

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра процеси, машини і обладнання

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

КАЗАНЦЕВ МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.822

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Підвищення довговічності підшипникових вузлів машин

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ М. С. Казанцев

Керівник роботи

Грабар І.Г.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Казанцев Максим Сергійович. Підвищення довговічності підшипникових вузлів машин. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі встановлено, що при відновленні посадки зовнішнього кільця підшипника полімерним матеріалом збільшується пружна деформація зовнішнього кільця в зоні центрального тіла кочення, що дозволяє вибрати зазори між біговими доріжками і бічними тілами кочення при менших навантаженнях.

Доведено, що підшипники кочення з посадками, відновленими полімерними матеріалами, мають більш високу довговічність. Так, при товщині покриття з еластофікованої епоксиакрилатної композиції 0,3 мм і циркуляційному навантаженні довговічність підшипника в 3,6 рази вище розрахункової.

Довговічність підшипників кочення з посадками, відновленими полімерними композиціями, залежить від товщини покриття і його складу. Найбільшу довговічність мають підшипники кочення з посадками, відновленими композицією складеної з епоксидної композиції еластофікованим герметиком 6Ф (15 мас. час.), дибутилфталат (20 мас. час.), акрилопласт АСТ-Т (35 мас. час.), алюмінієва пудра (10 мас. час.), оброблений в ультразвуковому полі до полімеризації і затверділа інфрачервоним опроміненням.

Довговічність нерухомих з'єднань, відновлених полімерними матеріалами, також залежить від товщини покриття. Зі збільшенням товщини покриття довговічність з'єднань знижується.

Ключові слова: підшипники кочення, полімерні матеріали, епоксидні композиції, відновлення

ANNOTATION

Kazantsev Maxim Sergiyovich. Increasing the durability of bearing units of machines. – The quality of the robot as a manuscript.

Qualification of the robot for the purpose of the master's degree for specialties 208 – Agroengineering. – Polisky National University, Zhytomyr, 2021.

In the magister robot, it was established that when the new bearing of the bearing ring was renewed with a polymeric material, the spring deformation of the bearing ring in the zone of the central section of the road was installed, as long as possible.

It has been reported that rolling bearings with landings, updated polymeric materials, may be more advanced. So, when the coating is made with an elastic epoxyacrylate composition of 0.3 mm and a circulating pressure rating of 3.6 times the bearing capacity.

Downgrade of bearings in rolling with landings, renewed by polymeric compositions, to lay down in the field of pokrittya and yogo warehouse. The best possible durability of rolling bearings with landings, new composite folded with epoxy composition, 6F (15 wt. Hours), dibutyl phthalate (20 wt. Hours), acryloplast AST-hours wt. hour), crumbling in an ultrasonic field before polymerization and hardened,

The dignity of the non-talented people, updated by polymeric materials, can also be found in the community of pokrittya. In the midst of the increase in business, the degree of confidence is reduced.

Key words: *rolling bearings, polymeric materials, epoxy compositions, renewal*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЗВ'ЯЗОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕТАЛЕЙ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ З УМОВАМИ ЇХ РОБОТИ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	16
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ НЕРУХОМИХ З'ЄДНАНЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ З ПОЛІМЕРНИМ ПОКРИТТЯМ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ.....	21
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	36

ВСТУП

Однією з основних завдань в машинобудуванні є збільшення терміну служби деталей машин і устаткування.

Різноманіття умов експлуатації сільськогосподарської техніки веде до зносу поверхневих шарів деталей спряжених деталей. Довговічність машини залежить від ресурсу її складових елементів.

Серед останніх важливе місце займають підшипникові вузли, які є найчисленнішими елементами конструкції тракторів і сільсько-господарських машин. Ресурс більшості підшипників кочення тракторів і сільськогосподарських машин нижче розрахункового і знаходиться в межах 2000...3000 мото-год. [1]. 80-відсотковий гамма-ресурс підшипників кочення трансмісії нових тракторів ХТЗ при звичайній експлуатації становить 5500...5700 мото-год. [2], що явно недостатньо, так як ресурс підшипників кочення у нових тракторів повинен бути доведений до 12...14 тис. мото- годин. , а у відремонтованих – до 9,6...12 тис. мото-год.

Ресурс підшипників кочення багато в чому залежить від посадок кілець в корпусних деталях і на валах. Збільшення зазору між пальцями і посадочними місцями погіршує розподіл навантаження між тілами кочення, призводить до її підвищення на центральні і зниження на бічні тіла кочення. При цьому довговічність підшипника кочення знижується.

Збільшення зазору між кільцями і посадочними місцями є результатом зношування останніх. Основними причинами зношування є фретинг-корозія і проворот кілець підшипника.

Розвиток хімічної промисловості сприяло створенню ряду полімерних матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями.

Наявні в даний час полімерні матеріали, модифікування їх властивостей, розвиток технології їх переробки створили можливість цілеспрямовано

використовувати економічні методи застосування полімерів як в машинобудуванні, так і в ремонтному виробництві.

Використання полімерних матеріалів у машинобудівному і ремонтному виробництві обумовлено тим, що при нанесенні полімерного покриття не потрібно застосування дорогого технологічного устаткування і значних капіталовкладень.

Перевагою полімерних покриттів є і та обставина, що допустимий знос деталей машин може бути встановлений в межах шару, що наноситься (0,3...1,5 мм.).

З представників термореактивних олігомерів і пластмас експлуатаційним вимогам відновлення підшипникових вузлів найбільш повно відповідають пластмаси на основі епоксидних смол і акрилових пластмас, еластофікованим герметиком 6Ф.

У епоксидних смол це хороша вилита при високих фізико-механічних характеристиках, у акрилових пластмас – нетривалий процес затвердіння, у герметика 6Ф – висока еластичність і ударна в'язкість. Ймовірно, поєднання кращих властивостей цих полімерів дозволить скласти композицію, що відповідає експлуатаційним вимогам.

Мета і задачі дослідження. Мета досліджень підвищення довговічності підшипникових вузлів машин шляхом застосування нових полімерних матеріалів в

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Встановити зв'язок експлуатаційних показників деталей підшипникових вузлів з умовами їх роботи
- Визначити склад полімерних матеріалів для ремонту підшипникових вузлів, розробити спосіб їх нанесення та методику досліджень підшипникових вузлів на довговічність;
- Провести дослідження по визначенню впливу складу композицій на надійність підшипникових вузлів сільськогосподарських машин.

Об'єкт дослідження: процес втрати працездатного стану підшипникових вузлів сільськогосподарських машин.

Предмет дослідження: закономірності зміни триботехнічних характеристик посадок підшипників кочення з покриття із полімерних матеріалів.

Методи дослідження. Досліджено виконано з використанням методів механіки, триботехніки, хімотології та прикладної фізики. Обробку експериментальних методів виконували із застосуванням математичної статистики, методики планування та обробки експерименту за допомогою прикладних програм на ПК.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Казанцев М. С.** Зв'язок експлуатаційних показників деталей підшипникових вузлів з умовами їх роботи. Збірник тез *V-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. 28-29 березня 2019 року м. Житомир. ЖАТК. С. 305.

2. **Казанцев М. С.** Класифікація підшипників кочення. Збірник тез *VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 223-225.

3. **Казанцев М. С.** Дослідження довговічності нерухомих з'єднань підшипникових вузлів з полімерним покриттям при динамічному навантаженні. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (5-24 жовтня 2020 року, смт. Глеваха Київської області, Національний науковий центр «ІМЕСГ» НААН України. м. Київ, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Видавничий центр НУБіП України, 2020. [Електроний ресурс] – <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи можуть бути впровадженні в ремонтних майстернях аграрних підприємств при ремонті підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 15 найменування. Загальний обсяг роботи становить 37 сторінок комп'ютерного тексту містить 6 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ЗВ'ЯЗОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕТАЛЕЙ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ З УМОВАМИ ЇХ РОБОТИ

Термін служби машин, механізмів і обладнання до капітального ремонту багато в чому залежить від зносостійкості деталей їх вузлів тертя. Як відомо, велика частина деталей (80-85%) виходить з ладу внаслідок їх інтенсивного зношування і порушення посадки [1]. Через недостатню довговічності деталей виникає економічно невиправдано високий рівень потреби і витрати запасних частин. Ремонтні підприємства становлять в середньому по машинобудуванню не менше 60-80% основного виробництва [2-4].

Залежно від умов експлуатації деталі машин підшипникових вузлів можуть піддаватися одному або кільком наступним видам зношування [5-14]:

- абразивне зношування, що виникає в результаті ріжучого або царапаючої дії твердих тіл і частинок і приводить до механічного руйнування поверхонь тертя (деталі вузлів тертя ковзання сільськогосподарських, дорожніх, будівельних, транспортних та інших машин);

- корозійно-механічне зношування, що виникає в основному при терті матеріалів, що вступають у хімічну взаємодію з навколишнім середовищем (машини і обладнання в нафтохімічній, харчовій, гірничо-металургійної, деревообробної, мікробіологічної промисловості; деталі вузлів тертя, що працюють в агресивних середовищах, в електродіодах);

- адгезійне зношування, що виникає внаслідок дії міжповерхневих сил молекулярного зчеплення на поверхні розділу, утворення адгезійних зв'язків між дотичними поверхнями;

- втомлювальне зношування, що виникає в результаті повторного формування мікроб'ємів матеріалу, що викликає виникнення тріщин і відділення його частинок;

- зношування при фретинг-корозії, що виникає при малих коливальних, циклічних, зворотно-поступальних переміщеннях з малими амплітудами (заклепочні, болтові, шліцьові, шпонкові, штифтові, пресові з'єднання, шарніри, з'єднання муфт, ресори, клапани, кулачкові механізми; деталі вузлів тертя, що працюють в умовах вібрацій, змінних в часі крутних і згинальних моментів);

- ерозійне зношування, що виникає в результаті впливу на поверхню потоку рідини, газу, твердих частинок;

- кавітаційне зношування, що виникає при відносному русі твердого тіла і рідини в умовах кавітації;

- зношування при заїданні, що виникає в результаті захоплення, глибинного виривання матеріалу, його перенесення з однієї поверхні тертя на іншу.

Для деталей, що працюють в стаціонарних умовах, важливим є зменшення величини початкового зносу і скорочення періоду їх припрацювання. Величина початкового зносу, тобто зносу за період припрацювання, може досягати 20...30%, а в окремих випадках – до 70% від граничних значень [15].

Залежність контактних переміщень в підшипникових вузлах а від тиску q висловлюють залежністю $a = cq^m$. Показники такої степеневі залежності c і m , а також допустимі величини контактних деформацій при первинних і повторних навантаженнях можуть бути використані для характеристики здатності поверхневих шарів деталей, що знаходяться в контакті, чинити опір дії сил, що прагнуть їх деформувати.

Як показники, що визначають корозійну стійкість, використовують корозійні втрати, витривалість характеризують межею витривалості, втомну міцність при циклічних напруженнях – числом циклів, які призводять до руйнування поверхонь деталей, підшипникових вузлів і т.д.

Експлуатаційні показники деталей спряжених пар в загальному вигляді залежать від наступних факторів:

- від силових і кінематичних параметрів (тиск на поверхнях, швидкість їх відносного переміщення і т.д.);

- від виду тертя (з мастильним або без мастильного матеріалу, тертя спокою, ковзання, кочення або кочення з проковзуванням);

- від виду мащення (граничне, гідродинамічне або газодинамічне);

- від параметрів, що характеризують склад, структуру і механічні властивості взаємодіючих поверхонь (твердість, межа плинності, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та ін.);

- від параметрів, що характеризують якість поверхневого шару деталей, що знаходяться в контакті (відхилення форми, хвилястість, шорсткість, зміцнення, напружений стан);

- від зовнішніх умов і властивостей навколишнього середовища (температура, вологість, наявність вакууму, вплив агресивних рідин і т.д.).

Забезпечення довговічності деталей можливо, таким чином, шляхом належного вибору матеріалу деталей (з відповідними межею плинності, модулем пружності, теплофізичними властивостями, коефіцієнтом Пуассона і ін. характеристиками), призначення твердості поверхневих шарів (обумовлюючи вид зміцнюючої обробки робочих поверхонь деталей) і інших параметрів їх якості, виходячи з конкретних умов експлуатації спряженої пари. Складність такого вибору зумовлена, зокрема, великою кількістю факторів залежностей і зв'язків експлуатаційних показників з параметрами якості поверхневих шарів деталей і недостатньою вивченістю взаємодії деталей з різномірних матеріалів.

Для оцінки якості поверхневого шару використовують наступні показники:

- 1) геометричні параметри [2]:

- а) відхилення від правильної геометричної форми (від округлості, прямолінійності, площинності);

- б) параметри хвилястості;

в) характеристики шорсткості;

г) напрямок слідів обробки

2) параметри, що характеризують механічні та фізико-механічні властивості поверхневого шару [4-8, 11]:

а) механічні характеристики матеріалу (межа плинності, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, твердість і т.д.);

б) показники зміцнення шару [поверхнева мікротвердість, коефіцієнт зміцнення (як відношення поверхневої мікротвердості до мікротвердості основи деталі), глибина зміцнення і т.д.];

в) параметри, що характеризують розподіл залишкових напружень (найбільш повно вивчені макронапруження, що охоплюють області, співмірні з розмірами деталі, і в якості їх параметрів приймають найбільш характерні точки епюри розподілу залишкових напружень в поверхневому шарі: величина залишкових напружень, що діють поблизу поверхні, максимальна величина залишкових напружень і глибина їх залягання, загальна глибина поширення залишкових напружень т.д.);

г) параметри, що характеризують властивості структури, її недосконалість в поверхневому шарі (розміри фрагментів і блоків структури, кути їх розорієнтування, розміри і кути, що визначають будову кристалічної решітки, щільність дислокацій, концентрація вакансій у металів, молекулярна маса, надмолекулярна структура, форма і розміри макромолекул, їх кінетична рухливість полімерних матеріалів і т.д.);

3) характеристики фізико-хімічних властивостей, що відображають взаємодію поверхні з навколишнім середовищем (фізична адсорбція, хемосорбція, окислення, утворення плівок, дифузія чужорідних атомів в матеріал деталі і т.д.) [9, 13].

З розглянутих показників якості стандартизовані і вказуються на кресленнях деталей лише відхилення форми (ДСТУ 24642, 24643) і характеристики шорсткості (ДСТУ 2789 і 25142).

Найбільш повно вивчена шорсткість поверхні, що обумовлено, з одного боку, простотою її метрологічного забезпечення в порівнянні з іншими параметрами і, з іншого боку, тим, що вона є простим і надійним критерієм оцінки стану технологічного процесу механічної обробки і умов експлуатації деталі: будь-які її відхилення відображаються на шорсткості поверхні.

В даний час шорсткість поверхні характеризують більш ніж 40 параметрами.

Теоретичний аналіз процесів контактної взаємодії деталей можливий на основі фізичної моделі, розробленої І.В. Крагельська і його учнями, найбільш важливі положення якої такі: двоїста молекулярно-механічна або адгезійно-деформаційна природа зовнішнього тертя; правило градієнта здвигового опору (відповідно до якого для забезпечення зовнішнього тертя процеси деформування і пошкодження контактних нерівностей повинні бути зосереджені якомога ближче до поверхні розділу тіл, в зв'язку з цим необхідним є формування на поверхні твердого тіла тонкої плівки, третього тіла, менш міцною, ніж більш глибоко лежачі шари), формування на поверхневих шарах сполучених пар рівноважної шорсткості.

Однією з причин відмови підшипникових вузлів є знос посадочних місць підшипників в корпусних деталях і на валах. При зносі посадочних місць збільшуються зазори між кільцями підшипників і сполучаються поверхнями корпусних деталей і валів, що призводить до переносу осей валів, збільшення вібрації і динамічних навантажень. В результаті знижується довговічність підшипників кочення, валів, зубчастих коліс та інших деталей.

Фактичний ресурс підшипників кочення як нових, так і відремонтованих сільськогосподарських машин значно нижче запланованих величин. Тому розробка заходів щодо підвищення довговічності підшипників кочення як нових, так і відремонтованих тракторів є актуальним завданням.

Зношування посадочних місць підшипників кочення відбувається в результаті багатьох складних процесів, що протікають на сряжених поверхнях

корпусних деталей і зовнішніх кілець, валів і внутрішніх кілець підшипників. При цьому зрізаються і знімаються окремі мікронерівності поверхонь, що з'єднуються при запресовуванні, пластично деформуються мікровиступи в зонах фактичного контакту протягом перших циклів навантаження, змінюються розміри посадочних місць в результаті релаксації внутрішніх напружень в корпусних деталях в процесі експлуатації, руйнуються поверхні посадочних отворів в результаті гідродинамічних явищ при наявності в сполученні рідкого мастила.

Однак перераховані причини зношування посадочних місць підшипників не є основними. До основних причин відносяться фретинг-корозія і провертання кілець підшипників в процесі експлуатації.

Висновки по розділу 1

Аналіз літературних джерел показав, що довговічність підшипникових вузлів як нових, так і відремонтованих машин не відповідає поставленим вимогам. Великі витрати на ремонт тракторів, автомобілів і сільськогосподарської техніки. Ресурси підшипників кочення багато в чому залежать від посадок кілець в корпусних деталях і на валах.

Під час експлуатації підшипникових вузлів відбувається збільшення зазорів між кільцями і посадочними місцями підшипників в корпусних деталях і на валах, що призводить до зниження довговічності підшипникових вузлів. Основною причиною збільшення зазорів є знос посадочних місць підшипників в результаті фретинг-корозії і провертання кілець підшипників.

Для підвищення довговічності підшипникових вузлів при ремонті машин досить усунути зазори в з'єднаннях кілець підшипників і посадочних місць і виключити їх контактування. Найбільш просто виконати ці умови при відновленні нерухомих з'єднань підшипників кочення полімерними

матеріалами. При цьому способі відновлення між кільцями підшипників і посадочними місцями формуються пружні прокладки

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Підшипникові вузли з полімерним покриттям є недостатньо вивчена складна система, в якій відбуваються пружні і пластичні деформації, виявляються міжмолекулярні сили полімеру і сили з'єднання полімеру до металу.

Теоретичний розрахунок міцності підшипникових вузлів, як у пружних, так і в пружно-пластичних областях не може врахувати всього різноманіття фізичних і механічних факторів, що впливають на міцність з'єднань. Неточності збірки підшипникових вузлів і вплив сусідніх ділянок можуть спотворювати розрахункову схему з'єднання.

Так як більшість підшипникових вузлів тракторів, автомобілів, сільськогосподарських машин та іншої техніки працюють в умовах динамічного навантаження, змінного температурного поля, дослідження довговічності підшипникових вузлів з полімерним покриттям в умовах вібрації і температурного поля представляють певний практичний інтерес.

Об'єктом дослідження служили підшипникові вузли з підшипниками кочення з покриттям із полімерних композицій на основі еластофікованих реактопластов (епоксидних смол ЕД-16 і ЕД-20) і акрилових пластмас холодного затвердіння АСТ-Т.

Епоксидні смоли – полімерні матеріали конструкційного призначення, якими цікавляться багато галузей народного господарства. Смоли ЕД- 16 і ЕД-20 являє собою в'язкі рідини коричневого кольору. У твердому стані вони мають високу механічну міцність і адгезію до металів, хорошими демпфівальними властивостями і досить високу хімічну стійкість в різних середовищах. В якості еластофікованого агента – герметик 6Ф.

Герметик 6Ф є продукт суміщення каучуку марки СКН-40 зі смолою ФКУ на основі заміщеного фенолу вінілацетилової структури. Покриття з

розчину герметика 6Ф має високі характеристики: теплостійкості, деформаційно-міцнісні і адгезійні властивості і високу хімічну активність.

В якості пластифікатора використовували дибутилфталат, введення якого знижує крихкість, підвищує пластичність, ударну в'язкість і поліпшує теплофізичні властивості епоксидної композиції.

Наповнювачами служили різні металеві матеріали (чавунні і залізні порошки, необроблені алюмінієва і бронзова пудри, карбід кремнію, діоксид титану, дисульфід молібдену), мінеральні порошки (графіт, тальк, маршаліт і рубане скловолокно). Ці матеріали (кожен окремо) забезпечують високу механічну міцність, низький коефіцієнт теплового розширення і зниження усадки композиції. Затверджувачем служили поліетиленополіамін і АФ-2. Зразками для нанесення епоксидних покриттів служили чавунні кільця із зовнішнім діаметром 96 мм. Внутрішній діаметр кілець змінювався в залежності від товщини покриття.

Нанесення рідких полімерних композицій на зразки виконували шпателем або заливали розплавом композиції. Після витримки на повітрі протягом 1 год здійснювали формування отворів за допомогою калібруючої оправки.

Затвердіння полімерних композицій здійснювали в магнітному полі соленоїдів при кімнатній температурі протягом 72 год. І в сушильній шафі за ступінчастому режиму: при температурі 293К – 1,0 год., При 350К – 1,0 год. і при 390К – 1,5 год. При ступінчастому режимі затвердіння усувається витік епоксидної композиції і відбувається рівномірний розподіл усадочних напружень в композиції. Після затвердіння виконували запресування підшипників в кільце з нанесеним покриттям (рис. 2.1, 2.2).



Рис. 2.1 Кільце з полімерним покриттям на посадкових поверхнях підшипник.

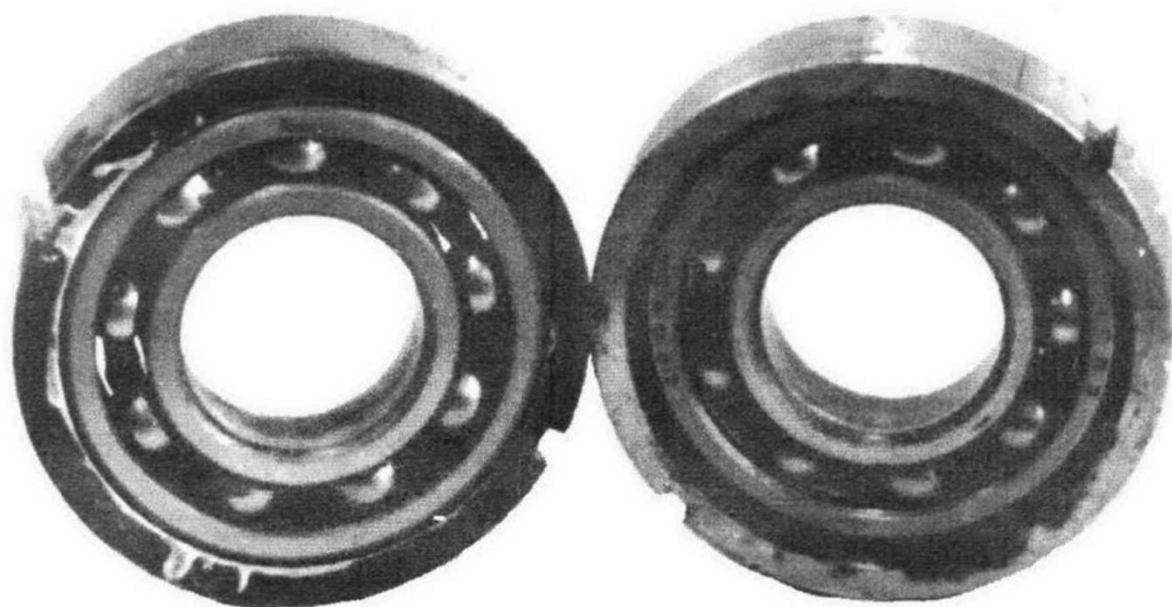


Рис. 2.2. Нерухомі спряження, відновлені епоксидними композиціями.

Нанесення покриття виконували приладом схема якого показана на рис.

2.3.

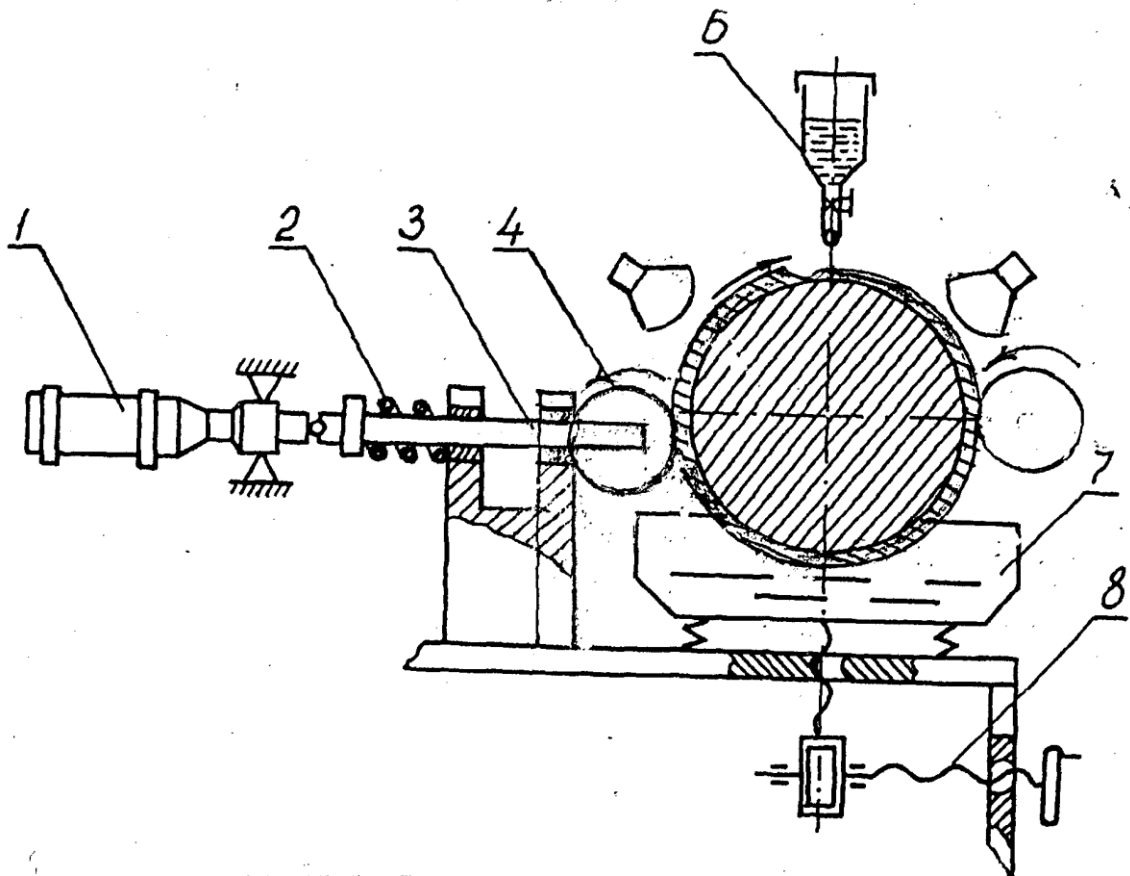


Рис. 2.3. Схема приладу для нанесення полімерного покриття

Випробування при циркуляційному навантаженні зовнішнього кільця підшипника проводили на стенді, виготовленому на базі електромеханічного вібратора ІВ-22 (рис. 2.4).

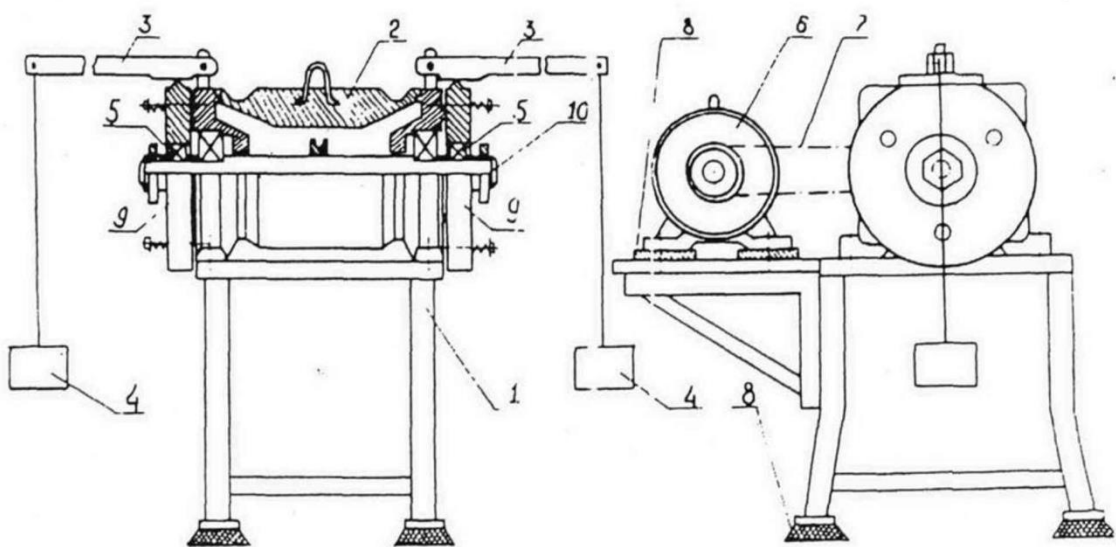


Рис. 2.4. Схема стенда для дослідження підшипників кочення

Порівняльні стендові випробування підшипників на довговічність при місцевому навантаженні зовнішнього кільця приводили на стенді (рис. 2.4), що складається з корпусу 2 з підшипниковими вузлами і валом 10, двох змінних корпусів 9, дослідних підшипників 5, двох важелів 3 з вантажами 4, електродвигуна 6, пасової передачі 7, стола 1 з гумовими амортизаторами 8.

Підшипник 5 за допомогою важеля 3 і вантажів 4 навантажували радіальним навантаженням 8 кН. Частота обертання валу 10 становить 2800 хв. Тривалість випробувань визначали за розрахунком. Після випробувань підшипники піддавали мікрометражу, а поверхні кочення – структурному аналізу.

При циркуляційному навантаженні зовнішнього кільця підшипника менш довговічне внутрішнє кільце підшипника, на бігових доріжках якого з'являються сліди втомного викришування металу. Момент дії викришування супроводжувався різким збільшенням вібрації і сильним шумом.

Втомні пошкодження найбільш часто мають довжину від 2 до 10 мм, ширину від 1,5 до 6 мм і глибину від 0,5 до 1,5 мм, іноді – довжину до 22 мм і глибину в окремих точках більше 1,5 мм

Висновки по розділу 2

В другому розділі магістерської роботи розроблено методику експериментальних досліджень довговічності нових та відремонтованих підшипникових вузлів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ НЕРУХОМИХ З'ЄДНАНЬ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ З ПОЛІМЕРНИМ ПОКРИТТЯМ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Довговічність нерухомих з'єднань визначали на стенді, виготовленому на базі електромеханічного приладу ІВ-22 (ТУ-22-4660-80). За методикою, наведеною в розділі 2, навантаження становило 0,1...0,8 мм.

Посадкові отвори під підшипники в щитах вібратора розточуються і в них запресовують чавунні кільця. Установку підшипників 208 в кільця виконували з різними зазорами і натягами. Полімерні покриття з епоксидних і акрилатних композицій наносили на зовнішнє кільце підшипника. Полімерні покриття наносили на поверхні, що сполучаються перед складанням. Радіальне навантаження на підшипник створювали від 8 до 16 кН регулюванням вимушених сил дизбалансів. Частота обертання валу вібратора становила 300 хв⁻¹.

За критерій довговічності нерухомого з'єднання брали напрацювання до початку зсуву зовнішнього або внутрішнього кільця підшипника в посадковому отворі або на валу. Реєстрацію зсуву здійснювали за допомогою спеціального пристосування, що забезпечує світлову сигналізацію початку зсуву і облік числа обертів кільця підшипника.

Заміна у вібратора ІВ-22 підшипників 3608К на 208 проведена для збільшення навантаження на посадочні місця чавунних кілець. Збільшене в 2,1 рази навантаження відповідала максимальному навантаженню посадочних місць підшипників коробки передач автомобіля ЗІЛ-130 в режимі розгону і гальмування. Час роботи в цьому режимі складає 10...15% від повного часу роботи. У зв'язку з цим при випробуваннях нерухомих з'єднань забезпечувалося 12...20-кратне прискорення.

Довговічність нерухомих з'єднань в значній мірі залежить від швидкості зношування посадочних отворів підшипників в корпусних деталях і шийок валів. Чим нижче швидкість зношування, тим вище довговічність нерухомих з'єднань.

У разі посадки підшипника без полімерного покриття з зазором або натягом, залежності зносу від напрацювання має три явно виражених ділянки: початковий, відповідний зносу під час припрацювання поверхонь; середній прямолінійна ділянка, відповідає періоду нормального зношування; кінцевий, при якому спостерігається катастрофічний знос. Швидкості зношування на прямолінійних ділянках в випадку посадки підшипників з зазором і натягом близькі між собою. Це свідчить про єдиний механізм зношування отворів при посадці підшипників з зазором і натягом. Однак довговічність з'єднань при посадці підшипників з натягом 0,02 мм в два рази вище, ніж при посадці з зазором 0,02 мм.

Характер зношування посадочних отворів істотно змінюється при посадці підшипників з покриттям з еластофіцированої смоли ЕД-6. Знос посадочних отворів підшипників з полімерним покриттям без спеціальної обробки визначали при зазорі 0,02...0,04 мм, з покриттям, терморадіаційна обробка при 160 °С протягом 0,5 при зазорі 0,08...0,12 мм.

У цьому випадку залежності зносу від напрацювання не мають ділянок напрацювання. Знос посадочних отворів при сполученні з полімерним покриттям істотно знижується. Так, при наявності полімерного покриття без спеціальної обробки знос за напрацювання 200 год. в 5 разів менше, ніж без полімерного покриття і при натягу 0,02 мм. На ділянці нормального зносу швидкість зношування при наявності полімерного покриття в 3,2 рази менше, в порівнянні з ділянкою нормального зносу при посадці підшипника з натягом.

Проведена терморадіаційна обробка покриттів з еластофіцированих епоксидних і бутакрилових композицій призводить до подальшого зниження зносу посадочних отворів. Наприклад, при наявності полімерного покриття

обробленого інфрачервоним опроміненням при 150 °С протягом 30 хв і товщиною покриття 0,35 мм визначити знос при напрацюванні 270 год не вдалося.

Аналогічні результати отримані при визначенні зносу посадочних місць під підшипник на валах. При наявності покриття з розчину герметика 6Ф товщиною 0,06 мм в поєднанні з натягом 0,02 мм знос за напрацювання 340 год. визначити не вдалося, в той час, як шийка вала з'єднання без полімерного покриття (натяг 0,02 мм) при напрацюваннях 200, 250 і 300 год. мала знос відповідно 0,022; 0,035 і 0,070 мм.

Нанесення покриття на основі ЕД-16 і акрилової смоли АСТ-Т, еластофікованим герметиком 6Ф при складанні підшипникових вузлів сприяє різкому зниженню зносу посадочних отворів. Так, при наявності композиції з епоксидної смоли ЕД-16 анаеробного герметика в з'єднанні з натягом 0,02 мм знос посадкового отвору за напрацювання 320 год. визначити не вдалося.

Основною причиною зношування посадочних поверхонь нерухомих з'єднань без полімерного покриття є фреттинг-корозія. В процесі випробувань на посадочних поверхнях підшипників, корпусів і валів виявлені глибокі пошкодження фреттинг-корозією. Відмітною ознакою фреттинг-корозії є утворення червоно-бурих продуктів зношування. При посадці підшипника з натягом продукти зношування у вигляді пастоподібної маси починають виділятися через 30...40 год. роботи з'єднання.

Пастоподібна маса складається з продуктів зношування й змащення, яка проникає в з'єднання підшипника з посадковим отвором і валом. Наявність пастоподібної маси перешкоджає провороту зовнішнього і внутрішнього кілець підшипника при виникненні зазорів в з'єднаннях. Провертання кільця підшипника починається тільки після того, як під дією зовнішніх сил пастоподібна маса повністю видавлюється із з'єднання.

Цим пояснюється зниження зовнішньої сили, необхідної для утримання кілець підшипника від провертання при наявності мастила на сполучених поверхнях.

При складанні нерухомих з'єднань без полімерного покриття з зазором провертання кільця починається відразу ж після початку роботи з'єднання. Продукти зношування не накопичуються в з'єднанні. Поверхні кілець підшипників і посадочних місць стають гладкими і блискучими. Однак, якщо ці поверхні протерти білим папером, то на ній залишаться червонобурі тонкі смуги, які свідчать про протікання процесів фретинг-корозії. При обертанні кілець створюються сприятливі умови для розподілу продуктів фретинг-корозії по всій поверхні посадочних місць і постійного видалення їх із з'єднання. Мікроплощинки фактичного контакту, на яких інтенсивно протікають процеси фретинг-корозії, постійно змінюють своє місце розташування і охоплюють велику площу поверхонь, що сполучаються. В цьому випадку поверхні, що сполучаються не мають глибоких локальних пошкоджень.

Наявність в з'єднанні полімерного покриття перешкоджає розвитку фретинг-корозії на сполучних поверхнях. В процесі контактування мікроставупи зминаються. Полімерний матеріал в западинах знаходиться в стані гідростатичного стиснення і виконує роль мікроамортизатора. У місцях контактування металевих поверхонь розвиваються процеси фретинг-корозії. Полімерне покриття через попадання в нього оксидів заліза стає чорним. Однак процеси фретинг-корозії протікають з низькою інтенсивністю, що призводить до значного зниження зносу посадочних поверхонь.

Покриття складається з композиції на основі ЕД-16 М і оброблене терморадіаційним випромінюванням при температурі 160 ° С протягом 0,5 год., повністю запобігає контакту металевих поверхонь і перешкоджає розвитку фретинг-корозії, що виключає знос посадочних поверхонь.

Однак для забезпечення заданої довговічності нерухомих з'єднань необхідно запобігти повертанню кілець підшипників, так як довговічність визначається напрацюванням до початку повертання.

Довговічність з'єднань, відновлених еластофіцированими реактопластами на основі ЕД-16 і АСТ-Т, залежить від зазору в з'єднанні до нанесення покриття. Стрілки у точок означають, що повертанню кільця підшипника під час випробувань не досягнуто.

Довговічність з'єднань з полімерним покриттям підвищується зі зменшенням зазору перед нанесенням покриттів. Залежність довговічності від зазору мають вигляд гіпербол, які асимптотично наближаються до осі ординат. Шляхом впливу силових полів і опромінення покриттів можна в значній мірі підвищити довговічність нерухомих з'єднань, нанесених з еластофіцированих епоксидних композицій.

Значне підвищення довговічності з'єднань «зовнішнє кільце підшипника-посадочний отвір», терморадіаційною обробкою з композиції на основі еластофіциованої епоксидної смоли ЕД-16 спостерігається при товщині покриття менше 0,2 мм, необроблених терморадіаційним опроміненням – менше 0,04 мм і нанесенням покриттів з композиції на основі бутакрілу – менше 0,16 мм. Тому еластофіцированою епоксидною смолою ЕД-16 доцільно відновлювати нерухомі з'єднання підшипникових вузлів типу «зовнішнє кільце підшипника-посадочний отвір» з зазором до 0,2 мм, акриловою пластмасою «Бутакріл» – до 0,16 мм.

Значне підвищення довговічності з'єднань «внутрішнє кільце підшипника - вал», відновлених нанесенням термооброблених покриттів з композиції епоксидної смоли ЕД-16, розчину герметика 6Ф, спостерігається при зазорах менше 0,2 мм, нанесенням покриттів з розчину еластомеру ГЕН-150 (В) – менше 0,12 мм. При зазорі до відновлення 0,12 мм довговічність нерухомих з'єднань, відновлених композицією з герметика 6Ф і епоксидної смоли ЕД-16, в

2,3 рази, а при зазорі 0,2 мм в 14 разів вище довговічності нерухомих з'єднань, відновлених композицією, яка містить бутакріл.

Механізм руйнування покриттів, оброблених терморадіаційним опроміненням і без нього, в нерухомих з'єднаннях має якісну відмінність. Покриття, не піддане терморадіаційній обробці, зношуються за допомогою скочування. Це особливий вид зношування, характерний для полімерів в високо еластичному стані. Він виникає, коли сили тертя між полімерним покриттям і посадковим місцем великі, а робота розриву полімеру мала. В цьому випадку ковзання полімерного покриття щодо посадкового місця не відбувається, а в результаті складного деформування полімеру утворюється «скатка». В умовах зазору переміщення «скатка» відбувається за принципом тертя кочення. Кочення «скатка» супроводжується розривом покриття, а переміщення кільця підшипника сприяє видаленню відірваних «скаток» з нерухомого з'єднання. При цьому частота провертання зовнішнього кільця підшипника постійно зростає і через 20...30 хв досягає частоти, що відповідає зазору до нанесення полімерного покриття. Покриття повністю руйнується і після розбирання нерухомого з'єднання полімерне покриття не вдається.

Руйнування обробленого покриття з композиту ЕД-16 і розчину герметика 6Ф не супроводжується утворенням «скаток». Початковий зсув кільця підшипника відбувається в момент пуску, але через кілька секунд роботи кільце зупиняється і нерухомо протягом усього періоду безперервної роботи. Після зупинки і охолодження підшипникового вузла при подальшому пуску спостерігається нове зрушення кільця, але вже на величину, більшу первісної. Після 10...20 таких пусків кільце підшипника починає обертатися постійно. Тільки після початку постійного обертання кільця полімерне покриття може повністю відшаруватися і вийти з нерухомого з'єднання без утворення «скаток».

Довговічність нерухомих з'єднань, відновлених бутакріловою композицією, також залежить від зазору в з'єднанні до відновлення. При

зниженні зазору довговічність збільшується. Стрілки у точок означають, що при випробуванні нерухомого з'єднання повертання кільця підшипника не відбулося.

Максимальний зазор, при якому підшипниковий вузол не зруйнувався, може бути прийнятий за максимально допустимий зазор, до якого нерухоме з'єднання рекомендується відновлювати даною полімерною композицією. Нерухомі з'єднання з зносом до $-0,2$ мм доцільно відновлювати герметиком 6Ф, епоксидною смолою ЕД-16 $0,3$ мм і вище.

При одному і тому ж проміжку до відновлення нерухомі з'єднання, відновлені різними марками анаеробних герметиків, мають різну довговічність. Найбільш довговічними є нерухомі з'єднання, відновлені еластофіцированими епоксидними композиціями і акрилпластмасами.

Довговічність підшипникових вузлів з підшипниками кочення визначалася також вклеюванням підшипників кочення в чавунні кільця за допомогою епоксидних композицій, наповнених різними металевими і мінеральними порошками. Показником довговічності служив руйнує зусилля клейового шару і напрацювання підшипникового вузла. Через певний інтервал напрацювання на розривній машині визначали зусилля руйнування полімерного шару.

Результати досліджень залежності зусилля руйнування полімерного покриття (клейового шару) в підшипниковому вузлі при динамічному навантаженні представлені на рис. 3.1.

Як видно з рис. 3.1 і 3.2 міцність всіх нерухомих з'єднань, відновлених епоксидними і акриловими композиціями різного складу, зі збільшенням напрацювання знижується. Однак інтенсивність зниження міцності різна в залежності від складу композиції і способу затвердіння. Вона вище при використанні в якості наповнювача чавунного порошку, ніж при використанні алюмінієвої пудри і вище при гарячому нанесенні, ніж при магнітному. Інтенсивність зниження тим вище, чим більше концентрація наповнювача в

епоксидній композиції. Так, якщо на початку випробувань при невеликому напрацюванні, так само як і при статичних випробуваннях, найбільша міцність сполучень досягається при використанні в якості наповнювача композиції чавунного порошку, то після напрацювання 250-300 годин, більшою міцністю володіють композиції з алюмінієвої пудри. Аналогічно змінюється міцність з'єднань при використанні композицій з різним вмістом чавунного порошку.

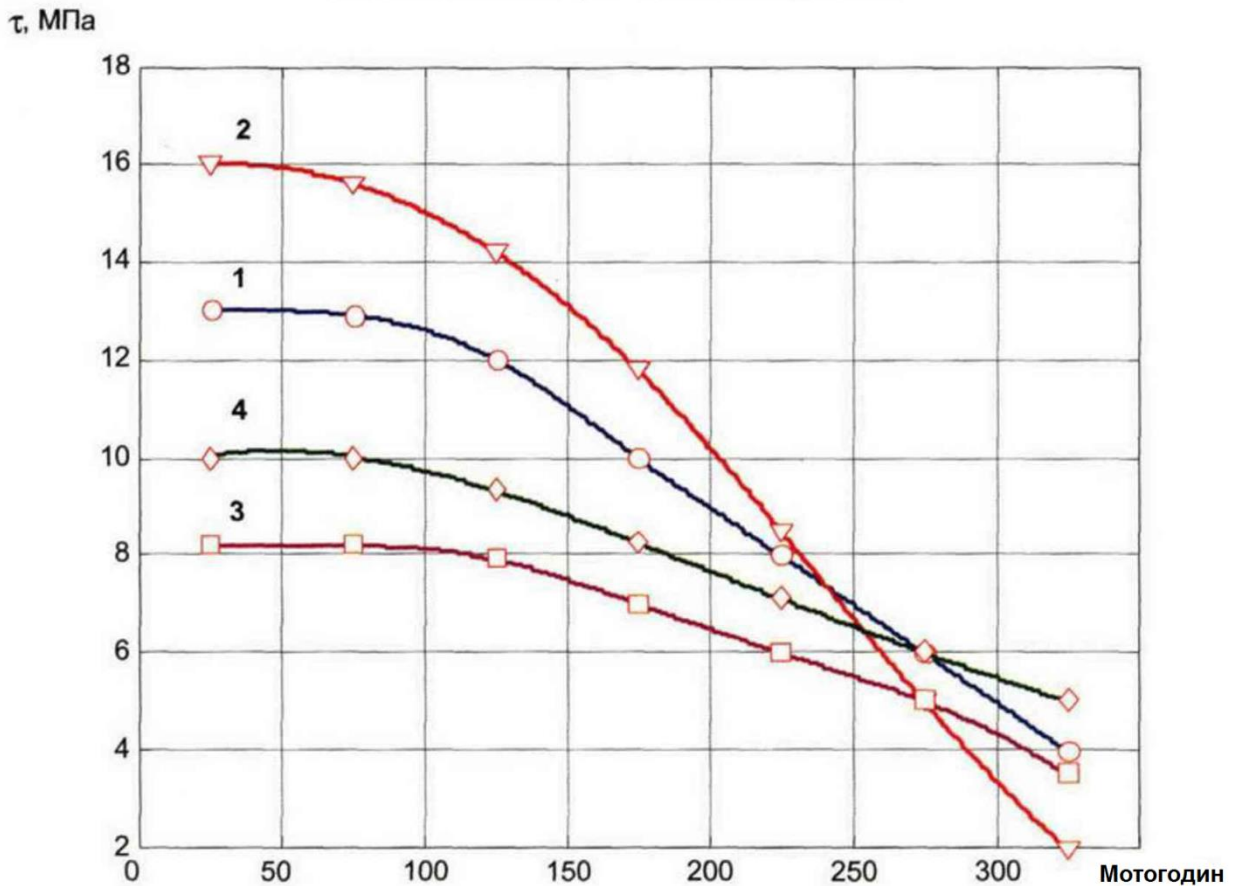


Рис. 3.1. Залежність міцності нерухомих з'єднань, відновлених полімерними матеріалами від способу затвердіння і тривалості роботи. 1 – композиція 3, 2 – композиція 9, 3 – композиція 8, 4 – композиція 1 міцності.

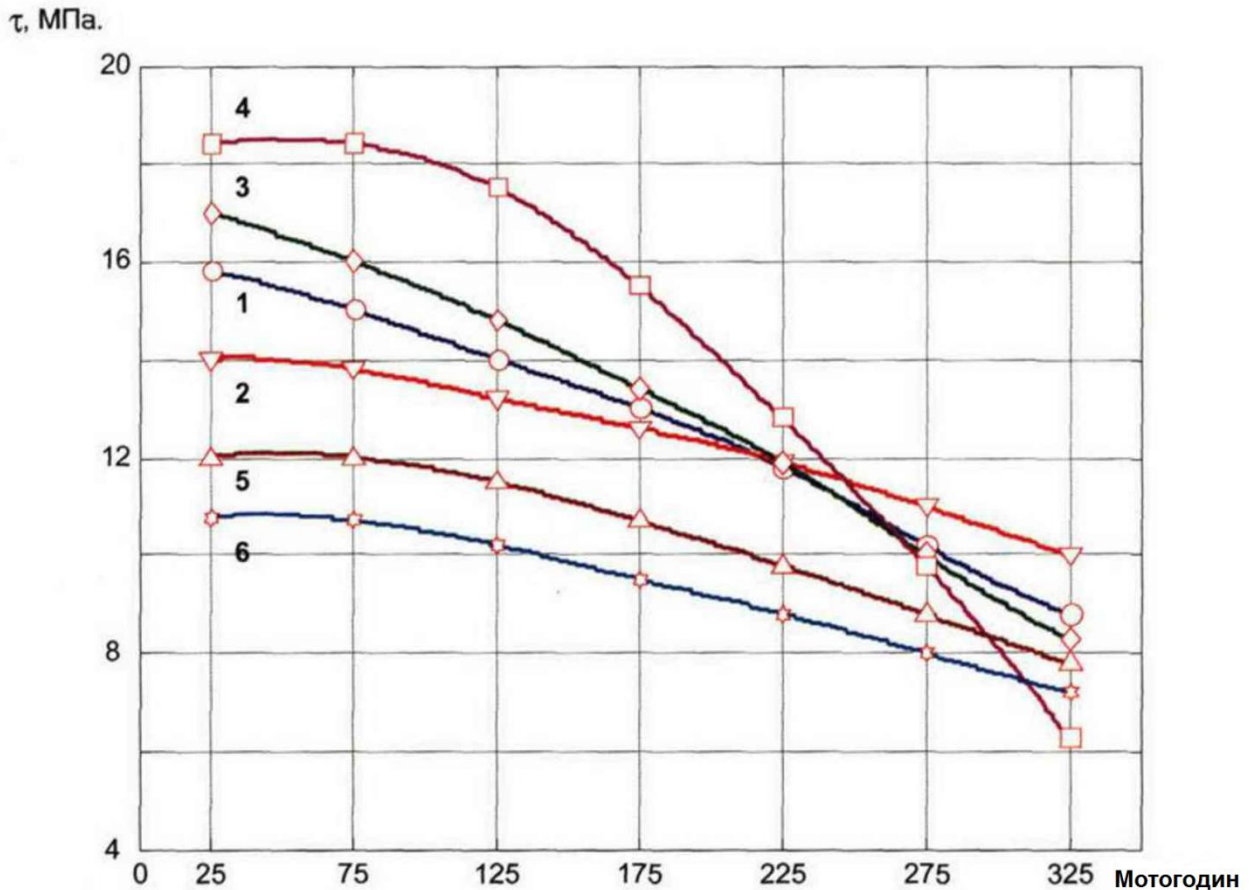


Рис. 3.2. Залежність міцності нерухомих з'єднань, відновлених полімерними композиціями від тривалості роботи 1 – композиція 12, 2 – композиція 18, 3 – композиція 13, 4 – композиція 15, 5 – композиція 17, 6 – композиція 34.

На початку випробувань міцність тим вище, чим більше концентрація порошку, а після напрацювання 250-270 мото-годин, навпаки, чим вона менша. Наприклад, при напрацюванні 25 мото-годин міцність з'єднання, відновленого композицією, що містить 120 частин чавунного порошку, становила 18,7 МПа (3.2), а містить 80 частин порошку – 17,0 МПа при напрацюванні 250 мото-годин, міцність цих з'єднань стали однаковими, а при напрацюванні 325 мото-годин міцність першого сполучення (120 частин порошку) становила 8 МПа, а другого 9 МПа. Хоча при використанні в якості наповнювача алюмінієвої пудри зберігається тенденція підвищення інтенсивності зниження міцності з'єднання при збільшенні концентрації наповнювача, проте вона виражена

значно слабкіше, ніж при використанні чавунного порошку. При цьому протягом всього періоду випробувань (325 годин) міцність нерухомих сполучень, відновлених епоксидною композицією з концентрацією алюмінієвої пудри 15 частин по масі, залишається вище, ніж з концентрацією 10 частин (криві 2 і 5 на практично паралельні між собою).

Характер зміни міцності нерухомих сполучень, відновлених композицією, з епоксидної смоли ЕД-16, без наповнювача, затверділі затверджувачем АФ-2 при температурі 393К майже лінійний (рис. 3.1 і 3.2). Тут треба зазначити, що міцність цього сполучення в початковий період роботи найменша, але після напрацювання 325 годин стає рівної міцності сполучення, відновленого композицією з 80 частин по масі чавунного порошку і пластифікатор ДБФ в кількості 20 частин по масі.

Механізм зниження міцності сполучення в процесі роботи при динамічному навантаженні, мабуть, пов'язаний з виникаючими під дією динамічних і статичних навантажень пружно-пластичними деформаціями. Під час перекочування кульки по жолобу кільця підшипника під дією радіальної навантаження і вимушених коливань виникає пружна деформація, яка за величиною і напрямком гармонійно змінюється.

Чим менше пружні властивості розглянутих композицій, тим більше вона поглинає енергію вимушених коливань системи і перетворює її в теплову енергію, розігріваючи композицію, і тим самим знижує дію зовнішніх навантажень на міцність сполучення. Саме цим і пояснюється зниження міцності нерухомих з'єднань, відновлених епоксидними композиціями, що містять в якості наповнювача 120 частин за масою чавунного порошку, в порівнянні з сполученнями, де в композиції міститься 80 частин по масі чавунного порошку, а також в порівнянні з сполученнями, відновленими алюмінієвою пудрою .

Таким чином, проведені дослідження показують, що міцність сполучень, відновлених епоксидними композиціями з менш пружними властивостями, при

тривалому динамічному навантаженні знижується менш інтенсивно, ніж міцність сполучень, відновлених композиціями з більш високими пружними властивостями.

Найбільшою довговічністю володіють сполучення, відновлені композиціями з менш пружними властивостями, але які мають пружну енергією достатню для утримання зовнішнього кільця підшипника від повертання.

Тому при складанні полімерної композиції для ремонту нерухомих сполучень необхідно прагнути забезпечити у композиції максимальні демпфіруючі властивості при наявності пружної енергії, достатньої для утримання елементів сполучення в нерухомому стані.

Висновки по розділу 3

Стендові та експлуатаційні дослідження показали, що максимальні демпфіруючими властивостями володіють композиції наступного складу (в частинах за масою):

- Епоксидна смола ЕД-16 – 100;
- Акрилова платмаса АСТ-Т – 35;
- Еластофікований герметик 6Ф – 15;
- пластифікатор ДБФ – 20;
- алюмінієва пудра – 10;
- затверджувач АФ-2 – 6;

Однак при статичних випробуваннях найбільшою міцністю володіли сполучення, відновлені композиціями з 120 частинами по масі чавунного порошку. Отримані результати не суперечать один одному, а лише вказують на те, що статичні випробування не забезпечують об'єктивної оцінки довговічності сполучень і не можуть бути використані в якості критерію при визначенні

оптимального складу епоксидної композиції для відновлення нерухомих сполучень.

Дані, отримані експериментальним шляхом, добре узгоджуються з попередньо проведеними теоретичними дослідженнями інших авторів.

ВИСНОВКИ

На підставі проведених досліджень, довговічність підшипникових вузлів підшипників кочення, з полімерним покриттям можна зробити наступні висновки:

1. Пружна деформація зовнішнього кільця підшипника без полімерного покриття і рівномірність розподілу навантаження між тілами кочення залежить від посадки підшипника в корпус. Пружна деформація зовнішнього кільця під навантаженням значно зростає при наявності між зовнішнім кільцем і корпусом зазору. В результаті деформації зовнішнє кільце приймає форму еліпса з великою віссю, перпендикулярної напрямку прикладеного навантаження. При наявності між корпусом і зовнішнім кільцем підшипника зазору навантаження передається тільки центральному тілу кочення. Передача навантаження бічними тілами кочення можлива тільки після вибору зазору між кільцями і бічними тілами кочення.

2. При відновленні посадки зовнішнього кільця підшипника полімерним матеріалом збільшується пружна деформація зовнішнього кільця в зоні центрального тіла кочення, що дозволяє вибрати зазори між біговими доріжками і бічними тілами кочення при менших навантаженнях. При цьому знижується нерівномірність розподілу навантаження між тілами кочення. Так, при відновленні посадки підшипника герметиком 6Ф нерівномірність розподілу навантаження знижується в 1,5 рази в порівнянні з посадкою з натягом 0,005 мм без полімерного покриття і більш в 2,4 рази в порівнянні з посадкою з зазором 0,336 мм.

3. Підшипники кочення з посадками, відновленими полімерними матеріалами, мають більш високу довговічність. Так, при товщині покриття з еластофікованої епоксикакрилатної композиції 0,3 мм і циркуляційному навантаженні довговічність підшипника в 3,6 рази вище розрахункової.

Довговічність підшипників кочення з посадками, відновленими полімерними композиціями, залежить від товщини покриття і його складу. Найбільшу довговічність мають підшипники кочення з посадками, відновленими композицією складеної з епоксидної композиції еластофікованим герметиком 6Ф (15 мас. час.), дибутилфталат (20 мас. час.), акрилопласт АСТ-Т (35 мас. час.), алюмінієва пудра (10 мас. час.), оброблений в ультразвуковому полі до полімеризації і затверділа інфрачервоним опроміненням.

4. Нерухомі з'єднання підшипників кочення, відновлення нанесенням полімерного покриття, мають більш високі питомі зусилля і роботу запресовки і розпресування в порівнянні з сполуками без полімерного покриття, і одному і тому ж натягу.

5. Зусилля запресовування і розпресування нерухомих з'єднань, відновлених еластофікованими реактопластами залежить від товщини покриття і натягу при запресовуванні. Зі збільшенням зазору питоме зусилля при запресовуванні і коефіцієнт відносної міцності знижуються. Максимальне зусилля запресовування і розпресування нерухомих з'єднань, відновлені композицією складається з смоли ЕД-16 і герметика 6Ф зазором 0,14 мм (зовнішнє кільце-корпус), а максимальні коефіцієнти відносної міцності відповідно при натягах 0,025 і 0,015 мм.

6. Довговічність нерухомих з'єднань, відновлених полімерними матеріалами, також залежить від товщини покриття. Зі збільшенням товщини покриття довговічність з'єднань знижується. Тому посадки зовнішніх кілець підшипників кочення рекомендується відновлювати герметиком 6Ф при зносі до 0,2 мм, при зносі більше 0,2 мм доцільно відновлювати еластофікованою і модифікованою епоксидною композицією. Нанесення полімерних покриттів з епоксидних композицій є ефективним способом захисту металевих поверхонь від фретинг-корозії. Так, при наявності покриття з епоксидної композиції знос посадкового місця підшипника в корпусі під час стендових випробувань був

відсутній, в той час, як в аналогічних умовах без полімерного покриття він перевищив 70 мкм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черновол М. И. Повышения качества восстановления деталей машин. Киев : Техника, 1989. 367 с.
2. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / под ред. П. І. Стоєва. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.
3. Воробьев Ю. А. Допуски и посадки деталей из пластмасс. Москва : Машиностроение, 1964. 199 с.
4. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов 2-е изд. переработ. и доп. / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. Москва : Машиностроение, 2001. 664 с.
5. Подшипниковые узлы современных машин и приборов: Энциклопедический справочник / Под общ. ред В.Б. Носова. Москва : Машиностроение. 1997. 640 с.
6. Белый В. А. Трение и износ материалов на основе полимеров. Москва : Наука и техника, 1976 432 с.
7. Гайдамака А. В. Підшипники кочення. Базові знання та напрямки вдосконалення : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2009. 248 с.
8. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс. Москва : Госстандарт, 1982. 62 с.
9. Заблонский К. И. Детали машин. Киев : Вища школа, 1985. 518 с.
10. Селиванов А. И., Артемьев Ю. Н. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники. Москва : Колос, 1978. 247 с.
11. ДСТУ 3012-95. Підшипники кочення та ковзання. Терміни та визначення. чинний від 1996-01-01. Офіц.вид. К. : Держстандарт України, 1995. 75 с.
12. ДСТУ ГОСТ 520:2014 Підшипники кочення. Загальні технічні умови (ГОСТ 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ).

13. Harting D.R. Demodulated Resonance Analysis – A Powerful Incipient Failure Detection Technique. ISA Transactions, (Instrument Society of America). 1977. Vol. 17, N 1. P. 35-40.

14. Костецкий Б. И., Носовский И. Г. Износостойкость и антифрикционность деталей машин: Киев: Техника, 1965. 206 с.

15. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. Москва : Машиностроение, 1977. 526с.