

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВЕТЕРИНАРНОЇ МЕДИЦИНИ ІМ. С. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ**

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **“ Дослідження методу відновлення місця встановлення під-
шипників в автомобілях завдяки застосуванню полімерних композиційних
матеріалів ”**

Виконав: студент групи Ат-62
Спеціальності 274 "Автомобільний транспорт"
(шифр і назва)

Володимир КИЛЮШИК
(ім'я та прізвище)

Керівник: Ростислав ПАСЛАВСЬКИЙ
(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 631.3.004.

Килюшик В. С. Дослідження методу відновлення місця встановлення підшипників в автомобілях завдяки застосуванню полімерних композиційних матеріалів. Дубляни: Львівський НУВМГ, 2025. 70 с.

12 рис., 6 табл., 23 літ. джерел.

У магістерській роботі оптимізовано полімерний композиційний матеріал для відновлення посадочних місць під підшипники кочення автомобілів. При цьому використовувався метод вібровихрового електростатичного напilenня покриттів на зношені поверхні.

Дослідивши теоретичні основи та провівши експерименти, нами підтверджено можливість підвищення стабільності та якості фізико-механічних властивостей полімерних покриттів. При цьому, під час формування покриттів, на підкладку діяли ультразвуком. Це дало можливість розробити спосіб отримання полімерних покриттів з порошкоподібних композицій методом їх формування в суміщеному ультразвуковому та електростатичному полі.

З М І С Т

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖУВАНОГО ПИТАННЯ	7
1.1. Аналіз довговічності підшипникових вузлів автотранспорту	9
1.2. Аналіз причин відмов підшипникових вузлів автотранспорту	12
1.3. Аналіз способів відновлення нерухомих з'єднань підшипників	14
1.4. Аналіз довговічності полімерних матеріалів і відновлених ними спрацьо- ваних підшипникових вузлів	17
Висновки до розділу	23
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
2.1. Основні положення	25
2.2. Моделювання процесів руйнування поверхонь підшипникових вузлів автомобілів, відновлених полімерними матеріалами	26
Висновки до розділу	30
3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	31
3.1. Початкові дані для проведення експерименту	31
3.2. Експериментальні установки, обладнання, прилади та зразки	33
3.3. Методика дослідження технологічних, фізико-механічних та експлуата- ційних властивостей покриттів	40
Висновки до розділу	43
4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	44
4.1. Вплив технологічних режимів на фізико-механічні властивості покрит- тів	44
4.2. Вплив умов формування на густину та оливо- і волого поглинання пок- риттів	45
4.3. Вплив умов формування на ударну міцність і твердість покриттів	49
4.4. Дослідження працездатності підшипникових вузлів автомобілів, віднов- лених полімерними композиційними матеріалами	50
Висновки до розділу	56

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	57
5.1. Моделювання процесів формування та виникнення травмонебезпечних ситуацій під час виконання транспортних операцій автомобілем	57
5.2 Пропозиції з покращення умов праці	61
5.3. Шляхи захисту навколишнього середовища від впливу автомобільного транспорту	62
5.4. Розробка заходів щодо захисту цивільного населення	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69

ВСТУП

Підвищення ефективності використання автотранспортної техніки в умовах експлуатації західного регіону України є найважливішою економічною проблемою. Її вирішення полягає у зменшенні тривалості виконання сервісного обслуговування чи ремонту. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити нові конструкційні матеріали та технологічні процеси ремонту автомобілів в умовах експлуатації.

Одним з основних завдань в автомобілебудуванні є підвищення надійності (безвідмовності та довговічності) конструктивних елементів.

Відновлені підшипникові вузли повинні набути можливість багатократного демонтажу та монтажу під час технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Тому завдання вдосконалення існуючих та створення нових технологічних методів відновлення посадочних місць під підшипники вузлів автомобілів і конструкційних матеріалів є вельми актуальною.

Враховуючи сучасні досягнення в матеріалознавстві, вирішальне значення набуває використання полімерних матеріалів та композицій на їх основі. Розробка складу полімерного композиційного матеріалу дозволяє отримати покриття пошкоджених поверхонь деталей автомобіля з наперед заданими властивостями. Застосування процесу нанесення полімерного шару на спрацьовані поверхні забезпечує безвідходну технологію, легко піддається механізації та автоматизації, поверхні покриті полімерами не піддаються корозії, можуть експлуатуватися в агресивних середовищах у важких динамічних режимах роботи.

1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖУВАНОГО ПИТАННЯ

Сучасні умови спонукають до постійного зростання складності конструкції автомобілів, збільшуються вимоги щодо їхніх робочих характеристик, зниження металоємності, зростання економічних вигод, але поряд з цим вимагається висока надійність та довговічність.

Щодо довговічності автотранспортної техніки, то про неї слід дбати ще на етапі конструювання, забезпечувати потрібно на етапі виробництва, а реалізується вже при експлуатації. Тобто, щоб забезпечити довговічність автомобілів потрібно здійснювати ряд певних дій на усіх етапах виготовлення та експлуатації автомобіля [2].

Саме експлуатація автомобільної техніки є періодом найдовшим у його життєвому циклі, а досконалість експлуатаційних можливостей автомобілів забезпечується системою їх технічного обслуговування та ремонту, технологічним обладнанням, якістю використовуваних матеріалів. Неразривний вплив також має і робочий персонал, їх кваліфікація, мотивація та процеси відновлення працездатності.

Щоб забезпечити надійність та тривалу експлуатацію автомобілів слід розпрацьовувати заходи, які ґрунтуються на дослідженнях процесів, що відбуваються в окремих ділянках автомобілів під час експлуатації. До цих процесів відносимо наступні:

- зміна параметрів деталей через їх зношуваність;
- втомлюваність та старіння матеріалу, з якого виготовлені ті чи інші деталі;
- зміна параметрів деталей внаслідок їх пластичної деформації;
- зміна фізико-механічних властивостей використовуваних матеріалів та деталей під впливом навколишнього середовища під час використання автомобільної техніки.

Такі процеси знижують працездатність автомобілів та спонукають до технічних неполадок.

Одним з найважливіших заходів під час експлуатації техніки та засобом підтримки її належного стану є система технічного обслуговування та належного ремонту.

Система технічного обслуговування та ремонту ставить за мету забезпечення належного технічного стану техніки впродовж їх експлуатації, що дає можливість забезпечити належний рівень (коефіцієнт) готовності виробів (α_T) до їх використання, а також мінімізує витрати часу, засобів та трудосмності.

Отже коефіцієнт готовності виробів є одночасно показником ефективності роботи техніки й роботи технічної служби на підприємстві.

Обчислюючи коефіцієнт технічної готовності, потрібно враховувати час простою автомобільного транспорту, коли він не експлуатувався, тобто знаходився на технічному обслуговуванні. Для тих автомобілів, що не заплановано капітального ремонту під час належних (так би мовити бездоганих) умов експлуатації (не враховуючи простої автомобіля через організаційні моменти) рівень технічної готовності можемо обчислити з допомогою наступної формули:

$$\alpha_T = \frac{1}{1 + l_{cc} \left(\frac{D_{TO-2}^H + D_{TP}^H}{1000} \right)}, \quad (1.1)$$

де α_T – стан технічної готовності;

D_{TO-2}^H – показник, який характеризує тривалість простою автотранспорту відповідно під час технічного обслуговування та ремонту, дн./1000 км;

l_{cc} – довжина пробігу автомобіля в добу, км.

Отже на технічну готовність впливають такі чинники як пробіг автомобіля в добу, тобто інтенсивність експлуатації та термін служби автомобіля.

Через зростання кількості відмов, і, як наслідок, зростання терміну простою під час ремонту коефіцієнт технічної готовності визначимо за формулою:

$$\alpha_T = \frac{1}{1 + B_p l_{cc}} = \frac{1}{1 + B_p T_H V_3}, \quad (1.2)$$

де B_p – термін перебування автомобіля на ремонті та технічному обслуговуванні під час робочого часу, дн./1000км,

$B_p = D_{PC}/L_{СП}$; D_{PC} – цикловий простій автомобіля, дн., $D_{PC} + D_{ТР,ТО}$;

$L_{СП}$ – пробіг автомобіля до списання, км;

$D_{ТР,ТО}$ – коефіцієнт простою автомобіля в технічному обслуговуванні і поточному ремонті, дн./1000 км;

T_n – період однієї зміни, год.;

V_e – експлуатаційна швидкість, км/год.

Таким чином, бачимо, що довговічність та працездатність автомобільної техніки залежать від простоювання автомобілів під час сервісного обслуговування та ремонту. Також впливає і напрацьований пробіг до списання техніки. Але пробіг встановлюється при моделюванні, тому ми можемо вплинути лише на час простою автомобілів під час ремонту та технічного обслуговування. Це можна зробити шляхом удосконалювання чи створення нових конструкторських розробок, використання доброти матеріалів, а також способів відновлення деталей та вузлів автомобіля.

1.1. Аналіз довговічності підшипникових вузлів автотранспорту

Посадка зовнішнього кільця в з'єднаннях корпусних деталей, а також на осях сполучень внутрішнього кільця підшипника неабияк впливає термін роботи підшипникових вузлів.

У з'єднаннях підшипникових вузлів можуть утворюватися щілини, які призведуть до перерозподілу навантаження в опорах кочення, і цим самим до зниження тривалості роботи підшипникового вузла.

Чинники, які впливають на термін роботи підшипникового вузла, розділимо умовно на дві групи. До першої групи віднесемо експлуатаційні чинники, а до другої - конструкторсько-технологічні.

Класифікацію факторів, які мають вплив на термін роботи підшипникового вузла покажемо на рисунку 1.1.

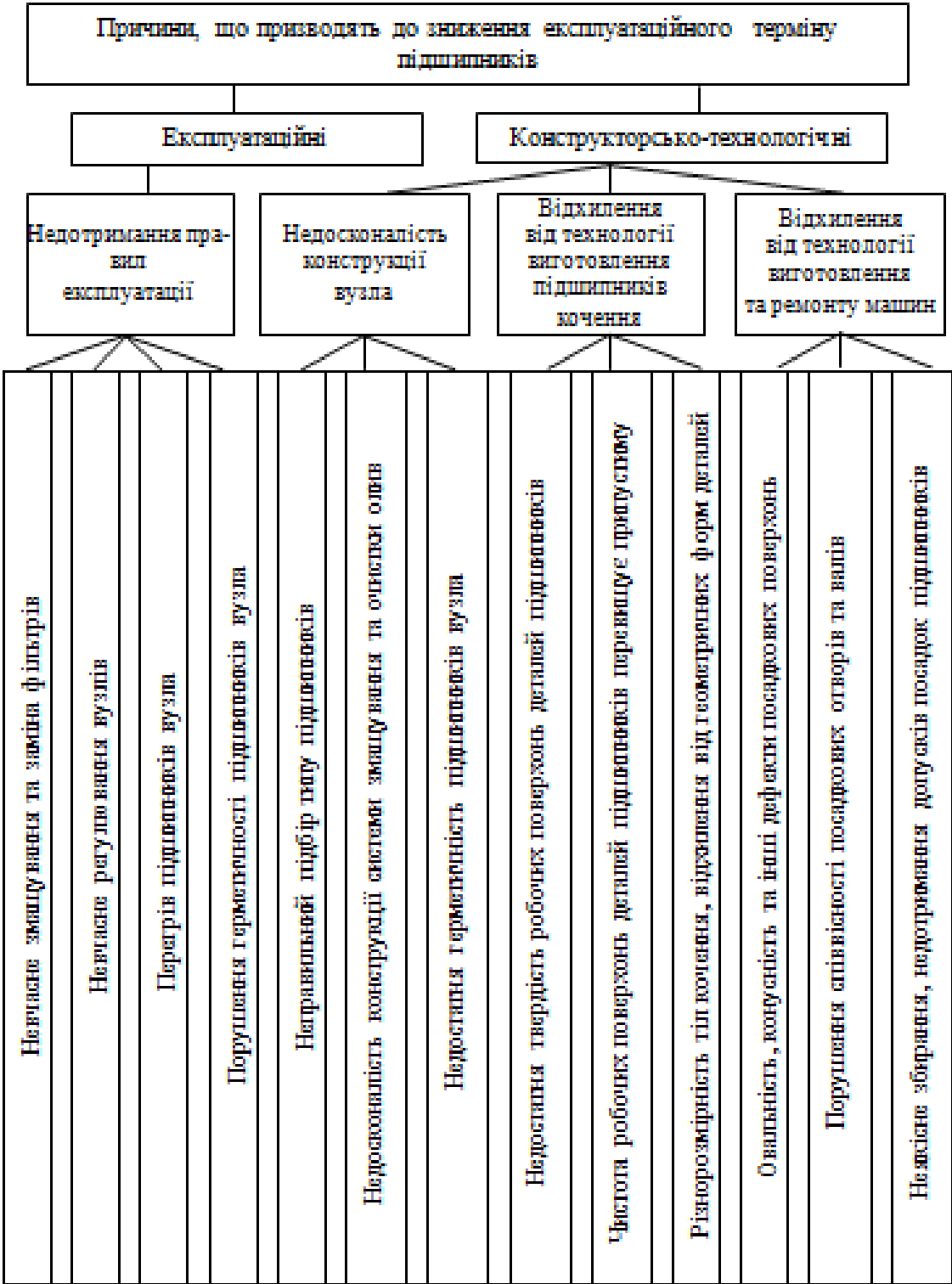


Рисунок 1.1. Класифікація причин, які призводять до зниження тривало-

На довговічність підшипникового вузла впливають конструктивно-технологічні чинники до яких можемо віднести технологію виготовлення та досконалість конструкції.

До експлуатаційних чинників, які суттєво впливають на довготривалість роботи підшипникового вузла є дотримання правил експлуатації та

дотримання системи планово-запобіжного технічного обслуговування та ремонту.

Недотримання системи планово-запобіжного технічного обслуговування та ремонту в частині змащувально-заправних робіт, збільшення пробігів між замінами фільтрувальних елементів та несвоєчасне регулювання опор коченню, призводить до накопичення абразивних часток, перегріву підшипникових вузлів, зміні фізико-механічних властивостей олив. А це все призведе до збільшення зносу підшипникового вузла.

Відхилення від технології виробництва та технологій ремонтних робіт призводять до дефектів посадкових місць підшипникових вузлів, таких як конусність та овальність, а це призводить до нерівномірного розподілу навантаження між тілами кочення та спричиняє руйнування поверхонь кочення. А те, що недотримується співвісність посадкових місць та шийок валів призводить до перекосу кілець, затискання тіл кочення і поломок деталей підшипників.

Підбір оптимальної посадки сполучних деталей забезпечує якості збирання, що також впливає довготривалість роботи підшипникових.

Якщо посадки сполучних деталей кілець підшипників послаблюються, т кільця провертатимуться, що призведе до зношування посадочних місць підшипникового вузла [3].

1.2. Аналіз причин відмов підшипникових вузлів автотранспорту

Дослідження показують, що зношування посадкового місця підшипникового вузла має, в основному, правосторонню асиметрію та підкоряються закону Вейбула. Відповідно до [2] до причин спрацювання посадочних місць підшипників кочення відносимо проворот кілець і фреттинг-корозію.

Фреттинг-корозія є одним з особливих видів зношування нерухомих, зв'язаних між собою металевих поверхонь, яка проявляється через поворот-

но-поступальні переміщення певної амплітуди. До причин цих переміщень відносимо динамічні навантаження, вібрацію, вигин чи скручування деталей, які контактують між собою [4 - 10].

Інтенсивність руйнування металевих поверхонь, які контактують між собою при фреттинг-корозії залежить від фізичних параметрів, таких як температура, відносна твердість поверхонь, тощо та параметрів зовнішньої механічної дії, таких як питоме контактне навантаження, амплітуда відносного зсуву, кількість циклів навантаження та частота коливань, а також впливу навколишнього середовища [7, 9].

Наслідком фреттинг-корозії є суттєве зниження міцності та збільшення спрацьбування контактуючих поверхонь по параболічній залежності [9, 10, 11].

Аналізуючи дослідження бачимо, що об'єм зношеного матеріалу є пропорційним до кількості циклів навантаження, а максимальна зношеність поверхонь, що контактують спостерігається при частоті 10...25 Гц, а якщо збільшити до понад 25 Гц - величина зносу знижується [11, 14].

Збільшуючи кількості циклів навантаження спостерігаємо лінійну залежність зростання зносу [8, 15].

Поява зазору між кільцями підшипників, контактними поверхнями корпусних деталей і валів зумовлено зносом посадочних місць підшипників кочення, а знижує ресурс підшипникового вузла.

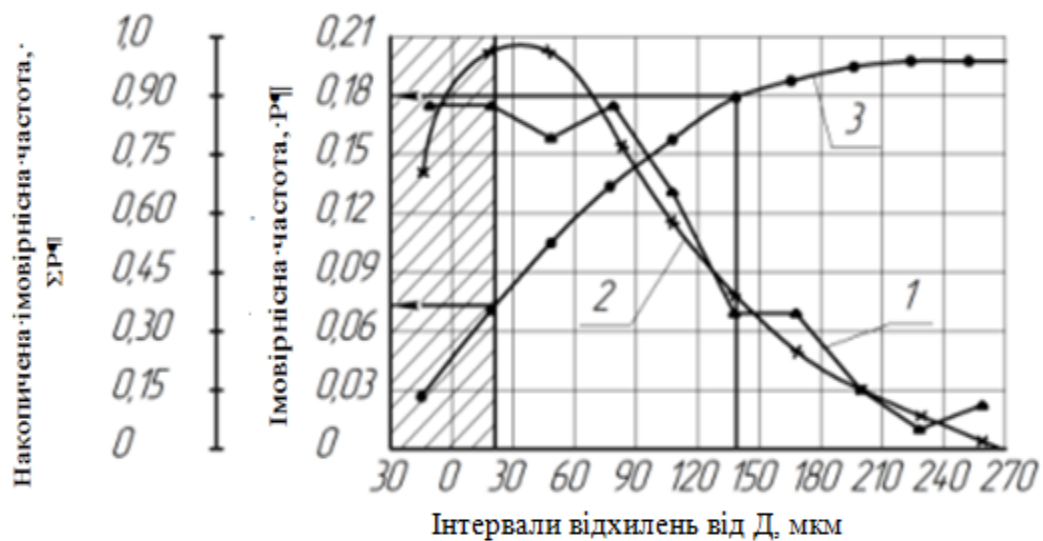
У роботі [16], встановлено, що питоме навантаження на зуб шестерні коробки передач збільшується на 25% коли знос посадочного отвору становить 0,05 мм, а ресурс знижується в декілька разів. Це підтверджують і спостереження за роботою коробок передач, яка складена з нових деталей в невідремнтованому корпусі. Ресурс таких агрегатів становив лише 30-40% доремонтного ресурсу нових коробок передач.

Причиною зменшення контактної поверхні в зчепленні зубчатих коліс та самовимкнення передач є підвищений знос посадочних місць підшипникових вузлів.

У роботах [17, 18, 19] показано, що знос посадочних місць підшипників у корпусах коробок передач Scania R 114 становить 0,08-0,18 мм, а овальність і конусність відповідно 0,01-0,03 мм. Саме через ці причини означають, що 90% корпусів коробок передач вимагають відновлення.

Зауважимо, що в літературних джерелах приведені дані, які в основному відносяться, до деталей вузлів трансмісій автомобілів. Проте відсутні дані про причини пошкоджень, а також характер і величину зносу посадочних місць підшипникових вузлів агрегатів електроустаткування автомобілів.

Через це проведено аналіз ремонтного фонду та характеру зносу посадочних місць під підшипники кришок генераторів. Аналізуючи результати вимірювань (рис. 1.2) бачимо, що найбільша схожість розподілу зносу забезпечується законом розподілу Вейбулла. При цьому для всіх партій вимірюваних деталей $P(x^2) > P(0,1)$. Це є підґрунтям для ухвалення закону розподілу Вейбулла як теоретичного закону розподілу.



1 – полігон розподілу статистичних даних; 2 – диференціальні криві імовірнісного розподілу; 3 – інтегральна крива імовірнісного розподілу

Рисунок 1.2 Криві розподілу зносу посадочних місць підшипників кришок генераторів автомобілів

На гістограмі розподілу видно, що придатними до подальшої експлуатації є лише 36% кришок генераторів автомобілів через знос посадочних місць під підшипники.

Отже, відновлювати потрібно 64% кришок генераторів автомобілів, які скеровано в ремонт (серед них 54% мають спрацювання, яке є меншим за 0,12 мм). Максимальне спрацювання становить $\Delta U_{\max} = 0,24$ мм.

1.3. Аналіз способів відновлення нерухомих з'єднань підшипників

Найширший аналіз методів відновлення посадочних місць підшипникових вузлів кочення можемо зустріти в роботі [12]. У цій роботі подано класифікацію способів – рис. 1.3, описано основні переваги та недоліки, зроблено порівняльну характеристику існуючих способів відновлення.

Способи відновлення посадочних місць підшипникових вузлів мають певні недоліки. До них відносимо:

- складність технологічного процесу;
- потреба в дорогому технологічному обладнанні;
- необхідність механічних впливів на відновлені деталі;
- висока енерго- праце- та матеріаломісткість, а отже і собівартість операції.

Відповідно до [11] трудоемність відновлення становить 10...120 год/м², енергоємність 100...256 кВт х год./м³, витрата матеріалу 1,5...50 кг/м², а основній причині зносу посадочних місць підшипників кочення – фретинг-корозії не запобігають.

Якщо використовувати полімерні матеріали під час відновлення посадочних місць підшипникових вузлів, то вище перелічені недоліки можна виключити [3, 10, 11].

Відновлення нерухомих з'єднань підшипникових вузлів ремонтними полімерними матеріалами проводимо двома способами: до першого способу відносимо нанесення полімерного покриття на посадочне місце, тоді проводиться формування його під номінальний розмір; другий спосіб – це склеювання одного з кілець підшипника з деталлю, що сполучається [9, 14, 18].



Рисунок 1.3 – Класифікація способів відновлення посадочних місць підшипниковий вузол кочення

Відновлюючи посадочні місця підшипникових вузлів найчастіше використовують епоксидні полімери, а також композиції на їх основі [19], які готують на основі епоксидних олігомерів та затверджувачів. Складовими елементами композиції служать наповнювачі такі як скляна мука, залізний порошок, алюмінієва пудра тощо та пластифікатори такі як дибутилфталат, діоктилфталат тощо [20].

Епоксидні полімери і композиції, що отримані на їх основі володіють високими адгезійними властивостями, механічною міцністю, водо-, тепло-, та хімічною стійкістю [13], вони здатні твердіти за різних температур.

У роботі [12] запропоновано відновлення нерухомого з'єднання підшипника кочення, що полягає в нанесенні на зношену поверхню корпусу підшипникового вузла шару епоксидної композиції з подальшим калібруванням після часткового затвердіння покриття. Склад полімерної композиції базується на основі епоксидної смоли, затвердженою низькомолекулярною поліамідною смолою або поліетиленполіаміном. Спосіб, що розглянуто дає можливість отримати відновлені посадочні місця підшипників з номінальним розміром і це не вимагає механічної обробки.

Проте цей спосіб має і певні недоліки. Він потребує певного обладнання для розточування та пресування, надто довгий час для формування та затвердіння нанесеного покриття.

Ці недоліки відновлення можна усунути з допомогою склеювання кільця підшипника з корпусною деталлю опори кочення.

При відновленні нерухомих з'єднань методом склеювання найчастіше використовуються анаеробні герметики, які володіють хорошою адгезією до металів, а також стійкі до дії олив, води, палива, лугів, органічних розчинників, кислот та інших хімічних речовин, і при цьому зберігають всі свої властивості після затвердіння при температурі від 60-150°C. [12].

Під час вклеювання зовнішнього кільця в отвір корпусної деталі, слід використовувати спеціальні центруючі пристосування, що дозволить забезпечити необхідну співвісність.

Анаеробні герметики, які використовуються під час відновлення підшипникових вузлів опор кочення, підвищують довговічність в 3,6 рази порівняно з новими [16], оскільки здійснюється перерозподіл навантаження між тілами кочення.

Проте і цей спосіб має свої недоліки, які полягають в потребі спеціального центруючого обладнання, необхідності вертикального розташування з'єднання, а також низькій стійкості герметиків до циклічних навантажень, що призводить до утворення тріщин.

Такий недолік можна усунути, ввівши дисперсні наповнювачі нано-розмірних частинок. Введення таких частинок в анаеробні герметики підвищує їх міцність і витривалість, скорочує час затвердіння та підвищує ресурс в 1,42 рази порівняно з ненаповненими полімерними матеріалами [16].

1.4. Аналіз довговічності полімерних матеріалів і відновлених ними спрацьованих підшипникових вузлів

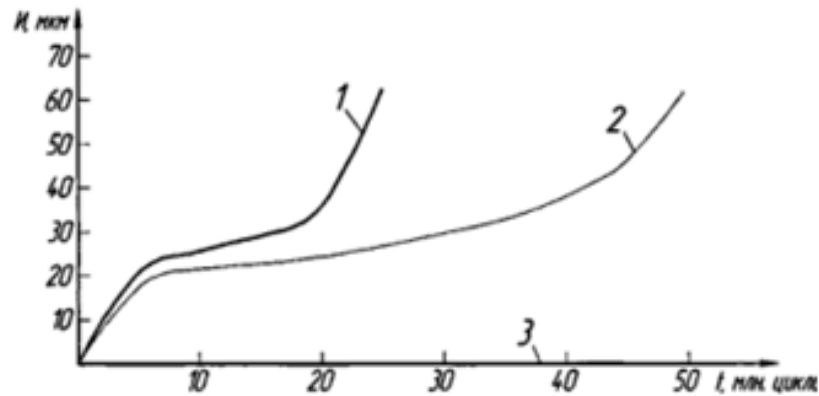
Відповідно до проведеного аналізу одним зі способів підвищення довговічності зношених місць підшипникових вузлів під час ремонту є відновлення ремонтними полімерними матеріалами. Такий спосіб виключає контакт з поверхонь, і це сприяє зниженню динамічних навантажень та запобігає повертанню зовнішнього кільця підшипника.

Відмінність в'язкопружних фізико-механічних та теплофізичних властивостей металів і полімерів впливає на появлення та розвиток напруги в нерухомому з'єднанні з полімерним покриттям в навантаженому стані [3].

Кількість циклів при динамічному навантаженні має суттєвий вплив на термін експлуатації підшипникових вузлів, таким чином, відповідно роботи [12], встановлено, що при динамічному навантаженні та посадці підшипника без полімерного покриття найменший час експлуатації у з'єднаннях із зазором в сполученні, що становить 0,02 мм (рисунок 1.4, крива 1), а довговічність нерухомого з'єднання з натягом 0,02 мм є у 2 рази вищою (рисунок 1.4, крива 2). Випробовуючи підшипник кочення, який має полімерне покриття з термообробленого герметика впродовж 270 годин зношення посадочного отвору не спостерігається.

Динамічні навантаження, які виникають у вузлах автомобілів, під час їх використання з часом змінюються як по знаку, так і по значенню. Такий вид навантаження називається циклічним. Розрізняють наступні цикли навантаження: знакопостійний цикл (рис. 1.5. а) – напруга змінює лише числове значення; знакозмінний цикл (рис. 1.5. б) – цикл, в якому міняється знак напру-

ження, а також значення; пульсуючий цикл (рис. 1.5. в) – знакопостійний цикл, в якому напруження змінюється від нуля до максимального значення; симетричний цикл (рис. 1.5. г) – знакозмінний цикл, в якому абсолютні значення максимальних напружень різного знаку рівні [7].



1 - посадка із зазором 0,02 мм; 2 - посадка з натягом 0,02 мм; 3 - з покриттям посадочного місця підшипника кочення термообробленим герметиком

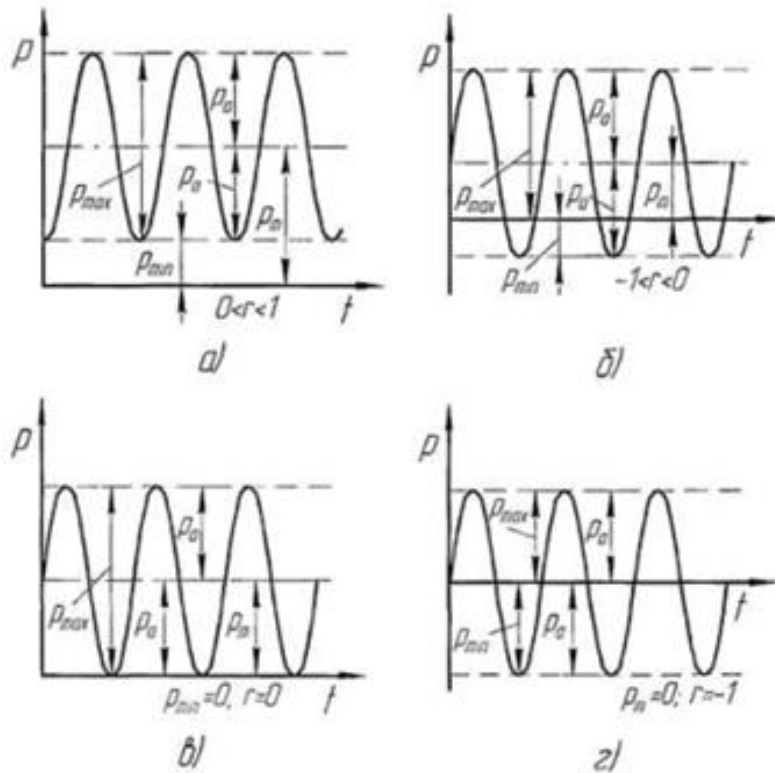
Рисунок 1.4 Залежність зносу посадочних місць від напрацювання при різних видах нерухомих з'єднань

Перебуваючи під циклічними навантаженнями в нерухомих з'єднаннях підшипникових вузлів, які відновлено полімерами, виникають напруження стиску, зрушення та розтягування. Тривала дія цих напружень призводить до поступового накопичення пошкоджень в полімерному матеріалі, що веде до утворення й розвитку тріщин і, як наслідок, викликає руйнування деталі.

Модель руйнування полімерних композиційних матеріалів, які використовують під час ремонту посадочних місць підшипникових вузлів, складається з трьох етапів та представлено на рис. 1.6 [8, 9].

На першому етапі накопичуються напруження, що спричиняють появу локальних розривів у міжмолекулярних зв'язках, а це в свою чергу призводить до утворення мікротріщин. На другому етапі під дією циклічних навантажень накопичуються мікропори, що розпушує матеріал і є чинником зростання первинної мікротріщини.

На третьому етапі мікротріщина стає мікроскопічною, протягується через весь зразок і руйнує його.



а – знакопостійний цикл; б – знакозмінний цикл; в – пульсуючий цикл; г – симетричний цикл.

Рисунок 1.5 Види циклічного навантаження

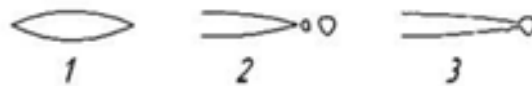


Рисунок 1.6 Модель збільшення тріщини в полімерному матеріалі при циклічному навантаженні.

Для визначення циклів навантаження ще до руйнування полімерного матеріалу при циклічному навантаженні можна використати формулу [11]:

$$N = K(\sigma - \sigma_a)^{-m} \quad (1.3)$$

де N – кількість циклів навантаження до руйнування;

σ – напруження;

σ_a – межа витривалості;

K , m – коефіцієнти, які залежать від властивостей полімерів та режиму навантаження.

З формули (1.3) можна показати типову залежність (рис. 1.7).

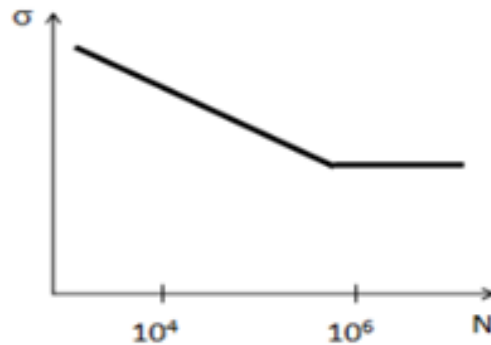


Рисунок 1.7 Типова залежність між амплітудою напруги σ і логарифмом кількості циклів N навантаження до руйнування

Витривалість ремонтних полімерних композиційних матеріалів залежить від таких чинників як товщина клейового шва; температура; амплітуда деформації при циклічному напруженні та амплітуда напруження при циклічному навантаженні; середня напруга та середня деформація; частота циклів навантаження.

Через накопичення внутрішніх напружень, які потім переходять в мікротріщини, погіршуються властивості полімерних матеріалів, внаслідок чого руйнуються деталі. З виразу 1.3 видно, що кількість циклів до початку руйнування матеріалу залежить від його властивостей, максимальних діючих напружень та режиму навантаження.

Введення нанорозмірних порошків, як наповнювачів, до складу полімерних композиційних матеріалів підвищує їх міцність, тріщиностійкість та витривалість, а також збільшує їх ресурс [5]. Про це свідчить порівняльний аналіз випробувань на стендах та під час експлуатації підшипникових вузлів, які були відновлені полімерними композиційними матеріалами показав, що їх експлуатаційний період є довшим у порівнянні з ненаповненими полімерними матеріалами.

Зазначені недоліки сповільнюють широке використання епоксидних та інших склеюючих композицій для відновлення посадочних поверхонь корпусних деталей.

Використання термопластичних полімерів та композицій на їх основі є найефективнішим для відновлення посадочних місць підшипникових вузлів автомобілів. Обираючи певний склад композицій, можна одержати покриття з наперед заданими властивостями. Сам процес нанесення такого покриття не складно механізувати та автоматизувати, тобто можна використати весь початковий матеріал, забезпечуючи при цьому практично безвідходну технологію. Такі покриття мають достатньо високі фізико-механічні властивості, дають можливість отримати потрібну товщину, легко піддаються механічній обробці.

На рис. 1.8 показано класифікацію способів нанесення полімерних композицій, що використовується під час ремонту.

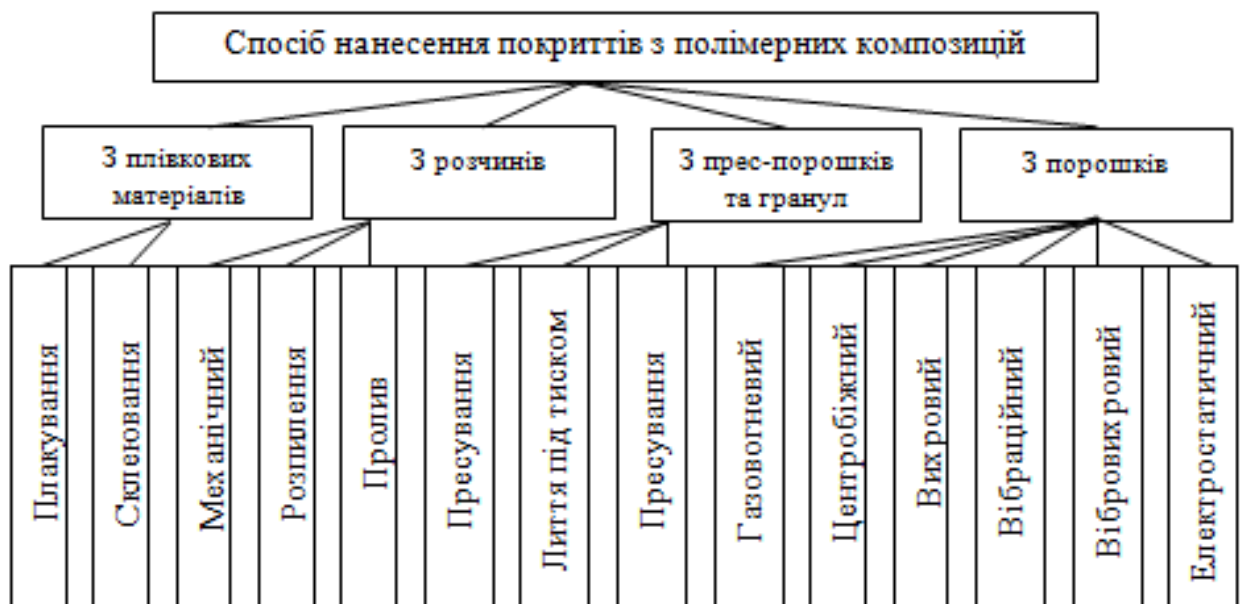


Рисунок 1.8 Класифікація способів нанесення полімерних композицій для відновлення деталей машин

Спосіб отримання полімерних покриттів з порошкоподібних композицій є найперспективнішим з усіх наявних способів нанесення термопластичних полімерів та їх композицій. Адже він є найуніверсальнішим, його легко

наносити, він володіє здатністю тонкошарового розподілу розплаву полімеру на поверхні, яку покриваємо.

Суть цього способу у тому, що на деталь наносять частинки полімеру, тоді, під дією температури, вони плавляться і при цьому утворюють суцільне покриття.

Аналізуючи існуючі способи нанесення покриттів для відновлення посадочних місць підшипникових вузлів опор кочення бачимо, що найдоступнішим є камерний електростатичний спосіб, проте він поьребує певного вдосконалення. Вдосконалення також потребує і обладнання, що використовується при цьому способі для вказаного класу деталей.

Щоб підвищити якість відновлюваних деталей потребує обґрунтування склад полімерної композиції для формування покриттів, адже аналіз літературних джерел показав, що відомі порошкоподібні полімерні композиції для електростатичного напилення не повністю забезпечують необхідні властивості покриттів.

Для відновлення деталей, які підлягають коливальним навантаженням та працюють в агресивних середовищах, доцільно використовувати поліамідні покриття [6].

Прийнятними є порошки на основі поліаміду 12, це полімерний матеріал, який відрізняється рядом важливих фізико-механічних, технологічних, а також експлуатаційних властивостей.

Покриття, які отримують з поліаміду-12 мають достатню зносостійкість та великий температурний інтервал: від -20 до $+100^{\circ}\text{C}$. Також такі покриття добре поглинають ударні навантаження [17]. Але при нагріванні частинки поліамідних порошків погано зберігають електричний тому, що знижується електричний опір. Все це ускладнює процес покривання в електричному полі. Поліамідні покриття мають велику усадку і високі внутрішні напруження, а їх адгезійна пружність є недостатньою [18].

Такі властивості обмежують можливість використовувати їх в якості покриттів для відновлення посадочних місць підшипникових вузлів.

В сучасних умовах промисловістю випускаються різноманітні епоксидні порошкові полімери. Їх, в основному, використовують для створення захисно-декоративних покриттів. Ці порошки, на відміну від поліамідних, швидше заряджаються в електричному полі та краще концентрують заряд, а покриття ними мають високу адгезійну міцність та твердість [18]. Проте використовувати ці покриття для відновлення посадочних місць підшипникових вузлів в чистому вигляді неможливо, адже вони дуже крихкі та мають низьку зносостійкість.

Отже, використання ремонтних полімерних композиційних матеріалів під час відновлення нерухомих з'єднань підшипникових вузлів є актуальним завданням, розв'язання якого дасть можливість суттєво підвищити надійність автотранспорту й понизити витрати на технічне обслуговування та ремонт техніки. Для цього слід теоретично обґрунтувати підвищення довговічності ремонтних полімерних композиційних матеріалів за умови введенні дисперсних наповнювачів, зокрема щодо підвищення несучої здатності полімерних композицій [7].

Висновки до розділу

Аналіз літературних джерел та результати попередніх дослідів дає можливість стверджувати, що довговічність підшипникового вузла залежить від посадок кілець в корпусних деталях. В процесі експлуатації автотранспорту в підшипникових вузлах агрегатів збільшуються зазори між контактними поверхнями посадочних місць підшипників, що впливає на термін експлуатації підшипникових вузлів і автомобіля загалом. Основною причиною збільшення цих зазорів є зношуваність посадочних місць підшипників через фреттинг-корозію та провертання кілець підшипників.

Перспективним напрямком відновлення посадочних місць підшипникових вузлів опор коченого автомобіля є використання полімерних покриттів з порошкоподібних композицій, але ті матеріали, які існують не повніс-

тю забезпечують якісне покриття у зношених місцях підшипників, які працюють в складних умовах.

Ті способи нанесення покриттів з порошкоподібних композицій, які зараз використовуються, не забезпечують якісними покриттями, які би мали високі адгезійні властивості, що є особливо важливим для терміну експлуатації відновлених деталей.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Основні положення

Одними з багатьох з'єднань в агрегатах автомобільної техніки є посадочні місця підшипникових вузлів. Їх геометрична, просторова та розмірна точність змінюючись, вагомо впливає на точність розмірних ланцюгів, а отже і на довговічність та працездатність техніки.

Експлуатаційні вимоги до підшипникових вузлів автомобільної техніки, суттєво впливають на вибір матеріалів для покриттів та їх фізико-механічних властивостей.

Покриття, які використовують для відновлення посадочних місць підшипникових вузлів автомобілів, повинні мати високу адгезію та ударну міцність, бути стійкими до агресивних середовищ, якнайменше поглинати вологи та мати точну розмірність при змінах температури.

Ще одним суттєвим показником якості посадочних місць корпусних деталей, які пройшли відновлення, є протистояння до ударів і забезпечення довговічності відновленої поверхні [3].

Доречно зауважити, що одним з важливих показників є властивість самих порошоків, зокрема їх здатність до електроосадження. Нормальні умови нанесення покриттів вимагають граничного електроосадження порошкоподібних композицій, які є призначені для нанесення в електростатичному полі, не нижчого за 150 г/м^2 , ударна міцність покриття повинна бути не меншою 4,6 Н.м, також можливим має бути багатократність монтажу й демонтажу відновлених підшипникових вузлів з мінімальним зносом покриття [8].

Як вже зазначалося, суттєва відмінність в'язкопружних фізико-механічних та теплофізичних властивостей металів і полімерів тісно взаємопов'язана з виникненням напруг в нерухомих з'єднаннях з полімерним покриттям в навантаженому стані.

Користуючись діючою методикою оцінки роботи нерухомих з'єднань, які було відновлено з допомогою полімерних матеріалів, методом визначення

зусилля випрессовки підшипника, дає можливість оцінити лише їхню статичну міцність і не враховує при цьому зміну властивостей полімеру під впливом циклічних навантажень та зовнішніх чинників таких як агресивне середовище, температура, час тощо.

Отже, для відновлення підшипникових вузлів, вибір оптимального складу полімерних композиційних матеріалів повинен ґрунтуватися на теоретичних основах процесів руйнування в'язкопружних тіл, які підлягають механічним навантаженням.

2.2. Моделювання процесів руйнування поверхонь підшипникових вузлів автомобілів, відновлених полімерними матеріалами

Коли відновлені місця підшипникових вузлів піддаються впливу циклічних чи повторюваних напружень виникає так зване втомне руйнування, оскільки відбуваються пластичні деформації [7].

Збільшення тріщини в тонкій пластині з ремонтного полімерного матеріалу із змінними властивостями під дією знакозмінного навантаження, показано на рисунку 2.1.

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

де p_0 – початкове значення зовнішнього навантаження;

Δp – величина прикладеного навантаження;

ω – частота циклічного навантаження;

t – час; p_0 , Δp , ω не залежать від часу, а $\Delta p \ll p_0$.

Проведені експериментальні та теоретичні [6] дослідження дають можливість зробити висновок, що швидкість росту тріщини при одночасній дії утомленості та повзучості, за умови, що частота циклічного навантаження ω є невеликою і в процесі руйнування нагрівання в кінці тріщини незначне, можна записати у вигляді:

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

де $(dl/dN)_n$ – швидкість росту тріщини в умовах повзучості;

$(dl/dN)_y$ – швидкість росту тріщини в умовах втомленості;

N – кількість циклів навантаження.

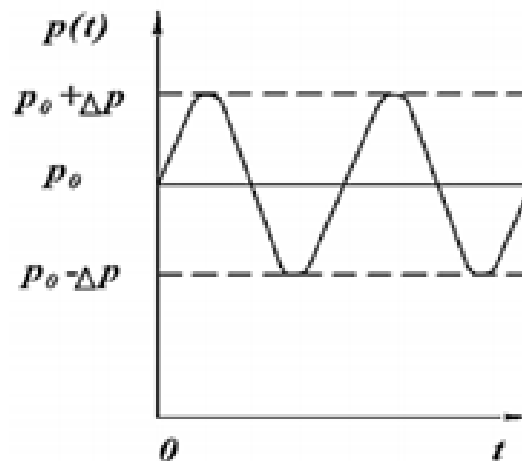


Рисунок 2.1 Закон зміни циклічного навантаження

Під час проведення експериментальних досліджень для певних ремонтних полімерних матеріалів [6], встановлено, що руйнування від утомленості і повзучості в першому наближенні можна розглядати незалежно один від одного. При цьому випадку залежність (2.2) можна подати як:

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

Формула (2.3) справджується при різних співвідношеннях між доданками, навіть тоді, коли вони приблизно рівні між собою.

Якщо врахувати, що один цикл $N' = \omega t / 2\pi$, то залежність (2.3), набуде вигляду:

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

де $(dl/dt)_n$ – швидкість утворення тріщини при зміні властивостей матеріалів;

$(dl/dt)_y$ – швидкість утворення тріщини при дії втомленості.

Напруженість у макроскопічній тріщині характеризується коефіцієнтом інтенсивності напруг [7], який при циклічному навантаженні в наших умовах має вигляд:

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

де k – коефіцієнт апроксимації;

ωt – міра повзучості при чистому зсуві;

l – довжина тріщини;

$\varphi_1 = \Delta p / p_0$.

Швидкість розвитку тріщини унаслідок втомлюваності представимо у вигляді:

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

де K_c – коефіцієнт інтенсивності напруг;

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

β – постійна, яка має розмірність довжини і визначається з експерименту;

ΔK – зміна коефіцієнта інтенсивності напруг в циклі;

Перетворивши (2.6), отримаємо:

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

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

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

ω – частота циклічного навантаження для випадку розрахунку макроскопічних тріщин.

Тоді швидкість розвитку макроскопічної тріщини для даного ремонтного полімерного матеріалу визначиться:

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

де $q(t)$ визначаємо з рівняння:

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

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

де $Q_1, Q_2 \dots Q_8$ – математичні похідні [6].

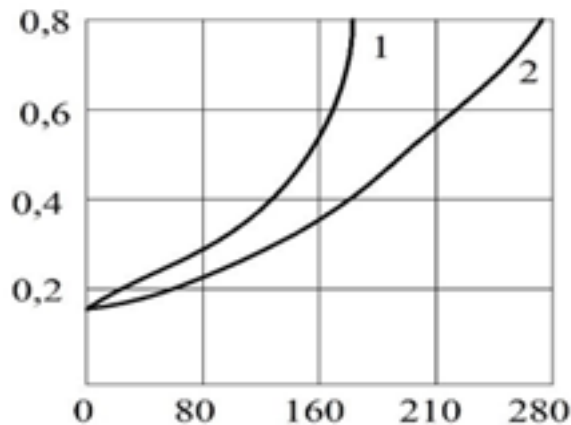
Розділимо рівняння (2.4) на l^* та підставимо рівняння (2.7) і (2.9) отримаємо систему диференціальних рівнянь:

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

де $f(q, t)$ має вигляд (2.9).

На рис. 2.2 позначені залежність безрозмірної довжини y від часу t , яку ми отримали розв'язуючи рівняння (2.10) з допомогою методу Рунге-Кутта для макротріщини, яка збільшується в ремонтному полімерному матеріалі зі змінними властивостями, коли ядро повзучості в інтегральному операторі має вигляд:

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



1 – при сумісній дії постійного і циклічного навантажень; 2 – за відсутності складової втомного навантаження

Рисунок 2.2 Зростання втомної макроскопічної тріщини в ремонтному полімерному матеріалі з властивостями, що змінюються.

Реологічні параметри ремонтного полімерного матеріалу $A=6,94$
 $C=8,64$, $\mu_1 = 0,014$ 1/д. $\mu_2 = 0,1$ 1/д., при $\beta_0 = 0,2$ с⁻¹, $p/\sigma_m = 0.1$, $k=1$, $\omega =$

1Гц, $\phi_1 = 0.05$. На рисунку 2.2 крива 2 відповідає зростанню тріщини, коли відсутня втомна складова зовнішнього навантаження.

Висновки до розділу

Теоретично вивчена і експериментально підтверджена можливість поліпшення розтікання розплавів з композиційних порошкоподібних полімерів на металевих підкладках шляхом дії на них ультразвукового коливання, що сприяє підвищенню адгезійної міцності з'єднання.

Визначені оптимальні технологічні режими формування покриттів з розробленої композиції в сумісному електростатичному і ультразвуковому полі. Такі режими дають можливість забезпечити високу адгезійну міцність з'єднання. При цьому температура формування $T_{\phi} = 200-220^{\circ}\text{C}$; амплітуда торця хвилеводу 8-13 мкм; тривалість формування $\tau = 20-25$ хв.; частота ультразвукових коливань 18-22 кГц.

Провівши експерименти вдалося показати, що адгезійна міцність полімерних покриттів залежить від матеріалу підкладки та стану поверхні, яку покривають. Найкращу адгезійну міцність можна досягнути при $R_z = 15-30$ мкм. У цьому випадку зміна адгезійної міцності від шорсткості є менше залежною для покриттів, одержуваних в ультразвукових полях.

Вдалося встановити, що кращою адгезійною міцністю володіють покриття, сформовані на фосфатованих поверхнях при дії ультразвукових полів. Тому, при відновленні деталей, які повинні задовільняти високим вимогам до адгезійної міцності, покриття слід формувати в ультразвукових полях, а коли ці вимоги нижчі – покриття можна формувати без ультразвукових полів, але з попереднім фосфатуванням поверхні, яку покривають.

3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Початкові дані для проведення експерименту

Проводячи дослідження, нами розглянуті: порошкоподібна композиція, спосіб отримання полімерних покриттів, фізико-механічні та експлуатаційні властивості покриттів підшипникових вузлів опор кочення, які підлягають відновленню, а також реологічні властивості полімерних композицій.

Зважаючи, що полімерну композицію використовують для відновлення вузлів опор кочення автомобілів, її склад вибирають враховуючи, що відновлені деталі працюватимуть у складних умовах.

Ще одним з важливих показників якості відновлених посадочних місць корпусних деталей є те, що вони можуть витримати ударні навантаження. можна стверджувати, що при ударній міцності покриттів не менше 4,6 Н•м забезпечуються нормальні умови експлуатації підшипникових вузлів. [9].

Потрібно зауважити, що одним з важливих показників є самі властивості порошків, а особливо – притаманність їм електроосадження. Щоб створити нормальні умови в яких наноситимуться покриття, граничне електроосадження порошкоподібних композицій, які наносяться в електростатичному полі, має бути не нижчим 150 г/м².

Отже, можна стверджувати, що полімерна композиція, яку використовують щоб відновити посадочні місця підшипникових вузлів, має забезпечити електроосадження порошкоподібної композиції не менше аніж 150 г/м², а максимальна зносостійкість під час монтажу, в процесі експлуатації та при демонтажі підшипникових вузлів ударну міцність покриття не менше 4,6 Н•м. саме ці показники беремо за основні критерії оптимізуючи склад композиції.

Інші властивостей композиції можуть дещо змінювати свої значення, але бути не нижчими, ніж у покриттів, які отримують з чистого компонента з гіршими показниками.

Знаходження оптимального складу композиції відбувалося в два етапи.

I етап передбачав вибір складових композиції та вивчали як залежать фізико-механичні властивостей від відсоткового вмісту компонентів. II етап: пошук найоптимальнішого складу композиції.

Найменше передбачуваним є вплив наповнювача на якість композиції. Тому проводили дослідження для п'яти рівнів вмісту наповнювача.

Одним з критеріїв оптимізації складу композиції вибрано ударна міцність покриття, граничне електроосадження порошку, а також зносостійкість відновлених посадочних місць підшипникових вузлів під час монтажу та демонтажу підшипників.

Сама порошкова композиція була приготовлена в кульовому млині сухим змішуванням зі швидкістю обертання барабана $80-100 \text{ м}^{-1}$ впродовж однієї години. Далі суміш просівали через вібросито зі сіткою № 0,2.

До складу композиції входить поліамід 12, епоксидний олігомер П-ЕП-219 та скляна мука.

Нанесення композиції відбувалося камерним електростатичним способом (рис. 2.1), тоді її оплавляли в термопечі 10 хвилин за температури 220°C .

Адгезійну міцність визначали для покриттів, які наносили на зразки із сталі 45 та АЛ-4 відповідно до методики, яку представлено на рисунку 2.4, а ударну міцність визначали для покриттів, які наносили на плоскі зразки. Зносостійкість посадочних з'єднань оцінювали, враховуючи кількість циклів збирання-розбирання сполучень у яких початковий натяг становив 20 мкм до досягнення нульового положення випробовуваних сполучень.

Проаналізувавши дані, отримані експериментальним шляхом, маємо залежність фізико-механічних властивостей та процентного вмісту складових композицій:

- зі збільшенням кількості П-ЕП-219 спостерігаємо зростання адгезійної міцності та електроосадження порошку, щодо решти показників, то вони зменшуються;

- збільшуючи вміст пилоподібного скловолокна спостерігаємо зростання зносостійкості під час збирання, в процесі експлуатації та під час розби-

рання;

- для аналізу ударної міцності склад композиції міняється неоднозначно.

Під час знаходження співвідношення між компонентами композиції встановлено, що максимальне значення по циклах складання та розбирання з'єднань з початковим натягом 20 мкм до досягнення нульового положення становить 8. Ударна міцність при цьому не стала меншою на 4,6 Н•м.

Отже, оптимальний склад композиції міститиме епоксидного олігомеру – 32-40%, скляної муки – 9,8-11,6%, поліаміду 12 – решту складу.

У таблиці 2.1 представлено фізико-механічні властивості композиції для умов граничного вмісту компонент.

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

Склад композиції			Фізико-механічні властивості				
поліамід 12	П-ЕП- 219	скляна мука	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 - електроосідання порошку, г/м²;

n - кількість циклів складання та розбирання з'єднань з початковим натягом 20 мкм до досягнення нульового положення;

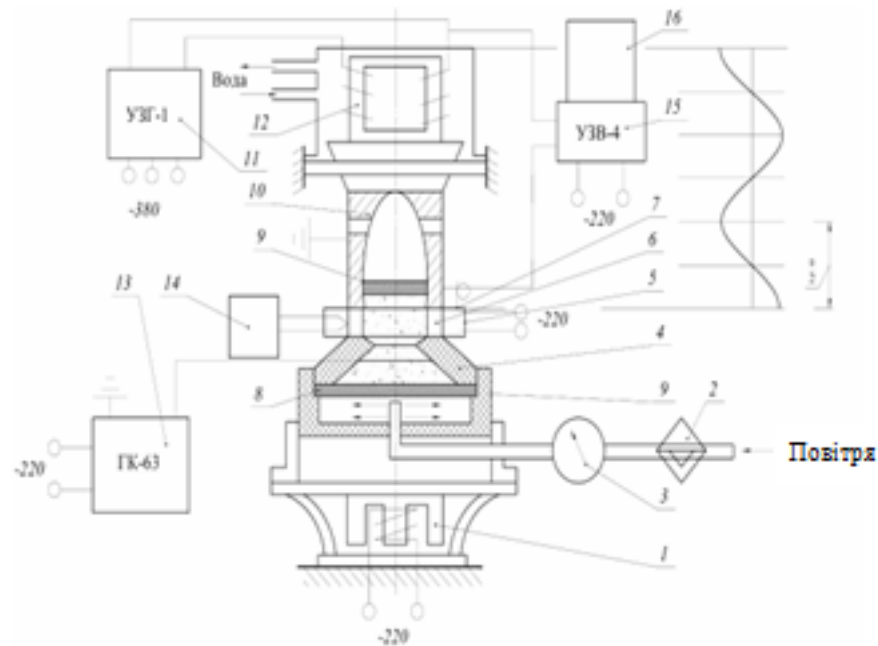
у – ударна міцність Н•м.

3.2. Експериментальні установки, обладнання, прилади та зразки

Нанесення покриттів в лабораторних умовах здійснювалося на двох установках, одна з яких використовувалася для нанесення та формування покриттів, а інша – для дослідження того, як розтікаються розплавлені поліме-

ри.

Установка для нанесення і формування покриттів (рис. 3.1) складається джерела високої напруги 13, ванни киплячого шару 4 та джерела ультразвукового коливання 11, коливальної системи 10, приладів реєстрації та наладки технологічних режимів і параметрів ультразвукових коливань.



1 – електромагнітний вібратор; 2 – фільтр-вогловіддільник; 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 ультразвуку; 12 – магнітострикційний перетворювач; 13 – генератор каскадний; 14 – терморегулятор; 15 – віброметр; 16 – осцилограф.

Рисунок 3.1 Схема лабораторної установки для нанесення і формування покриттів:

Ванна складається з трьох камер. Нижня камера - повітряна, верхня камера є камерою збору зайвого порошку та передачі ультразвукових коливань, а робочою камерою є середня. За допомогою трьох пружних опор ванну встановлюють на електромагнітному вібраторі 1.

Між нижньою та середньою камерою міститься пориста перегородка 9. Над перегородкою встановлено кільце з електродною сіткою 8. Кільце 8

з'єднано з джерелом високої напруги. Зразки, які потрібно покривати, розташовують над робочою камерою та притискають хвилеводом 10.

Ультразвукові коливання отримують з допомогою широкосмугового ультразвукового генератора УЗГ-1 в якого діапазон частоти 10-40 кГц.

Сама коливальна система установки має два елементи – активний (серійний магнітострикційний перетворювач типу ПМС-15А-18) та пасивний (спеціальний акустичний трансформатор коливань – експоненціальний хвилевід, який одночасно служить і пристроєм збору надлишків порошку).

Усі елементи коливальної системи взаємопов'язані як акустичними, так і механічними параметрами. В якості матеріалу з яких вони виготовлені використані сталь 45 та алюмінієвий сплав Д-16Т.

Електронним частотоміром ЧЗ-35А визначено резонансну частоту коливальної системи, а віброметром УЗВ-4 – амплітуду механічних коливань наконечника хвилеводу.

Каскадний генератор КГ-63 слугував джерелом високої напруги, а регулювали її лабораторним автотрансформатором ЛАТР-2М, контроль здійснювали з допомогою вольтметра, який розташований на панелі управління.

Електронно-променевим осцилографом ОЕШ-70, звуковим генератором ЗГ-14, електронним частотоміром ЧЗ-35А та потенціометром вимірювали та налагоджували технологічні режими та параметри ультразвукових коливань.

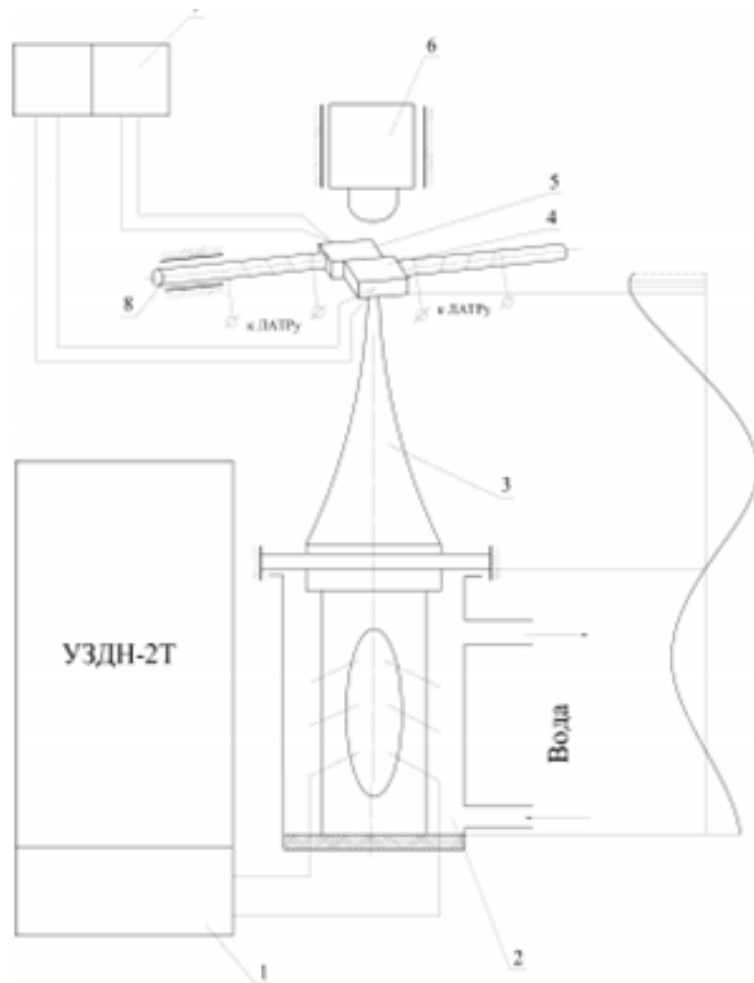
Принцип роботи такого обладнання полягає у поєднанні камерного електростатичного способу нанесення покриття з активною дією на процес формування покриття ультразвуковими коливаннями.

Полімерний порошок, дисперсність якого становить 80-200 мкм, псевдозрідженим вібро-вихровим способом, під дією електростатичних сил переноситься на заземлену деталь. Під дією електростатичного поля відбувається електризація порошку.

Деталь, на якій осів полімерний порошок, нагрівається до тих пір, поки розплавляться частинки полімеру та утвориться суцільна плівка. В процесі

утворення покриття деталі на неї впливають ультразвукові коливання.

Прилади з допомогою яких вивчали розтікання розплавленого полімеру (рис. 3.2) komponували з ультразвукового диспергатора УЗДН-2Т. Їх конструкція дає можливість одночасно досліджувати формування краплі полімеру як в ультразвуковому полі, так і в звичайних умовах. Динаміку формування краплі зафіксували електричним мікроскопом (моделі ММУ-3), який обладнаний цифровим відеоокуляром та під'єднувався до персонального комп'ютера. Цифровий окуляр зі збільшенням в 1000 разів.



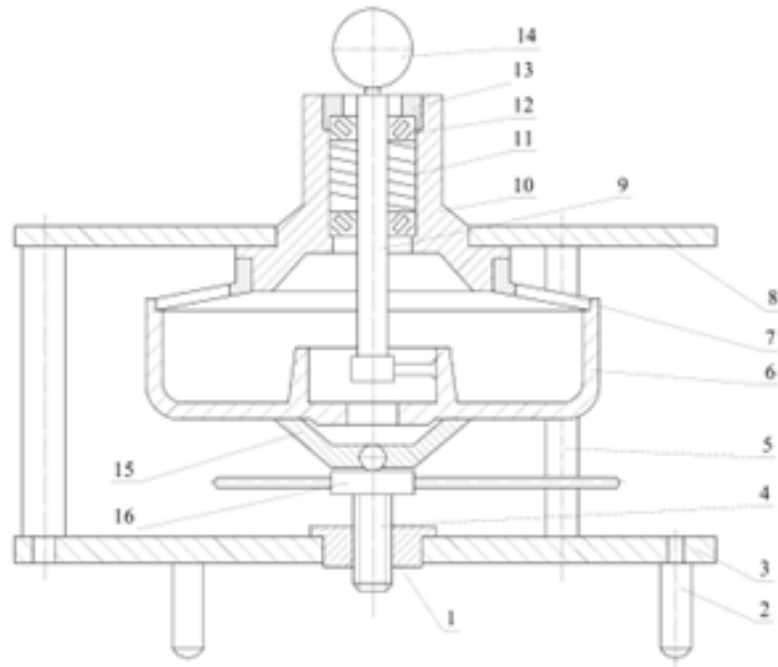
1 – ультразвуковий диспергатор; 2 – магнітострикційний перетворювач; 3 – хвилевід; 4, 5 – зразки; 6 – електронний мікроскоп; 7 – терморегулятори; 8 – нагрівачі.

Рисунок 3.2 – Схема обладнання для вивчення динаміки розтікання розплавлених полімерів

З допомогою двох терморегуляторів на однаковому рівні підтримували

температурні режими обидвох зразків

Аналіз того, як розподілялося зношування посадочних місць підшипників в кришках генераторів відбувався з допомогою спеціального обладнання (рис. 3.3).



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 – регулювальний диск; 14 – індикаторна головка; 15 – п'ята; 16 – притискний механізм

Рисунок 3.3 Схема обладнання для вимірювання зношування посадочних місць підшипників кришок генераторів

Робота даного обладнання ґрунтується на тому, що будуємо осцилограми спрацювання посадочних місць відносно базової поверхні. Самі відхилення вимірюємо індикаторним нутроміром з кроком 0,002 мм.

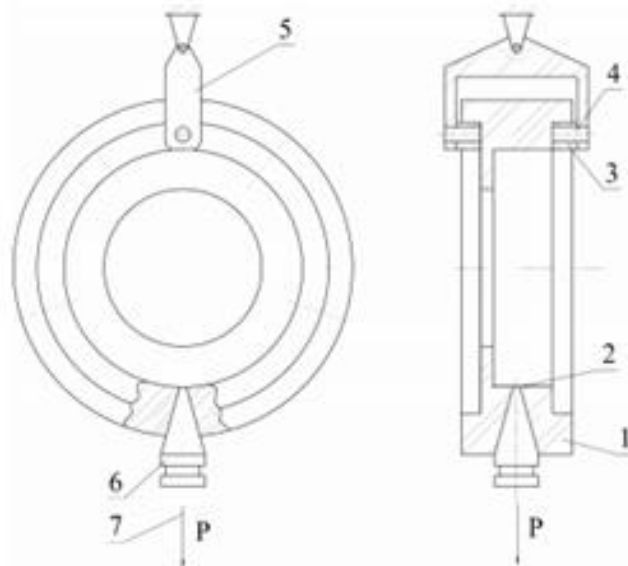
Обладнання містить нижній 3 та верхній 8 диски, які з'єднані між собою трьома стійками 5. На верхньому диску розташований індикаторний нутромір 9, який обертається в двох конічних підшипниках. Підшипники розміщені в корпусі 10, на якому запресована тарілчаста мембрана 7.

Вимірювана деталь 6 встановлюється замковою поверхнею на мембра-

ну і фіксується притискним механізмом 16 через п'яту 15. П'яту 15 розташовано на нижньому диску.

Під час експерименту вимірювали зношуваність посадочних місць підшипників в кришках генераторів. Аналіз розподілу зносу проводили для отворів в кришках, які були виготовлені з алюмінієвих сплавів та сталі з номінальним розміром посадочного отвору 72 мм. В кожній партії кількість кришок становила 100 шт. Для побудови кривих розподілу брали різницю між номінальним діаметром посадочного отвору та показами індикатора. Позитивна різниця між допустимим граничним значенням посадочного отвору та між дійсним максимальним розміром зношеного посадочного отвору і було значенням зносу.

Адгезійну міцність визначали на зразках, як виготовлені зі сталі та алюмінієвих сплавів і мають форму втулки. У зразках висверлювали п'ять конічних отворів. В ці отвори вставляли конічні штифти, які притиралися до місця (рис. 3.4).



1 – зразок; 2 – полімерні композитні матеріали; 3 – ролик; 4 – вісь ролика; 5 – механізм самовідцентрування; 6 – штифт; 7 – зусилля розриву.

Рисунок 3.4 Схема обладнання для визначення адгезійної міцності методом штифтів

Реологічні властивості полімерних композиційних матеріалів у віднов-

леному підшипнику визначали з допомогою динамомеханічного аналізу (рис. 3.5) [6].

Прилад для динамомеханічного аналізу містить вимірювальну частину, систему нагріву й охолодження, і контроллери. Дослідження проводили з плоскими прямокутними зразками. На зразки впливали осцилюючим навантаженням, з амплітудою та частотою широкого діапазону.

Під час експерименту витримано наступні режими випробувань: амплітуда коливань 60 мкм; частота коливань 1 Гц; статична сила 0,5 Н; динамічна сила 7 Н; швидкість підйому температури 2 К/хв; коефіцієнт пропорційності 1,1.



Рисунок 3.5 Загальний вигляд приладу динамомеханічного аналізу

Термомеханічні та в'язкопружні властивості полімерних матеріалів досліджували на полімерному зразку. Полімерний зразок вибрали у формі плоского прямокутника з розмірами $12 \pm 0,1$ мм та заввишки $15 \pm 0,1$ мм.

Зразок витягували з приладу після встановленого часу випробування і залишали його в стані спокою на 12 годин, тоді знову вимірювали його висоту.

Таким чином з допомогою приладу вдалося визначили миттєвий модуль пружності, часу релаксації, значення початкової та кінцевої в'язкості,

константи старіння, в'язкої текучості тощо.

Враховуючи положення теорії пружності та пластичності опрацьовували результати експерименту.

3.3. Методика дослідження технологічних, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей покриттів

Щоб покращити адгезійні властивості покриттів, які отримують з допомогою розробленої композиції на підкладках зі сплавів алюмінію, досліджували як впливають ультразвукові коливання на формування відновлюваної поверхні. При цьому досліджували як розтікається розплав з порошкоподібної композиції. Результати фіксувалися з допомогою мікрофільмування та фотографування, а тоді проводився їх аналіз. Для такого дослідження використовували два зразки. На один з них впливали ультразвуком. На ці зразки встановлювали кубики з нанесеним полімером так, щоб за ними можна було одночасно спостерігати.

Дослідження розтікання проводилося за температури підкладки, яка становила 180-220°C до моменту повного формування краплі.

Адгезійну міцність оцінювали методом штифтів, тобто за величиною зусилля, яке потрібне для нормального відриву конусоподібних штифтів [5]. Штифти руйнували розривною машиною МР-05ц. Відцентровування осі штифта відносно зусилля розтягу досягалося за рахунок обладнання, зображеного на рис. 3.4.

В місці контакту з покриттям вибирали діаметр штифта враховуючи, що:

$$d \leq 4\delta \frac{[\tau_{\text{ср}}]}{[\sigma]}, \quad (3.1)$$

де δ – товщина покриття;

$[\sigma]$ – допустима напруга міцності зчеплення покриття;

$[\tau_{\text{ср}}]$ – допустима напруга на зріз покриття.

Щоб забезпечити щільніше прилягання штифтів в конусних отворах підкладки штифтів та сверла для виготовлення конусних отворів обробляли однаково. тоді штифти підфасовували до місця та обробляли одночасно з поверхнею, яку покривали.

Вісь штифта відцентровували відносно зусилля розтягу скориставшись приладом для самоцентрування штифтів (рис. 3.4.).

Вбирання вологи оцінювали за кількістю дистильованої води, яку поглинуло покриття. Густина визначали з допомогою флотаційного методу.

Властивості реологій полімерних композиційних матеріалів зразка у відновленому підшипниковому вузлі визначали в такому порядку [6]:

- величини пластичних деформацій ε_n , виходячи з принципу адитивності деформацій, через поточну висоту $h(t)$ зразка:

$$\varepsilon_n = \ln[h(t)/(h_0 - \Delta h_y)], \quad (3.2)$$

де Δh_y – пружна деформація.

h_0 – початкова висота зразка;

ε_y - величини пружних деформацій, використовуючи (3.3):

$$\varepsilon_y = \ln[(h_0 - \Delta h_y)/h_0]. \quad (3.3)$$

σ - фактичну напругу, користуючись (3.4)

$$\sigma = 4F/(\pi d_0^2)h(t)/h_0, \quad (3.4)$$

де d_0 – діаметр зразка;

F – статична сила.

E - миттєвий модуль пружності:

$$E = \sigma_y/\varepsilon_y, \quad (3.5)$$

де $\sigma_y = \sigma$ (при $h(t) = h_0 - \Delta h_y$) – напруги, які відповідають пружній деформації.

- модуль зсуву:

$$G = E / 3. \quad (3.6)$$

- швидкість пластичної деформації:

$$\frac{d\varepsilon_n}{dt} = \frac{\sigma}{\tilde{\eta}} = \sigma_y \exp(-\varepsilon_n) / \tilde{\eta}, \quad (3.7)$$

де η – поздовжня в'язкість матеріалу, з якого виготовлено зразок.

- еластичність зразка:

$$L = \frac{\varepsilon_n}{\sigma_y} + \varepsilon_n \int_0^t \tilde{\eta}^{-1} dt. \quad (3.8)$$

- константа старіння k_0 при $T = T_0$, $I_0 = 0$ та достатньо великих значеннях часу навантаження ($t \rightarrow \infty$):

$$k_0 = \frac{\ln(\tilde{\eta}_k^0 / \tilde{\eta}_n^0)}{\tilde{\eta}_k^0 (L / \varepsilon_n - 1 / \sigma_y) - t}. \quad (3.9)$$

При цьому початкове $\tilde{\eta}_n^0$ та кінцеве $\tilde{\eta}_k^0$ поздовжньої в'язкості визначали як котангенси кутів нахилу дотичних до кривих при $t \rightarrow 0$ і при $t \rightarrow \infty$. Поздовжня в'язкість $\tilde{\eta}$ і в'язкість зі зсувом течії η взаємопов'язані залежністю $\tilde{\eta} = 3\eta$.

Енергію активації процесу старіння U та енергію активації в'язкої течії E визначали методом побудови графіків залежностей $\tilde{\eta}_k^0 = \varphi(T^{-1})$ та $k_0 = \varphi(T^{-1})$.

Вказані сталі величини визначаються як тангенси кутів нахилу апроксимуючих прямих до осі абсцис.

Випробування проводилися на кришках генераторів у діючих виробничих умовах.

Довговічність відновлених підшипникових вузлів визначали на кришках автомобільних генераторів. Покривали порошкоподібною композицією.

Математичне прогнзування експериментів та опрацювання результатів проводилися з допомогою програми StatSoft, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 10 і програми Microsoft Office Excel.

Використання статистичних методів прогнозування експериментів дозволило виключити інтуїтивний підхід до дослідів. Більшість експериментів проводили за науково обгрунтованою програмою, що включає об'єктивну оцінку результатів досліджень.

Рівняння регресії підбирали по індексу кореляції та похибки рівняння. Достовірність індексу кореляції (t_i) порівнювали із стандартним значенням критерію Ст'юдента (t_{st}). За умови, якщо $t_i > t_{st}$, індекс кореляції достовірний. Якщо $t_i < t_{st}$ - індекс кореляції не достовірний, тобто теоретична залежність не описує експериментальні результати з потрібною точністю.

Планування та аналіз експериментів проводили, користуючись програмою StatSoft, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 10. Перевірка адекватності моделі виконувалася за умови ризику $\alpha=0,05$, для цього послідовно розраховували: суму квадратів, пов'язану з неадекватністю моделі, дисперсію неадекватності та критерію Фішера, які порівнювали з табличним [16].

Висновки до розділу

1. Виходячи з умов використання композиції та користуючись літературними даними, вибралися складові передбачуваної композиції і рівень їх змін. Отримані рівняння регресії, які характеризують вплив процентного вмісту складових на основні фізико-механічних властивостей композиції.

2. Оптимізовано склад ремонтної композиції для відновлення посадочних місць підшипників кочення методом електростатичного напилення покриттів на зношені поверхні: а) скляна мука – 9,8-11,6%; б) епоксидний олігомер ПЕП-219 - 32-40%; в) поліамід 12 (12АП-Н) – інше.

3. Встановлено, що отриманий склад композиції не забезпечує потрібну адгезійну міцність покриттів, тому слід її потрібно підвищувати, а це поліпшить якість відновлення посадочних місць під підшипники кочення корпусних деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Вплив технологічних режимів на фізико-механічні властивості покриттів

Фізико-механічні властивості полімерів є досить різноманітним, тому на покриття, отримані з них суттєво впливають методи нанесення, формування та експлуатації [9].

Вимоги до покриттів, які використовують для відновлення посадочних місць підшипникових вузлів, визначаються технологічними умовами формування покриттів, зокрема температурно-часові, силові та термообробка. Слід зауважити, що в літературних джерелах відсутні рекомендації щодо технологічних режимів формування покриттів зі склонаповнених порошкоподібних полімерів, зокрема композиція, що досліджувалася. Також недостатньо дослідженим є вплив ультразвукової дії на водо- та оливопоглинання, твердість, густину, ударну міцність, що суттєво впливає на довговічність деталей, які відновлювали полімерними покриттями в умовах виробництва.

Тому в процесі дослідження виникла необхідність обґрунтувати технологічні режими відновлення посадочних місць підшипникових вузлів опор кочення композиційними полімерними покриттями, а саме:

1. Дослідити вплив температури формування та швидкості охолодження на волого - та оливопоглинання та густину покриттів, які наносили в ультразвуковому полі та в звичайних умовах.

2. Дослідити вплив температури формування на ударну міцність покриттів та їх твердість.

Густину, оливо та водопоглинення визначали для покриттів, відокремлених від підкладки, та отриманих із запропонованої композиції в електростатичному полі під дією ультразвуку або без нього. Товщина покриття $(0,5 \pm 0,05)$ мм.

Перед випробуванням дослідні зразки сушили у вакуумсушильній шафі впродовж 24 ± 1 год за температури $50 \pm 2^\circ\text{C}$, потім охолоджували в ексікаторі

над п'яти оксидом фосфору за температури 23°C. Після охолодження зразки зважували на аналітичних вагах з точністю до 0,0001г. Потім занурювали окремо в дистильовану воду, оливу і витримували протягом впродовж 24±1год. Потім зважували. І так до тих пір, поки останні 2 зважування не показували однакові результати.

Волого поглинання дослідили за температури середовища +23±2°C, а оливо поглинання за температури +20±2°C та +60±5°C.

Що ж до густини, то її визначали для покриттів, отриманих в різних температурних режимах, та за різних умов охолодження: на повітрі, у воді, в печі.

Твердість вимірювали твердоміром МПВ-1 та оцінювали за глибиною втискання кульки діаметром 5 мм під навантаженням 50 кН. Заміряли це на покриттях завтовшки 1±0,2 мм, що були нанесені на сталеві зразки.

Ударну міцність визначали на приладі У-1А для покриттів, що були нанесені на пластинки зі сталеві стрічки 08 КП розміром 70x150x1,0 мм, на яку кидали вантаж (Н) з максимальної висоти (м), з якої падав вантаж і не руйнував шар полімеру.

Для дослідження фізико-механичних властивостей використовували зразки, які витримували в ексикаторі впродовж 48 год. за кімнатної температури. Це було потрібно щоб стабілізувати структуроутворення та інших процесів, що впливають на результати вимірювань.

4.2.Вплив умов формування на густину та оливо- і волого поглинання покриттів

Однією з особливостей полімерних композиційних матеріалів є непіддавання корозії при експлуатації у водному середовищі. Але тоді розвивається гігроскопічність полікомполімерних матеріалів, тобто при взаємодії полярних груп полімеру з рідиною полімер починає поглинати вологу з води. Це

викликає зміну геометричних розмірів деталей та їх фізико-механічних властивостей, а, отже, збільшує похибку експлуатації, і як результат, негативно впливає на термін експлуатації відновлених вузлів.

Оливо- та волого поглинання є критеріями завершення процесу утворення покриття, адже їх значення зростають із зростанням кількості дефектів покриттів. Тому визначення умов за яких формують покриття з найменшим волого- та оливо поглинанням, є важливим технологічним завданням, виконання якого дасть можливість обґрунтовано призначити допуски та посадки сполучень деталей та напівкомпозитних матеріалів.

Дослідження того, як впливає температура формування на водопоглинання (рис. 4.1) дозволило зробити висновок, що із зростанням температури зростає і волого поглинання, що, мабуть, викликано збільшенням утворення пор в результаті підвищення термоокисної деструкції.

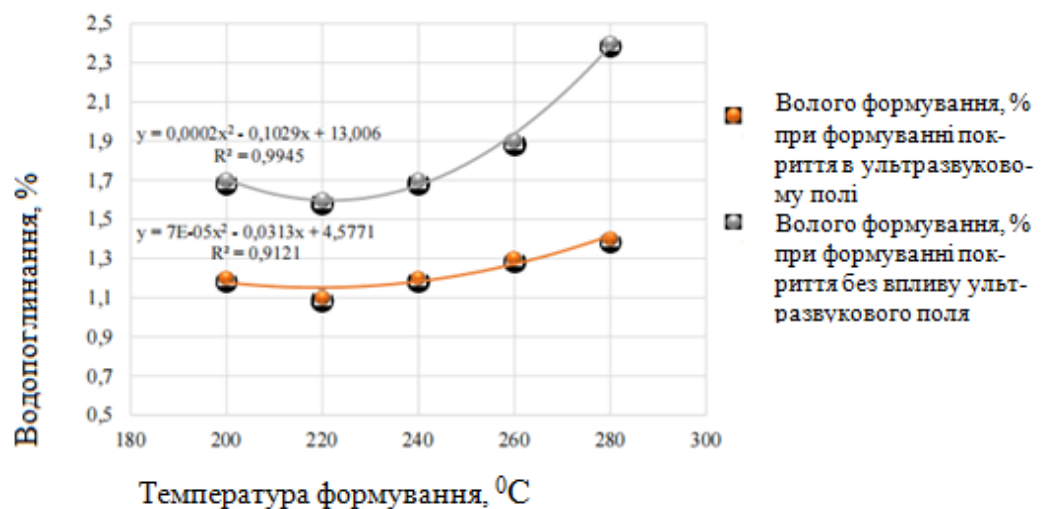


Рисунок 4.1 – Вплив температури формування на волого поглинання покриттів за температури середовища 23°C

Існує припущення, що ультразвук в межах тих температур, що досліджувалися забезпечує видалення газових включень з покриттів поверхні та впорядковує структуроутворення. Під час дослідження оливо поглинання від температури формування покриттів бачимо такі самі залежності [9].

Найбільше поглинання оливи бачимо тоді, коли витримуємо покриття в

оливі за високої температури (рис. 4.2). під час зміни температурного режиму оливи в діапазоні 20°C - 60°C оливо поглинання має тенденцію до збільшення в 1,3 рази для тих покриттів, які були створені без впливу ультразвукового поля, а під впливом ультразвукового поля - в 1,2 рази.

Значення оливо поглинання, які отримано під час експерименту, лежать в температурах від 210°C до 230°C з наступними значеннями: якщо покриття формувалися без впливу ультразвукового поля - 0,29, 0,22; якщо покриття формувалися під впливом ультразвукового поля - 0,15, 0,12.

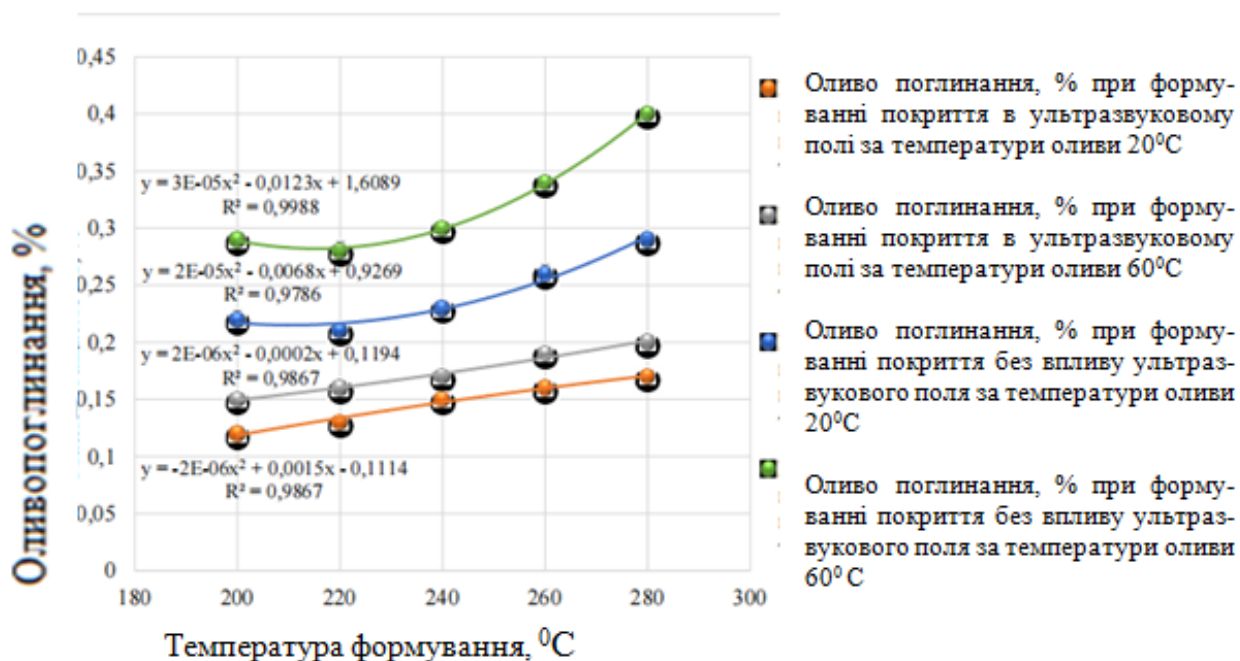


Рисунок 4.2 – Вплив температури формування на поглинання оливи

Отже, вплив ультразвуку знижує поглинання оливи та вологи майже до 1,4 рази, а це означає вищу полімеризацію полімеру і дає можливість отримати кращі адгезійні зв'язки між складовими самої композиції та вищою густиною упаковки структурних елементів.

Під час технологічного процесу потрібно отримати покриття з найвищою густиною. Адже це дозволить виготовлення з точнішими лінійними розмірами, що є вкрай важливим в процесі відновлення деталей з жорсткими допусками.

Під час проведення експериментів, досліджувалася залежність густини

покриття від температури формування та методів охолодження. З результатів експерименту (рис. 4.3) можемо побачити, що зі зниженням температури формування та сповільнення охолодження покриття – густина зростає, її максимальне значення досягається за температури формування 200-230°C. Таке явище пояснюється зміною кристалічності полімеру, від чого залежить густина упаковки макромолекул. Кристалізація полімерів залежить від умов формування покриттів. Існує версія, що сповільнене охолодження в печі сприяє утворенню дуже закристилізованих покриттів.

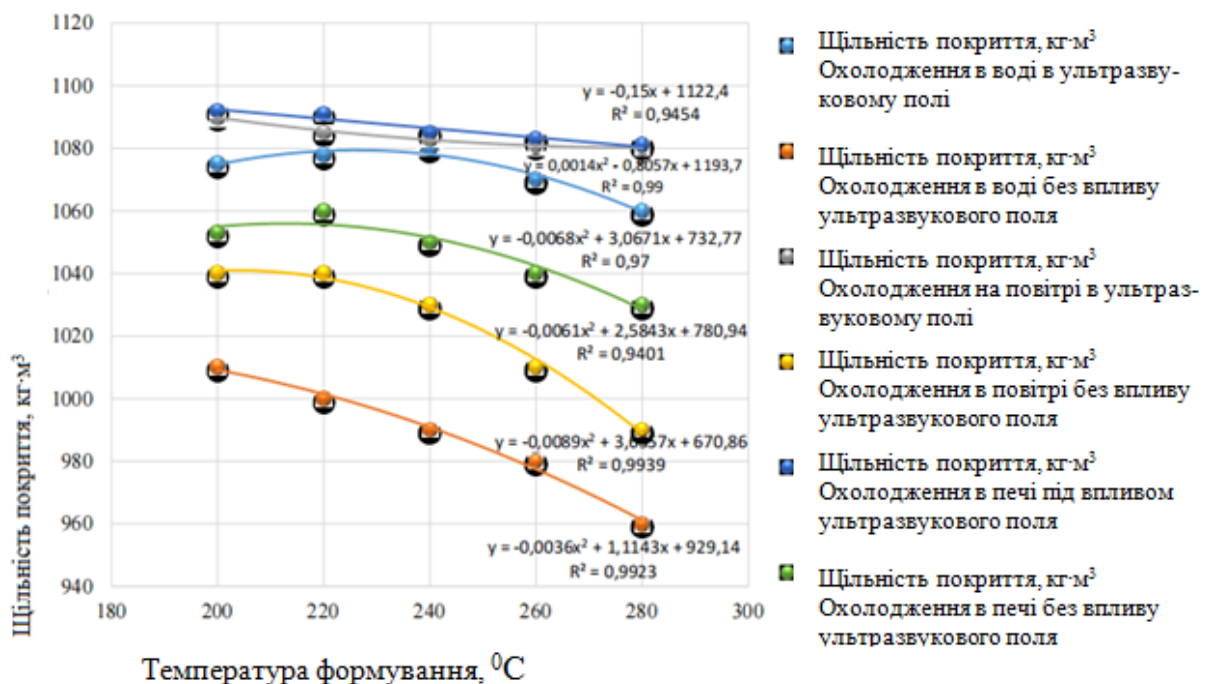


Рисунок 4.3 Залежність густини покриттів від температури формування та швидкості охолодження покриттів

Зростанню густини сприяє також і дія ультразвукового поля. Встановлено також, що густина покриттів, які утворені під дією ультразвукового поля, менше залежить від швидкості охолодження та температури формування покриттів. Це можна пояснюється притаманністю ультразвуку врівноважувати процеси релаксації, упорядковувати структуроутворення, і тим самим сприяти зростанню ступеня кристалічності полімерного покриття.

Отже, можна стверджувати, що одним з ефективних засобів зниження

оливо- та водо поглинання і збільшення густини і, як наслідок, зниження дефектності покриттів є вплив ультразвукових коливань на формування полімерних покриттів. Доречно зауважити, що достатньо високу густину покриттів отримуємо і без дії ультразвуку, за температури 210-220°C за умов дуже повільного охолодження в печі.

Аналізуючи результати досліджень, можемо стверджувати, що найоптимальніші умови для формування покриттів зі склонаповнених порошкових композицій на основі поліаміду П-12 та епоксидного олігомера, які дають можливість отримати слабке оливо-, та волого поглинання та високу густину, можна отримати за температури 210-230°C під дією на підкладку ультразвукового поля з повільним охолодженням покриття в печі.

4.3. Вплив умов формування на ударну міцність і твердість покриттів

Однією з важливих властивостей полімерних покриттів є те, що вони можуть поглинати енергію коливань. Ця здатність пластмас дає можливість використати їх у вузлах, на які діють циклічні навантаження, а також збільшити точність роботи вузла і зменшити рівні вібрації та шуму.

Властивості полімеру характеризуються поглинанням енергії коливань, молекулярною структурою, а також температурою експлуатації, тиском та вологістю, наявністю дефектів та пор. Ударна пружність та твердість покриттів змінюється залежно від того, в яких умовах воно опиняється (рис. 4.4).

Для температур при яких не спостерігається термодеструкція, а саме 200-220°C, ударна міцність та твердість є найвищими. Твердість покриттів, які сформовані під дією ультразвукового поля є вищою на 10-30%, а ударна пружність – на 6-12% ніж в покриттях, які формувалися в аналогічних умовах, але без впливу ультразвуку. Це пояснюється підвищеними адгезійною пружністю та щільністю покриттів, які сформовані під дією ультразвукового

ПОЛЯ.

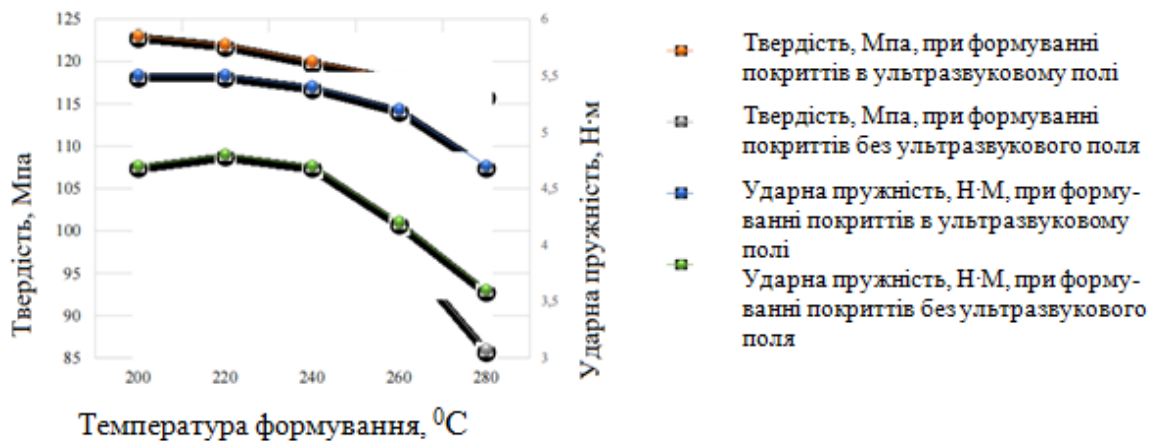


Рисунок 4.4 Залежність твердості та ударної міцності полімерного покриття від умов формування

4.4. Дослідження працездатності підшипникових вузлів автомобілів, відновлених полімерними композиційними матеріалами

Працездатність деталей, відновлених полімерними покриттями, визначається, в першу чергу, адгезійної міцністю покриттів [8], яка в реальних умовах експлуатації деталей міняється під дією вологи, температур, зовнішніх механічних навантажень. Слід зазначити, що в даний час в літературі недостатньо вивчені питання стабільності адгезійних систем, одержаних з порошкоподібних композицій, також відсутні рекомендації по раціональному підвищенню стабільності фізико-механічних властивостей полімерних покриттів, вживаних для відновлення посадочних місць підшипникових вузлів автомобілів.

Відомо, що довговічність посадочних місць під підшипники кочення багато в чому визначається фізико-механічними процесами, що відбуваються в зоні контакту поверхонь. Змвнюючи взаємодію поверхонь, що контактують, можна досягти зміни працездатності з'єднання [9].

Основними чинниками, що визначають характер взаємодії сполучення,

є величина поля допуску деталей, що сполучаються, і мікрорельєф контактуючих поверхонь.

На форму мікрорельєфу та величину допуску впливають геометричні параметри сполучення, характер навантаження, товщина покриття, типи і точність підшипника, умови монтажу і демонтажу підшипника, умови його експлуатації, а також фізико-механічні властивості покриттів відновлених деталей.

У літературних джерелах знаходимо окремі рекомендації щодо призначення посадок для сполучень, які відновлено полімерними покриттями [11, 14, 16], але вони визначені для певних матеріалів та часто не враховують всі чинники, що впливають на характер сполучень. Тому слід вивчати вплив умов навантаження, товщини покриття, поля допуску сполучення і шорсткості відновлених поверхонь на довговічність відремонтованих вузлів.

Отже, щоб розробити ефективну технологію відновлення посадочних місць підшипникових вузлів автомобільного транспорту, які би забезпечили високу довговічність відремонтованих вузлів, потрібно розглянути наступні:

- зміну адгезійної міцності в умовах змінних температур та при дії вологи.
- вплив типу з'єднання підшипника кочення з відновленим посадочним отвором на довговічність відремонтованих вузлів.
- розробку технологічних рекомендацій щодо відновленню посадочних місць підшипникових вузлів із використанням покриттів з розробленої композиції.

Досліди було проведено трьома етапами. На першому етапі досліджувалась стабільність адгезійної міцності покриттів. Стабільність оцінювали змінюючи адгезійну міцність металополімерних з'єднань в гідростатичних умовах.

На другому етапі досліджували як залежить довговічність покриттів від умов навантаження та товщини покриття. При цьому використовували математичне планування експериментів. Впродовж дослідів випробовували пі-

дшипникові вузли опор кочення, які складаються з підшипникового щита електродвигуна та підшипника кочення. Номінальним вважали діаметр посадочного отвору, що дорівнює 72 мм.

За критерій довговічності вибирали проміжок часу до моменту провертання зовнішнього кільця підшипника в посадочному отворі.

Режими випробувань та рівні зміни вибрали такими, що аксимально наближалися до умов експлуатації відновлених деталей. Вони мали такі значення:

- частота обертання валу – 1800 хв^{-1} ;
- вид навантаження – радіальне змінне;
- товщина покриття ($x_1 = 0,5^{\pm 0,4} \text{ мм}$);
- навантаження на опори ($x_3 = 4^{\pm 3\text{кН}}$).

Умови та результати дослідів представлено в таблиці 4.1.

На третьому етапі вивчали як впливає поле допуску сполучення і шорсткості відновлених посадочних місць на довговічність підшипникових вузлів та міцність з'єднання. Паралельно з цими досліджували як змінюється характер посадки відновлених підшипникових вузлів від способу і кількості складок.

Шорсткість оцінювали з допомогою використовуваного параметру R_a та параметра форми t_p . з допомогою цих параметрів достатньо повно характеризують контактну жорсткість пресових з'єднань [9].

Змінюючи геометрію ріжучого інструменту та режими механічної обробки отримували різні значення шорсткості посадочного отвору. На токарному верстаті проводили механічну обробку. Якщо було потрібно, то посадочний отвір шліфували тонкою шліфувальною шкіркою. Геометрію різців та режими різання приймали відповідно до [10].

При багатократному збиранні з'єднань умови контакту мінялися. Оскільки найбільше зминання мікронерівностей проявляється під час механічного збирання, то досліджувалася зміна натягу та шорсткості від значення початкового натягу і кількості складок. План дослідження представлено в таб-

лиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Умови експерименту і результати зміни натягу і шорсткості від початкового натягу і кількості складок

№ дос- ліду	План в кодованих змінних		План в натуральних змінних		Натяг, мкм	tзб, %
	x1	x2	$\tilde{x}_1$ - кількість складок	$\tilde{x}_2$ – 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

Шорсткість визначали з допомогою профілограм, які отримували профілографом-профілометром.

В певних умовах використання адгезійних з'єднань зниження адгезійної міцності призводить до руйнування покриття і, як наслідок – вихід з ладу вузла в цілому. Тому важливо знати реальний термін експлуатації відновлених деталей, а особливо, можливості його підвищення.

Дослідження (рисунок 4.5) показали, що адгезійна міцність покриттів, які сформовані в ультразвуковому полі, є стабільнішою. Відшарування покриттів на підкладках з алюмінієвих сплавів, які сформовані в ультразвуковому полі, відбулося через 340 год. витримки в гігростаті за температури 60°C та відносній вологості повітря 95-100%. А покриття, які сформовані без впливу ультразвуку, при витримці в аналогічних умовах, відшарувалися через 46 год. Краще термостатичну дію витримали покриття, які нанесені на сталеві підкладки - 840 год. та 140 ч відповідно, для сформованих під дією

ультразвуку та без нього відповідно.

Таблиця 4.1 - Умови експерименту і результати дослідження довговічності покриттів від товщини і навантаження

№ дослідження	План в кодованих змінних		План в натуральних змінних		Результати експерименту	
	x ₁	x ₂	$\tilde{x}_1$ - товщина покриття, мм	$\tilde{x}_2$ - навантаження, кН	L _{уз} ¹ , год.	L ² , 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

1 довговічність покриттів, сформованих в УЗП

2 довговічність покриттів, сформованих без УЗП

Вища стабільність адгезійної міцності покриттів, що сформовані під впливом ультразвукового поля, пояснюється збільшенням кількості адгезійних зв'язків між покриттям та підкладкою, підсилюючи їх ультразвуковою дією. Припускаємо, що це досягається тому, що на початку періоду утворення адгезійного контакту ультразвукові коливання створюють вимушену конвекцію в розплавленому полімері, руйнують межевий шар, збільшують видалення газових включень з поверхні розподілу фаз.

Після того, як встановлено молекулярний контакт, ультразвукове поле активує дифузії кінців і сегментів макромолекул полімеру та інтенсифікує взаємодію функціональних груп адгезивів з іонами металу чи оксиду, тобто призводить інтенсифікації міжфазних молекулярних сил.

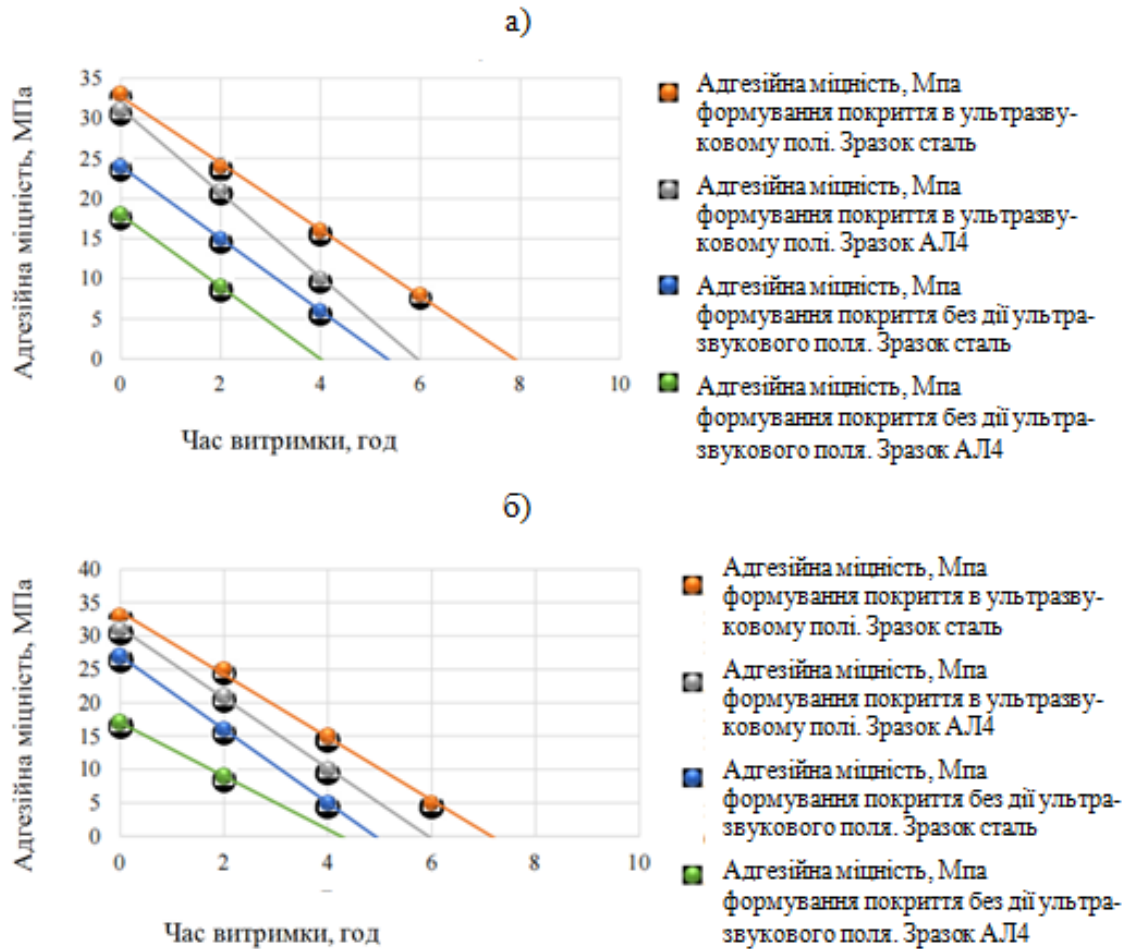


Рисунок 4.5 – Зміна адгезійної міцності полімерних покриттів від тривалості витримки в гідростаті при 40°C (рис. а) і 60°C (рис. б)

Можемо вважати, що й наступні стадії формування металополімерного з'єднання - утворення хімічних зв'язків між полімерами та підкладкою і формування структури покриття – суттєво змінюються, коли впливає на них радіаційний тиск ультразвуку.

Отже, позитивні зміни, які спостерігаються під час термічної та ультразвукової дії, суттєво впливають на постійність адгезійної міцності металполімерних систем [11].

Висновки до розділу

Під час досліджень виявлено, що дія ультразвуку на деталь в процесі формування полімерних покриттів суттєво збільшує густину, ударну міцність, твердість та знижує оливо- та вологопоглинання покриттів, при підвищених температурах.

Встановлено температурний режим формування покриттів та швидкість охолодження покриттів, а це своєю чергою, сприяє утворенню високих фізико-механічних властивостей покриттів, а саме – температура формування від 210°C до 230°C , охолодження має бути повільним та в печі.

Досліджено та виявлено, що швидкість охолодження не суттєво впливає на ударну міцність та твердість покриттів, які сформовані в ультразвуковому полі. Тому, коли розробляється технологічний процес з використанням ультразвукового поля, охолоджувати потрібно, враховуючи економічну доцільність та забезпечуючи послідовність технологічних операцій.

Встановлено, що вплив температури та вологи на стабільність адгезійної міцності покриттів, які сформовані під дією ультразвуку є меншим. Покриття, які випробовують в гідростатичних умовах мають більшу довговічність в 2-4 рази, аніж покриття, які отримують в звичних умовах, тобто без впливу ультразвуку.

Визначено шорсткість та поле допуску посадочних поверхонь, які відновлювалися розробленою композицією, за умов забезпечення кращої довговічності та вищої міцності зчеплення.

Для деталей, які збирають один раз, рекомендована посадка N7, а для деталей, що підлягають багатократній збірці - P7.

Встановлено, що використання полімерних покриттів для відновлення посадочних поверхонь підшипників кочення, які сформовано в ультразвуковому полі, дає можливість багато разів монтувати й демонтувати підшипникові вузли, а також експлуатувати їх при навантаженнях, які сягають 7 кН.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Моделювання процесів формування та виникнення травмо-небезпечних ситуацій під час виконання транспортних операцій автомобілем

Кожний небезпечний виробничий фактор незалежно від його виду, рівня та інших властивостей має певну зону своєї дії. Якщо розміри цієї зони мають чітко фіксовані значення. То її можна вважати постійною. Якщо в процесі роботи така зона може змінюватися внаслідок зміни рівня небезпечного фактора, його переміщень у просторі, то вона буде змінною.

У деяких випадках (аварійна ситуація) небезпечний виробничий фактор може значно виходити за межі визначеної (фіксованої) зони. При цьому небезпека травмування працюючого виникає уже за межами небезпечної зони, що була встановлена заздалегідь. Ось чому кожний працюючий на конкретній машині чи на певному робочому місці завжди повинен добре знати про таку небезпеку.

Під час транспортування с.-г. культур постійні небезпечні зони виникають в процесі агрегатування машин з трактором, комбайном тощо, їх регулювання, безпосередньо під час експлуатації тощо.

У процесі роботи внаслідок порушення нормативних вимог охорони праці, допущення помилок, виникає можливість потрапляння людини в небезпечну зону. Дія, внаслідок якої людина потрапляє до небезпечної зони, вважається небезпечною. Під час транспортування с.-г. культур попадання в небезпечну зону може бути внаслідок відсутності попереджувальних знаків небезпечних місць, відсутності страхувальних ланцюгів, несправностей гідравлічної системи, порушення відповідних правил експлуатації машинно-тракторного агрегату. Робота МТА може супроводжуватися небезпечними

умовами, яка визначається недоліками конструкцій машин, технологічного обладнання, низьким рівнем організації праці.

Вищенаведені явища, що формують небезпечну, ситуацію мають певну достовірність виникнення, а це означає, що небезпечні умови (НУ), небезпечні дії (НД), небезпечні ситуації (НС) і їх наслідки – аварія (А), травма (Т) належать до випадкових явищ. Виявити їх завчасно і попередити ці наслідки вдається не завжди.

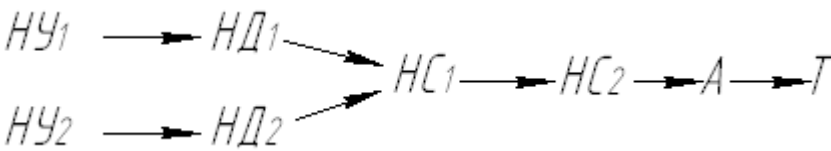
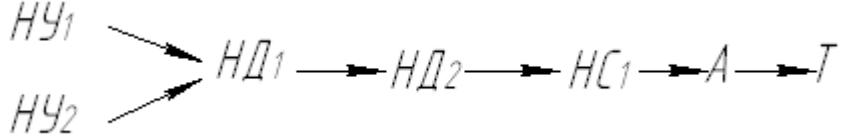
У зв'язку з цим необхідно моделювати процеси формування, виникнення небезпечних ситуацій та їх наслідків, і на підставі їхнього аналізу попереджувати існуючі і потенційні небезпеки.

Моделювання процесів формування та виникнення травмонебезпечних ситуацій під час транспортування с.-г. культур автомобілем та визначення заходів щодо їх запобігання наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1.

Моделювання процесів формування та виникнення травмонебезпечних ситуацій
під час транспортування с.-г. культур

Вид робіт, склад агрегату	Виробнича безпека			Можливі наслідки	Заходи запобігання небезпечним ситуаціям
	небезпечна умова (НУ)	небезпечна дія (НД)	небезпечна ситуація (НС)		
Транспортні роботи	Кузов автомобіля завантажений масою більшою за номінальну вантажопідйомність НУ ₁ Швидкість руху автомобіля більша 60 км/год	Різде натискання педалі гальм НД ₁ Керування автомобілем в умовах поганої видимості НД ₂	Зіткнення з перешкодою НС ₁	Аварія Травма	Встановлення травмонебезпечної рульової колонки.
	Модель процесу <pre> graph LR NU1 --> ND1 NU1 --> NS1 NU2 --> ND2 ND1 --> A NS1 --> A ND2 --> A A --> T </pre>				

Дорога, по якій рухається автомобіль має ями, вибоїни, НУ₁ Механізм приводу керованих коліс у технічно несправному стані НУ₂	Об'їжджаючи дорожні перешкоди, водій різко повернув руля НД₁ Автомобіль рухається з підвищеною швидкістю НД₂	Від вібрації порушується зв'язок між деталями конструкції і автомобіль втрачає керуваність НС₁ Зіткнення із зустрічним транспортом НС₂	Аварія Травма	Організувати систематичний контроль за технічним станом органів керування.
Модель процесу  <pre> graph LR NU1[НУ1] --> ND1[НД1] NU2[НУ2] --> ND2[НД2] ND1 --> NS1[НС1] ND2 --> NS1 NS1 --> NS2[НС2] NS2 --> A[A] A --> T[T] </pre>				
Ширина проїжджої частини не дозволяє одночасного руху в дві сторони НУ₁ Видимість на поворотах обмежена НУ₂	Водій скеровує автомобіль на осьову лінію дороги НД₁ Здійснює маневрування створюючи перешкоди іншим транспортним засобам НД₂.	Поява інших транспортних засобів, пішоходів або перешкод на проїжджій частині у місцях з обмеженою видимістю НС₁	Аварія. Травма	Водії повинні регулярно проходити інструктажі з правил дорожнього руху
Модель процесу  <pre> graph LR NU1[НУ1] --> ND1[НД1] NU2[НУ2] --> ND1 ND1 --> ND2[НД2] ND2 --> NS1[НС1] NS1 --> A[A] A --> T[T] </pre>				

5.2. Пропозиції з покращення умов праці

Проведений аналіз стану охорони праці під час виконання операції транспортування с.-г. культур автомобілем показав, що ще не відповідає повністю вимогам, які ставляться в галузевих нормах. Для його покращення необхідно провести ряд заходів, зокрема:

1. При підготовці автомобіля до виїзду водій зобов'язаний перевірити:

- технічний стан автомобіля, справність гальмової системи, рульового управління, приладів освітлення і сигналізації, склоочисників, установку дзеркал, чистоту і видимість номерних знаків, а також відсутність підтікання палива, масла, води;
- тиск повітря в шинах;
- наявність інструмента та інвентарю;
- заправку автомобіля паливом, маслом, водою, гальмовою рідиною, антифризом і рівень електроліту в акумуляторній батареї;
- наявність запасного колеса, буксирного троса, аптечки першої допомоги, домкрата, вогнегасника.

2. Заправлення автомобіля паливом проводити при непрацюючому двигуні. Заправлення автомобіля етилованим бензином потрібно проводити з бензоколонки зі шлангом, забезпеченим роздавальним пістолетом. Забороняється заправляти автомобілі етилованим бензином за допомогою відер, лійок і т. п., а також відпускати етилований бензин в тару (каністри). Заправник і водій повинні знаходитися при заправленні з навітряного боку автомобіля.

3. Перед заправкою системи охолодження двигуна антифризом необхідно:

- перевірити, чи немає в системі охолодження (в з'єднувальних шлангах, радіаторі, сальниках водяного насоса) течі, а при наявності – необхідно її ліквідувати;
- промити систему охолодження чистою гарячою водою.

Ця рідина містить в собі сильнодіючий яд – етилен-гліколь, попадання якого в організм призводить до тяжкого отравлення. Тара в якій зберігається й перевозиться

зиться антифриз, повинна мати надпис «Яд» і бути обпломбованою. Категорично забороняється переливати низькозамерзаючі рідини за допомогою гланга шляхом сасування ротом. Заправка автомобіля антифризом проводиться безпосередньо в систему охолодження. Після обслуговування системи охолодження, необхідно уважно помити руки. При випадковому попаданні антифриза в організм постраждавший повинний бути швидко доставленим в медичний пункт для надання допомоги.

4. Водій зобов'язаний перевірити, щоб автомобіль був забезпечений упорними колодками (не менше двох штук) для підкладення під колеса, широкою підкладкою під п'яту домкрата, а також медичною аптечкою, знаком аварійної зупинки або миготливим червоним ліхтарем та вогнегасником. Працюючий персонал необхідно бути забезпечений спецодягом, взуттям та засобами індивідуального захисту в залежності від виду транспортування.

5.3. Шляхи захисту навколишнього середовища від впливу автомобільного транспорту

Сучасний транспорт зробив для людини доступними колосальні швидкості для транспортування. Водночас він спричинив і багато негативних явищ: з відпрацьованими газами в атмосферу викидаються сотні мільйонів тон шкідливих речовин щорічно. В усіх великих містах України автомобільний транспорт є основним джерелом забруднення повітря. Це становить 70–90% від загального забруднення. Автомобіль також один із головних чинників шумового забруднення. В результаті погіршується здоров'я людей, отруюються ґрунти і водоймища, втрачається рослинний і тваринний світ. Визначено, що один автомобіль щорічно поглинає з атмосфери понад чотири тони кисню, викидаючи з відпрацьованими газами приблизно 800 кілограм оксиду вуглецю, 40 кілограм оксидів азоту і оксиди вуглеводів.

Забруднення навколишнього середовища токсичними компонентами відпрацьованих газів, в основному вантажними автомобілями, приводить до великих економічних втрат. Головною причиною забруднення повітря є неповне,

нерівномірне згорання палива. Автомобіль всього 55–60% витрачає його на рух, а 40% є непродуктивними витратами. Багато шкідливих речовин утворюються під час роботи двигуна на холостому ходу та під час гальмування двигуном. Коли дросильна заслінка закрита й система холостого ходу карбюратора дає дуже збагачену суміш через недостатню подачу повітря в циліндрі суміш згорає не до кінця. В цьому разі вихід шкідливих речовин з відпрацьованими газами можна зменшити регулюванням системи холостого ходу. Карбюратори регулюють так, щоб при початкових навантаженнях двигун працював на збіднених сумішах, це знижує витрати палива і забезпечує повне його згорання. Однак і в цьому випадку можливе утворення токсичних речовин через недостатньо рівномірний розподіл паливної суміші в циліндрах (не однакова довжина впускних патрубків). Рівномірного розподілу пальної суміші в циліндрах можна досягнути, якщо замінити карбюратор системою впорскування бензину в зону перед впускним клапаном за допомогою насоса з електронним керуванням. Однак карбюратор дешевший і простіший ніж існуючі впорскувальні пристрої, тому тривають роботи з його вдосконалення. Дуже перспективний напрям – це оснащення карбюратора електронною системою керування.

Токсичні продукти неповного згорання палива можна нейтралізувати у випускному трубопроводі двигуна, допалюванням їх, або введенням окислювальних каталізаторів. Найпростіший спосіб допалювання, це подача додаткового повітря у випускну трубу, в зону випускного клапана де температура газів дуже висока. Під час змішування відпрацьованих газів з повітрям незгорілі вуглеводні взаємодіють з киснем. Відбувається їх окислення і утворюється нешкідливий вуглекислий газ і пари води. Окислення незгорілих компонентів відпрацьованих газів відбувається повніше при використанні каталізатора вміщеного у випускний трубопровід, або у так званих спеціальних реакторах для безкаталітичного допалювання, які представляють собою ізольовану камеру достатнього об'єму для затримання в ній на певний період – часу відпрацювання газів, в котру насосом подається свіже повітря. У досконаліших каталітичних допалювачах відпрацьовані газы, спочатку (І-ша камера) обробляються каталізатором,

який відновлює оксиди азоту, потім (II-га камера) вони змішуються з чистим повітрям, що подається насосом і обробляється окиснювальним каталізатором для допалювання. Найкращі каталізатори – це благородні метали (платина, паладій), а також оксиди алюмінію та сплави нікелю. Їх тонким шаром наносять на поверхню керамічних гранул, які знаходяться в камерах допалювачів.

Ефективний спосіб захисту водоймищ від шкідливих викидів автомобілів – це зведення споруд для очищення зливних вод на АЗС. Велике значення має очищення стоків, які утворюються під час миття машини на АТП. Хлористі сполуки, які застосовуються для видалення снігу і льоду з дорожніх покриттів шкідливо впливають, як наслідок прямого контакту так і через ґрунт. Цей вплив можна звести до мінімуму влаштуванням водовідведення.

Дуже важлива проблема – це зниження шуму в містах. Акустична характеристика транспортних потоків визначається показником шумності автомобіля. Одним із напрямків боротьби з шумом є дотримання державних стандартів на засоби пересування. Рівень транспортного шуму також залежить від якості дороги. Існують також технологічні засоби зниження рівня шуму. Застосовують глушник шуму на впуску, або повітряний фільтр. Рівень шуму, який створюється колесами автомобіля, залежить від рисунку протектора та типу шин. Рівень шуму в цілому автомобілі залежить від типу кузова, конструкції підвісок двигуна та кузова.

5.4. Розробка заходів щодо захисту цивільного населення

Захист цивільного населення у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій є одним із найважливіших завдань, яке покладається на службу з охорони праці в господарстві.

Захист населення базується на дотриманні системи заходів, що забезпечують виконання організаційних, інженерно-технічних, санітарно-гігієнічних, про-

ти епідемічних та інших заходів у сфері запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

У господарстві, де виявлено хворих тварин, запроваджується карантин. До його зняття не дозволяється:

- будь-яке переміщення у господарстві;
- вивезення незаражених продуктів тваринництва і рослинництва;
- вивезення нових тварин;
- проїзд через зону карантину;
- вхід на територію стороннім.

Усім, хто доглядає хворих тварин, необхідно працювати тільки у спеціальному одязі, оскільки можна наразитись на дію бактеріальних засобів, а по закінченні роботи даний одяг продезинфікувати або знищити.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Для проведення досліджень, які пов'язані з даною роботою, ми проаналізували літературні джерела, ремонтний фонд, ґрунтовно розглянули теоретичні передумови досліджень та розробили методику їх проведення. Було розроблено технологічний процес, який забезпечує відновлення зношених посадочних місць підшипникових вузлів автомобілів. При цьому використовувався новий полімерний композиційний матеріал.

Проведено теоретичні, лабораторні та експлуатаційні дослідження. На їх основі вдалося отримати такі результати:

1. Розроблено математичні моделі:

- розвитку втомних тріщин в старіючих матеріалах деталей автомобілів;
- розвитку втомних макроскопічних тріщин;
- розвитку втомних тріщин з чималою зоною перед руйнуванням.

Достовірність цих моделей підтверджено експериментально.

2. Оптимізовано полімерний композиційний матеріал для відновлення посадочних місць під підшипники кочення автомобілів. При цьому використовувався метод вібровихрового електростатичного напилення покриттів на зношені поверхні.

Отримали наступне оптимальне співвідношення компонентів:

- епоксидний олігомер П-ЕП-219 - 32-40%;
- скляна мука – 9,8-11,6%.
- поліамід 12 (12АП-Н) – решту.

3. Дослідивши теоретичні основи та провівши експерименти, нами підтверджено можливість підвищення стабільності та якості фізико-механічних властивостей полімерних покриттів. При цьому, під час формування покриттів, на підкладку діяли ультразвуком. Це дало можливість розробити спосіб отримання полімерних покриттів з порошкоподібних компо-

зицій методом їх формування в суміщеному ультразвуковому та електростатичному полі.

4. Встановлено технологічні режими для формування покриттів з розробленої композиції в сумісному ультразвуковому та електростатичному полі, які забезпечують високу міцність з'єднання та адгезію.

При цьому:

- температура формування $T_{\phi} = 200-220^{\circ}\text{C}$;
- тривалість формування $\tau = 20-25$ хв.;
- частота ультразвукових коливань 18-22 кГц;
- амплітуда торця хвилеводу 8-13 мкм.

5. Експериментально встановлено, що матеріал підкладки і стан поверхні, що покривається, суттєво впливає на адгезійну міцність полімерних покриттів. Найвища адгезійна міцність досягається при $R_z = 15-30$ мкм. Менше залежною зміна адгезійної міцності від шорсткості є для покриттів, які отримуємо в ультразвуковому полі.

6. Досліджено, що покриття, сформовані на фосфатованих поверхнях під дією ультразвукового поля має вищу адгезійну міцність (для підкладок з АЛ4 приблизно 28 МПа, а для сталевих підкладок - приблизно 35 МПа.). Саме тому, відновлюючи автомобільні деталі з високими вимогами до адгезійної міцності, покриття потрібно формувати під дією ультразвукового поля, а коли ці вимоги нижчі, то покриття можна формувати і без ультразвуку, але попередньо проводити фосфатуванням поверхонь, які покривають.

7. Визначено шорсткість та поле допуску посадочних поверхонь, які відновлювали розробленою композицією, виходячи з умов забезпечення найбільшої міцності зчеплення та найвищої довговічності. Запропонована посадка N7 для деталей, які збираються одноразово, для деталей багаторазового збирання - P7. Шорхуватість покриття $R_a = 2,5...0,63$ мкм і $t_{30} \geq 25\%$.

8. Встановлено, що той склад склад композиції, який запропоновано в роботі, за умови його нанесення на зношені посадочні місця підшипникових вузлів автомобілів в оптимальних умовах, дає можливість багато разів мон-

тувати і демонтувати підшипникові вузли та експлуатувати їх при навантаженнях до 7 кН.

Розроблено послідовність технологічного процесу відновлення зношених місць підшипникових вузлів кришок генераторів автомобільної техніки рекомендованим полімерним матеріалом. Встановлено, що високу продуктивність процесу та найкращу рівномірність покриття можна досягнути, якщо порошкоподібна композиція проходитиме через демпфуючий отвір, форма перерізу якого наближена до гіперболоїдної.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Голего Н. Л., Алябєв А. Я., Шевель В. В. Фреттінг-корозія металів. Київ: Техніка, 2014. 270 с.
2. Онопрієнко В. П. Вплив фізико-механічних і хімічних факторів на метали при фреттінг-корозії: Дисс. канд. техн. наук. Київ. 2003. 174 с.
3. Курчаткін В. В. Відновлення посадкових місць підшипників кочення сільськогосподарської техніки полімерними матеріалами. Київ: Урожай, 2013. 407 с.
4. Мотовилин Г. В. Відновлення автомобільних деталей полімерними композиціями. Харків: видавничий центр Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2013. 244 с.
5. Нарисова І. Міцність полімерних матеріалів: пер. з япон. Київ: Техніка, 2012. 161 с.
6. Партон В. З. Механіка руйнування: від теорії до практики. Київ: Арістей, 2016. 279 с.
7. Баурова Н. І., Зорин В. А. Застосування полімерних композитних матеріалів при виготовленні та ремонті машин. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2008. 496 с.
8. Білий В. А., Довгяло В. А., Юркевич О. Р. Полімерні покриття. Київ: Арістей, 2016. 388 с.
9. Берлин А. А. Та ін Полімерні композитні матеріали: структура, властивості, технологія: навч. посібник. Суми: Університетська книга, 2018. 480 с.
10. Яковлєв А. Д., Дзор В. Ф., Каплан В. І. Порошкові полімерні матеріали і покриття на їх основі. Київ: Урожай, 2003. 223 с.
11. Партон В. З., Морозов Е. М. Механіка пружно-пластичного руйнування. Суми: Університетська книга, 2010. 320 с.
12. Баженов С. Л. Механіка і технологія композитних матеріалів: Наукове издание. Харків: видавничий центр Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2013. 535 с.

13. Машков Ю. К., Кропотин О. В., Шилько С. В. Самоорганізація і структурна модифікація в металлополімерних трибосистемах. Київ: Урожай, 2012. 341 с.
14. Зорін В. А. Надійність механічних систем: Навчальний посібник для вузів. Київ: Арістей, 2010. 355 с.
15. Zorin, V.A., Baurova, N.I., Balovnev, V.I., Grib, V.V., Kosenko, E.A. Informational Model of State Change in a Mechanical System // Engineering Research. August 2019. Vol. 39. No. 8. pp. 680–682.
16. Lugscheider, E., Bobzin, K., Beckers, M., Burckhardt, M. Gradierte Kohlenstoffschichten für Bauteile und Komponenten // In Tagungsband "GfT Jahrestagung 2021" Göttingen, Deutschland. 2021. pp. 23/1-23/10.
17. Miyamoto Y. Development of functionally graded materials by HIP // Mat. Sci. Res. Int. 2010. No. 6. pp. 3-8.
18. Khmelev, V.N. High Power Ultrasonic Oscillatory Systems // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2017, 2017. pp. 293-298.
19. R.N. Haward, R.J. Young. The physics of glassy polymers. 2nd ed. L: Chapman & Hall, 2017. 508 pp.
20. V. V. Grib V. A. Zorin N. I. Baurova. Determination of the Resources of Machine Components Made of Polymeric Composite Materials on the Basis of Cumulative Evidence // Polymer Science, Series D. October 2018. Vol. 11. No. 4. pp. 431–435.
21. Hurlbut G.S., Jr. Dana's. Manual of Mineralogy. 21st ed. New York: John Wiley & Sons, 2018.
22. Parameswaran, V., Shukla, A. Processing and characterization of a model functionally gradient material // Journal of Material Science. 2010. No. 35. pp. 21-29.
23. Waterhouse R.B. Fretting fatigue. London: Applied science publ, 2021. 244 pp.