

На правах рукописи



Мироненко Александр Вячеславович

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РОЛИКОПОДШИПНИКОВЫХ
УЗЛОВ В КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЯХ АВТОМОБИЛЕЙ,
ВОССТАНОВЛЕННЫХ КОМПОЗИЦИЕЙ
АДГЕЗИВА АН-110**

Специальность 05.22.10 Эксплуатация автомобильного транспорта

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» (ФГБОУ ВО ЛГТУ)

- Научный руководитель:** **Ли Роман Иннакентьевич**
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Карагодин Виктор Иванович**
доктор технических наук, профессор, декан заочного факультета, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
- Кононенко Александр Сергеевич**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Технологии обработки материалов, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I»

Защита диссертации состоится **«19» апреля 2017 года в 10:00 часов** на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.111.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: г. Орел, ул. Московская, д. 77., ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте (<http://oreluniver.ru>) ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 340.

Автореферат разослан «02» марта 2017 г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства образования и науки Российской Федерации (www.vak.ed.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, направлять в диссертационный совет по адресу: 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95.

Телефон для справок +79155080508

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 999.111.03



Катунин А.А.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Восстановление изношенных деталей позволяет значительно снизить затраты на ремонт. Особенно это актуально при ремонте крупногабаритных металлоёмких корпусных деталей трансмиссии, масса и стоимость которых может достигать 40...45% от массы и стоимости всего автомобиля в целом. Поэтому возникает необходимость создания и использования новых технологий восстановления, отвечающих современному уровню развития техники.

Основной причиной отказа подшипников качения, является износ посадочных мест подшипников в корпусных деталях. Существует множество способов восстановления посадочных мест подшипников, однако они требуют применения сложного технологического процесса, дорогостоящего технологического оборудования, механической обработки восстанавливаемых поверхностей, имеют высокую трудоемкость, энергоёмкость и себестоимость. Кроме того данные способы восстановления не предотвращают фреттинг-коррозию – основную причину износа посадочных мест подшипников.

Способы восстановления посадок подшипников качения полимерными материалами лишены вышеуказанных недостатков. При этом полностью исключается появление фреттинг-коррозии, многократно повышается долговечность восстановленных деталей, значительно снижается себестоимость и трудоёмкость восстановления.

Актуальной задачей является создание полимерных композиционных материалов (ПКМ) с улучшенными потребительскими характеристиками и разработка новых эффективных технологических процессов восстановления с их применением.

Степень разработанности темы. Вопросам диагностики и ремонта автомобилей посвящены труды Афанасьева Л.Л., Власова В.М., Денисова А.С., Зорина В.А., Карагодина В.И., Крамаренко Г.В., Кузнецова Е.С., Мирошникова Л.В. и др. отечественных ученых. Проблема восстановления корпусных деталей авто-тракторной техники полимерными материалами исследована в работах Ибилдаева Б.А., Курчаткина В.В., Ли Р.И., Котина А.В., Кононенко А.С., Башкирцева В.Н., Гаджиева А.А., Гвоздева А.А. и многих других отечественных ученых.

Наряду с шарикоподшипниками в агрегатах трансмиссии автомобильного транспорта широко используются роликоподшипники. Литературный обзор показал, что в отличие от шарикоподшипников, вопрос восстановления посадочных мест роликоподшипников полимерными материалами практически не исследован. Недостаточно изучен вопрос распределения нагрузки между телами качения, формирования параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, долговечности роликоподшипников с посадками, восстановленными полимерными материалами.

При восстановлении посадочных отверстий корпусных деталей ПКМ на основе анаэробных герметиков и акрилового адгезива АН-105 требуется специальная технологическая оснастка для калибрования, формования или центрирования. Для ПКМ на основе эластомеров требуется нагревательное оборудование и до-

полнительный расход электроэнергии. Необходимо разработать полимерный композиционный материал, который можно наносить вручную кистью как эластомеры, и который отверждается при комнатной температуре, как анаэробные герметики и акриловые адгезивы. Следует разработать технологию и несложную технологическую оснастку для восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях агрегатов трансмиссии автомобильного транспорта новым ПКМ.

Работа выполнена в соответствии с планом госбюджетных научно-исследовательских работ ЛГТУ на 2013...2016 годы по теме 05.02.01 «Разработка перспективных технологий восстановления и упрочнения деталей машин и технологического оборудования» на кафедре "Транспортные средства и техносферная безопасность".

Цель работы. Повышение долговечности роликоподшипниковых узлов за счет снижения контактных напряжений в подшипнике, обеспечения высокого ресурса посадок подшипников при восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110.

Объект исследований. Пленки, клеевые соединения, полимерные покрытия, роликоподшипник 42209, корпусные детали с посадками «корпус-подшипник», восстановленными адгезивом АН-110 и композицией на его основе.

Предмет исследования. Деформационно-прочностные и адгезионные свойства ПКМ на основе акрилового адгезива АН-110, распределение нагрузки в роликоподшипнике, с посадкой восстановленной ПКМ адгезива АН-110, долговечность роликоподшипников и посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ на основе адгезива АН-110.

Методика исследования представлена теоретическими исследованиями на основе теории упругости и трибологии, экспериментальными исследованиями деформационно-прочностных и адгезионных свойств ПКМ на основе адгезива АН-110, параметров контакта и распределения нагрузки в роликоподшипнике с посадкой, восстановленной ПКМ адгезива АН-110, долговечности роликоподшипников и посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ адгезива АН-110.

Достоверность результатов исследования обусловлена применением современного исследовательского оборудования и приборов, методов регрессионного и дисперсионного анализа, результатами эксплуатационных испытаний.

На защиту выносятся:

- теоретические предпосылки повышения ресурса роликоподшипниковых узлов при восстановлении полимерными материалами;
- результаты исследований деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений, выполненных акриловым адгезивом АН-110 и ПКМ на его основе, процесса полимеризации, коэффициента податливости упругого основания композиции, распределения нагрузки и параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения в роликоподшипнике с восстановленной посадкой, долговечности посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ адгезива АН-110;

– технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях композицией на основе акрилового адгезива АН-110 и технико-экономическая эффективность ее использования.

Научная новизна диссертации заключается в теоретическом обосновании снижения контактных напряжений, оптимального натяга полимерной посадки, увеличения ресурса роликоподшипниковых узлов при восстановлении отверстий корпусных деталей полимерными материалами, разработанной модели формирования контакта нагруженных тел с дорожками качения в роликоподшипнике с полимерным покрытием, методе и компьютерной программе расчета параметров контакта, контактных напряжений и долговечности роликоподшипника с полимерным покрытием, результатах экспериментальных исследований деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений, выполненных акриловым адгезивом АН-110 и композицией на его основе, оптимальном составе композиции на основе адгезива АН-110, исследованных параметрах контакта нагруженных тел с дорожками качения и долговечности при местном и циклическом нагружении роликоподшипниковых узлов 42209 с посадками в корпусных деталях восстановленными композицией адгезива АН-110.

Практическая ценность заключается в новой технологии и технологической оснастке для восстановления корпусных деталей автомобильного транспорта композицией адгезива АН-110.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ЛГТУ (г. Липецк) в 2013...2016 гг.; Международных научно-практических конференциях: БелГСХА (г. Белгород) в 2013 г.; МичГАУ (г. Мичуринск) в 2015 г.; ЮЗГУ (г. Курск) в 2016 г.; ОГУ (г. Орел) в 2016 г.; ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов) в 2016 г.; СГАУ (г. Ставрополь) в 2016 г.; заседании кафедры "Транспортные средства и технологическая безопасность" ЛГТУ в 2016 г.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе четыре статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Общий объем публикаций составляет 6,4 п.л., автору принадлежит 4,1 п.л. По теме диссертации получены два патента РФ на изобретение №2537864 и №2569547.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 179 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 9 таблиц, 5 приложений и библиографию из 120 наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность темы и основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе «Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований» рассмотрены способы повышения долговечности подшипников качения, распределение нагрузки и контактные напряжения в подшипнике с посадкой, восстанов-

ленной полимерным материалом, представлены полимерные композиционные материалы и способы восстановления корпусных деталей машин, сформулированы цель и задачи исследований.

Повышения долговечности подшипников качения можно добиться изменением формы тел и дорожек качения, перераспределением нагрузки между телами качения, для чего уменьшают жесткость корпуса в определенных местах, изменяют форму посадочного отверстия, применяют различные упругие элементы между подшипником и корпусом. Однако все эти способы достаточно трудоемки и недостаточно эффективны. Наиболее перспективным способом, обеспечивающим благоприятное распределение нагрузки между телами качения в подшипнике, является нанесение полимерного покрытия на посадочное отверстие под подшипник в корпусной детали. Нанесение полимерных покрытий выгодно отличается простотой и эффективностью, не требует больших материальных затрат.

Исследования Ибилдаева Б. А., Курчаткина В. В., Ли Р. И. показали, что в подшипниках с полимерным покрытием повышается равномерность распределения нагрузки между телами качения, значительно снижается нагрузка на наиболее нагруженное центральное тело качения и контактные напряжения, что приводит к увеличению ресурса подшипников до 8 раз. В работе Ли Р. И. приведены формулы для расчета долговечности подшипников с полимерным покрытием. В данных формулах наличие полимерного покрытия, перераспределение нагрузки между телами качения и снижение контактных напряжений учитываются интегральным показателем – коэффициентом Кирхгофа. Недостаточно изучен вопрос повышения долговечности роликоподшипников с полимерным покрытием. Необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования зависимости долговечности роликоподшипника от распределения нагрузки между телами качения и параметров контакта нагруженного ролика с дорожкой качения в подшипнике с полимерным покрытием. Требуется рассмотреть вопрос влияния натяга полимерного покрытия при восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях на радиальный зазор и распределение нагрузки между телами качения в роликоподшипнике.

Для восстановления корпусных деталей автомобилей в работах Котина А.В., Гаджиева А.А., Бутина А.В., Бочарова А.В., Машина Д.В. и др. применяют ПКМ на основе анаэробных герметиков, акриловых клеев и эластомеров. Основным технологическим недостатком анаэробных герметиков является то, что материал полимеризуется лишь при отсутствии кислорода, поэтому наносить его и отверждать в виде покрытия на изношенных посадочных отверстиях корпусных деталей без специальной оснастки невозможно. Недостатком эластомеров и ПКМ на их основе является необходимость термической обработки материала, что требует нагревательного оборудования, затрат электроэнергии, повышает стоимость восстановления корпусных деталей.

Необходимо разработать полимерный композиционный материал, который можно наносить вручную кистью как эластомеры, и который отверждается при комнатной температуре, как анаэробные герметики и акриловые адгезивы. Следует разработать технологию восстановления корпусных деталей и несложную технологическую оснастку для обеспечения заданной точности восстановленных от-

верстий с полимерным покрытием.

На основании проведенного анализа, в диссертационной работе сформулированы следующие задачи исследований:

- Разработать теоретические предпосылки повышения долговечности роликоподшипников при восстановлении посадочных мест полимерным материалом.
- Разработать новый полимер-полимерный композиционный материал на основе акрилового адгезива АН-110 для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильного транспорта.
- Исследовать деформационно-прочностные свойства, оптимизировать состав полимер-полимерной композиции на основе акрилового адгезива АН-110.
- Исследовать параметры контакта нагруженных тел с дорожками качения и распределение нагрузки между телами качения в роликоподшипнике с посадкой восстановленной ПКМ на основе акрилового адгезива АН-110.
- Исследовать долговечность роликоподшипника с посадкой восстановленной ПКМ на основе акрилового адгезива АН-110.
- Исследовать долговечность при циклическом нагружении посадок роликоподшипников восстановленных ПКМ на основе акрилового адгезива АН-110.
- Разработать технологию и оснастку для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильного транспорта ПКМ на основе акрилового адгезива АН-110 и оценить ее экономическую эффективность.

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления роликоподшипниковых узлов полимерными материалами» рассмотрены параметры контакта и влияние натяга посадки на радиальный зазор в роликоподшипнике с полимерным покрытием, долговечность роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом. Обоснован выбор компонентов ПКМ. Разработан способ калибрования отверстий с полимерным покрытием.

Параметры контакта в роликоподшипнике с полимерным покрытием.

Максимальные контактные напряжения в пятне контакта тела и дорожки качения в роликоподшипнике рассчитывают по известной формуле

$$\sigma_{max} = \frac{2P}{\pi l_p b_k} \quad (1)$$

где P – нагрузка на тело качения; l_p – длина ролика; b_k – половина ширины пятна контакта. В стандартном подшипнике полуширину пятна контакта можно определить по формуле

$$b_k = \left\{ \frac{8P}{\pi l_p \sum \rho} \left[\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

где E и ε – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала подшипника; $\sum \rho$ – сумма кривизн контактирующих тел, в данном случае дорожки и тела качения; для стандартного роликоподшипника

$$\sum \rho = \frac{1}{R_w} + \frac{1}{r_{II2}} \quad (3)$$

где R_w – радиус ролика; r_{II2} – радиус дорожки качения в месте контакта с роликом, в случае стандартного подшипника $r_{II2} = D_1/2$, D_1 – диаметр дорожки качения.

В подшипнике с полимерным покрытием на наружном кольце, последнее при приложении радиальной нагрузки деформируется в местах контакта с телами ка-

чения (рисунок 1). Из-за этого радиус кривизны дорожки качения $r_{П2}$ в месте контакта уже не равен половине диаметра дорожки. Для определения радиуса $r_{П2}$ разрезали кольцо подшипника и представили его как балку на упругом основании. Прогиб y балки на упругом основании (рисунок 2) в случае действия на балку системы сил $P_1, P_2, P_3 \dots P_j$ ($j=1, 2, 3 \dots N$) определяется из уравнения

$$y(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{P_j}{8\beta^3 EI} e^{-\beta|x_i-x_j|} \{ \cos(-\beta|x_i-x_j|) + \sin(-\beta|x_i-x_j|) \} \quad (4)$$

где x_i – координата точки, в которой необходимо вычислить прогиб; x_j – координата точки в которой приложена сила P_j ; E – модуль упругости материала балки (наружного кольца); J – момент инерции сечения; β – коэффициент равный

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ}} \quad (5)$$

где k – коэффициент постели, $k = k_1 \cdot b_{П}$, где k_1 – коэффициент податливости основания, $b_{П}$ – ширина наружного кольца подшипника.

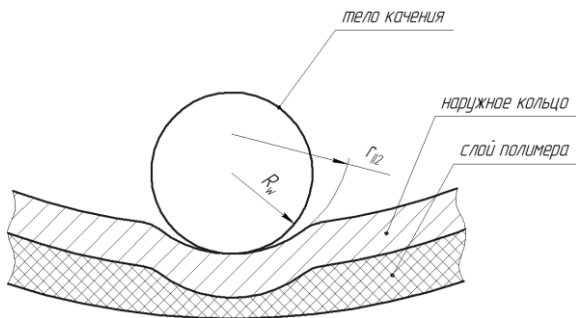


Рисунок 1 – Локальная деформация наружного кольца роликоподшипника с полимерным покрытием

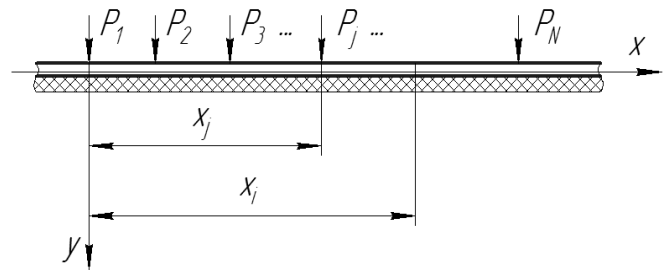


Рисунок 2 – Действие на балку системы сил

Рассчитали радиус кривизны балки в точке прогиба под центральным телом качения. Для этого аппроксимировали деформированный участок балки окружностью. Учитывали нагрузки от центрального, первых и вторых боковых тел качения (рисунок 3): P_0 – нагрузка от центрального тела качения; $P_{11} = P_{12} = P_1$ – от первых боковых тел качения; $P_{21} = P_{22} = P_2$ – от вторых боковых тел качения; y_0 – прогиб под центральным телом качения; l – расстояние между телами качения.

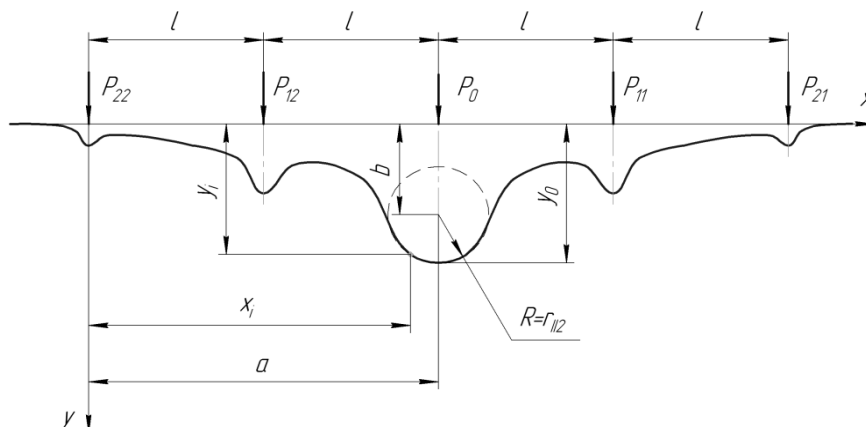


Рисунок 3 – Схема расчета радиуса кривизны балки $r_{П2}$

Уравнение окружности имеет вид $(x - a)^2 + (y - b)^2 - R^2 = 0$, где a, b – координаты центра окружности; R – радиус окружности. В нашем случае $R = r_{II2}$. Для решения задачи аппроксимации минимизировали функцию

$$F_1 = \sum_{i=1}^n ((x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2)^2,$$

где n – число точек, взятых для аппроксимации, x_i, y_i – координаты этих точек.

Для проведения расчетов аппроксимации создали компьютерную программу. При помощи программы исследовали зависимость радиуса кривизны деформированного кольца подшипника r_{II2} от прогиба кольца под центральным телом качения y_0 для различных подшипников. Данная зависимость имеет вид гиперболической функции

$$r_{II2} = \frac{k_{кр}}{y_0}, \quad (6)$$

где $k_{кр}$ – коэффициент кривизны, зависящий от типоразмера подшипника и свойств полимерного покрытия.

Из выражений (2) и (3) получили формулу для определения полуширины пятна контакта между центральным телом и дорожкой качения наружного кольца роликоподшипника с полимерным покрытием

$$b_{к0} = \left\{ \frac{8P_0 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)}{\pi l_p \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{r_{II20}} \right)} \right\}^{1/2}. \quad (7)$$

Из выражений (1) и (7) получили формулу расчета максимального контактного напряжения в пятне контакта

$$\sigma_{max0} = \sqrt{\frac{P_0 \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{r_{II20}} \right)}{2\pi l_p \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)}}. \quad (8)$$

Преобразовав выражение (4) для определения прогиба y_0 под центральным телом качения получили

$$y_0 = \frac{1}{8\beta^3 EI} [P_0 + 2P_1 e^{-\beta l} (\sin \beta l + \cos \beta l) + 2P_2 e^{-2\beta l} (\sin 2\beta l + \cos 2\beta l)]. \quad (9)$$

Подставив (6) и (9) в (7) и (8) и проведя преобразования, получили формулы для определения полуширины пятна контакта и максимальных напряжений в зоне контакта нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца роликоподшипника с полимерным покрытием

$$b_{к0} = \left\{ \frac{8P_0(1 - \varepsilon^2)}{\pi l_p E \left(\frac{1}{R_w} + \frac{P_0 + 2P_1 e^{-\beta l} (\sin \beta l + \cos \beta l) + 2P_2 e^{-2\beta l} (\sin 2\beta l + \cos 2\beta l)}{8k_{кр}\beta^3 EI} \right)} \right\}^{1/2}; \quad (10)$$

$$\sigma_{max0} = \sqrt{\frac{P_0 E \left(\frac{1}{R_w} + \frac{P_0 + 2P_1 e^{-\beta l} (\sin \beta l + \cos \beta l) + 2P_2 e^{-2\beta l} (\sin 2\beta l + \cos 2\beta l)}{8k_{кр}\beta^3 EI} \right)}{2\pi l_p (1 - \varepsilon^2)}}. \quad (11)$$

Долговечность роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом. Известна формула зависимости долговечности подшипника качения от нагрузки

$$nL = \left(\frac{C}{P}\right)^k, \quad (12)$$

где L – долговечность подшипника в часах; n – число оборотов вращающегося кольца в минуту; C – коэффициент работоспособности; P – нагрузка на подшипник; k – коэффициент, для роликоподшипников $k = 3,33$; Известно соотношение

$$P_0 = \frac{KP}{z}, \quad (13)$$

где P_0 – нагрузка на центральное, наиболее нагруженное тело качения; K – коэффициент нагрузки на центральное тело качения, зависящий от типа подшипника и радиального зазора в подшипнике. Данный коэффициент характеризует значение нагрузки на центральное тело качения. Чем меньше его значение, тем меньше нагрузка на центральное тело качения. Выразив из (13) P и подставив в (12) получили

$$L = \frac{\left(\frac{KC}{zP_0}\right)^{3,33}}{n}; \quad L \sim \left(\frac{1}{P_0}\right)^{3,33}, \quad (14)$$

то есть долговечность подшипника обратно пропорциональна нагрузке на центральное тело качения.

Для роликоподшипника коэффициент K можно определить из соотношения

$$\frac{P}{C_\delta \frac{e}{2}} = \frac{\delta_0}{\frac{e}{2}} + 2 \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\delta_0}{\frac{e}{2}} + 1 \right) \cos iy - 1 \right] \cos iy. \quad (15)$$

где δ_0 – сумма сближений наиболее нагруженного ролика с кольцами подшипника; e – радиальный зазор в подшипнике. Из соотношения (15) можно определить δ_0 , а затем определить P_0 и коэффициент K

$$P_0 = C_\delta \delta_0; \quad K = \frac{zP_0}{P} = \frac{zC_\delta \delta_0}{P}.$$

Проанализировав выражение (15), получили, что при уменьшении радиального зазора коэффициент K , а значит и нагрузка на центральное тело качения снижаются. У стандартного подшипника 42209 радиальный зазор может достигать 55 мкм, а коэффициент $K=4,6 \dots 4,7$. Необходимый оптимальный радиальный зазор определили из условия передачи нагрузки на боковые тела качения

$$e = \frac{2(y_0 - y_i - \delta_0 + \delta_i)}{1 - \cos iy}.$$

Расчеты и эксперименты показали, что при радиальной нагрузке $P=9000\text{Н}$ в роликоподшипнике 42209 с полимерным покрытием оптимальный радиальный зазор при работе должен составлять 17...22 мкм. Достичь уменьшения радиального зазора в подшипнике с полимерным покрытием можно подбором толщины слоя полимера, чтобы при запрессовке подшипника в отверстие, обеспечивался натяг посадки. Обозначим коэффициент нагрузки на центральное тело качения стандартного подшипника K_C , а подшипника с полимерным покрытием – $K_{\text{П}}$. Тогда, учитывая (13), можно записать соотношение

$$\frac{P_{0c}}{P_{0п}} = \frac{K_C}{K_{п}}, \quad (16)$$

где P_{0c} и $P_{0п}$ – нагрузка на центральное тело качения в стандартном и подшипнике с полимерным покрытием соответственно. У подшипника с полимерным покрытием из-за натяга посадки, а следовательно и меньшего радиального зазора, значение коэффициента нагрузки на центральное тело качения будет меньше, а значит $K_C / K_{п} > 1$.

Вторым фактором, влияющим на распределение нагрузки между телами качения, является деформация наружного кольца подшипника. Слой полимера выполняет роль упругой прокладки и при приложении радиальной нагрузки на подшипник, наружное кольцо деформируется и принимает форму эллипса с большей осью в направлении действия нагрузки. Вследствие этого нагрузка перераспределяется с центрального на боковые тела качения. Данную зависимость можно записать как отношение коэффициентов распределения нагрузок для стандартного (k_{pc}) и подшипника с полимерным покрытием ($k_{пп}$)

$$k_{pc} = \frac{P_{1c}}{P_{0c}}, \quad k_{пп} = \frac{P_{1п}}{P_{0п}},$$

где P_{1c} и P_{0c} – нагрузки на первые боковые и центральное тела качения в стандартном подшипнике, а $P_{1п}$ и $P_{0п}$ – в подшипнике с полимерным материалом. Учитывая условие равновесия системы и подставив коэффициенты распределения нагрузки получили

$$2P_{0c} k_{pc} \cos \gamma + P_{0c} = 2P_{0п} k_{пп} \cos \gamma + P_{0п} = P.$$

Проведя преобразования, получили отношение нагрузок на центральные тела качения в стандартном подшипнике и подшипнике с полимерным покрытием, выраженное через коэффициенты распределения нагрузки

$$\frac{P_{0c}}{P_{0п}} = \frac{k_{пп} \cos \gamma + 0,5}{k_{pc} \cos \gamma + 0,5}. \quad (17)$$

Третьим фактором, влияющим на долговечность подшипников качения с полимерным покрытием, является локальная деформация наружного кольца подшипника в месте контакта с телами качения, в результате чего увеличиваются размеры пятна контакта и соответственно уменьшаются контактные напряжения. Так как зависимость контактных напряжений от ширины пятна контакта и нагрузки линейна, что видно из формулы (1), предположили, что в подшипнике с полимерным покрытием для создания такого же напряжения в зоне контакта центрального тела и дорожки качения, как в стандартном подшипнике, на центральное тело качения должна действовать эквивалентная нагрузка $P_{0п}$, которая меньше чем нагрузка на центральное тело качения в стандартном подшипнике P_{0c} и можно записать соотношение

$$\frac{P_{0c}}{P_{0п}} = \frac{b_{к0п}}{b_{к0c}}, \quad (18)$$

где $b_{к0c}$, $b_{к0п}$ – половина ширины пятна контакта для стандартного и подшипника с полимерным покрытием соответственно, $b_{к0п} > b_{к0c}$.

Учитывая (14), (16), (17) и (18) получили отношение долговечностей подшипника с полимерным покрытием и стандартного

$$\frac{L_{\Pi}}{L_c} = \left(\frac{P_{0c}}{P_{0п}}\right)^{3,33} = \left(\frac{K_c}{K_{\Pi}} \cdot \frac{k_{рп} \cos \gamma + 0,5}{k_{рс} \cos \gamma + 0,5} \cdot \frac{b_{к0п}}{b_{к0c}}\right)^{3,33};$$

Отсюда выразили долговечность роликоподшипника с полимерным покрытием

$$L_{\Pi} = L_c \left(\frac{K_c}{K_{\Pi}} \cdot \frac{k_{рп} \cos \gamma + 0,5}{k_{рс} \cos \gamma + 0,5} \cdot \frac{b_{к0п}}{b_{к0c}}\right)^{3,33}. \quad (19)$$

Расчет оптимального натяга посадки подшипника в отверстии с полимерным покрытием. С учетом деформации (сжатия) u и наружного кольца от натяга посадки формула радиального зазора в подшипнике запишется в виде

$$e = e_n - \delta_2 - 2u - K_t + \delta_0 \quad (20)$$

где e_n – начальный радиальный зазор; δ_2 – уменьшение зазора из-за увеличения дорожки качения внутреннего кольца подшипника при его установке с натягом на вал; K_t – уменьшение зазора от разности температур в подшипнике, δ_0 – увеличение зазора вследствие наличия контактных деформаций между телами и дорожками качения внутреннего и наружного колец подшипника.

Наружное кольцо подшипника представили как цилиндр, подвергаемый сжатию. В этом случае перемещение (сжатие) наружного кольца может быть определено из формулы Ляме

$$u = \frac{2r_0 Q}{E(1 - k^2)}, \quad (21)$$

где r_0 – внутренний радиус цилиндра; k – отношение внутреннего радиуса к наружному радиусу цилиндра; E – модуль упругости кольца подшипника; Q – давление действующее на наружное кольцо, определяется по формуле

$$Q = \frac{cE_{пм}Nh_{пп}}{R^{*2}} \quad (22)$$

где N – натяг полимерного покрытия; R^* – радиус срединной поверхности цилиндрической оболочки (полимерного покрытия); $E_{пм}$ – модуль упругости полимерного материала; $h_{пп}$ – толщина полимерного покрытия; c – поправочный коэффициент.

Чтобы определить по формуле (21) деформацию наружного кольца подшипника, рассчитали размеры поперечного сечения цилиндра эквивалентного поперечному сечению наружного кольца подшипника по жесткости и подставив (22) в (21) получили

$$u = \frac{cE_{пм}Nh_{пп} \left(D - \sqrt[3]{\frac{96J_{кн}}{b}} \right)}{R^{*2}E \left[1 - \left(\frac{D - \sqrt[3]{\frac{96J_{кн}}{b}}}{D} \right)^2 \right]}, \quad (23)$$

где D – наружный диаметр подшипника; b – ширина подшипника; $J_{кн}$ – момент инерции сечения наружного кольца подшипника.

Получив формулы для определения δ_2 , K_t , δ_0 , подставили их вместе с (23) в (20) и выразили отсюда натяг полимерного покрытия, необходимый для создания оптимального радиального зазора e в роликоподшипнике

$$N = \left[e_H - e + 0,579 \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{d_1 R_w^2 \pi^2 l_p^2 \frac{k_{кр}}{y_0} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{2}{d_1} \right) \left(\frac{1}{R_w} + \frac{y_0}{k_{кр}} \right)}{8 P_0^2 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)^2} + 1,628 \right) - \frac{d \Delta}{d + \sqrt[3]{\frac{96 J_{кв}}{b}}} - \alpha \Delta t \left(d + \sqrt[3]{\frac{96 J_{кв}}{b}} \right) \right] \times \frac{R^{*2} E \left[1 - \left(\frac{D - \sqrt[3]{\frac{96 J_{кв}}{b}}}{D} \right)^2 \right]}{2 c E_{мт} h_{мт} \left(D - \sqrt[3]{\frac{96 J_{кв}}{b}} \right)}, \quad (24)$$

где d_1 – диаметр дорожки качения внутреннего кольца; d – внутренний диаметр подшипника; Δ – натяг посадки подшипника на вал; α – коэффициент линейного температурного расширения материала подшипника; Δt – разность температур колец подшипника, °C; $J_{кв}$ – момент инерции сечения внутреннего кольца подшипника.

Расчеты показали, что при начальном радиальном зазоре $e_H = 45$ мкм в подшипнике 42209 (натяг посадки внутреннего кольца на вал приняли $\Delta = 25$ мкм, разницу температур колец подшипника – $\Delta t = 10^\circ\text{C}$) с полимерным покрытием толщиной $h_{мт} = 0,2$ мм, в диапазоне нагрузок $P = 5000 \dots 9000$ Н для достижения оптимального радиального зазора в работающем подшипнике, обеспечивающего передачу нагрузки на боковые тела качения, необходимо создать натяг полимерного покрытия $N = 35 \dots 45$ мкм.

Обоснование выбора компонентов полимер-полимерного композиционного материала. Сопротивление материала разрушению можно охарактеризовать критической скоростью высвобождения энергии $\Psi_{\text{с}}$. Если скорость высвобождения энергии при деформации уменьшается ниже критического значения, рост трещины прекращается и для дальнейшего развития трещины, необходима дополнительная энергия. При введении эластификатора в полимерную матрицу увеличивается поверхностная энергия разрушения. Например, добавлением небольших количеств каучука в эпоксидную смолу, можно увеличить поверхностную энергию разрушения более чем в 10 раз.

В работе Бутина А.В. проведены исследования деформационно-прочностных свойств полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-105. При введении эластификатора – эластомера Ф-40, относительное удлинение образцов возросло на 30%, а удельная работа разрушения выросла практически на 50%.

Представляет практический интерес новый акриловый адгезив АН-110, цена которого 8 тыс. руб/кг, что в 3 раза ниже цены АН-105 (22 тыс. руб/кг). Этот материал не использовался ранее для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильного транспорта. Необходимо исследовать вопросы эластификации адгезива АН-110 эластомером Ф-40.

Способ калибрования отверстий с полимерным покрытием. Разработан способ калибрования отверстий полимерным покрытием в корпусных деталях. Полимерное покрытие из ПКМ адгезива АН-110 наносят послойно на поверхность отверстия кистью. После нанесения последнего слоя в восстанавливаемое отверстие устанавливают базирующую деталь. Вдоль базирующей детали перемещают калибр, скругленным торцом которого убираются излишки полимерного

материала и обеспечивается заданный размер и форма отверстия с полимерным покрытием.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведены общая методика исследований и частные методики исследования деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений, выполненных акриловым адгезивом АН-110 и ПКМ на его основе, процесса полимеризации, коэффициента податливости упругого основания ПКМ адгезива АН-110, распределения нагрузки и параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения в роликоподшипнике с восстановленной посадкой, долговечности роликоподшипников и посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ адгезива АН-110.

Когезионную прочность пленок ПКМ адгезива АН-110 оценивали при одноосном растяжении. Образцами являлись пленки размерами $60 \times 15 \times 0,15$ мм, с расчетной длиной образца 40 мм. Образцы испытывали на разрывной машине ИР 5082-50.

Прочность клеевых соединений адгезива АН-110 и ПКМ на его основе исследовали на образцах, представляющих клеевые соединения внутренних колец подшипников 207 с валами, изготовленными из стали 45. Толщина клеевого шва составляла 0,025 мм. Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50.

Процесс полимеризации ПКМ на основе адгезива АН-110 исследовали диэлектрическим методом. Исследования проводили при температурах $T = 20; 30$ и 40°C . Температуру в 30 и 40°C обеспечивали в шкафу сушильном СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3. В качестве образцов служили клеевые соединения подшипников 207 с валами. Электрическую емкость клеевого шва соединения измеряли прибором Е7-11. О завершении полимеризации судили по стабилизации значений диэлектрической проницаемости клеевого шва.

Усадку адгезива АН-110 и ПКМ на его основе исследовали измерением толщины пленок после отверждения и сравнением с первоначальной толщиной. Пленки получали при помощи рамки-трафарета. Поверхности пленок формовали фторопластовой пластиной по рамке-трафарету для обеспечения одинаковой и равномерной толщины. Толщину пленок измеряли рычажной скобой повышенной точности СРП-25 (ГОСТ 11098-75) с ценой деления 0,001 мм.

Параметры контакта, распределение нагрузки между телами качения и зависимость радиального зазора от натяга посадки в роликоподшипнике 42209 исследовали на нагрузочном стенде. Радиальный зазор в подшипнике измеряли индикаторной головкой ИЧЦ 0-10-0,001. Прикладывали к валу нагрузку и измеряли его перемещение в радиальном направлении. При исследовании параметров контакта нагруженного ролика с дорожкой качения строили тарировочные графики зависимости ширины пятна контакта от радиальной нагрузки P на ролик. Размеры пятен контакта – определяли микроскопом МПБ-2. Радиальная нагрузка на ролик: 850; 1874; 2895; 4938 Н. Толщина покрытия ПКМ составляла 0,2 мм. При исследовании распределения нагрузки между телами качения: $P = 4940, 6980, 9010$ Н; толщина слоя ПКМ – 0,215 и 0,24 мм; натяг посадки 15 и 40 мкм.

При исследованиях коэффициента податливости использовали ролик от подшипника 42209 и пластину из стали ШХ-15 размерами $100 \times 25 \times 4,91$ мм с

подложкой из ПКМ адгезива АН-110. Жесткость пластины соответствовала жесткости наружного кольца подшипника 42209. Пластину устанавливали полимерным покрытием вниз на поверочную плиту 2-1-250×250 (ГОСТ10905-75), установленную на опорную раму станда. Деформацию пластины измеряли индикаторной головкой ИЧЦ 0-10-0,001, установленной на штативе.

Исследование долговечности подшипников с посадками, восстановленными ПКМ адгезива АН-110, проводили на специальном станде. Радиальная нагрузка на подшипник составляла 13070 Н. За критерий долговечности приняли предельное значение радиального зазора 0,3 мм.

Исследование долговечности посадок «корпус-подшипник», восстановленных ПКМ адгезива АН-110, проводили на вибростанде. Значение циклической радиальной нагрузки 20,0 кН. База испытаний $5,76 \times 10^7$ циклов нагружения. За критерий долговечности посадки приняли наработку до начала сдвига наружного кольца подшипника в посадочном отверстии.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты исследования деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений, процесса полимеризации и усадки адгезива АН-110 и ПКМ на его основе, параметров контакта и распределения нагрузки между телами качения в роликоподшипнике с покрытием ПКМ на основе адгезива АН-110, коэффициента податливости подложки ПКМ на основе адгезива АН-110, долговечности роликоподшипниковых узлов, восстановленных ПКМ на основе адгезива АН-110.

Исследования деформационно-прочностных свойств пленок полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-110. Определили оптимальный состав композиции, обеспечивающий высокие когезионные свойства: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс. ч., эластомер Ф-40 – 10 масс. ч. Прочность образцов композиции на основе адгезива АН-110 составила 9,5 МПа, что на 28% меньше прочности ненаполненного адгезива (12,1 МПа). Деформация композиции составила 36%, что в 2,1 раза больше адгезива АН-110 (17%). Удельная работа разрушения композиции составила 2,95 МДж/м³, что в 1,41 раза больше данного показателя адгезива АН-110 (2,09 МДж/м³).

Исследование деформационно-прочностных свойств клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе акрилового адгезива АН-110. Определен оптимальный состав композиции, обеспечивающий высокие адгезионные свойства материала: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс. ч., эластомер Ф-40 – 10 масс. ч. Прочность клеевых соединений композиции на основе адгезива АН-110 15,2 МПа, что превышает прочность клеевых соединений с ненаполненным акриловым адгезивом на 2,7% (14,8 МПа). Деформация клеевых соединений композиции составила 6,3%, что в 1,4 раза выше чем с адгезивом АН-110 (4,5%). Удельная работа разрушения клеевого шва композиции составила 23,6 МДж/м³, что на 53% больше данного показателя ненаполненного адгезива АН-110 (15,4 МДж/м³).

Исследование процесса полимеризации клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-110 при различных условиях отверждения. При температуре 20°С стадия монолитизации протекает в течение

3,5...4 ч, а диэлектрическая проницаемость композиции снижается с 20,7 до 2,85. Время отверждения, по истечении которого образуется сшитый полимер, составляет 4, 3 и 2 ч при температурах 20; 30 и 40°С, соответственно.

Исследование усадки акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе. Акриловый адгезив АН-110 имеет усадку 6,3%. Введение эластомера увеличивает усадку композиции в 1,36 раза до 8,6%, что обусловлено тем, что эластомер Ф-40 является раствором композиции каучука и модифицированной фенольной смолы в ацетоне. При отверждении ПКМ ацетон испаряется.

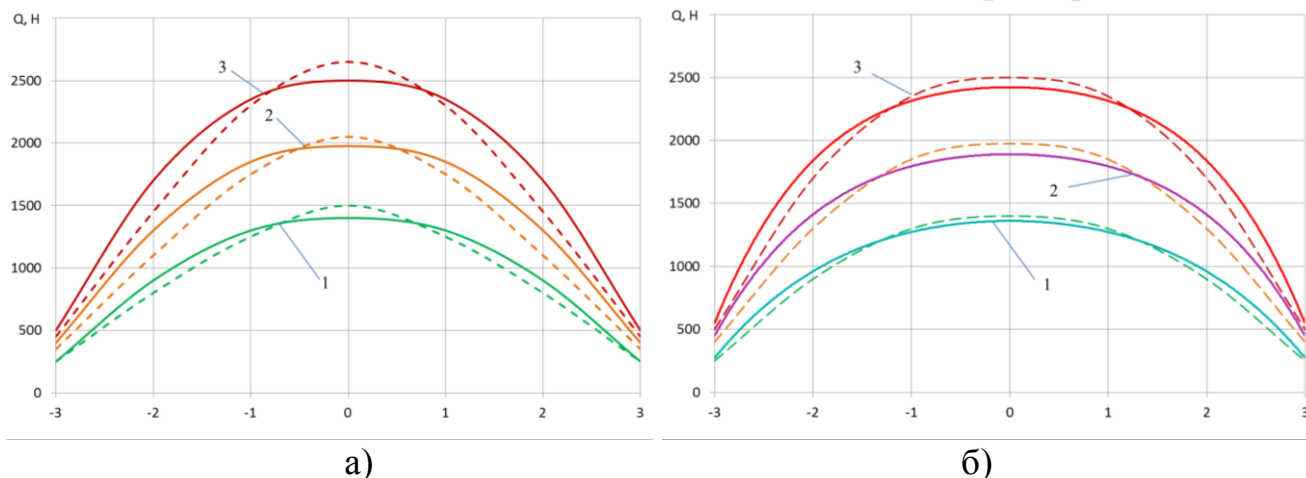
Исследование параметров контакта и распределения нагрузки между телами качения и зависимости данных параметров от радиального зазора в подшипнике. При исследовании зависимости радиального зазора в подшипнике 42209 от натяга посадки получили, что при натяге полимерного покрытия $N = 20$ мкм, радиальный зазор в подшипнике составляет 41 мкм. При $N = 35$ мкм радиальный зазор в подшипнике уменьшился в 1,5 раза, до 27 мкм. При $N = 70$ мкм радиальный зазор уменьшился до 14 мкм, что в 2,9 раза меньше первоначального значения. Это объясняется тем, что напряженное состояние полимерного покрытия создает осесимметричное равномерное давление на наружное кольцо подшипника, сжимая его. Расчетные и экспериментальные значения отличаются максимум на 8%, поэтому формула (24) обеспечивает достаточную точность расчета.

При исследовании зависимости ширины пятна контакта от нагрузки на тело качения получили, что при нагрузке 850 Н ширина пятна контакта составила 0,42 и 0,45 мм для стандартного и подшипника с полимерным покрытием соответственно; при нагрузке 1874 Н – 0,65 и 0,70 мм; при 2895 Н – 0,86 и 0,91 мм; при 4938 Н – 1,14 и 1,21 мм. В подшипнике с полимерным покрытием ширина пятна контакта в 1,05...1,07 раза больше, чем в стандартном подшипнике. Увеличение ширины пятна контакта в подшипнике с полимерным покрытием происходит из-за локальной деформации наружного кольца в зоне контакта с роликом.

Установлено, что при радиальном нагружении роликоподшипника с полимерным покрытием происходит перераспределение нагрузки с центрального на боковые тела качения. В роликоподшипнике 42209 (при натяге посадки 15 мкм) нагрузка на центральное тело качения в сравнении со стандартным подшипником меньше на 6...7% (рисунок 4, а); на первые боковые тела качения нагрузка больше на 2...4%; на вторые боковые тела качения – больше на 13...17%. При увеличении натяга посадки до 40 мкм, происходит дальнейшее снижение нагрузки на центральное тело качения: нагрузка на центральное тело качения в сравнении со стандартным подшипником меньше на 12...13% (рисунок 4, б); на первые боковые тела качения нагрузка больше на 3...5%; на вторые боковые тела качения – больше на 25...27%. Снижение нагрузки на центральное тело качения и увеличение размеров пятна контакта привело к соответствующему снижению контактных напряжений. Максимальные напряжения в зоне контакта наружного кольца и центрального тела качения в роликоподшипнике 42209 с полимерным покрытием при радиальной нагрузке 9010 Н до 17...18% ниже, чем в стандартном.

Исследование коэффициента податливости упругого основания. Исследованиями установлено, что с увеличением толщины полимерного покрытия от 0,05 до 0,15 мм, коэффициент податливости упругого основания k_n уменьшается в

2,9 раза, от 180,4 до 62,3 Н/мм³, что создает благоприятные условия для деформации наружного кольца, увеличения коэффициента распределения нагрузки и снижения контактных напряжений. Зависимость коэффициента податливости от толщины полимерной подложки имеет экспоненциальный характер: $k_{\text{п}}=9,785h^{-0,97}$.



- а) стандартный подшипник (пунктирные линии) и подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм (сплошные линии);
 б) подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм (пунктирные линии) и 40 мкм (сплошные линии)

Рисунок 4 – Распределение нагрузки между телами качения при радиальной нагрузке 4940Н (1), 6980Н (2) и 9010Н (3): 0; ±1; ±2; ±3 – центральное, первые, вторые и третьи боковые тела качения соответственно

Исследование долговечности при местном нагружении наружного кольца роликовых подшипников с посадками, восстановленными полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-110. Стендовые испытания показали, что при восстановлении изношенных отверстий в корпусных деталях композицией на основе акрилового адгезива АН-110, долговечность роликовых подшипников при местном нагружении наружного кольца увеличивается в сравнении с расчетной до 2,1 раз.

Исследование долговечности при циклическом нагружении посадок роликоподшипников, восстановленных полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-110. Стендовые испытания при циклическом нагружении покрытий ПКМ на основе адгезива АН-110 показали, что они обеспечивают высокую долговечность посадок подшипников при циклическом нагружении. Рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия под подшипники с диаметральным износом до 0,2 мм.

В пятой главе «Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка» разработана технология восстановления и оснастка для калибрования отверстий с полимерным покрытием, дана оценка её экономической эффективности.

Технология восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автомобильной техники ПКМ на основе адгезива АН-110 включает операции: очистка посадочных отверстий под подшипники в корпусной детали; измерение отверстий для определения износа; обезжиривание посадочных отверстий; приготовление

композиции; нанесение ее на посадочные отверстия в корпусной детали; калибрование отверстий под заданный размер; контроль качества полимерных покрытий.

Разработанная технология восстановления внедрена в ОАО «Добринское» Суровикинского района Волгоградской области. Для оценки надежности восстановленных корпусных деталей с октября 2015 г. по ноябрь 2016 г. в хозяйстве проводили эксплуатационные испытания автомобильной техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных посадок подшипников не наблюдалось.

Расчеты показали экономическую эффективность технологии восстановления корпусных деталей автомобильной техники. Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления ОАО «Добринское» Суровикинского района Волгоградской области составил около 320 тыс. руб.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО ЛГТУ при изучении дисциплины «Технология ремонта автомобилей и тракторов», «Техническая эксплуатация автомобилей и тракторов».

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны теоретические предпосылки повышения ресурса роликоподшипниковых узлов при восстановлении полимерными материалами. Установлено, что радиальный зазор влияет на распределение нагрузки между телами качения, а площадь пятна контакта нагруженного тела с дорожкой качения наружного кольца роликоподшипника увеличивается за счет полимерного покрытия.

2. Получены формулы (10) и (11) для расчета ширины пятна контакта и контактных напряжений нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом. Предложена формула расчета долговечности роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом (19), учитывающая влияние натяга посадки на распределение нагрузки между телами качения и параметры пятна контакта нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца подшипника. Получена формула (24) для расчета оптимального натяга полимерного покрытия, при котором обеспечивается оптимальный радиальный зазор, снижение нагрузки на центральное тело качения и соответственно, увеличение ресурса роликоподшипника. Разработаны метод и компьютерная программа расчета параметров контакта, контактных напряжений и долговечности роликоподшипника с полимерным покрытием.

3. Разработан способ калибрования отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях, обеспечивающий точность размеров восстанавливаемых отверстий.

4. Разработан композиционный материал на основе адгезива АН-110 с оптимальным составом: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс. ч., эластомер Ф-40 – 10 масс. ч. Материал имеет высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства: удельная работа разрушения пленок в 1,41 раза, а клеевых соединений в 1,53 раза больше, чем у ненаполненного адгезива АН-110. Время полного отвер-

ждения композиции составляет 4, 3 и 2 ч при температурах 20; 30 и 40°C, соответственно.

5. В роликоподшипнике 42209 с полимерным покрытием из композиции адгезива АН-110 площадь пятна контакта до 1,1 раза больше, чем в стандартном подшипнике из-за локальной деформации дорожки качения наружного кольца роликоподшипника в зоне контакта с нагруженным телом качения. В подшипнике 42209 с натягом посадки 40 мкм нагрузка на центральное тело на 13% меньше, на первые боковые на 5%, а на вторые боковые на 27% больше, чем в стандартном подшипнике. Увеличение площади пятна контакта, перераспределение нагрузки с центрального на боковые тела качения приводит к снижению напряжений в зоне контакта центрального, наиболее нагруженного тела с дорожкой качения наружного кольца до 18% в сравнении со стандартным подшипником.

6. При восстановлении изношенных отверстий в корпусных деталях композицией на основе акрилового адгезива АН-110, долговечность роликовых подшипников при местном нагружении наружного кольца увеличивается в сравнении с расчетной до 2,1 раза. Восстановление корпусных деталей композицией обеспечивает высокую долговечность посадочных мест подшипников. Рекомендуется восстанавливать посадочные отверстия в корпусных деталях с диаметральной зазором до 0,2 мм.

7. Разработана технология и оснастка для восстановления корпусных деталей автомобильной техники композицией адгезива АН-110. Технология восстановления внедрена в ОАО «Добринское» Суrowsикинского района, Волгоградской области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 320 тыс. руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах: в изданиях из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»:

1. **Мироненко, А. В.** Расчет параметров контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца в металлополимерном роликоподшипнике [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Известия МГТУ «МАМИ» - 2015. - №4(26), т. 1 – С. 65-70;

2. **Мироненко, А. В.** Программа расчета контактных напряжений в роликоподшипниковых узлах восстановленных полимерными материалами [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Вестник МичГАУ. – 2015. – № 4. – С. 181-186.

3. **Мироненко, А. В.** Исследование распределения нагрузки между телами качения в металлополимерном роликоподшипнике [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Известия МГТУ «МАМИ» - 2016. - №1(27), т. 1 – С. 38-41;

4. **Мироненко, А. В.** Восстановление корпусных деталей автомобильной техники полимер-полимерной композицией [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Мир транспорта и технологических машин – 2016. - №4 (55) – С. 9-15;

В сборниках научных трудов и материалах конференций:

5. **Мироненко, А. В.** Расчет контактных напряжений в подшипнике качения методом конечных элементов [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // «Проблемы и перспективы инновационного развития животноводства»: материалы междунар. науч.-производственной конф. Белгород, 15-16 мая 2013 г. / – п. Майский : Изд-во

БелГСХА им. В.Я. Горина, 2013. – С. 160.

6. **Мироненко, А. В.** Исследование деформационно-прочностных свойств полимерного композиционного материала с наноразмерными наполнителями [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // «Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии энергоэффективности и IT-технологий»: матер. XVIII междунар. науч.-произв. конф. Белгород, 26-27 мая 2014 / БелГАУ. – п. Майский: Изд-во БелГАУ им. В.Я. Горина, 2014. – С. 164.

7. **Мироненко, А. В.** Расчет контактных напряжений в роликоподшипнике восстановленном полимерными материалами [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: матер. Междунар. науч. практ. конф. 15-17 октября 2015 года. – Мичуринск: Издательство «2Д Мичуринск», 2015. – С. 223 – 230.

8. **Мироненко, А. В.** Композиция для покрытия металлических изделий [Текст]: Патент на изобретение № 2537864 РФ Заявл. 04.02.2013 / Ли Р.И., Мироненко А.В., Бутин А.В., Машин Д.В., Колесников А.А., Сафонов В.Н. // Оpubл. 10.01.2015. – Бюл. № 1.

9. **Мироненко, А. В.** Композиция для покрытия металлических изделий [Текст]: Патент на изобретение № 2569547 РФ Заявл. 22.10.2014 / Ли Р.И., Мироненко А.В. // Оpubл. 27.11.2015. – Бюл. № 33.

10. **Мироненко, А. В.** Исследование деформационно-прочностных свойств клеевых соединений выполненных перспективной полимер-полимерной композицией [Текст] / Р.И. Ли, И.Ж. Тоиров, А.В. Мироненко, Е.Ю. Гончаров, В.В. Сериков // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сборн. науч. трудов 6-ой Междунар. науч. практ. конф. (2-3 июня 2016 года) / Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО «Универс-я книга», Курск, 2016. – С. 183 – 186.

11. **Мироненко, А. В.** Деформационно-прочностные свойства клеевых соединений, выполненных перспективной полимер-полимерной композицией [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы 2-ой Междунар. науч. практ. конф., под общ. ред. д.т.н., проф. А.Н. Новикова (17 - 18 мая 2016 года, ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»). – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», 2016. – С. 265 – 269.

12. **Мироненко, А. В.** Перспективный акриловый адгезив повышенной эластичности для восстановления неподвижных соединений подшипников качения в узлах машин [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: Сборник научных статей / Под общ. ред. А.Т. Лебедева. – Ставрополь: Агрус Ставропольского ГАУ, 2016. – С. 336 – 342.

13. **Мироненко, А. В.** Расчет долговечности роликоподшипника с полимерным покрытием [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Повышение эффективности и экологические аспекты использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве: сборн. науч. докладов Междунар. науч. конфер., 6-7 октября 2016 года, г. Тамбов / ФГБНУ ВНИИТиН. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2016. – С. 26 – 30.

14. **Мироненко, А. В.** Распределение нагрузки в роликоподшипнике с полимерным покрытием [Текст] / Р.И. Ли, И.Ж. Тоиров, А.В. Мироненко, Е.Ю. Гончаров, В.В. Сериков // Вестник ЛГТУ. – № 3(29). – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2016. – С. 49 – 54.

15. **Мироненко, А. В.** Параметры контакта в роликоподшипнике восстановленном перспективной полимер-полимерной композицией [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Наука в центральной России – 2016. - №6 (24). – С. 30-36.