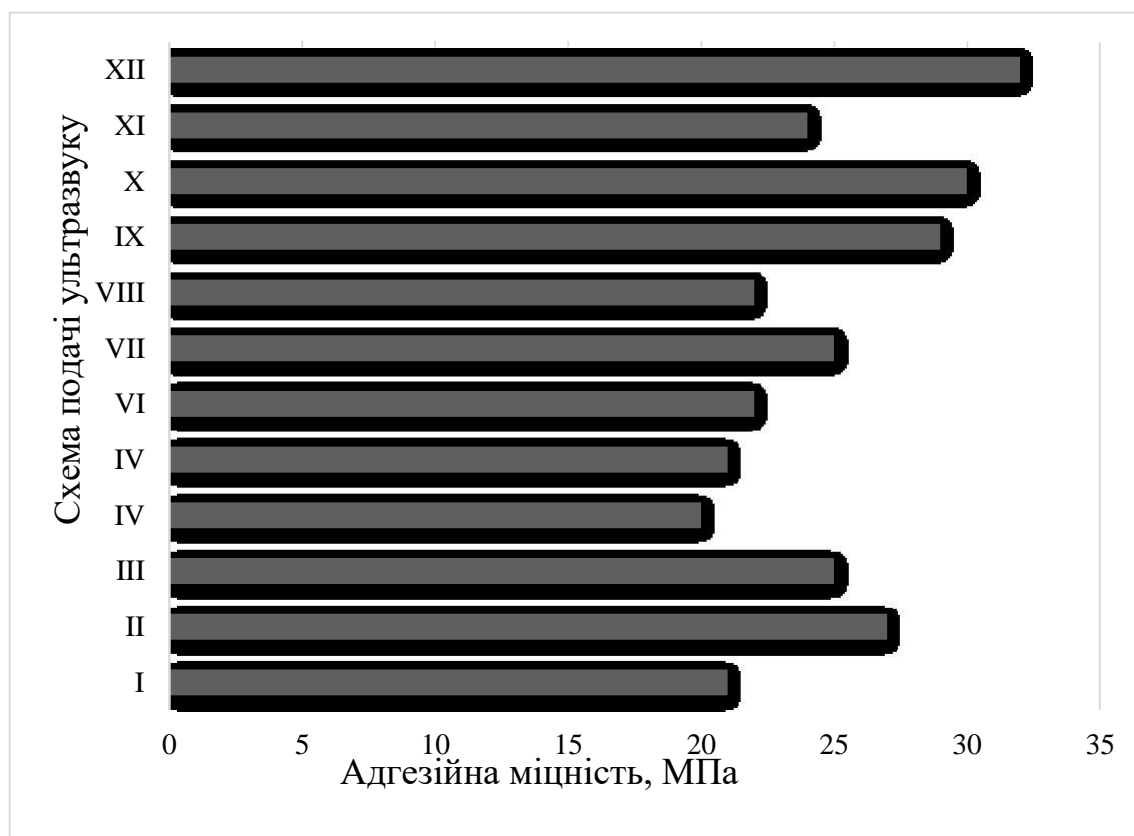


Рисунок 3.8 - Залежність адгезійної міцності покриттів від схеми подачі УЗК: температура формування $(210 \pm 10)^\circ\text{C}$; тривалість формування (15 ± 7) хв; матеріал підкладки АЛ4.

Як видно з малюнка адгезійна міцність підвищується (до 29 МПа) при впливі ультразвуком на підкладку до нанесення порошкоподібної

композиції і під час формування покриття (схеми IX і X), це, мабуть, пов'язано зі здатністю ультразвуку очищати поверхню і тим самим покращувати змочування підкладки розплавом полімеру, що узгоджується з результатами проведених досліджень.

Максимальна адгезійна міцність (32 МПа) досягається при дії ультразвуком за XII схемою. Формування покриттів за цією схемою супроводжується впливом УЗК на підкладку з частотою 20 кГц та амплітудою

10 хв з подальшим зменшенням амплітуди залежно, близькою до експоненційної. При цьому УЗК подаються в імпульсному режимі, що забезпечує отримання структури з високим ступенем кристалічності та рівномірним розподілом складових композиції обсягом покриття. Таким чином, підтверджується припущення про необхідність зниження інтенсивності УЗК за експоненційною залежністю. Це усуває можливість появи ефектів резонансу [87], отже забезпечує стійкість умов структурообрання.

Подана в таблиці (додатки А) матриця планування експерименту для незалежних один від одного факторів була реалізована після отримання результатів попередніх дослідів, описаних та представлених на рисунках 3.6 та 3.9. Отримані поліноми II ступеня дали можливість припустити, що адекватність отриманої при плануванні експерименту моделі буде достатньою, що і було перевірено після статистичної обробки результатів експерименту за методикою, викладеною в роботі [88].

Порівнювали дисперсії отриманих відгуків і за критерієм Фішера перевіряли їхню приналежність до генеральної сукупності. Максимальна дисперсія спостерігалася для $y_1 = 65,84$ МПа, а для y_3 - мінімальна 60,4 МПа. Тоді відношення більшої до меншої дисперсії дає розрахункове значення критерію Фішера $FP=65,84/60,4=1,09$, що менше табличного значення критерію рівня довірчої ймовірності 95% $FT(0,05)=2,728$. В той час, як р-рівень

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 54 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

значимості, що визначається за допомогою вбудованої функції FРАСП Microsoft Excel дорівнює 0,41, що більше рівня значимості 0,05, отже, зробили висновок про рівність дисперсій. Вбудовані функції вказаного програмного забезпечення дозволили поряд із програмою Statistica 10.0 перевірити не тільки значущість кожного отриманого коефіцієнта рівняння регресії за критерієм Стюдента, але й адекватність отриманої моделі через розрахунок дисперсії адекватності та повторного порівняння критерію Фішера з табличними значеннями:

$$F_p \leq F_T \quad (3.5)$$

Далі за допомогою програмного модуля Statistica 10.0 (далі ПМ Статистика) шляхом перетворення Бокса-Кокса отримали параметри, необхідні для розрахунку критеріїв згоди Пірсона та Колмогорова. Результати перетворення представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Результати перетворення Бокса-Коксу на Statistica для розрахунку критеріїв згоди, отримані в ПМ Statistica

| | | | | |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | Перетворення Б-К залежної змінної: Адгезійна міцність, МПа 4 3-х рівневі ф; 1 Блоки; Залишок. SS=8,342449 ЗП Адгезійна міцність. МПа | | | |
| | Лямбда | SSE(I) | Xi2(1) | p |
| Статистик и | - 0,22061 9 | 79,9571 8 | 6,06885 0 | 0,01376 4 |

Близькість спрогнозованих моделлю залежностей до отриманих у лабораторії результатів вимірювань адгезійної міцності була оцінена за допомогою критеріїв згоди [89]:

- Пірсона (критерій Хі-квадрат) отримано за допомогою ПМ Статистика (див.табл.3.1) $\chi^2=6,07$, що менше табличного значення Р (6;3) = 111, отже, за критерієм згоди Пірсона теоретичний закон розподілу, передбачений математичною моделлю близький до фактичного.

- Колмогорова ($p[\lambda=0,22]=0,485$) що приблизно дорівнює 0,5 і дорівнює верхній межі критерію. За результатами цієї перевірки було також

зроблено висновок про випадковість розходження між теоретичними та досвідченими результатами.

За даними обробки результатів випробувань отримані рівняння регресії залежності адгезійної міцності від вхідних параметрів, що варіюються, в кодованих значеннях змінних:

$$AP = 22,104 - 1,9x_1 + 4,771x_2 - 0,143x_3 + 0,561x_4 - 1,9x_2 + 1,67x_2 + 1,67x_2 + 1,57x_2 - 2,32x_1x_2 \quad (3.35)$$

З таблиці 3.2 видно, що коефіцієнти рівняння залежності міцності від чинників все парні взаємодії, крім твори x_1x_2 є не значущими, що підтвердило результати розрахунків за критерієм Стьюдента.

Таблиця 3.2 - Оцінки ефектів визначення рівнянь регресії

| Оценки эффектов; R-кв.=,93626;Скор.,86189 (Таблица 27 опытов.ста) 4 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=8,342449 ЗП Адгезионная прочность, МПа | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|--------------------|--------------------|----------|
| Фактор | Эффект | Ст.Ош. | t(12) | p | -95, % Дов.Пред | +95, % Дов.Пред | Козф. |
| Сред/Св.член | 22,10437 | 0,602989 | 36,65798 | 0,000000 | 20,79057 | 23,41817 | 22,10437 |
| (1)Температура формирования, °С(L) | -3,80640 | 1,556022 | -2,44624 | 0,030804 | -7,19668 | -0,41612 | -1,90320 |
| Температура формирования, °С(K) | 6,57132 | 1,385834 | 4,74178 | 0,000479 | 3,55184 | 9,59079 | 3,28566 |
| (2)Продолжительность формирования, мин.(L) | 9,54263 | 1,330896 | 7,17008 | 0,000011 | 6,64285 | 12,44240 | 4,77131 |
| Продолжительность формирования, мин.(K) | 3,34139 | 1,776049 | 1,88136 | 0,084399 | -0,52828 | 7,21107 | 1,67070 |
| (3)Частота УЗК, кГц(L) | -0,28519 | 1,480336 | -0,19265 | 0,850454 | -3,51056 | 2,94018 | -0,14259 |
| Частота УЗК, кГц(K) | 3,34139 | 1,776049 | 1,88136 | 0,084399 | -0,52828 | 7,21107 | 1,67070 |
| (4)Амплитуда УЗК, мин.(L) | 1,12175 | 1,335214 | 0,84013 | 0,417261 | -1,78743 | 4,03093 | 0,56088 |
| Амплитуда УЗК, мин.(K) | 3,14139 | 1,776049 | 1,76875 | 0,102322 | -0,72828 | 7,01107 | 1,57070 |
| 1L на 2L | -4,64470 | 1,674406 | -2,77394 | 0,016838 | -8,29292 | -0,99649 | -2,32235 |
| 1L на 3L | 0,52296 | 1,651924 | 0,31658 | 0,757005 | -3,07627 | 4,12219 | 0,26148 |
| 1L на 4L | 0,30530 | 1,674406 | 0,18233 | 0,858366 | -3,34292 | 3,95351 | 0,15265 |
| 2L на 3L | 0,65757 | 1,579501 | 0,41631 | 0,684530 | -2,78387 | 4,09900 | 0,32878 |
| 2L на 4L | -0,38462 | 1,413098 | -0,27219 | 0,790106 | -3,46350 | 2,69425 | -0,19231 |
| 3L на 4L | -1,24357 | 1,623971 | -0,76576 | 0,458619 | -4,78190 | 2,29476 | -0,62178 |

Перший стовпець праворуч таблиці 3.2 включає оцінки коефіцієнтів нелінійного рівняння регресії при перекодованих значеннях чинників. Перший та другий стовпці таблиці 3.2 дають готові коефіцієнти рівняння регресії без їх перекодування. Але зручніше аналізувати рівняння у перекодованих значеннях факторів, коли масштаби всіх чотирьох

незалежних факторів умовно однакові та перебувають у інтервалі від -1 до +1.

Для оптимізації умов проведеного експерименту одержали залежність відгуку «адгезійна міцність» від змінних факторів. Результати проведених досліджень представлені у вигляді тривимірних графіків, отриманих за допомогою ПМ Статистика 3.11.

Для більш точного вивчення факторного простору поблизу оптимального (максимального) значення відгуку в ПМ Статистика є модуль «Предсказания значень через функцію бажаності», для отримання якого можна задати отримані критичні значення кодованих змінних: $x_1 = -0,288$; $x_2 = 0,812$; $x_3 = 0,002$; $x_4 = 0,057$. Цьому поєднанню факторів модель передбачає значення відгуку $y = 35,26$ МПа у довірчому інтервалі від 31,57 до 38,95 з 95%

рівнем передбачення (див. рисунок 3.12).

Як показує аналіз малюнка 3.12, найбільш значущими факторами для отримання бажаності більше 1 є поєднання факторів у кодованих значеннях: температура формування, оС $x_1 = -0,8 \dots 0,4$ і тривалість формування, хв $x_2 = 0,0 \dots 1,0$. Про те, наскільки точно в центр факторного простору потрапляє залежність частоти від амплітуди УЗК, можна судити по контуру отриманої поверхні, що ми і спостерігаємо на поверхні відгуку (див. рис. 3.12 (г)), але межі варіювання факторів видно краще на контурних лініях проекції. Звідси можна зробити висновок, що подальше збільшення температури формування покриття вище 0,4 кодованих значеннях не доцільно. І навпаки, зниження часу нижче середини факторного простору призведе до зниження адгезійної міцності одержуваного покриття.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 57 |

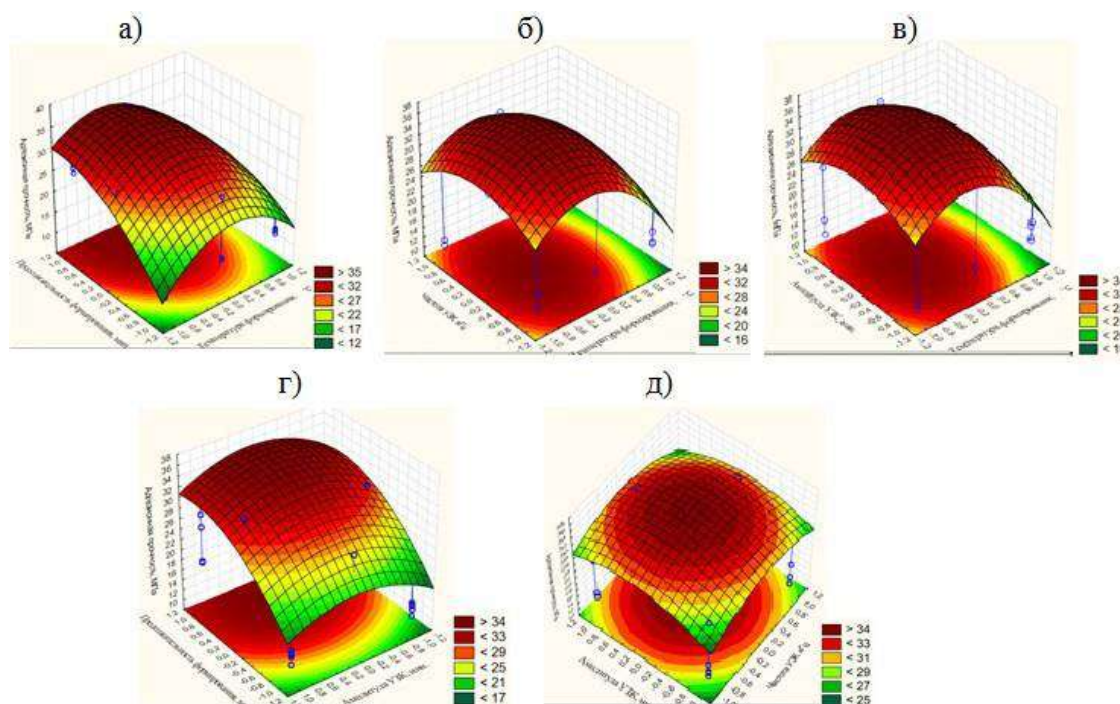


Рисунок 3.9 – Залежність відгуку «адгезійна міцність» від змінних факторів: а) «тривалість формування» та «температура формування покриття»; б) «частота ультразвуку» та «температура формування покриття»; в) «амплітуда ультразвуку» та «температура формування покриття»; г) «тривалість формування» та «амплітуда ультразвуку»; д) «амплітуда ультразвуку» та «частота ультразвуку».

При найбільш сприятливому поєднанні факторів $x_1 \dots x_4$ можна отримувати і вищі значення міцності аж до 42 МПа, що значно перевищує отримані на межах дослідженого факторного простору значення міцності і дозволяє прогнозувати подальше збільшення адгезійної міцності при дуже незначному варіюванні вхідних параметрів моделі. Цей висновок вкотре доводить справедливість закону «Створу» І.А. Риб'єва для будь-яких композиційних матеріалів [88]: найбільш екстремальному значенню відгуку відповідають лише оптимальні значення факторів.

Найбільш узагальненим критерієм передбачення залежних параметрів відгуку від незалежних факторів, що варіюються, є коефіцієнт детермінації моделі за критерієм R^2 . І хоча передбачення завдяки ПМ

Статистика виходить не нижче $R^2 = 0,95$, але загальний коефіцієнт кореляції між передбаченими за рівнянням регресії значення відгуку моделі з результатами вимірів в лабораторії для даної математичної моделі, розраховані в Excel за допомогою вбудованої функції, що має синтаксис КОРРЕЛ від двох масивів урах за рівнянням (2) і уср, було отримано лише на рівні $R^2=0,593$, що можна вважати досить високим рівнем передбачення математичної моделі.

Істотне зростання адгезійної міцності покриттів з підкладкою з АЛ4 за рахунок УЗП, ймовірно, спричинене здатністю ультразвуку прискорювати термоокислювальні, кристалізаційні та інші процеси, а також специфічною особливістю морфологій поверхневого шару підкладки.

Поряд із цим слід зазначити, що зміна адгезійної міцності за рахунок УЗП менш виражена для покриттів, сформованих на підкладках з чавуну, що пояснюється наявністю включень графіту на межі розділу фаз, які погіршують контакт полімеру з підкладкою.

Адгезійна міцність дещо підвищується для покриттів, нанесених на фосфатованих поверхнях, порівняно з нефосфатованими. Так, при нанесенні покриттів на фосфатовані сталеві поверхні адгезійна міцність збільшується в середньому на 6...16%, а при нанесенні покриттів на зразки з алюмінієвих сплавів, оброблених цинкофосфатним розчином КФ-2, - на 12...18%. Встановлено, що покриття, сформовані в УЗП, мають більшу адгезійну міцність.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 59 |

4. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ

4.1.Вимоги до покриття при відновленні посадкових місць підшипникових вузлів

Фізико-механічні властивості полімерів дуже різноманітні, тому при дослідженні покриттів, отриманих з них, необхідно виходити з умов їх нанесення, формування та експлуатації [90].

Вимоги до покриття, що застосовується для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів, значною мірою визначаються технологічними умовами формування покриттів, особливо температурно-тимчасовими, силовими, а також термообробкою. Слід зазначити, що в літературі відсутні рекомендації щодо вибору технологічних режимів формування покриттів із склонаповнених порошкоподібних полімерів, до яких відноситься композиція, що вивчається в даній роботі. Також відсутні дані про вплив ультразвукового впливу на такі властивості покриттів, як водо- та маслопоглинання, щільність, твердість, ударна міцність, які істотно впливають на довговічність деталей, відновлених полімерними покриттями та застосовуваних в умовах ремонтного виробництва [91].

Тому для обґрунтування технологічних режимів відновлення посадкових місць підшипникових вузлів опор кочення композиційними полімерними покриттями необхідно було вивчити такі питання:

1. Вплив температури формування та швидкості охолодження на волого- та маслопоглинання та щільність покриттів, нанесених в УЗП та у звичайних умовах.

2. Вплив температури формування на твердість та ударну міцність покриттів.

Водо-, маслопоглинання та щільність визначали для покриттів, відокремлених від підкладки, та отриманих із запропонованої композиції в

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 60 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

електростатичному полі з ультразвуковою дією або без такого. Товщина покриття ($0,5\pm 0,05$) мм.

Зразки перед випробуванням сушили у вакуум-сушильній шафі протягом (24 ± 1) год при температурі (50 ± 2)°С, потім охолоджували в ексикаторі над п'ятиокисом фосфору при температурі 23°С. Після охолодження зразки зважували на аналітичних терезах з точністю до 0,0001г. Потім занурювали окремо дистильовану воду, окремо масло і витримували протягом (24 ± 1) ч. Потім зважували. І так далі, поки останні 2 зважування не показували однакових результатів.

Вологопоглинання вивчили при температурі середовища ($+23\pm 2$)°С, маслопоглинання - при температурі ($+20\pm 2$)°С та ($+60\pm 5$)°С.

Щільність визначали для покриттів, отриманих при різних температурах формування, та в різних середовищах охолодження (у воді, на повітрі та разом з піччю).

Твердість вимірювали на твердомірі МПВ-1 та оцінювали за значенням глибини вдавлення кульки діаметром 5 мм під навантаженням 50 кг. Вимірювання проводили на покриттях завтовшки ($1\pm 0,2$) мм, нанесених на сталевих зразках.

Ударну міцність визначали на приладі У-1А для покриттів, нанесених на пластинки зі сталеві стрічки 08 КП (70x150x1,0) мм, і оцінювали добутком величини вантажу (Н) на максимальну висоту (м), з якої падає вантаж, не викликаючи руйнування шару полімеру.

Фізико-механічні властивості вивчали на зразках після їхньої витримки в ексикаторі протягом 48 годин при кімнатній температурі. Це викликано необхідністю стабілізації структуроутворення, релаксаційних та інших процесів, які впливають на результати вимірів.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 61 |

4.2.Вплив умов формування на волого-, маслопоглинання та щільність покриттів

Відмінною особливістю композиційних полімерних матеріалів є те, що вони при експлуатації у воді, не піддаються корозії. Однак за цих умов з'являється гігроскопічність ПКМ, тобто внаслідок взаємодії полярних груп полімеру та рідини з'являється здатність полімеру поглинати вологу з води та водних розчинів. Це призводить до зміни геометричних розмірів деталей та зміни їх фізико-механічних властивостей, а значить – до збільшення похибки експлуатації [75], що, зрештою, позначається на довговічності відновлених вузлів.

Волого- і маслопоглинання одночасно є і критерієм завершеності процесу утворення покриття, т.к. їх значення зростають із збільшенням числа дефектів покриттів. Тому визначення умов формування покритті, що забезпечують найменшу волого- та маслопоглинання, є важливим технологічним завданням, вирішення якого дозволить обґрунтовано призначити допуски та посадки сполучення з деталями з ПКМ.

Вивчення впливу температури формування на водопоглинання (рисунок 4.1) показало, що зі збільшенням температури вологопоглинання зростає, це, мабуть, спричинене інтенсифікацією пороутворення внаслідок підвищення термоокислювальної деструкції [92].

У межах тих самих температурних режимів відзначено зниження водопоглощаємості (до 1,13%) у покриттів, сформованих в УЗП. Аналогічні покриття, сформовані без впливу УЗП, мають водопоглинання в 14 рази вище і досягають 16%. Це можна пояснити більшою мірою кристалічності і більш досконалою структурою покритті, сформованих в УЗП. Підтвердженням цих припущень є більш пологий характер залежності вологопоглинання від температур формування покриттів.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 62 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

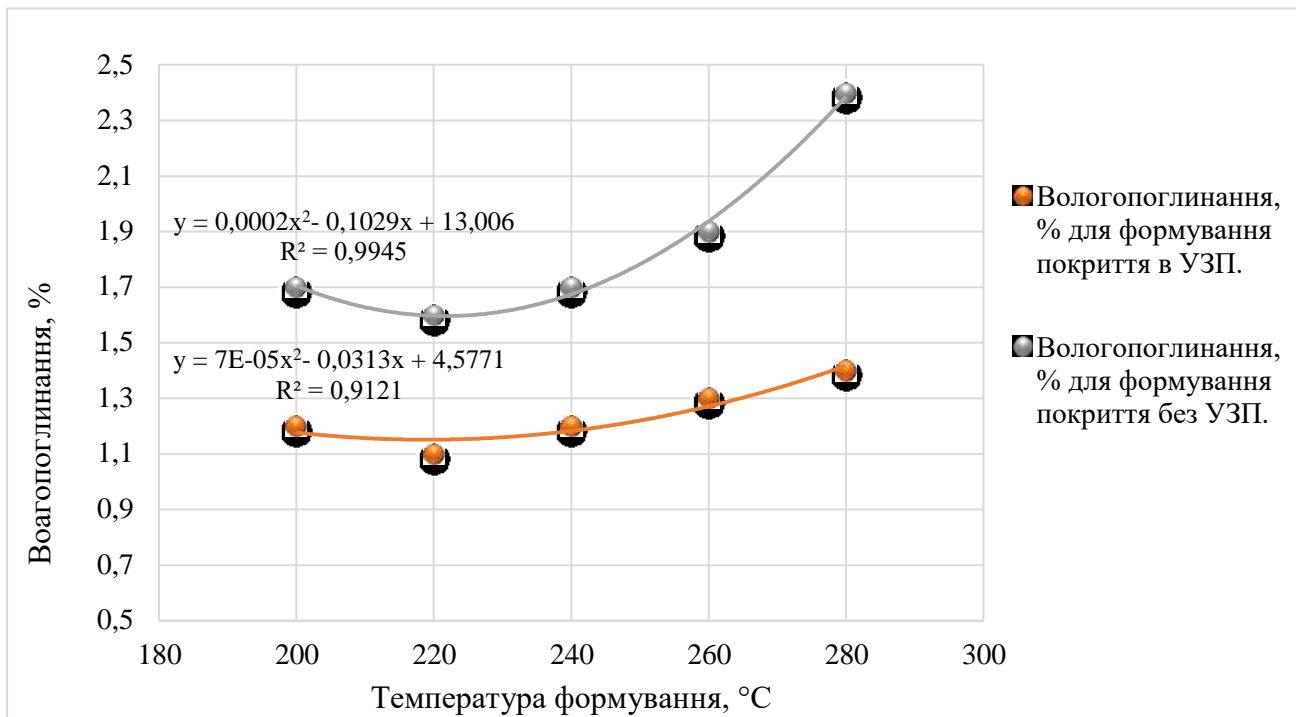


Рисунок 4.1 – Вплив температури формування на вологопоглинання покриттів при температурі середовища 23°C

Ймовірно, ультразвук у діапазоні досліджуваних температур сприяє видаленню з покриттів газових включень та упорядковує структуроутворення. Такі ж залежності спостерігаються і при вивченні маслопоглинання від температури формування покритої [93].

Найбільша маслопоглинання спостерігається при витримці покриттів у маслі з більшою температурою (рисунок 4.2). Так, при зміні температури олії від 20°C до 60°C маслопоглинання зростає, в середньому, в 1,3 рази для покритої, сформованих без УЗП, та в 1,2 рази для покриттів, сформованих в УЗП.

Екстремальні значення маслопоглинання знаходяться в межі температур 210-230°C мають такі значення: 0,29, 0,22 для покриттів, сформованих без УЗП; 0,15, 0,12 - сформованих в УЗП (перші значення

наведені для покриттів, випробуваних при температурі олії 60°C, другі - при 20°C).

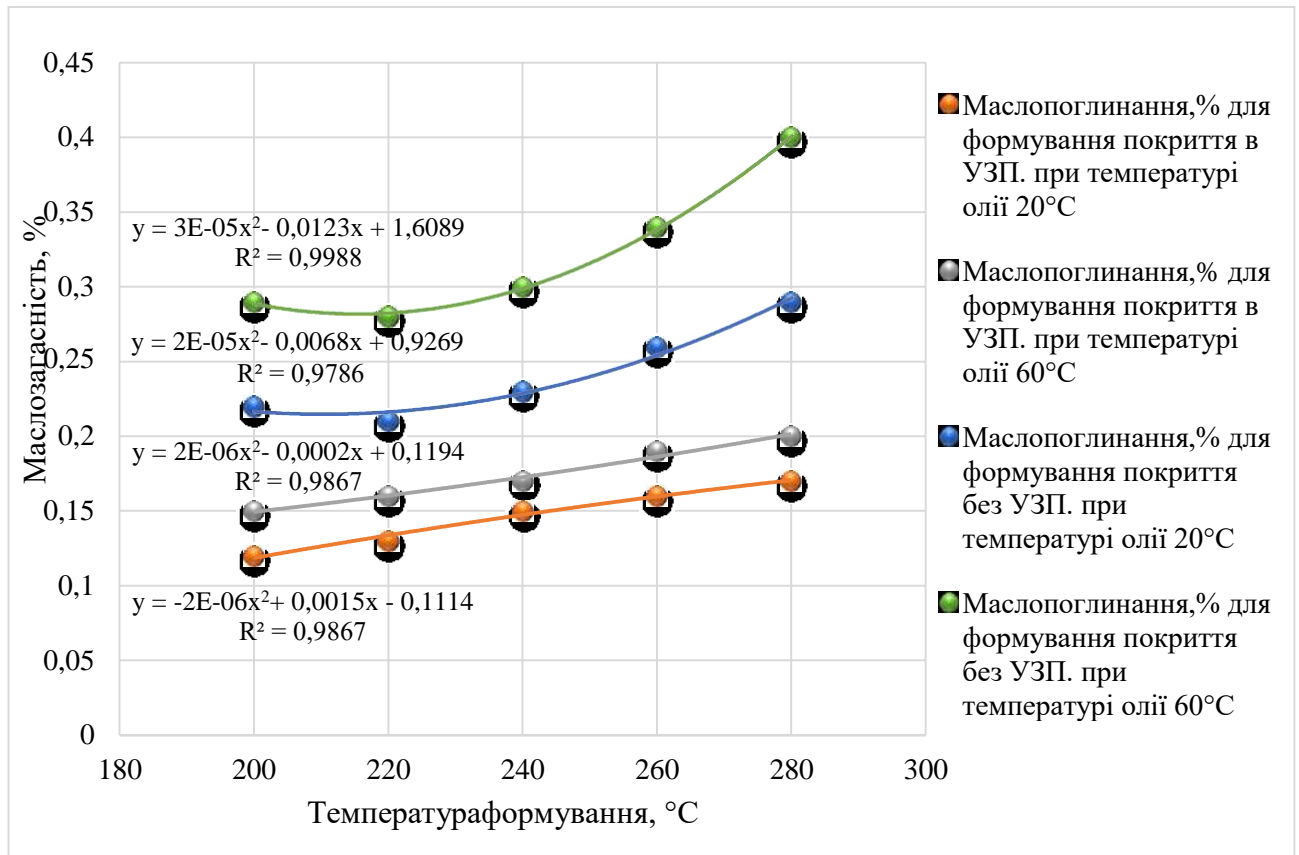


Рисунок 4.2 – Вплив температури формування на маслопоглинання

Таким чином, ультразвуковий вплив сприяє зниженню волого- і маслопоглинання до 1,4 рази, що, ймовірно, забезпечується повнішою полімеризацією полімеру, отриманням більш досконалих адгезійних зв'язків між складовими самої композиції і більш високою щільністю упаковки структурних елементів. Технологічний процес повинен забезпечити отримання покриттів з максимально можливою щільністю. У ході досліджень була вивчена залежність щільності покриття від температури формування та режимів охолодження. результати досліджень показали, що щільність, у міру зниження температури формування та зменшення швидкості охолодження покриття, збільшується та досягає максимальне значення при температурі формування 200...230°C. Це можна пояснити зміною ступеня кристалічності полімеру, від величини якої

залежить щільність упаковки макромолекул [95]. У свою чергу процес кристалізації полімерів визначається умовами формування покриттів. Ймовірно, повільне охолодження печі призводить до утворення сильно закристалізованих покриттів. Ультразвуковий вплив також сприяє підвищенню густини. Причому щільність покриттів, сформованих в УЗП менш залежна від температури формування і швидкості охолодження покриттів. Це можна пояснити здатністю ультразвуку врівноважувати релаксаційні процеси, упорядковувати структуроутворення, а отже, і збільшувати ступінь кристалічності полімерного покриття.

Таким чином, показано, що активний вплив УЗК на процес формування полімерних покриттів є ефективним засобом збільшення щільності та зниження водо- та маслопоглинання, а, отже, і зниження дефектності покриттів. Одночасно слід зазначити, що досить висока щільність покриттів виходить без впливу УЗП, при температурах формування (210...220)°С при дуже повільному охолодженні (разом з піччю).

Таким чином, результатами проведених досліджень встановлено, що оптимальні умови формування покриттів із склонаповнених порошкоподібних композицій на основі поліаміду П-12 та епоксидного олігомеру, що забезпечують отримання низької волого-, маслопоглинання та високої щільності, досягається при температурі формування (210...230)° з впливом на підкладку УЗП і подальшим повільним охолодженні покриття разом з піччю.

Поряд з іншими цінними властивостями, полімерні покриття мають здатність поглинати енергію коливань. Ця особливість пластмас дозволяє застосовувати їх у вузлах, що піддаються дії циклічних навантажень, збільшити точність роботи вузла, зменшити шум та рівень вібрації [96].

Поглинання енергії коливань характеризується властивостями полімеру, його молекулярною структурою, станом (температура

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 65 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

експлуатації, вологість, тиск), наявністю дефектів та пір.

Твердість та ударна міцність покриттів також змінюються залежно від умов формування. Для температур, при яких термодеструкція не спостерігається (200...220)°С, твердість та ударна міцність досягають найбільшого значення. Твердість покриттів, сформованих в УЗП, вища на 10...30%, а ударна міцність на 6...12%, ніж у покриттів, сформованих за ідентичних умов без впливу УЗП. Це можна пояснити підвищеною щільністю та адгезійною міцністю покриттів, сформованих в УЗП, що корелює з даними, отриманими у попередньому розділі цієї роботи.

4.3. Чинники, що впливають на працездатність підшипникових вузлів автомобілів

Відновлення деталі вважається економічно доцільним, якщо після відновлення вони можуть зберегти працездатність протягом встановленого нормативними вимогами ресурсу. В даний час ресурс відремонтованих машин повинен бути не менше 80% від нових ресурсів. Тому представляє великий практичний та науковий інтерес дослідження стабільності властивостей покриттів, що застосовуються для відновлення зношених деталей, аналіз працездатності відремонтованих деталей та вузлів загалом [97].

Працездатність деталей, відновлених полімерними покриттями, визначається насамперед адгезійною міцністю покриттів [78], яка в реальних умовах експлуатації деталей змінюється під дією вологи, температур, зовнішніх механічних навантажень. Слід зазначити, що в даний час у літературі недостатньо вивчені питання стабільності адгезійних систем, отриманих з порошкоподібних композицій, також відсутні рекомендації щодо раціонального підвищення стабільності фізико-механічних властивостей полімерних покриттів, які застосовуються для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 66 |

Відомо, що довговічність посадкових місць під підшипники кочення багато в чому визначається фізико-механічними процесами, що відбуваються в зоні контактування поверхонь, що сполучаються. Змінюючи характер взаємодії поверхонь, що контактуються шляхом цілеспрямованої технологічної підготовки, можна домогтися істотної зміни працездатності з'єднання [98].

Основними факторами, що визначають характер взаємодії сполучення, є величина поля допуску деталей, що з'єднуються, і мікрорельєф контактуючих поверхонь.

На величину допуску та форму мікрорельєфу значний вплив мають геометричні параметри сполучення, товщина покриття, характер навантаження, типи та точність підшипника, умови експлуатації, умови монтажу та демонтажу підшипника, фізико-механічні властивості покриттів відновлених деталей.

У літературі є окремі рекомендації щодо призначення посадок для пар, відновлених полімерними покриттями [11, 40, 46], але вони наводяться для конкретних матеріалів і часто не враховують всі фактори, що впливають на характер сполучень. Тому потрібне вивчення впливу умов навантаження, товщини покриття, поля допуску сполучення та шорсткості відновлених поверхонь на довговічність відремонтованих вузлів.

Таким чином, для розробки ефективної технології відновлення посадкових місць підшипникових вузлів автомобілів, що забезпечують високу довговічність відремонтованих вузлів, необхідно вивчити такі питання:

3. Зміна адгезійної міцності в умовах впливу вологи та змінних температур.

4. Вплив характеру з'єднання підшипника кочення з відновленим отвором на довговічність відремонтованих вузлів.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 67 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

5. Розробка технологічних рекомендацій щодо відновлення посадкових місць підшипникових вузлів із застосуванням покриттів із розробленої композиції.

Використовуючи математичне планування експериментів, вивчали довговічність покритті, нанесені на натурні деталі від умов навантаження та товщини покриття. Випробовували підшипникові вузли опор кочення, що складаються з підшипникового щита електродвигуна і підшипника кочення. Номінальний діаметр посадкового отвору прийняли рівним 72 мм.

Критерієм довговічності служив період часу до моменту повертання зовнішнього кільця підшипника в отворі.

Випробування проводили за методикою [40]. Режим випробувань та рівні варіювання вибрали наближеними до умов експлуатації відновлених деталей, які мали такі значення:

- вид навантаження – радіальне змінне;
- частота обертання валу – 1800 хв-1;
- товщина покриття ($0,5 \pm 0,4$ мм);
- навантаження на опори (4 ± 3 кН).

Умови та результати експериментів наведено у таблиці 4.1.

Також досліджували вплив поля допуску сполучення та шорсткості відновлених посадкових місць на міцність з'єднання та довговічність підшипникових вузлів. Одночасно вивчали зміну характеру посадки відновлених підшипникових вузлів від способу та кількості збирання.

Шорсткість оцінювали за традиційно застосовуваним параметром Ra і параметром форми tr. Ці параметри найповніше характеризують контактну жорсткість пресових з'єднань [99].

Таблиця 4.1 - Умови експерименту та результати дослідження

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 68 |

довговічності покриттів від товщини та навантаження

| № дослідю | План у кодованих змінних | | План у натуральних змінних | | Результати експерименту | |
|-----------|--------------------------|-------|----------------------------|------------------|-------------------------|----------|
| | x1 | x2 | Товщина покриття, мм | Навантаження, кН | Luз1, год. | L2, год. |
| 1 | -1 | 0 | 0,1 | 4 | 465 | 310 |
| 2 | +1 | 0 | 0,9 | 4 | 365 | 190 |
| 3 | +0,5 | +0,87 | 0,7 | 7 | 250 | 10 |
| 4 | +0,5 | -0,87 | 0,7 | 1 | 450 | 270 |
| 5 | -0,5 | +0,87 | 0,3 | 7 | 300 | 75 |
| 6 | -0,5 | -0,87 | 0,3 | 1 | 460 | 360 |
| 7 | 0 | 0 | 0,5 | 4 | 410 | 240 |
| 8 | 0 | 0 | 0,5 | 4 | 400 | 252 |
| 9 | 0 | 0 | 0,5 | 4 | 410 | 252 |
| 10 | 0 | 0 | 0,5 | 4 | 412 | 236 |

Шорсткість визначали шляхом обробки профілактограм, отриманих на профілактографі-профілометрі «Калібр 201» за ГОСТ 19300-86 Засоби вимірювання шорсткості поверхні профільним методом. Профілографи-профілометри контактні. Типи та основні параметри.

Різні значення шорсткості посадкового отвору досягали зміною режимів механічної обробки та геометрії ріжучого інструменту. Механічну обробку проводили на токарному верстаті 1К 62. При необхідності посадковий отвір шліфували тонкою шліфувальною шкіркою. Режими різання та геометрію різців приймали згідно.

Умови контактування суттєво змінюються при багаторазовому складанні з'єднань. Так як найбільше змінання мікронерівностей відбувається при механічному складанні, було вивчено зміну натягу та шорсткості від значення початкового натягу та кількості збірок. Дослідження проводили за планом, наведеним у таблиці 4.2.

| | | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | | | 69 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | | | |

Таблиця 4.2 - Умови експерименту та результати зміни натягу та шорсткості від початкового натягу та кількості збірок

| № досвіду | План у кодованих змінних | | План у натуральних змінних | | Натяг, мкм | тсб, % |
|-----------|--------------------------|-------|----------------------------|-----------------------|------------|--------|
| | x1 | x2 | Число збірок | Початковий натяг, мкм | | |
| 1 | -1 | 0 | 0 | 50 | 50 | 25 |
| 2 | +1 | 0 | 12 | 50 | 20 | 50 |
| 3 | +0,5 | +0,87 | 9 | 80 | 30 | 70 |
| 4 | +0,5 | -0,87 | 9 | 20 | 10 | 42 |
| 5 | -0,5 | +0,87 | 3 | 80 | 50 | 60 |
| 6 | -0,5 | -0,87 | 3 | 20 | 15 | 35 |
| 7 | 0 | 0 | 6 | 50 | 25 | 50 |
| 8 | 0 | 0 | 6 | 50 | 25 | 50 |
| 9 | 0 | 0 | 6 | 50 | 30 | 45 |
| 10 | 0 | 0 | 6 | 50 | 25 | 50 |

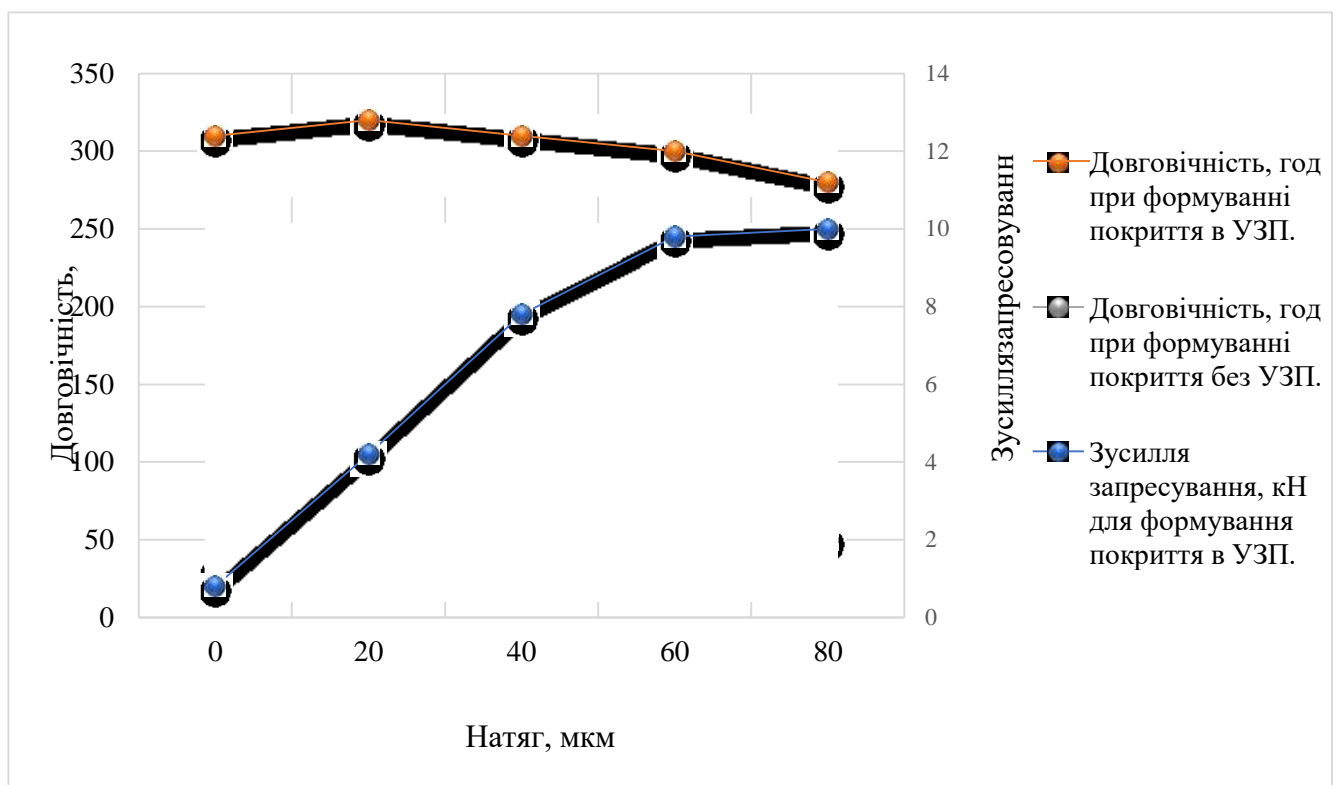
З проведеного нами аналізу випливає, що найбільша довговічність пар підшипникових вузлів, відновлених полімерними покриттями, досягається при їх з'єднанні з незначним натягом. Тому вимагає додаткових досліджень залежність довговічності та міцності з'єднання від натягу. Дослідження показали, що висока довговічність спостерігається при з'єднанні деталей з посадки з незначним натягом. Зменшення довговічності для сполучень з нульовим натягом або з зазором пояснюється тим, що зовнішнє кільце підшипника починає від початку випробувань прослизати по посадочній поверхні. Зважаючи на те, що пластмаси мають низькі пружні властивості, мікронерівності посадкової поверхні швидко вигладжуються, що призводить до появи зазору між підшипником і корпусом.

В результаті силових і температурних деформацій, що мають місце в умовах тертя і ударних навантажень, сили зчеплення між поверхнями, що

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|------|
| | | | | | | Арк. |
| | | | | | | 70 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

сполучаються, зменшуються, поверхневий шар, а потім і все покриття руйнується. Слід зазначити, що довговічність покриттів, сформованих в УЗП досить висока і при нульовому натягу. Це кращими фізико-механічними властивостями зазначених покриттів проти покриттями, сформованими у звичайних умовах. Найвища довговічність (до 320 год) спостерігається у сполучення з натягом 15...40 мкм. Для з'єднань з натягом 20 мкм (на графіці точка обведена кругом) випробування проводилися при двох зборках. Це було викликано значним зносом підшипника та валу.

отвори. При натягу 15...40 мкм зона контактування поверхонь, що з'єднуються, збільшується за рахунок отримання рівноважної шорсткості, під якою слід розуміти шорсткість, що встановлюється на межі контакту в результаті повзучості і релаксації полімеру.



Рисинук 4.3 Дослідження впливу натягу на довговічність

При натягу більше 40 мкм також виходить рівноважна шорсткість, але при цьому мають суттєві деформаційні зміни в покритті і на межі розділу фаз в зоні адгезійного контакту. Це відбувається тому, що під час заpresування

підшипника мікронерівності, що максимально виступають, зрізаються або під зусиллям зсуву порушують адгезійні зв'язки між підкладкою і адгезивом. Зі збільшенням натягу більше 70...80 мкм суцільність покриття порушується в результаті зрізу шару полімеру під час запресування підшипника і тому неможливо отримувати нормальне з'єднання (це показано вертикальною лінією).

Дослідження показали, що міцність з'єднання (зусилля розпресування) після повторного складання у кілька разів нижче, ніж після першого складання. Це можна пояснити змінанням мікронерівностей після першого складання і отриманням характеру сполучення, що встановився. Залежність має практично лінійний характер. При цьому міцність з'єднання менш чутлива до зміни початкового натягу.

На основі проведених досліджень можна призначити посадку для вузлів підшипникових опор кочення, відновлених полімерними покриттями. У зв'язку з тим, що максимальна довговічність досягається при початковому натягу, що дорівнює 15 ... 40 мкм, для покриттів, отриманих без впливу УЗП, і 0 ... 60 мкм для покриттів, сформованих в УЗП, посадкові місця можна обробляти, відповідно, для першого випадку по Р6, для другого - N7 або Р7.

Посадкові місця підшипникових вузлів рекомендується обробити за N7 - у разі одноразового складання, Р7 - у разі необхідності багаторазового складання вузла.

Таким чином, застосування полімерних покриттів, сформованих в УЗП для відновлення посадкових місць підшипникових вузлів кришок генераторів автомобілів дозволяє підвищити їх якість і зменшити точність механічної обробки на один квалітет порівняно з кришками серійно. Це позитивно позначається економічну доцільність застосування запропонованого способу відновлення.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 72 |

5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ПОСАДОЧНИХ МІСЦЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ КАМЕРНИМ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИМ СПОСОБОМ

5.1. Загальний опис технологічного процесу

На етапі розвитку ремонтного виробництва пред'являються нові, вищі вимоги до технології відновлення та ремонту деталей і вузлів автомобільної техніки.

Технологічний процес повинен забезпечити відновлення початкових функціональних властивостей деталей при найбільшій продуктивності та мінімально-можливих витратах. Це можливо досягти встановленням оптимальної послідовності операцій процесу, вибором ефективного способу та режимів їх виконання, обладнання, оснастки та інструменту.

Лабораторні та стендові дослідження дозволили обґрунтувати вибір способу та режимів нанесення покриттів із порошкоподібних композицій при відновленні посадкових місць підшипникових вузлів корпусних деталей. Слід зазначити, що особливості виробничих умов потребують індивідуального підходу під час вирішення питання відновлення конкретних деталей. Так, попередні дослідження показали, що при нанесенні покриттів на посадкові поверхні підшипникових вузлів не забезпечуються необхідною рівномірністю покриття по довжині і периметру поверхні, що покривається.

Виявлено, що рівномірність можна поліпшити зміною форми та розмірів перехідної насадки дозуючого пристрою (поз. 6 Рисунок 5.2), яка виконує роль демпфера повітряного порошку та частинок порошку, що переміщуються до поверхні, що покривається.

Для успішного подальшого впровадження технології у виробництво слід розробити класифікацію деталей, відновлення яких можливе

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 73 |

розробленим способом із запропонованою композицією, а також дати техніко-економічну оцінку технології.

Під час розробки технології відновлення вирішували такі вопрсы:

1. Розробити ефективне обладнання і оснащення для нанесення, формування та подальшої механічної обробки покриття.

2. Розробка технологічного процесу відновлення посадкових місць підшипникових вузлів кришок генераторів автомобілів.

3. Впровадження технології у виробництво та її техніко-економічне обґрунтування.

Дослідження проводили у три етапи.

На першому етапі розробили обладнання та оснащення для нанесення, формування та подальшої механічної обробки покриття.

Було досліджено конструктивні параметри та проведено експлуатаційні та техніко-економічні показники впровадження обладнання та оснащення. Для цього вивчали рівномірність покриттів, одержаних із застосуванням технологічного обладнання.

Покриття наносили на сталеві зразки (рисунок 5.1) діаметром отвору 42 мм, глибина 65 мм. Форма отвору кругла із напівглухим дном. Поверхні 1 та 2 обробляли з однієї установки на токарному верстаті, що забезпечувало мінімальне відхилення від співвісності. Вимірювання проводили у двох поясах аа і б-б та у п'яти перерізах на установці для вимірювання зношування посадочних місць (див. Рисунок 2.3).

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 74 |

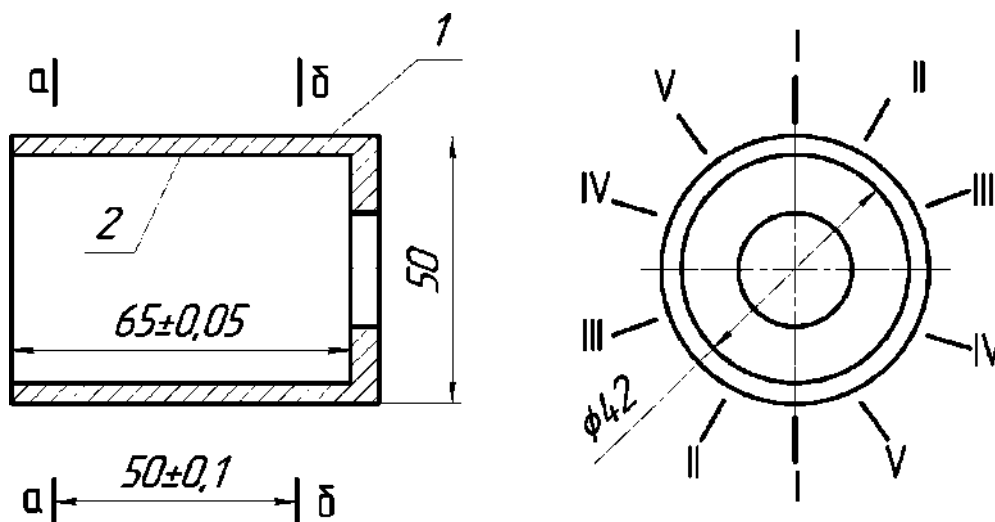


Рисунок 5.1 – Зразок та схема вимірювань відхилення

Базування зразків здійснювали по зовнішній поверхні обертанням індикаторного нутроміра у бік найменшого та найбільшого відхилення від номінального номінального розміру отвору. Потім визначали рівномірність покриття.

Товщину покриття визначали відніманням діаметра до нанесення покриття з діаметра покритого отвору.

На другому етапі було встановлено послідовність виконання технологічних операцій, розроблено рекомендації щодо вибору технологічних режимів нанесення та формування покриттів.

Третій етап був присвячений експлуатаційній перевірці відновлених деталей, розробці виробничих рекомендацій щодо впровадження технології у виробництво та техніко-економічної оцінки проведеної роботи.

5.2. Розробка технологічного обладнання та оснащення

Вибір устаткування - одне з найважливіших завдань складання будь-якого технологічного процесу. Обладнання повинно забезпечити необхідну продуктивність та якість роботи, бути зручним та безпечним в експлуатації, мати мінімальні наведені витрати на виконання

| | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | | 75 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | | |

технологічного процесу та мінімальний сорок окупності [108].

Виробничі випробування показали, що доцільно відокремити операції нанесення полімерного порошку та його оплавлення. Це пов'язано з технологічною складністю оплавлення порошку безпосередньо на установці для його нанесення, а також з економічними міркуваннями - тривалість оплавлення порошку значно більша за тривалість його нанесення - що позначається на продуктивності процесу відновлення. Тому була спеціально розроблена установка для нанесення покриттів з подальшим оплавленням порошку в термопечі - у разі формування покриттів без УЗП та на спеціальній установці для нагрівання та формування покритті з впливом УЗП.

Установка для нанесення покриттів (рисунок 5.2) складається з вібровихревої ванни та джерела високої напруги. Вібровихрева ванна являє собою закритий об'єм, виготовлений з токонепровідного матеріалу (наприклад, склопластику) і складається з повітряної камери 1 і камери напилення 3. Камери розділені пористою перегородкою 2, під якою встановлена електродна сітка 4, яка підключена до джерела високої напруги 12. встановлюється на перехідній насадці 6 і фіксується затискачем 9, в якому вмонтований магніострикційний перетворювач з хвилеводом 11.

Полімерний порошок приводиться в псевдозріджений стан в результаті вібраційного впливу, отриманого від електромагнітного вібратора 13 і вихрового впливу, отриманого з повітряної магістралі 16. Тиск повітря регулюється манометром 14, а очищення повітря здійснюється при його проходженні через вологовідділювач 1.

Під час псевдозрідження порошку електродну сітку подають високу напругу (30-60 кВ). Заряджені частинки полімеру осідають на деталь, що покривається, що має протилежний заряд. Полімерний порошок має доступ тільки до поверхні посадкової поверхні, що відновлюється. Вихід

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 76 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

полімерного порошку через верхній отвір закритий спеціальною перегородкою, що складається з тканинного фільтра 11 і 10 упору.

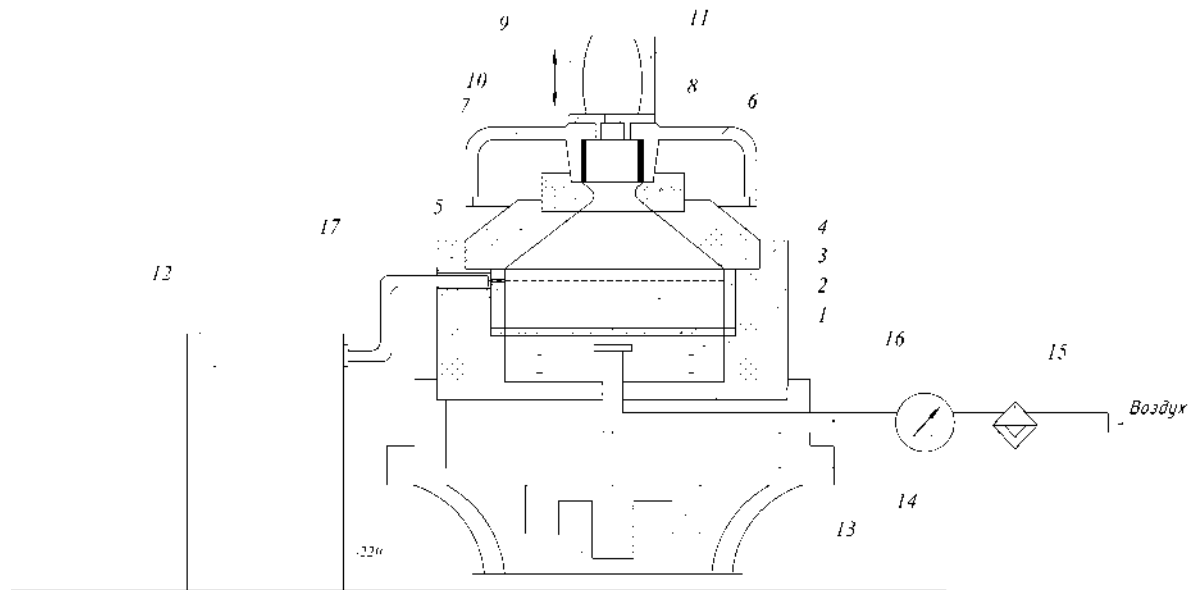


Рисунок 5.2 – Схема установки для нанесення полімерних покриттів:

1 – повітряна камера; 2 – пориста перегородка; 3 – камера наплення порошку; 4 –електродна сітка; 5-кришка; 6 – насадка; 7 - деталь, що відновлюється; 8 –покриття; 9 – затискач; 10 - упор; 11 хвилевід; 12 – джерело високогонапруги; 13 – вібратор; 14 – манометр; 15 - масло-вологовідділювач; 16 – повітряна магістраль; 17 – корпус

Геометрична форма і розмір перехідної насадки, через яку проходить полімерний порошок під час його осадження на деталі, істотно впливають на якість і товщину покриття, а значить і на продуктивність процесу. При проектуванні установки необхідно надати демпфірующому отвору насадки гіперболоїдну форму. Мінімальний діаметр демпфуючого отвору повинен дорівнювати $(0,4...0,6) D_p$. При такому співвідношенні досягається максимальна продуктивність за мінімальних відхилень покриття від правильної форми.

Для оплавлення полімеру була розроблена установка (рисунок 5.3), яка відрізняється тим, що для інтенсифікації процесу формування

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 77 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

покріттів використовується ультразвуковий вплив на деталь, а для нагріву - три індукційні печі, що мають вертикальний зворотно-поступальний рух.

Хвилі 3 встановлені на жорсткій підставці 6 і підключені до ультразвукового генератора 1. Деталь 2 після нанесення порошкоподібного полімеру на установці для нанесення порошку встановлюється на хвилевід і притискається затискачем 4. Потім піч опускають над деталлю і витримують в такому положенні до оплавлення порошку піднімають нагору і деталь відправляють на механічну обробку після її охолодження.

Для отримання ультразвукових коливань використовують промислові генератори типу УЗГ із постійним режимом подачі УЗК.

Конструкція хвилеводів визначається розмірами і формою деталей, що відновлюються. Для забезпечення ефективної передачі ультразвукових коливань необхідно забезпечити хороший контакт між хвилеводом і деталлю, що покривається.

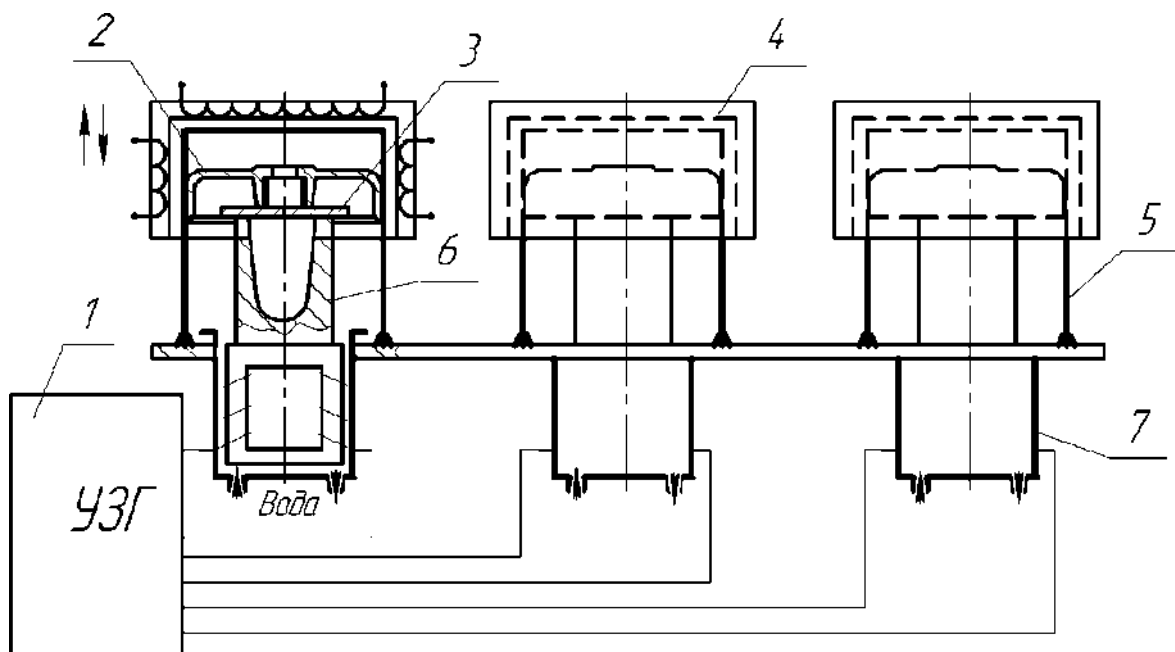


Рисунок 5.3 – Установа для оплавлення порошку в УЗП:

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

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 78 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

Для механічної обробки посадкових отворів деталей типу кришка генератора розроблено спеціальний пристрій, який забезпечує отримання необхідної точності обробки посадкового отвору (6-7 квалітетом) та необхідну співвісність посадкового отвору (див. рис. 5.4). Змінні насадки 5 дозволяють забезпечити більшу універсальність пристрою, що дозволяє обробляти номенклатуру деталей типу посадкових місць підшипників кришок генераторів, щитів електродвигунів.

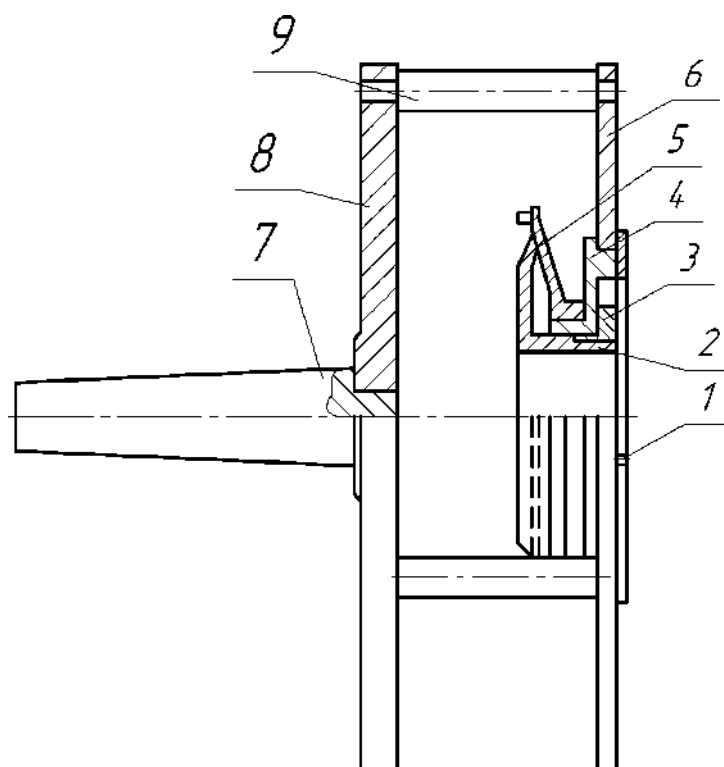


Рисунок 5.4 – Схема пристосування для механічного оброблення підшипникових місць кришок генераторів: 1 – гайка; 2 – упор; 3 – дискова п'ята; 4 – перехідна втулка; 5 – змінна мембрана; 6, 8 – завзяті диски; 7 – настановний конус; 9 – розпірка

Пристрій виконано у вигляді мембранного патрона (рисунок 5.4) і складається з двох дисків 6 і 8, пов'язаних між собою розпірками 9. Один з дисків забезпечений конусом 7, для кріплення в шпинделі токарно-

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 79 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТAM 22.171221.000. ПЗ | | | | |

гвинторізного верстата. На другому диску нерухомо закріплена змінна перехідна втулка 4, на якій встановлений пакет розтискних мембран 5. Пелюстки мембран забезпечені радіальними і торцевими настановними поверхнями, а ті в свою чергу з настановними поверхнями оброблюваної деталі.

Внутрішня поверхня перехідної втулки пов'язана зі маточкою змінної дискової п'яти 3, диск якої стикається з пакетом тарілчастих мембран. Розжим тарілчастих мембран, при встановленні та закріпленні деталі здійснюється за допомогою гайки 1, яка при закручуванні передає осьове обертання упору 2, який у свою чергу тисне на мембрани 5, розтискаючи їх.

При відкручуванні гайки 1 упор зміщується у зворотний бік під зусиллям мембран, самі мембрани стискаються і відпускають деталь. Таке виконання пристосування дає можливість обробляти деталі з одностороннім розташуванням оброблюваної та настановної поверхні при точності центрування діаметром 0,02...0,05 мм і по торцю 0,01...0,05 на 100 мм довжини.

5.3.Розробка технологічного процесу

У ремонтному виробництві процес відновлення деталей поділяється на такі етапи: очищення та миття деталей, дефектування, вибір технологічних баз, підготовка поверхні, що підлягає відновленню, відновлення зношених поверхонь та контроль якості відновлення. Зазначені етапи включають окремі операції, які є найважливішими елементами технологічного процесу. Раціональний вибір та побудова операцій зумовлює продуктивність, якість та собівартість відновлення .

Конструктивні та технологічні особливості деталей підшипникових вузлів опор кочення визначають вибір та порядок технологічних операцій.

На основі аналізу існуючих прогресивних технологій та проведених попередніх дослідів встановлена наступна схема відновлення посадкових

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 80 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

місць підшипникових місць кришок генераторів:

1. Очищення та миття деталей.
2. Дефектація деталей відповідно до технічних умов ремонту.
3. Термічний. Проводять з метою вигорання залишків мастила.

Необхідність цієї операції викликана тим, що в порах відновлюваної поверхні залишаються включення мастила. Під час оплавлення порошкового матеріалу це мастило розширюється, виходить із пор і, потрапляючи в зону розділу покриття-підкладка, значно погіршує адгезійний контакт між полімером та основою.

Інші способи підготовки поверхні (знежирення, травлення, фосфатування, пасивування) не дали бажаних результатів, особливо при відновленні деталей із алюмінієвих сплавів.

4. Попередня механічна обробка зношених поверхонь. Мета операції - зняття дефектного шару і відновлення початкової форми поверхні, що відновлюється. Цю операцію необхідно виконувати виходячи з рекомендацій, наведених у розділі 4, тобто посадковий отвір необхідно розточити до усунення зносу з шорсткістю $Rz = 15 \dots 30$ мкм. Таку шорсткість можна отримати напівчистовим розточуванням [110].

5. Нанесення та формування покриття – основна операція технологічного процесу, від якої залежить якість відновлення.

На основі аналізу результатів досліджень, проведених у попередніх розділах, прийнятий спосіб напилення покриттів із порошкоподібних композицій у поєднаному електростатичному та ультразвуковому полі. Як матеріал для покриттів визначена порошкоподібна композиція наступного складу:

- а) епоксидний олігомер П-ЕП-219 - 32 .. 40%; б) скляне борошно - 9,8...11,6%;
- в) порошкоподібний поліамід 12 - інше. Розміри частинок 80–200 мкм.

Аналіз результатів досліджень, проведених у розділах 3 та 4,

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 81 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

дозволив розробити рекомендації щодо вибору технологічних режимів нанесення та формування покриттів та параметрів УЗП. Ці режими були випробувані у виробничих умовах та скориговані з урахуванням специфічних особливостей виробничої технології. Слід зазначити, що наведені режими є орієнтовними й у кожному даному випадку потребують індивідуального коригування. Викликано це тим, що плівкоутворення залежить від численних факторів, які у виробничих умовах складно враховувати як у розрахунках, так і в практичних рекомендаціях. До таких факторів відносяться: розміри і конфігурація деталей, товщина покриття, теплопровідність деталі, вид нагріву, відношення маси деталі до поверхні, що покривається, дисперсійний склад порошку, вологість і заряд порошку, кількість шарів покриттів, що наносяться, та ін. Технологічні режими формування покриттів із полімерних композицій та параметри УЗК наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Технологічні режими нанесення та формування покриттів з порошкоподібної композиції в суміщеному електростатичному та ультразвуковому полі

| № п/п | найменування показника | Одиниці вимірювання | Значення |
|-------|----------------------------------|---------------------|-----------|
| 1 | Напруга на електродній сітці | кВт | 40-60 |
| 2 | Тиск повітря у повітряній камері | МПа | 0,03-0,08 |
| 3 | Тривалість напилення | з | 15-60 |
| 4 | Температура формування покриття | °С | 200-220 |
| 5 | Тривалість формування покриття | хв | 16-25 |
| 6 | Частота УЗК | кГц | 18-22 |
| 7 | Амплітуда УЗК | мкм | 8-13 |

6. Фінішна механічна обробка виконується з метою надання відновленої поверхні необхідної шорсткості та розмірів, які мають забезпечити оптимальні умови контактування підшипника кочення та

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | 82 |

корпусної деталі. Як фінішна обробка застосовується тонке розточування, яке проводиться на режимах різання кольорових металів, що не призводить до зміни структури полімеру і не впливає на якість поверхні.

При цьому посадкове місце підшипникового вузла необхідно обробити з полем допуску N7 або P7 і шорсткістю $Ra = 2,5 \dots 0,63 \text{ мкм}$ і $t_{сб} 25\%$.

Схема технологічного процесу представлена рисунку 5.5.

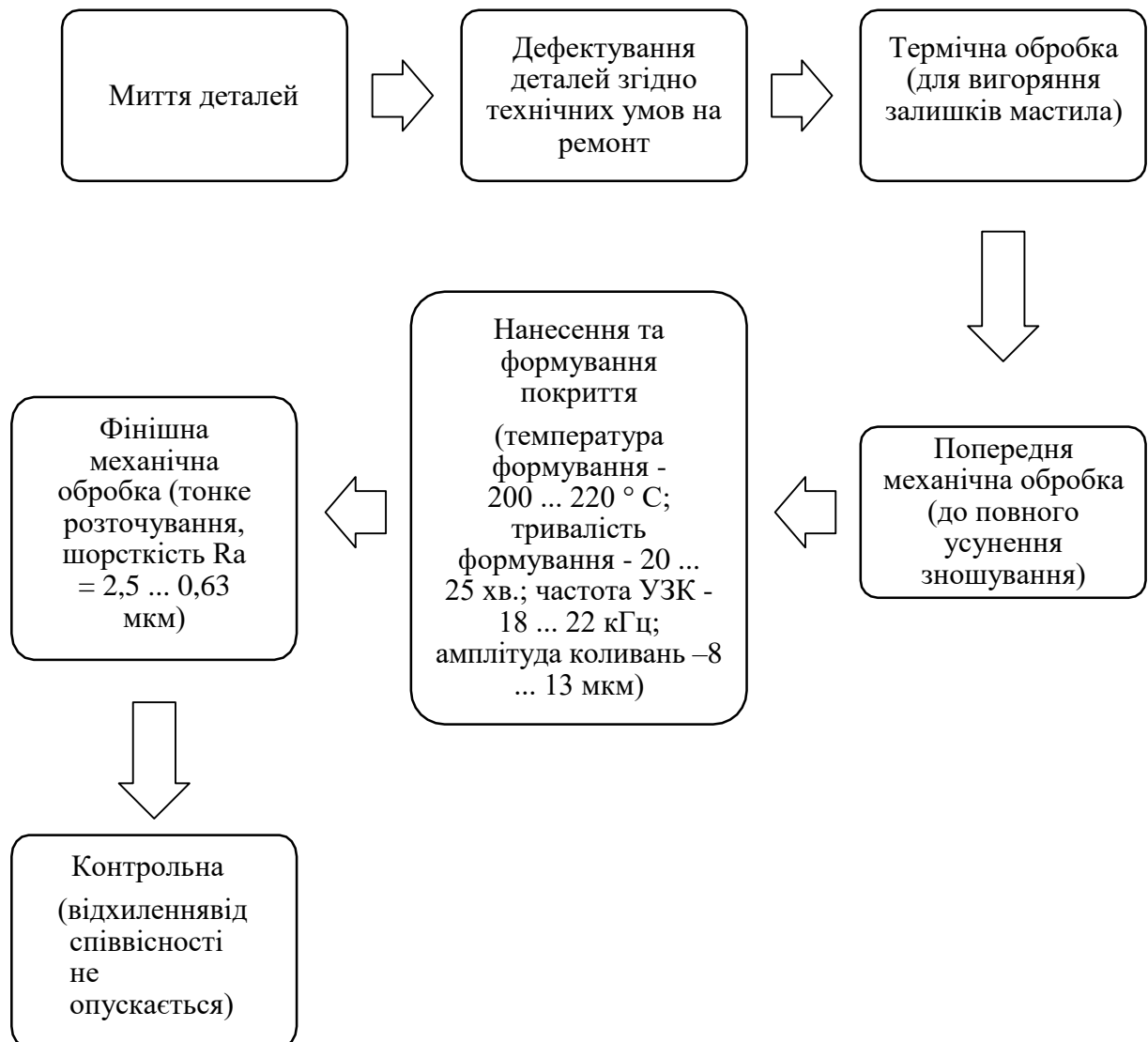


Рисунок 5.5 - Схема технологічного процесу відновлення зношених місць підшипникових вузлів

Експлуатаційну перевірку проводили на підприємствах транспортної галузі ПМР. Перевіряли генератори з відновленими кришками генераторів

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|-------------------------|------|
| | | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | 83 |

автомобілів.

Генератори з відновленими кришками встановлювали автомобілі, що експлуатуються в різних умовах. Тривалість експлуатації визначали за показниками одометра при випуску та поверненні автомобілів з лінії. При цьому враховували час простоїв, пов'язаних із проведенням призначених технічних обслуговувань та ремонтів.

Маршрутна технологія відновлення посадкових місць під підшипники кочення кришок генераторів автомобілів

| № операції | Найменування операції | Устаткування | Зміст операції |
|------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Мийна | Ультразвукова ванна УЗВ-12/200 МП | Промити деталь у 2-2,5% розчині МС-6 або МС-8 |
| 2. | Дефектувальна | - | Виробляти дефектування згідно з технічними умовами на ремонт |
| 3. | Термічна | Термопіч | Нагрівати деталь до температури 150-200°З витримці при цій температурі 1,5-2 год. |
| 4. | Токарна | Токарно-гвинторізний верстат 1К 62, пристрій для механічної обробки | Розточити отвір для посадки до повного встановлення зносу з шорсткістю Rz 15-30 мкм. |

| | | | |
|----|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5. | Нанесення покриття | Нанесення для покриттів із порошкоподібних композицій у поєднаному електростатичному та ультразвуковому полі | Наносити порошкоподібну композицію на посадкові місця, що відновлюються, з попередньою обробкою деталей УЗП: $\Phi=18-22$ кГц, $A=8\dots13$ мкм, напруга на електродній сітці 40-60 кВ, тиск повітря в |
| | | | робочої камери 0,02-0,08 МПа, тривалість наплення 15-60 с. |
| 6. | Формування покриття | Установка для формування покриттів в ультразвуковому полі | Формування покриття в УЗП. Частота УЗК 18-22 кГц, амплітуда УЗК 8...13 мкм, температура формування 200-220 ° С, тривалість формування 16-25 хв. |
| 7. | Токарна (тонке розточування) | Токарно-гвинторізний верстат 1К 62 | Розточити посадковий отвір з шорсткістю Rz 2,5-0,63 мкм та $tro \geq 25\%$ |
| 8. | Контрольна | - | Виконати повний контроль деталі відповідно до технічних умов на ремонт |

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 85 |

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз літературних джерел, аналіз ремонтного фонду ПМР дозволили розробити технологічний процес відновлення зношених посадочних місць підшипникових вузлів автомобілів.
2. Розроблено моделі розвитку втомних тріщин у старіючих матеріалах деталей автомобілів.
3. Зроблено оптимізацію полімерного композиційного матеріалу для відновлення посадкових місць під підшипники кочення автомобілів методом вібровихревого електростатичного напилення.
4. Визначено оптимальні технологічні режими формування покриттів із розробленої композиції у спільному електростатичному та ультразвуковому полі, що забезпечують високу адгезію та міцність з'єднання.
5. Експериментально показано, що адгезійна міцність полімерних покриттів залежить від матеріалу підкладки і стану поверхні, що покривається.
6. Визначено поле допуску та шорсткість посадкових поверхонь, відновлених розробленою композицією, з умов забезпечення найвищої довговічності та найбільшої міцності зчеплення.
7. Встановлено, що запропонований склад композиції, нанесений за оптимальних умов на зношені місця підшипникових вузлів автомобілів, дозволяє проводити багаторазовий монтаж і демонтаж підшипникового вузла.
8. Розроблено технологічний процес відновлення зношених місць підшипникових вузлів кришок генераторів автомобілів за допомогою полімерного матеріалу, що рекомендується.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 86 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | |

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зорін В.А. Підвищення довговічності дорожньо-будівельних машин шляхом удосконалення системи технічного обслуговування та ремонту: Дис. докт. техн. наук. . 1998. 411 с.
2. Беркович М.С. Дослідження та підвищення довговічності підшипникових вузлів тракторних трансмісій: Дис. канд. техн. наук. . 1972. 130 с.
3. Гаджієв А.А. Технологічне забезпечення довговічності підшипникових вузлів машин застосуванням полімерних матеріалів: Дис. докт. техн. наук. . 2006. 387 с.
4. Голего Н.Л. Фізико-хімічна механіка контактної взаємодії та фреттинг-корозія // Фізико-хімічна механіка фреттинг-корозії., 1973. С. 4-5.
5. Голего Н.Л., Аляб'єв А.Я., Шевель В.В. Фреттинг-корозія металів. Київ: Техніка, 1974. 270 с.
6. Аляб'єв А.Я., Шевеля В.В., Маркевич К.В., Рожков М.М. Збірник праць: надійність та довговічність авіаційних газотурбінних двигунів. // Дослідження основних стадій руйнування поверхні металу при фреттинг-корозії. Київ. 1971. Т. I. С. 45-50.
7. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-корозія. Л: Машинобудування., 1976. 271 с.
8. Рябченко А.В., Муравкін О.М. Фреттинг-корозія та захист металів, ЦБТІ, М, Огляд вітчизняної та зарубіжної літератури 1957.
9. Waterhouse RB Fretting letigue. London: Applied sciect publ, 1981. 244 pp.
10. Онопрієнко В.П. Дослідження впливу деяких фізико-механічних та хімічних факторів на зношування металів при фреттинг-корозії: Дис. канд. техн. наук. Київ. 1973. 174 с.
11. Щербіна Д.А. Дослідження структурно-енергетичних особливостей

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|-------------------------|------|
| | | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | 87 |

зношування металів при фреттинг-корозії: Дис. канд. техн. наук. Київ. 1975. 248 с.

12. Аляб'єв А.Я. Надійність та довговічність авіаційних газотурбінних двигунів // Фреттинг-корозія металів та її структурно-енергетичний опис. Київ. 1971. Т. I. С. 35-39.
13. Кондрашин С.І. Відновлення нерухомих з'єднань підшипників кочення сільськогосподарської техніки анаеробними герметиками з мінеральними дисперсними наповнювачами: дис. канд. техн. наук. Мічурінськ. 2009. 119 с.
14. Аляб'єв А.Я., Крилов К.А., Онопрієнко В.П. Надійність та довговічність авіаційних газотурбінних двигунів // Вплив зовнішніх факторів на фреттинг-корозію армко-заліза та сталі. Київ. 1971. Т. I. С. 51-55.
15. Білий В.А. та ін. Тертя та знос матеріалів на основі полімерів. МН: Наука та техніка, 1976. 432 с.
16. Курчаткін В.В. Відновлення посадкових місць підшипників полімерними матеріалами. М: Вища школа, 1983. 80 с.
17. Масіно М.А. Дослідження зносів та методика визначення коефіцієнтів відновлення корпусних деталей автомобілів. // Автомобільна промисловість. 1973. № 8. С. 19-22.
18. Курчаткін В.В. Відновлення посадок підшипників кочення сільськогосподарської техніки полімерними матеріалами: Дис. доктора техн. наук. . 1989. 407 с.
19. Чи Р.І. Відновлення нерухомих з'єднань підшипників кочення сільськогосподарської техніки полімерними матеріалами: Дис. докт. техн.наук. . 2001. 340 с.
20. Башкирцев В.М. Відновлення деталей машин та обладнання адгезивами: Дис. докт. техн. наук. . 2004. 397 с.
21. Дмитрієв А.Д. дослідження працездатності нерухомих сполук,

| | | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|--|-------------------------|------|
| | | | | | | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | | | 88 |

відновлених за допомогою епоксидних смол, модифікованих аліфатичною смолою ТЕГ-1: Дис. канд. техн. наук. . 1970. 137 с.

22. Гаджієв А.А. Дослідження можливості підвищення ресурсу нерухомих сполук, відновлених полімерними матеріалами. під час ремонту сільськогосподарської техніки: дис. канд. техн. наук. . 1978. 154 с.
23. Мотовилін Г.В. Відновлення автомобільних деталей олігомерними композиціями. : Транспорт, 1981. 111 с.
24. Шубін О.Г. Підвищення довговічності отворів корпусних корпусних деталей сільськогосподарської техніки, відновлених герметиком 6Ф: дис. канд. техн. наук. . 1980. 160 с.
25. Карпатницький А.М., Кузнєцова О.В., Дімент Б.І., Стеценко П.А. Анаеробні клеї в тракторних та сільгоспмашинах // Трактори та сільськогосподарські машини. 1981. Т. 4. С. 32-35.
26. Димов В.А., Коновалов А.А. Застосування анаеробних матеріалів під час складання підшипникових з'єднань // Техніка сільському господарстві. 1981. Т. 4. С. 52-54.
27. Баскаков В.М. Довговічність нерухомих сполук сільськогосподарських тракторів та шляхи її підвищення : дис. канд. техн. наук. . 1986. 201 с.
28. Купрієв М.П. Підвищення довговічності з'єднань підшипникових вузлів відремонтованої сільськогосподарської техніки: дис. канд. техн. наук. . 1988. 212 с.
29. Карпатницький А.М. Дослідження несучої здатності анаеробних клеїв у циліндричних сполуках // Трактор і сільськогосподарські машини. 1989. Т. 2. С. 27-30.
30. Аязбаєв М.Д. Довговічність нерухомих з'єднань типу вал-підшипник кочення, відновлених герметиком 6Ф в умовах сільськогосподарських ремонтних підприємств: дис. канд. техн. наук. . 1984. 193 с.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 89 |

31. Аль-Ассех Рашад Фахад. Обґрунтування вибору полімерного матеріалу для відновлення та підвищення довговічності нерухомих з'єднань підшипників кочення сільськогосподарської техніки: дис. канд. техн. наук. . 1989. 181 с.
32. Тоїров І.Ж. Відновлення нерухомих з'єднань підшипників кочення сільськогосподарської техніки анаеробними герметиками: дис. канд. техн. наук. . 1990. 172 с.
33. Чи Р.І. Неруйнівний контроль якості нерухомих з'єднань підшипників кочення сільськогосподарської техніки. відновлених анаеробними герметиками: дис. канд. техн. наук. . 1990. 220 с.
34. Селіверстов Р.В. Підвищення довговічності корінних підшипників двигунів нанесенням на їх гнізда полімерних покриттів під час ремонту: дис. канд. техн. наук. . 1993. 192 с.
35. Сафонов П.І. Вибір раціонального способу відновлення пару типу вал-підшипник кочення агрегатів тракторів: дис. канд. техн. наук. Л. 1973. 202 с.
36. герметики. Анаеробні склади, що ущільнюють: Каталог. Вінниця. 1980. 20 с.
37. герметики. Анаеробні склади, що ущільнюють: Каталог. Вінниця. 1984. 19 с.
38. Склади анаеробні ущільнюючі (герметики): Клеї акрилові. Вінниця. 1988. 22 с.
39. Ібілдаєв Б.А. Довговічність підшипників кочення сільськогосподарської техніки з посадками, відновленими герметиком 6Ф: дис. канд. техн. наук. . 1986. 159 с.
40. Зорін В.А., Ляхов Є.Ю. Аналіз довговічності місць підшипників, відновлених полімерними матеріалами // Інтербудмех-2018. 2018. С. 337-342.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 90 |

41. Нарисова І.. Міцність полімерних матеріалів: пров. з япон. . 1987. 398 с.
42. Партон В.З.. Механіка руйнування: від теорії до практики. : Наука, 1990. 240 с.
43. Ліхтон П.П. Динаміка системи циліндр-оболонка. : Машинобудування, 1988. 152 с.
44. Баурова Н.І., Зорін В.А. Застосування полімерних композиційних матеріалів під час виробництва та ремонту машин. : МАДИ, 2016. 264 с.
45. Коляско І.В. Дослідження та розробка технології відновлення деталей с.-г. техніки поліамідними покриттями: Дис. канд. тех. наук. . 1980. 152 с.
46. Lyakhov, E. Yu. Mixture substantiation of powder composition for bearing units seats restoring of rolling bearings/ E.Yu. Lyakhov, VA Zorin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1159.
47. Малишева Г.В. , Ахметова Е.Щ., Шими́на Ю.Ю.. Оцінка температур фазових переходів полімерних сполучних методом диференціально-скануючої калориметрії // Клеї. герметики. Технології. № 6, 2014. С. 29-33.
48. Г.В. Малишева, І.К. Романова. Оптимізація вибору параметрів, що характеризують стан об'єкта, при вирішенні завдань надійності // Ремонт, відновлення, модернізація. № 1, 2015. С. 29-33.
49. Камінський АА, Пестріков В.М. Розвиток макротріщин у старіючих вязкоупругопластических тілах під впливом змінних навантажень // Наука. Думка. 1990. Т. 1. № 2. С. 231-235.
50. Баурова Н.І. Закономірності процесів руйнування композиційних матеріалів при поздовжньому навантаженні залежно від особливостей їхньої структури на мікрорівні // Енциклопедія інженера механіка. 2012. № 11. С. 35-41.
51. Партон В.З., Морозов Є.М. Механіка пружно-пластичного руйнування. :

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|------------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | Арк. 91 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | |

- Наука, 1985. 504 з.
52. Баурова Н.І., Зорін В.А. Вибір моделей з метою оцінки довговічності полімерів різних масштабних рівнях // Теоретичні основи хімічної технології. 2018. № 5. С. 567-572.
 53. Черепанов Г.П. Механіка крихкої руйнації. : Наука, 1974. 640 з.
 54. Zorin, VA, Baurova, NI, Balovnev, VI, Grib, VV, Kosenko, EA Informational Model of State Change in Mechanical System // Ukrainian Engineering Research. August 2019. Vol. 39. No. 8. pp. 680-682.
 55. 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.
 56. Дудчак В.П. Теоретичні передумови для дослідження адгезійної міцності полімерних композиційних покриттів з основою // Електронна обробка матеріалів, Т. 39 № 1, 2003. С. 27-30.
 57. Miyamoto Y. Розвиток функціонально graded materials з HIP // Mat. SCI. Res. Int. 2000. No. 6. pp. 3-8.
 58. Ковачич Л. Склеювання металів та пластмас: пров. зі словацької. : Хімія, 1985. 239 с.
 59. Ляхов Є.Ю., Зорін В.А. Підвищення ефективності експлуатації дорожніх машин та автомобілів за рахунок застосування ремонтних полімерних матеріалів // Наука та техніка у дорожній галузі. 2021. № 1. С. 39-43.
 60. Лесєв В.М. Аналітичні методи дослідження кінетики процесів розтікання крапель: Автореферат канд. фіз-мат. наук. Нальчик: Кабард. - Балкар. держ. ун-т ім. Х.М. Бербекова, 2013. 35 с.
 61. Khmelev, VN High Power Ultrasonic Oscillatory Systems // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007, 2007. pp. 293-298.
 62. Негров Д.А., Шевчук О.М., Мікенін І.П. Зміна механічних та

| | | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | | 92 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | | | | | |

- триботехнічних властивостей композиту // Нові матеріали та технології у машинобудуванні, № 19, 2014. С. 82-86.
63. Волков С.С., Орлов Ю.М., Черняк Б.Я. Зварювання пластмас ультразвуком. 9-те вид. : Хімія, 1986. 256 с.
64. Негров Д.А., Єрьомін Є.М., Путінцев В.Ю., Мулюкова А.Р. Зміна механічних властивостей полімерного матеріалу при впливі ультразвукових коливань // Матеріали І Регіональної науково-технічної конференції. Київ. 2016. С. 81-84.
65. Зорін В.А. Гаджієв А.А. Підвищення характеристик міцності помірних покриттів обробкою в ультразвуковому полі // Автотранспортне підприємство, № 3, 2004. С. 12-16.
66. Ляхов Є.Ю., Зорін В.А., Штефан Ю.В. Визначення оптимальних технологічних режимів нанесення ремонтних полімерних матеріалів// Техніко-технологічні проблеми сервісу, № 4 (54), 2020. С. 15-25.
67. Мироненко О.В. Підвищення довговічності роликотидшипникових вузлів у корпусних деталях автомобілів, відновлених композицією адгезиву.
68. Тихомиров С.Г., Хаустов І.А., Попов А.П. Кінетика процесу термоокислювальної деструкції полімерів: отримання аналітичної залежності // Міжнародний науково-дослідний журнал № 10-2 (17), 2013. С. 95-96.
69. Негров Д.А., Путінцев В.Ю., Мулюкова А.Р., Хусаєнова Е.І. Зміна структури полімерного композиційного матеріалу під впливом ультразвукових коливань // Техніка та технології машинобудування. Київ. 2017. С. 144-147.
70. Приходька В.М. Фізичні основи ультразвукової технології під час ремонту автотракторної техніки. : БРАНДЕС, 1996. 125 з.
71. Нелсон У.Є. Технологія пластмас на основі поліамідів.-Пер. з англ. С.Г. Куличіхіна та Р.З.Маркович. : Хімія, 1979. 256 с.

| | | | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Арк. |
| | | | | | | | | | 93 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | | | |

МРТАМ 22.171221.000. ПЗ

72. Зорін В.А., Косенко О.О. Аналіз зміни стану деталей машин, виготовлених із використанням полімерних композиційних матеріалів // Будівельні та дорожні машини. . 2015. С. 52-54.
73. Баурова Н.І., Макаров К.А. Механічна обробка деталей машин із полімерних композиційних матеріалів // Технологія металів, № 2, 2017. С. 15-19.
74. RN Haward, RJ Young. Фізика glassy polymers. 2nd ed. L: Chapman & Hall, 1997. 508 pp.
75. VV GribV. A. ZorinN. I. Баурова. Визначення ресурсів технічних матеріалів Made of Polymeric Composite Materials on Basis of Cumulative Evidence // Polymer Science, Series D. October 2018. Vol. 11. No. 4. pp. 431-435.
76. Hurlbut GS, Jr. Dana's. Manual of Mineralogy. 21st ed. New York: John Wiley a, Sons, 1998.
77. Parameswaran, V., Shukla, A. Processing and characterization of a model gradient material // Journal of Material Science. 2000. No. 35. pp. 21-29.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | МРТАМ 22.171221.000. ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 94 |