

На правах рукописи



Быконя Андрей Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ
КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ ЭЛАСТОМЕРНЫМИ
НАНОКОМПОЗИТАМИ ПОСЛЕ ИНФРАКРАСНОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2022

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,
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический уни-
верситет (МАДИ)», профессор кафедры «Дорож-
но-строительные машины»

Кононенко Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Московский государственный тех-
нический университет им. Н.Э. Баумана»,
профессор кафедры «Технологии обработки ма-
териалов»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный аграрный уни-
верситет им. императора Петра I»

Защита диссертации состоится **«16» июня 2022** года в 14.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.032.03 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 на официальном сайте (<http://oreluniver.ru>) и в библиотеке ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: г. Орел, Каменская площадь д. 1.

Автореферат разослан « » 2022 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 науки и высшего образования Российской Федерации (www.vak.ed.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, направлять в диссертационный совет по адресу: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77.

Телефон для справок+79606476660

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



В.В. Васильева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных показателей, отражающих развитие экономики страны, является объем грузопассажирских перевозок. Более 50% всего грузо- и пассажиропотока сосредоточено в автомобильном транспорте. Объем перевозок в значительной мере зависит от надежности подвижного состава, а рентабельность от стоимости поддержания его в исправном состоянии. Восстановление изношенных деталей позволяет существенно сократить затраты на ремонт автомобильной техники, повысить уровень ее надежности. Наиболее высокий технический и экономический эффект достигается при восстановлении корпусных деталей автомобилей, отличающихся большой материалоемкостью и ценой.

Традиционные способы восстановления корпусных деталей характеризуются сложностью технологического оборудования, повышенным энергопотреблением, не обеспечивают fretting-стойкость и увеличение ресурса восстановленных подшипниковых отверстий. Эффективность восстановления посадочных отверстий корпусных деталей повышается при использовании полимерных композитов. Многократно увеличивается ресурс подшипниковых узлов при минимуме затрат. Перспективным направлением в повышении эффективности технологии восстановления является вопрос исследования и разработки эластомерных нанокомпозитов, обладающих улучшенными потребительскими свойствами. Деформационно-прочностные и адгезионные свойства, качество полимерных эластомерных покрытий существенным образом зависят от способов и режимов обработки: механическое или ультразвуковое смешение, термическая обработка, механическая обработка калиброванием и др. Большой научный и практический интерес представляют исследования в области совершенствования и развития способов обработки полимерных покрытий, которые позволят повысить качество полимерных покрытий, их долговечность, повысить эффективность восстановления корпусных деталей автомобилей.

Степень разработанности темы. Проблеме применения полимерных материалов при ремонте техники посвящены работы Афанасьева Л.Л., Астанина В.К., Бауровой Н.И., Власова В.М., Денисова А.С., Зорина В.А., Карагодина В.И., Крамаренко Г.В., Кузнецова Е.С., Пухова Е.В., восстановлению корпусных деталей автотракторной техники полимерными материалами – труды Курчаткина В. В., Котина А. В., Ли Р. И., Кононенко А. С., Башкирцева В. Н., Гаджиева А. А., Гвоздева А. А., Мельниченко И. М. и многих других отечественных ученых.

Эффективность восстановления посадок подшипников существенно повышается при использовании полимерных нанокомпозитов. Благодаря эффекту синергизма увеличиваются тепло-и термостойкость, теплопроводность, повышаются деформационно-прочностные свойства и выносливость материала. Вопрос наполнения анаэробных герметиков металлическими наночастицами для восстановления посадок подшипников качения подробно был исследован в работе Малюгина В.А. В работе Киба М.Р. впервые исследован вопрос наполнения эластомеров металлическими наночастицами, разработана техно-

логия восстановления посадочных отверстий подшипников в корпусных деталях эластомерными нанокompозитами. Эластомерное покрытие компенсирует износ в посадке подшипника и многократно повышает долговечность корпусных деталей и подшипниковых узлов. Технологической проблемой при конвективной сушке полимерных покрытий является пористость последних из-за испарения растворителя. Пористость покрытий при терморadiационном способе значительно меньше и качество существенно выше. Установки инфракрасного излучения (ИК) отличаются компактностью, мобильностью, небольшим энергопотреблением. Литературный обзор показал, что в настоящее время отсутствуют сведения об инфракрасном нагреве корпусных деталей при их восстановлении полимерами. Этот научный вопрос требует всестороннего исследования.

Условия и режимы термической обработки полимерного материала определяют его деформационно-прочностные и адгезионные свойства. Терморadiационный способ сушки полимерного покрытия отличается от конвективного механизмом отверждения. Применение инфракрасной обработки изменит потребительские свойства материала, трибологические параметры, контактные напряжения и долговечность подшипниковых узлов. Поэтому необходимы всесторонние экспериментальные исследования в этом направлении. Учитывая важность исследования трибологических параметров, контактных напряжений и долговечности подшипников с полимерной посадкой, представляет научный и практический интерес разработка новой конструкции стенда с повышенными функциональными возможностями для исследования вышеуказанных параметров. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-38-90227 по теме «Методология и технические средства исследования контактных напряжений и долговечности подшипниковых узлов автомобилей».

Цель работы: повышение эффективности восстановления корпусных деталей автомобильной техники за счет повышения качества покрытий из полимерных нанокompозитов после инфракрасной термообработки, повышения прочности и долговечности восстановленных посадок подшипников качения.

Задачи исследований:

- разработать математическую модель инфракрасного нагрева корпусных деталей автомобилей, метод расчета конструктивных и режимных параметров установок ИК излучения;
- разработать конструкцию стенда для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения;
- исследовать деформационно-прочностные и адгезионные свойства нанокompозита эластомера Ф-40С и оптимизировать режим его термической обработки;
- исследовать дефектность покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С, обработанных конвективным и инфракрасным способами;
- исследовать теплопроводность нанокompозита эластомера Ф-40С;
- исследовать контактные напряжения и долговечность подшипников качения с посадками, восстановленными нанокompозитом эластомера Ф-40С;
- исследовать долговечность посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокompозитом на его основе;

– разработать технологию восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях нанокompозитом Ф-40С и оценить ее технико-экономическую эффективность.

Научная новизна диссертации:

- разработана математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей и метод расчета режимных, конструктивных и технологических параметров инфракрасной обработки корпусных деталей при восстановлении полимерным материалом;

- экспериментально исследованы параметры нагрева корпусных деталей, деформационно-прочностные и адгезионные свойства, теплопроводность нанокompозита эластомера Ф-40С;

- получена регрессионная модель удельной работы разрушения пленок эластомерного нанокompозита после инфракрасной обработки;

- исследованы дефектность покрытий из эластомерного нанокompозита, контактные напряжения и ресурс подшипников качения с посадками, восстановленными эластомерным нанокompозитом, долговечность посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели инфракрасного нагрева корпусных деталей автомобилей и метода расчета конструктивных и режимных параметров инфракрасного нагрева корпусных деталей при восстановлении посадочных отверстий подшипников качения полимерным нанокompозитом.

Практическая значимость работы состоит в разработке компьютерной программы расчета конструктивных и режимных параметров инфракрасной сушки полимерных покрытий, конструкции стенда для исследования трибологических параметров, контактных напряжений и ресурса подшипников качения, новом нанокompозите и технологии восстановления корпусных деталей автомобилей.

Объект исследований - корпусные детали и подшипники качения автомобилей с посадками, восстановленными нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С, пленки и покрытия из эластомерного нанокompозита.

Предмет исследования - параметры инфракрасного нагрева корпусных деталей автомобилей, деформационно-прочностные, адгезионные и теплофизические свойства нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, трибологические параметры и контактные напряжения между телами и дорожками качения в подшипнике качения с посадкой, восстановленной нанокompозитом, долговечность подшипников и посадок «корпус-подшипник», выполненных нанокompозитом.

Методология и методы исследования. Методологическая, теоретическая и эмпирическая базы исследований представлены теоретическими исследованиями на основе теории тепло- и массообмена, трибологии, прочности и долговечности полимерных композитов, экспериментальными исследованиями параметров инфракрасного нагрева корпусных деталей автомобилей, механических и теплофизических свойств нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, трибологических параметров и контактных напряжений в подшипнике качения с посадкой, восстановленной нанокompозитом, долговечности подшипников и посадок «корпус-подшипник», выполненных нанокompозитом.

Положения выносимые на защиту:

- математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей и метод расчета режимных, конструктивных и технологических параметров инфракрасной обработки корпусных деталей при восстановлении полимерным материалом;
- конструкция стенда для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения;
- регрессионная модель удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С после инфракрасной обработки, результаты экспериментального исследования деформационно-прочностных и адгезионных свойств, теплопроводности эластомерного нанокompозита, оценки дефектности покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С, обработанных конвективным и терморрадиационными способами, контактных напряжений и долговечности подшипников качения с посадками из эластомерного нанокompозита, долговечности посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом;
- технология восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобилей нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С и оценка ее технико-экономической эффективности.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность результатов исследований подтверждается использованием современного исследовательского оборудования и приборов, регрессионным анализом и проведенными эксплуатационными испытаниями.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ЛГТУ (г. Липецк) в 2018...2021 гг.; Международных научно-практических конференциях: МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва), 2019 г.; Юго-Зап. гос. ун-т, (г. Курск), 2019...2021 гг.; ЕГУ им. И.А. Бунина, (г. Елец), 2020 г.; МГАУ (г. Мичуринск), 2020 г.; ТГТУ (г. Тамбов), 2020 г.; ОГУ имени И.С. Тургенева (г. Орел), 2021 г.; заседании кафедры "Транспортные средства и техносферная безопасность" ЛГТУ в 2021 г.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликовано 25 печатных работ, в том числе 2 публикации в рецензируемом научном издании из перечня ВАК, 4 патента на изобретение РФ, 5 публикаций в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 3 публикации в издании, включенном в международную систему базы данных Agris. Общий объем публикаций составляет 9,5 п.л., автору принадлежит 6,2 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 86 рисунков, 10 таблиц, 8 приложений и библиографию из 135 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы научная новизна результатов исследования, теоре-

тическая и практическая значимость работы, объект и предмет исследования. Представлены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе «Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований» рассмотрены полимерные композиты и способы восстановления посадок подшипников качения в узлах автомобилей, дан анализ конвективного и терморadiационного способов сушки полимерных покрытий, результатов исследования трибологических параметров контакта и долговечности подшипников качения с посадками, восстановленными полимерными материалами и известных конструкций стендов для исследований.

В работах Демина В.Е., Бутина А.В., Малюгина В.А. и Киба М.Р. разработаны нанокompозиты на основе анаэробных и акриловых адгезивов, эластомеров. Анализ способов восстановления посадочных отверстий показал, что наиболее технологичным для восстановления корпусных деталей является способ нанесением покрытия из растворов эластомера или композитов на его основе.

Важной технологической проблемой при термической обработке полимерных покрытий конвективным способом является их пористость из-за испарения растворителя. Терморadiационный способ сушки обеспечивает меньшую пористость и более высокое качество покрытий. Установки инфракрасного излучения отличаются компактностью, мобильностью, меньшим энергопотреблением. Анализ априорной информации показал, что в настоящее время нет сведений об инфракрасной обработке полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автомобилей и этот научный вопрос требует всестороннего исследования.

Математическое моделирование инфракрасного нагрева корпусных деталей позволит разработать метод расчета конструктивных и режимных параметров установок ИК излучения, учитывающий физико-механические, геометрические и другие параметры объектов обработки.

Терморadiационный способ сушки полимерного покрытия отличается от конвективного механизмом отверждения. По этой причине следует ожидать изменения режима термической обработки, деформационно-прочностных и адгезионных свойств материала, качества покрытий, трибологических параметров, контактных напряжений, долговечности подшипниковых узлов. Необходимы всесторонние экспериментальные исследования в этом направлении.

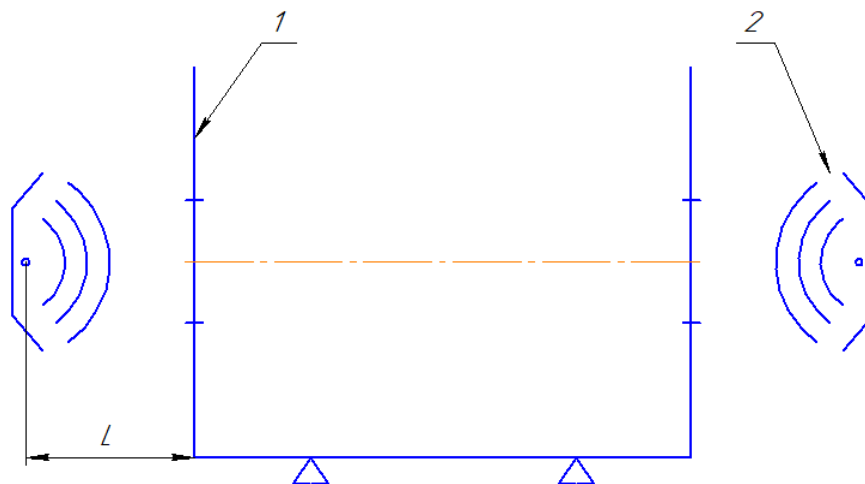
Учитывая важность исследования трибологических параметров, контактных напряжений и долговечности подшипников с полимерной посадкой, представляет научный и практический интерес разработка новой конструкции стенда с повышенными функциональными возможностями для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения.

На основании проведенного анализа в диссертационной работе сформулированы задачи исследований, приведенные выше.

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления корпусных деталей эластомерными нанокompозитами» разработана математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей автомобилей и метод расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасного излучения, описана конструкция нового стенда для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения.

Модель инфракрасного нагрева корпусных деталей автомобилей. Корпусную деталь коробки передач автомобиля представили как пустотелый короб, с двумя боковыми, одной нижней и двумя торцевыми стенками.

На рисунке 1 представлена схема нагрева корпусной детали инфракрасными излучателями.



1 – корпусная деталь; 2 – инфракрасный излучатель
Рисунок 1 – Принципиальная схема нагрева корпусной детали инфракрасными излучателями

Уравнение баланса теплового потока для корпусной детали можно представить в следующем виде

$$q_{\text{изл}} = q_{\text{щлуч}} + q_{\text{щконв}} + q_{\text{М}} + q_{\text{стлуч}} + q_{\text{стконв}} + q_{\text{м}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{изл}}$ – тепловой поток от инфракрасных излучателей, который поглощает корпусная деталь; $q_{\text{щлуч}}$ – тепловой поток, отдаваемый нагретыми торцевыми стенками (подшипниковыми щитами) при лучеиспускании; $q_{\text{щконв}}$ – тепловой поток, отдаваемый нагретыми щитами, при свободном конвективном теплообмене с окружающей средой; $q_{\text{М}}$ – тепловой поток, расходуемый на нагрев щитов; $q_{\text{стлуч}}$ – тепловой поток, отдаваемый нагретыми нижней и боковыми стенками при лучеиспускании; $q_{\text{стконв}}$ – тепловой поток, отдаваемый нагретыми нижней и боковыми стенками при конвективном теплообмене с окружающей средой; $q_{\text{м}}$ – тепловой поток, расходуемый на нагрев нижней и боковых стенок.

В результате проведенных теоретических исследований получены формулы членов формулы (1):

$$q_{\text{щлуч}} = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F_{\text{щ}}, \quad (2)$$

где ε – степень черноты серого тела, для чугуна: $\varepsilon = 0,60-0,70$; C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$; T – абсолютная температура щита, К; $F_{\text{щ}}$ – площадь поверхности щитов, м^2 .

$$q_{\text{щконв}} = k_{\text{щ}} (T - T_0) F_{\text{щ}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{щ}}$ – коэффициент теплоотдачи щита в условиях свободной конвекции в неограниченном пространстве, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}}$; T_0 – температура окружающей среды, К.

$$q_{\text{м}} = c_{\text{в}} M \frac{dT}{d\tau}. \quad (4)$$

$$q_{\text{стлуч}} = \int_{F_{\text{ст}}} \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 dF_{\text{ст}}, \quad (5)$$

где $c_{\text{в}}$ – теплоемкость материала подшипникового щита, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; M – масса подшипникового щита, кг; $T_{\text{ст}}$ – температура нижней и боковых стенок, К; $F_{\text{ст}}$ – суммарная площадь нижней и боковых стенок, м^2 .

$$q_{\text{стконв}} = \int_{F_{\text{ст}}} k_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0) dF_{\text{ст}}, \quad (6)$$

где $k_{\text{ст}}$ – усредненный коэффициент теплоотдачи нижней и боковых стенок в условиях свободной конвекции.

$$q_{\text{м}} = \int_{\text{м}} c_{\text{в}} \frac{dT_{\text{ст}}}{d\tau} dm, \quad (7)$$

где m – суммарная масса нижней и боковых стенок.

Боковую стенку представили как однородную призму размерами: $l \times w \times h$ (рисунок 2).

Получено дифференциальное уравнение нагрева корпусной детали

$$\lambda w \frac{d^2 T_{\text{ст}}}{dx^2} = 2 \left[k_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0) + \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right], \quad (8)$$

где λ – теплопроводность материала стенки, $\text{Вт/м} \times \text{К}$; w – толщина стенки, м. Общее решение уравнения (8) имеет следующий вид

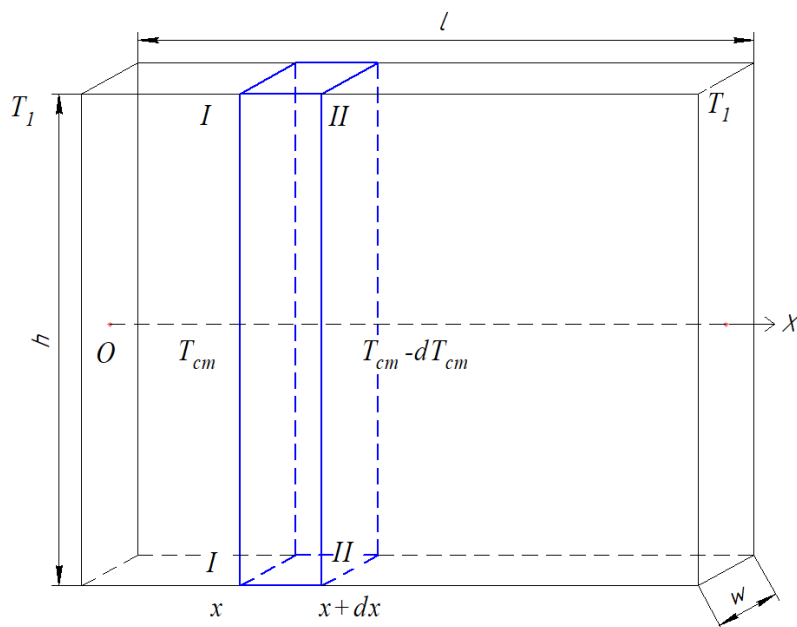
$$T_{\text{ст}} - T_0 = C_1 \text{ch}(bx) + C_2 \text{sh}(bx). \quad (9)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 определили из граничных условий, по которым температура торцов боковой стенки равна T_1

$$C_1 = T_1 - T_0 \text{ и } C_2 = \frac{T_1 - T_0 - (T_1 - T_0) \operatorname{ch}(bl)}{\operatorname{sh}(bl)}.$$

В результате получили закон распределения температуры вдоль боковой стенки корпусной детали

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{ст}}(x) = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{\operatorname{sh}(bl)} \{ \operatorname{sh}(bx) + \operatorname{sh}[b(l-x)] \} \quad (10)$$



$l \times w \times h$ – длина, толщина и высота боковой стенки, м;
 T_1 – температура в торцевой части боковой стенки, К

Рисунок 2 – Боковая стенка корпусной детали

Тепловой поток, который передаётся одной боковой стенке при установившемся режиме нагрева

$$q_{\text{бокст2}} = 2 \left[\int_0^l \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 h dx + \int_0^l k_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0) h dx \right] \quad (11)$$

Тепловой поток, который передаётся нижней стенке при установившемся режиме нагрева

$$q_{\text{нижст2}} = 2 \int_0^l \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 z dx + \int_0^l k_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0) z dx, \quad (12)$$

где z – ширина корпусной детали, м.

Суммарный тепловой поток, который подводится к боковым и нижней стенкам детали при установившемся режиме нагрева, следует определять как сумму тепловых потоков (11) и (12) по формуле

$$q_2 = 2q_{\text{бокст2}} + q_{\text{нижст2}} \quad (13)$$

Тепловой поток на нагрев торцевых стенок

$$q_1 = 2 \frac{(T_1 - T_0) c_v M}{H_{\text{эксп}}}, \quad (14)$$

Суммарный поглощаемый тепловой поток q , который идет на восполнение тепловых потерь для поддержания установившегося режима нагрева корпусной детали, следует определять как сумму величин (13) и (14).

$$q = q_1 + q_2 \quad (15)$$

Формула для расчета расстояния L от излучателя до корпусной детали

$$q = \frac{4\eta\epsilon Q_{\text{изл}} \sin(\beta_0) z \alpha_0}{l\varphi} - 8 \frac{\eta Q_{\text{изл}} \sin(\beta_0)}{l\varphi} \int_0^{\gamma_0} \sqrt{\frac{d^2}{4} - (L \operatorname{tg} \gamma)^2} d\gamma \quad (16)$$

где η – КПД излучателя; $Q_{\text{изл}}$ – электрическая мощность излучателя; l – длина излучателя; φ – угол рассеивания отражателя; d – диаметр отверстий в торцевой стенке корпусной детали; L – расстояние от излучателя до торца корпусной детали; углы $\alpha_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{z}{2L}\right)$, $\beta_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{l}{2L}\right)$, $\gamma_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{d}{2L}\right)$ в радианах (рисунок 3).

Расчет по формуле (16) проводят в среде РТС Mathcad Prime 3.0.

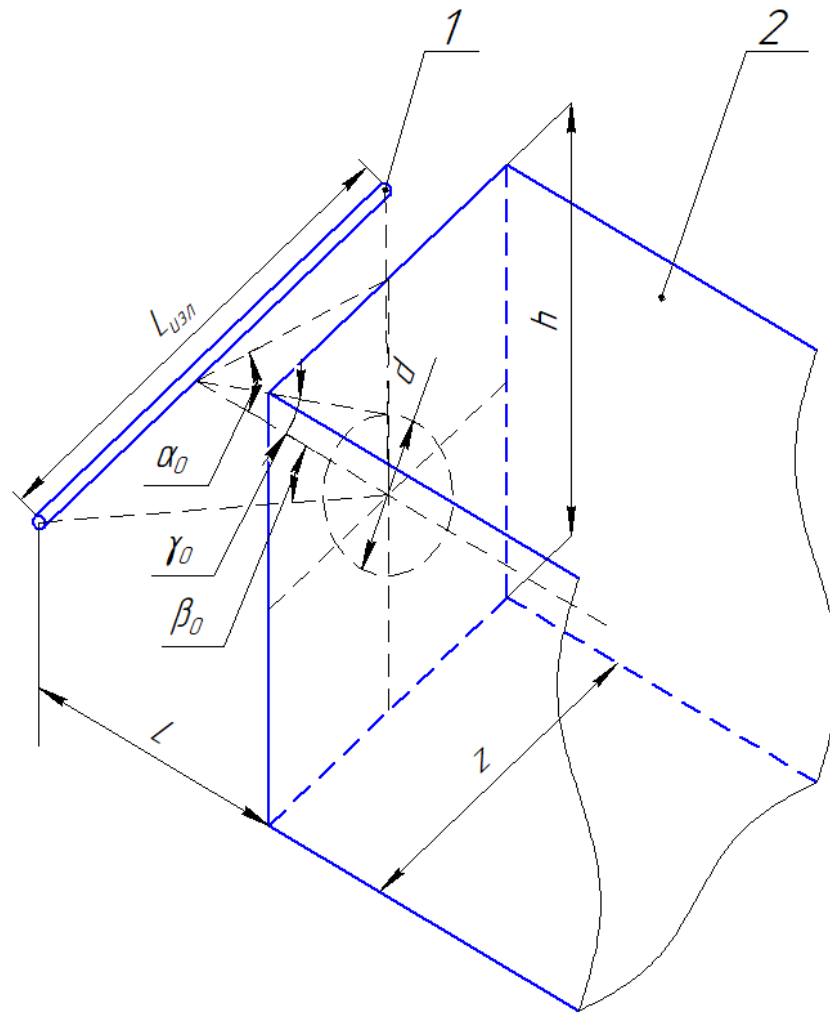
Формула для расчета времени нагрева корпусной детали

$$t = H_{\text{кд}} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{T_{\text{уст}} - T_0}{\dot{T}_0 H_{\text{кд}}}} \right), \quad (17)$$

где $T_{\text{уст}}$ – температура в установившемся режиме (термической обработки) корпусной детали; \dot{T}_0 – скорость роста температуры корпусной детали, $\dot{T}_0 = \frac{q}{C_v M_{\text{кд}}}$.

Метод расчета конструктивных и режимных параметров инфракрасных установок для терморadiационной обработки полимерных покрытий. На основе модели разработан метод, включающий алгоритм и компьютерную программу расчета конструктивных и режимных параметров установки терморadiационной обработки полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей. Блок-схема расчета представлена на рисунке 3. Программа включает базу данных о конструктивных параметрах инфракрасных излучателей и рефлекторов и позволяет оператору корректировать ее за счет возможности дополнительного ввода технических характеристик инфракрасного оборудования, которое имеется в наличии на ремонтном предприятии.

В конце расчета программа печатает: конструктивные ($Q_{\text{изл}}$, l) и режимные параметры (L , t) установки терморadiационной обработки полимерных покрытий.



1 – инфракрасный излучатель; 2 – корпусная деталь; $\angle \alpha_0$ – предельный угол падения инфракрасного луча на поверхность корпусной детали в вертикальной плоскости; $\angle \beta_0$ и γ_0 – углы обзора инфракрасного излучателя из центра корпусной детали в горизонтальной и вертикальной плоскости; L – расстояние от излучателя до детали; $l_{\text{изл}}$ – длина инфракрасного излучателя;

h и z – высота и ширина корпусной детали

Рисунок 3 – Инфракрасный нагрев корпусной детали

Стенд для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения с посадками восстановленными полимерными материалами. Разработана оригинальная конструкция стенда с расширенными функциональными возможностями (патент на изобретение РФ № 2719624). Конструкция стенда позволяет: 1) исследовать долговечность радиально-упорных и упорных подшипников качения; 2) обеспечить плавную, бесступенчатую регулировку нагрузки на испытываемые подшипники; 3) обеспечить плавную, бесступенчатую регулировку частоты вращения вала стенда и испытываемых подшипников. В сравнении с известными конструкциями стенд отличается компактностью, меньшей массой и устойчивостью конструкции.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведены общая методика исследований и частные методики исследования параметров ин-

фракрасного нагрева корпусных деталей, деформационно-прочностных и адгезионных свойств пленок нанокompозита, дефектности покрытий, теплопроводности нанокompозита, трибологических параметров, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадкой из нанокompозита, долговечности посадок подшипников восстановленных нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С.

При исследовании параметров инфракрасного нагрева образцами использовали корпуса коробок передач автомобилей ГАЗ-24 и ГАЗ-53. Нагрев деталей выполняли двумя установками инфракрасного нагрева, установленными по схеме на рисунке 1. Установка включает: излучатели QTS мощностью 750 Вт (для нагрева корпуса коробки передач 24-1701015) и 1500 Вт (для нагрева корпуса коробки передач 53А-1700010-05) и отражатели марки QTSR. Температуру нагрева корпусной детали измеряли инфракрасным пирометром марки Fluke-62.

Оптимальный режим обработки покрытий нанокompозита определяли в активном эксперименте по композиционному плану B_2 . Функцией отклика Y приняты удельную работу разрушения пленок при одноосном растяжении α , МДж/м³, а независимыми факторами: X_1 – температура, °С; X_2 – время термической обработки, ч. Образцы – пленки нанокompозита прямоугольной формы размерами: 50×10×0,15 мм. Расчетная длина образца составляла 30 мм. Состав нанокompозита: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., Al – 0,075 масс. ч.

Исследование деформационно-прочностных свойств проводили по ГОСТ 14236-81, ГОСТ 9550-81 и ГОСТ 12423-66. Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5047-50.

Адгезию покрытий нанокompозита оценивали прочностью связи материала с металлом при отслаивании образцов (ГОСТ 21981-76). В качестве подложки использовали пластину из стали 45, размерами: 100×25×3 мм. Шероховатость поверхности пластины Ra 0,63. После обезжиривания на поверхность пластины наносили послойно волосяной кистью №5 покрытие из раствора нанокompозита. Затем на покрытие накладывали железную сетку №07 (ГОСТ 3826-82). В завершении на уложенную сетку вновь послойно наносили покрытие из раствора нанокompозита. Расчетная длина образца составляла 70 мм.

Дефектность покрытий нанокompозита оценивали по ГОСТ 9407-84. Образцами являлись пленки нанокompозита после термической обработки конвективным и терморadiационным способами. Оценочные параметры качества пленок: площадь разрушенного покрытия, размер (диаметр пузырьков) и количество пузырьков на единицу площади. Значения двух последних параметров определяли микроскопом МПБ-2, который обеспечивает 24-х кратное увеличение.

При исследовании теплопроводности использовали метод температурного градиента. Метод основан на принципе доставки постоянного теплового потока от нагревателя к холодильнику, проходящего последовательно через эталонный и исследуемый образцы. Состав установки: холодильник, три диска из меди марки М1, диск из исследуемого материала, диск из оргстекла СО-95-К и нагреватель. Образцы изготовлены из нанокompозита в виде дисков диаметром 15,0 и толщиной 0,5 мм. Для тепловой изоляции от окружающей среды диски разместили в трубе из ПВХ, которую дополнительно опоясывает резиновая втулка. Температу-

ры трех медных дисков T_1 , T_2 и T_3 измеряли в установившемся температурном режиме инфракрасным пирометром марки Fluke-62.

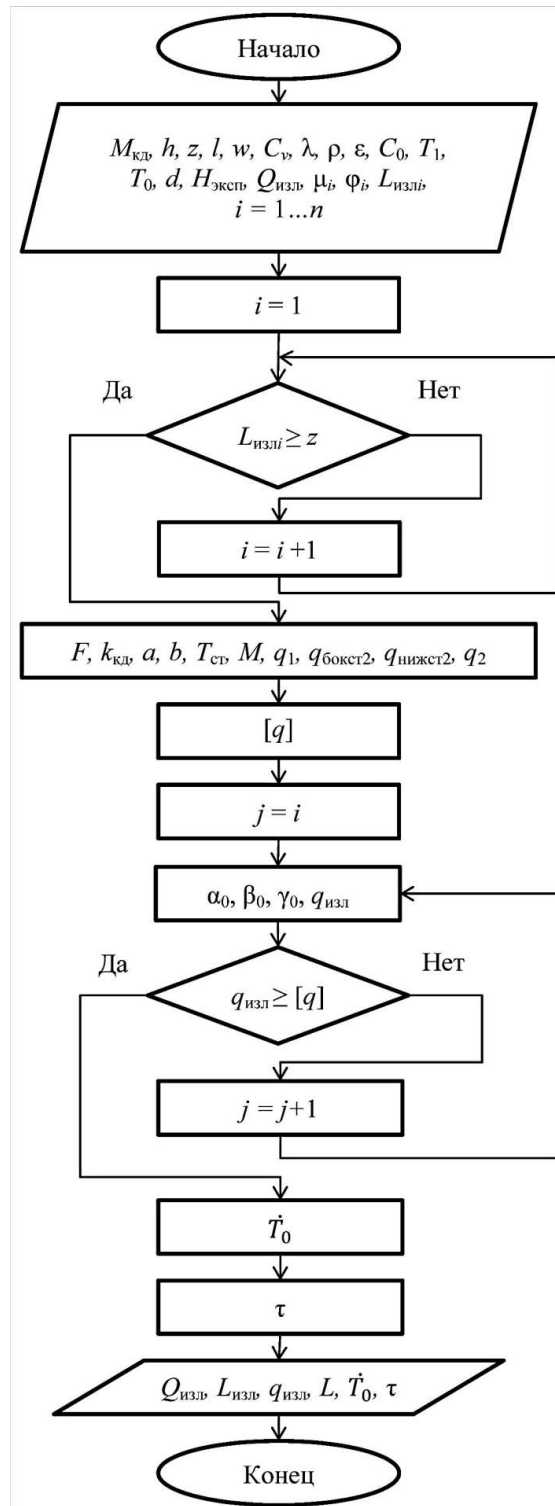


Рисунок 4 – Блок-схема компьютерного расчета конструктивных и режимных параметров установки терморadiационной обработки полимерных покрытий

При исследованиях коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости использовали шарик диаметром $D = 12,7$ мм и пластину из стали ШХ-15 размерами $100 \times 25 \times 4,92$ мм с подложкой из нанокompозита. Благодаря размерам, жест-

кость пластины соответствует жесткости поперечного сечения наружного кольца подшипника 209. Пластину уложили нанокompозитным покрытием вниз на поверочную плиту 2-1-250×250 ГОСТ 10905-75, которая установлена на опорной раме стенда. Толщина покрытия составляла: 0,1; 0,125 и 0,15 мм. Для фиксации пятна контакта, между шариком и пластиной, проложили полоску копировальной бумаги марки МВ-16 ГОСТ 489-88. Нагрузку на шарик создавали нагрузочной вилкой и гидроцилиндром стенда. Одновременно с нагружением шарика, измеряли деформацию пластины измерительной головкой 1МИГ с ценой деления 0,001 мм, установленной на штативе.

Исследования распределения нагрузки между телами качения, контактные напряжения и долговечность подшипников проводили на стенде (патент № 2719624). Образцами являлись подшипники 209 с посадками из нанокompозита.

На первом этапе исследовали зависимость площади пятна контакта шарика с беговой дорожкой наружного кольца подшипника от нагрузки с целью построения тарировочного графика. Подшипник 209 разобрали. На поверхность наружного кольца подшипника нанесли покрытие из нанокompозита. После термической обработки толщина покрытия составляла 0,12 мм. Наружное кольцо зафиксировали в проеме специальной нагрузочной вилки. Затем на поверхность дорожки качения наружного кольца подшипника уложили полоску копировальной бумаги МВ-16 ГОСТ 489-99. Наружное кольцо подшипника установили полимерным покрытием на поверочную плиту 2-1-250×250 ГОСТ 10905-75, которая предварительно установлена на опорной раме стенда. Затем на поверхность копировальной бумаги установили шарик подшипника 209. Нагрузочная пластина нагрузочной вилки имеет сферическую выемку под шарик, фиксируя его положение. Нагрузку на шарик создавали нагрузочной вилкой, хвостовик которой ввернут в шток гидроцилиндра. Значения нагрузок фиксировали контрольным манометром. Радиальная нагрузка составляла $P = 3471; 4166$ и 4860 Н. После выдержки под нагрузкой в течение 0,25 ч нагрузку снимали. Копировальную бумагу с полученными отпечатками исследовали на микроскопе МПБ-2. Повторность опытов пятикратная. В заключении эксперимента построили тарировочный график.

На следующем этапе исследовали распределение нагрузки между телами качения и напряжения в зоне контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника 209 с посадкой из нанокompозита. Толщина покрытия составляла 0,12 мм. Два подшипника 209 разобрали и внутренние кольца запрессовали на вал стенда. Наружные кольца подшипников с нанокompозитным покрытием запрессовали в отверстия подшипниковых щитов стенда с нулевым натягом. Затем собрали сепараторы, предварительно удалив по 4 шарика и оставив по пять шариков в каждом сепараторе. На поверхность желоба наружного кольца подшипника уложили полоску копировальной бумаги МВ-16 ГОСТ 489-99. Затем на поверхность копировальной бумаги установили сепаратор с пятью телами качения. Далее, перемещая вал в осевом направлении, установили его внутренними кольцами подшипников на тела качения. Нагрузку на исследуемые подшипниковые узлы создавали нагрузочными вилками и гидроцилиндрами, значения нагрузок фиксировали контрольными манометрами. Радиальная нагрузка составляла $P = 3471; 4166$ и 4860 Н. После выдержки под нагрузкой в течение 0,25

ч нагрузку снимали и проводили разборку подшипниковых узлов. Копировальную бумагу с полученными отпечатками исследовали на микроскопе МПБ-2. Повторность опытов пятикратная. Размеры пятна контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника измеряли при помощи микроскопа МПБ-2. Нагрузку на тела качения определяли по тарировочному графику.

Напряжения в зоне контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника определяли делением нагрузки на площадь пятна контакта.

Исследование ресурса подшипников качения с посадкой из нанокompозита проводили на стенде для испытания подшипников при статическом нагружении. Радиальная нагрузка на подшипник 209 составляла 10450 Н. За критерий долговечности подшипника приняли предельное значение радиального зазора.

Исследование долговечности посадок «корпус-подшипник», восстановленных нанокompозитом, проводили на вибростенде. Значение циклической радиальной нагрузки на подшипниковый узел при испытаниях 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 параметров инфракрасного нагрева корпусных деталей, деформационно-прочностных и адгезионных свойств пленок нанокompозита, дефектности покрытий, теплопроводности нанокompозита, трибологических параметров, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадкой из нанокompозита, долговечности посадок подшипников восстановленных нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С

Оценка сходимости расчетных и экспериментальных значений параметров инфракрасного нагрева корпусных деталей. Контрольный эксперимент показал корректность разработанной математической модели и компьютерной программы расчета конструктивных и режимных параметров установки инфракрасного нагрева корпусных деталей.

Исследования температуры и времени ИК нагрева корпусов КП автомобилей ГАЗ-24 и ГАЗ-53 показали, что экспериментальные значения различаются от расчетных значений:

- по температуре нагрева корпусных деталей на величину от 1,5 до 2,4%;
- по времени нагрева от 6,1 до 8,2%.

Исследования распределения температуры по длине боковой стенки корпусов КП автомобилей показали, что экспериментальные значения различаются от расчетных значений:

- при ИК нагреве корпуса КП 24-17010158 на величину от 0,9 до 4,5%;
- при ИК нагреве корпуса КП 53А-1700010-05 на величину от 1,0 до 5,4%.

Оптимизация режима термической обработки терморadiационным способом пленок нанокompозита эластомера Ф-40С. Реализован активный эксперимент и получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита, от температуры и времени ИК нагрева. Уравнение регрессии в натуральных единицах имеет вид

$$Y = -3835,89 + 53,77x_1 + 97,155x_2 + 0,0175x_1x_2 - 0,193x_1^2 - 16,92x_2^2, \quad (18)$$

Поверхность отклика и её двумерное сечение представлены на рисунках 5 и 6.

Максимальной удельной работой разрушения $53,389 \text{ МДж/м}^3$ обладают пленки композита после обработки при режиме: температура – $139,43^\circ\text{C}$; время $2,943 \text{ ч}$. Определен оптимальный режим ИК нагрева: температура – 140°C , время – 3 ч .

Деформационно-прочностные свойства и модули упругости пленок нанокompозита эластомера Ф-40С после термической обработки конвективным и терморрадиационным способами. После инфракрасной обработки, в сравнении с конвективным способом, прочность пленок нанокompозита увеличилась в 1,13 раза от $19,0$ до $21,5 \text{ МПа}$. Деформация образцов после инфракрасной обработки увеличилась в 1,32 раза от 74 до 98% . Модуль упругости при растяжении увеличился на 3% от $158,3$ до $161,8 \text{ Мпа}$, сжатия – на $5,4\%$ от $82,7$ до $87,2 \text{ Мпа}$.

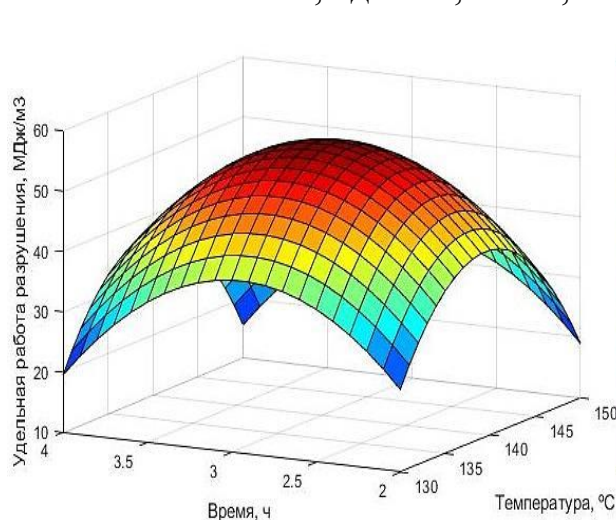


Рисунок 5 – Поверхность отклика

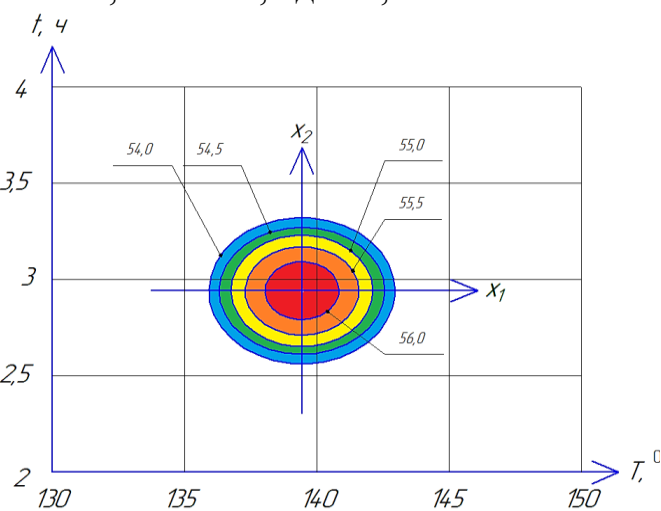


Рисунок 6 – Двумерное сечение поверхности отклика

Исследование адгезии покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С после термической обработки конвективным и терморрадиационным способами. Адгезия эластомерного нанокompозитного покрытия после отверждения конвективным способом составляет $F = 9594,4 \text{ Н/м}$. В покрытиях после инфракрасной обработки аналогичный параметр увеличился до $F = 12392,6 \text{ Н/м}$. Показатель адгезионной прочности увеличился в 1,3 раза.

Исследование дефектности покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С, обработанных конвективным и терморрадиационным способами. В сравнении с конвективным способом, термическая обработка покрытий нанокompозита эластомера Ф-40С терморрадиационным способом существенно повышает качество покрытий: площадь разрушенного покрытия уменьшилась в 1,33 раза, концентрация пор в покрытии – в 1,24 раза, размер пор – на 15% .

Исследование теплопроводности нанокompозита эластомера Ф-40С. Образцы эластомера Ф-40С имеют теплопроводность $\lambda_n = 0,27 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. У образцов из эластомерного нанокompозита значение коэффициента теплопроводности соста-

вило $\lambda_k = 9,9 \frac{Вт}{м \cdot К}$. Ввод дисперсных алюминиевых наночастиц в эластомер повысил коэффициент теплопроводности в 36,7 раза.

Исследование коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С. Повышение деформационно-прочностных свойств нанокompозита, в сравнении с не наполненным эластомером, является основной причиной увеличения коэффициента Кирхгофа до 8%. Увеличение модуля упругости нанокompозита, в сравнении с не наполненным эластомером, является причиной увеличения коэффициента податливости упругого основания до 32%. Соответственно увеличивается жесткость опоры и будет меньше смещение осей сопрягаемых деталей подшипникового узла при радиальном нагружении.

Исследование контактных напряжений и долговечности подшипников качения с посадками восстановленными нанокompозитом эластомера Ф-40С. В подшипнике 209 с посадкой из нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, по сравнению со стандартной посадкой, увеличивается площадь пятна контакта нагруженных тел с дорожками качения наружного кольца. В зависимости от радиальной нагрузки на подшипник площадь пятна контакта центрального тела с дорожкой качения увеличилась от 1,33 до 1,43 раза, первых боковых тел качения увеличилась от 1,5 до 1,56 раза.

Благодаря наличию упругой полимерной посадки, кольцо подшипника при радиальном нагружении деформируется, что приводит к перераспределению нагрузки с центрального, наиболее нагруженного, на первые и вторые боковые тела качения. В зависимости от радиальной нагрузки на подшипник нагрузка на центральное тело качения снизилась от 25,5 до 27%, на первые боковые тел качения увеличилась от 27 до 29%. При этом часть радиальной нагрузки на подшипник перераспределилась на вторые боковые тела качения.

Коэффициент распределения нагрузки в подшипнике с посадкой из эластомерного нанокompозита, по сравнению с подшипником с нулевым зазором посадки, увеличился от 0,46 до 0,74, т.е. в 1,6 раза.

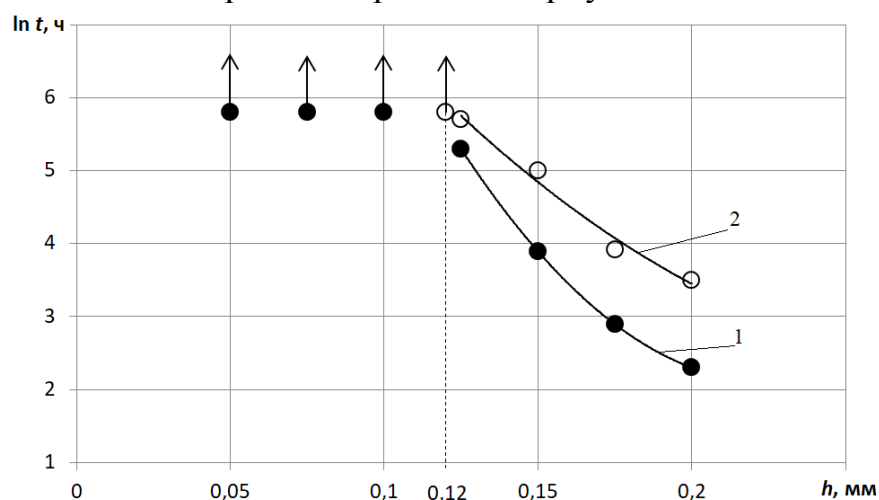
Благодаря увеличению площади пятна контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца, в подшипнике с посадкой из эластомерного нанокompозита, уменьшились контактные напряжения. В зависимости от радиальной нагрузки на подшипник контактное напряжение на центральном теле качения снизилась от 1,67 до 1,8 раза, на первых боковых телах качения от 1,18 до 1,22 раза. Ресурс подшипника 209 с посадкой, восстановленной нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С, превысил в 3,1 раза расчетный ресурс и составил 46,32 млн. об.

Исследования долговечности посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокompозитом на его основе. На рисунке 7 показаны результаты исследования долговечности при циклическом нагружении в 20 кН посадок подшипников 209 с различной толщиной полимерного покрытия из эластомера Ф-40С и нанокompозита на его основе. Долговечность посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом эластомера Ф-40С, выше аналогичного параметра посадок не наполненного эластомера в зависимости от толщины поли-

мерного покрытия от 1,4 до 3,3 раза. Наноккомпозитом на основе эластомера Ф-40С рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия в корпусных деталях автомобилей с диаметральным износом до 0,24 мм.

В пятой главе «Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка» приведены разработанная технология восстановления и ее экономическая эффективность.

По результатам проведенных исследований разработана технология восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автомобильной техники наноккомпозитом на основе эластомера Ф-40С, которая содержит следующие операции: очистка посадочных отверстий под подшипники в корпусной детали; измерение посадочных отверстий для определения износа; обезжиривание посадочных отверстий; приготовление наноккомпозита; нанесение наноккомпозитного покрытия на посадочные отверстия в корпусной детали; термическая обработка нанесенных полимерных покрытий; калибрование отверстий с полимерным покрытием, контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали.



1 – эластомер Ф-40С; 2 – наноккомпозит на основе эластомера Ф-40С

Рисунок 7 – Зависимость долговечности t полимерных посадок подшипника 209 в корпусной детали от толщины полимерного покрытия h при радиальной нагрузке 20 кН

Разработанная технология восстановления корпусных деталей автотракторной техники внедрена в ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александровского района Рязанской области. Для оценки надежности восстановленных корпусных деталей с марта 2020 г. по ноябрь 2021 г. в хозяйстве проводили эксплуатационные испытания автомобильной техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных корпусных деталей не наблюдалось.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО ЛГТУ при изучении дисциплин: «Технологические процессы технического обслуживания и ремонта автомобилей и тракторов», «Техническая эксплуатация автомобилей и тракторов», «Ремонт и утилизация автомобилей и тракторов», «Эксплуатация и ремонт мобильных машин».

Расчеты показали экономическую эффективность технологии восстановления корпусных деталей автомобильной техники. Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления в ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александровского района Рязанской области составил около 420 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны математическая модель терморadiационного нагрева корпусных деталей, метод и компьютерная программа расчета конструктивных и режимных параметров инфракрасной установки для терморadiационной обработки полимерных покрытий при восстановлении изношенных корпусных деталей автомобилей. Расхождение расчетных значений от фактических: по температуре нагрева корпусной детали не более 2,4%, времени нагрева – 8,2%.
2. Разработана оригинальная конструкция стенда для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения, отличающаяся от аналогов компактностью и большей функциональностью (патент на изобретение РФ №2719624).
3. Получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С от режима инфракрасной термической обработки. Определен оптимальный режим нагрева: температура – 140°C, время – 3 ч. Нанокompозит имеет высокую удельную работу разрушения 52,0 МДж/м³. После инфракрасной обработки, в сравнении с конвективным способом, прочность пленок нанокompозита увеличилась в 1,13 раза от 19,0 до 21,5 МПа, а деформация в 1,32 раза от 74 до 98%. Модуль упругости при растяжении увеличился на 3% от 158,3 до 161,8 Мпа, сжатия – на 5,4% от 82,7 до 87,2 Мпа.
4. В сравнении с конвективным способом, термическая обработка покрытий нанокompозита эластомера Ф-40С терморadiационным способом существенно повышает качество покрытий: площадь разрушенного покрытия уменьшилась в 1,33 раза (с 20 до 15%); концентрация пор в покрытии – в 1,24 раза (с 0,67 до 0,54 шт/см²) и размер пор – на 15% (с 0,109 до 0,095 мм).
5. Наполнение эластомера наночастицами алюминия увеличивает коэффициент теплопроводности нанокompозита в 37,6 раза (от 0,27 до 9,9 Вт/м*К), что позволит повысить теплоотвод и обеспечит более благоприятные условия работы подшипниковых узлов.
6. В подшипнике 209 с посадкой из эластомерного нанокompозита, по сравнению со стандартной посадкой, площадь пятна контакта нагруженных тел с дорожками качения наружного кольца, в зависимости от радиальной нагрузки на подшипник, увеличивается от 1,33 до 1,56 раза, коэффициент распределения нагрузки – в 1,6 раза. Увеличение площади пятна контакта и коэффициента распределения нагрузки снижает контактные напряжения до 1,8 раза. В итоге ресурс подшипника 209 с посадкой, восстановленной эластомерным нанокompозитом, превысил в 3,1 раза расчетный ресурс и составил 46,32 млн. об.
7. Восстановление корпусных деталей нанокompозитом обеспечивает высокую долговечность посадок подшипников. Ресурс посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом эластомера Ф-40С, выше аналогичного параметра посадок не наполненного эластомера до 3,3 раза. Эластомерным нанокompозитом ре-

комендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия в корпусных деталях автомобилей с диаметральной износом до 0,24 мм.

8. Разработаны технология и технологическое оборудование для восстановления подшипниковых отверстий в корпусных деталях автомобилей нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С. Технология восстановления внедрена в ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александро-Невского района Рязанской области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 430 тыс. руб.

Рекомендации производству. Нанокompозит на основе эластомера Ф-40С (эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,095 масс. ч.), новая технология, установки ИК нагрева рекомендуются для восстановления корпусных деталей при ремонте автомобилей.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Создание новых полимерных нанокompозитов. Разработка технологий восстановления посадок подшипников качения новыми нанокompозитами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ а) в издании, рекомендованном ВАК Минобрнауки РФ:

1. Быконя, А. Н. Расчет напряженного состояния и моделирование долговечности полимерного покрытия в восстановленной корпусной детали [Текст] / Р.И. Ли, Д. Н. Псарев, М.Р. Киба, А.Н. Быконя, А.В. Пчельников // Мир транспорта и технологических машин – 2017. - №4 (59) – С. 31-37.
2. Быконя, А. Н. Улучшение эластомерного нанокompозита при восстановлении корпусных деталей автомобилей после инфракрасной обработки [Текст] / Р.И. Ли, Д. Н. Псарев, А.Н. Быконя // Мир транспорта и технологических машин – 2022. - №1 (76) – С. 24-30.

б) патенты на изобретение РФ:

3. Быконя, А. Н. Композиция для склеивания металлических изделий [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2678063. Заявл. 09.01.2018. / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Малюгин В. А., Быконя А. Н. // Оpubл. 22.01.2019. – Бюл. №3.
4. Быконя, А. Н. Стенд для испытания подшипников качения на долговечность [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2719624. Заявл. 08.07.2019. / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Ризаева Ю.Н., Пчельников А.В., Быконя А. Н., Мельников А.Ю. // Оpubл. 21.04.2020. – Бюл. №12.
5. Быконя, А. Н. Способ восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях покрытием из раствора полимерного материала [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2751339. Заявл. 18.03.2020. / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Ризаева Ю.Н., Киба М.Р., Быконя А. Н., Мельников А.Ю. // Оpubл. 13.07.2021. – Бюл. №20.
6. Быконя, А. Н. Композиция для покрытия металлических изделий [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2757271. Заявл. 19.10.2020. / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М.Р., Быконя А. Н., Мельников А.Ю., Ерохин В.Е. // Оpubл. 12.10.2021. – Бюл. №29.

в) прочие издания:

- в издании, включенном в систему цитирования (библиографическую базу) Scopus:

7. Lee, R., Pchel'nikov, A., Bykonya, A. Stand for Research of Contact Stresses and Durability of Cars Bearing Units. Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, pp. 614-616.
8. R. I. Li, D. N. Psarev, A. N. Bykonya. A Mathematical Model of Infrared Heating of Auto Body Parts during Restoration by a Polymer Material. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 172-176.
9. R. I. Li, Yu. N. Rizaeva, D. N. Psarev and A. N. Bykonya. Calculation of Structural and Operational Parameters of a Facility for Infrared Heating of Base Parts during Restoration with a Polymer Material. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2020, Vol. 13, No. 4, pp. 387-390.
10. R. I. Li, D. N. Psarev, A. N. Bykonya and M. R. Kiba. A Mathematical Model of Thermal Irradiation Processing of Polymer Coatings during Restoration of Automobile Body Parts. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2021, Vol. 14, No. 3, pp. 376-380.
11. R. I. Li, Yu. N. Rizaeva, D. N. Psarev, A. N. Bykonya, and M. R. Kiba. A Method for Calculating the Parameters of a Unit for Thermoradiation Treatment of Polymer Coatings in the Restoration of Car Body Parts. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2021, Vol. 14, No. 4, pp. 517-521.

- в издании, включенном в международную базу данных Agris:

12. Быконя, А. Н. Теоретические аспекты терморadiационного нагрева изношенных корпусных деталей техники при восстановлении [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.Н. Быконя, А.В. Пчельников, А.Ю. Мельников // Наука в Центральной России. – 2020. – №1 (43). – С. 50-59.
13. Быконя, А. Н. Исследование трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения автомобилей [Текст] / Р.И. Ли, М.Р. Киба, А.Н. Быконя // Наука в Центральной России» – 2020. – №4 (46) – С. 76-84.
14. Быконя, А. Н. Исследование теплопроводности полимерных нанокомпозитов [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, М.Р. Киба, А.Ю. Мельников, А.Н. Быконя // Наука в Центральной России. – 2022. – №1 (55). – С. 81-91.

- статьи в сборниках материалов научных конференций:

15. Быконя, А.Н. Модель инфракрасного нагрева корпусных деталей при восстановлении посадочных отверстий полимерными материалами [Текст] / Р.И. Ли, Ф.М. Маматов, И.Ж. Тоиров, А.Н. Быконя // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ПТТ-2018: материалы I междунар. науч.-практ. конф., 12-13 декабря 2018 года, г. Липецк – Липецк: Изд-во Липецкого гос. тех. университета, 2018. – С. 107-112.
16. Быконя, А.Н. Математическая модель инфракрасного нагрева корпусной детали [Текст] / Р.И. Ли, А.Н. Быконя // Инновационные технологии реновации в машиностроении: Сборник трудов Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана, 4-5 февраля 2019 года, под общ. ред. В. Ю. Лавриненко. Москва, 2019. С. 140-143.
17. Быконя, А.Н. Терморadiационный нагрев корпусных деталей автотракторной техники при восстановлении полимерными материалами [Текст] / Р.И. Ли, А.Н.

- Быконя // Современные материалы, техника и технологии: Сборник научных статей IX Междунар. науч.-практ. конф., 28 декабря 2019 года. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2019. – С. 10-14.
18. Быконя, А.Н. Стенд для исследования контактных напряжений и долговечности подшипниковых узлов автотракторной техники [Текст] / Р.И. Ли, А.Н. Быконя, М.Р. Киба // АВТОМОБИЛИ, ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ: настоящее, прошлое и будущее: сборник статей 2-й Международной научно-технической конференции (22 мая 2020 года)/ редкол.: Е.В. Агеев (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. – С. 173-175.
19. Быконя, А.Н. Математическая модель расчета режимов инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях [Текст] / Ли Р.И., Псарев Д.Н., Быконя А.Н., Пчельников А.В., Мельников А.Ю. // Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А. А. Шестакова (16-17 сентября 2020 года). Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина. Елец, 2020. С. 408-413.
20. Быконя, А.Н. Стенд для физического моделирования трибологических параметров контакта в подшипниковых узлах автомобилей [Текст] / Ли Р.И., Быконя А.Н., Коломейченко А.А. // Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А. А. Шестакова (16-17 сентября 2020 года). Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина. Елец, 2020. С. 479-484.
21. Быконя, А.Н. Повышение деформационно-прочностных свойств полимеров после инфракрасной обработки [Текст] / Р.И. Ли, А.Н. Быконя, В.Е. Ерохин // Современное состояние садоводства Российской Федерации, проблемы отрасли и пути их решения. Материалы науч. -практ. конф. 17 – 18 сентября 2020 года в г. Мичуринске Тамбовской области. – Мичуринск-научоград РФ, 2020. – Тамбов: ООО «ТПС», 2020 – с. 204-208.
22. Быконя, А.Н. Определение ширины контактной площадки в роликовом радиально-упорном подшипнике [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Пчельников, А.Н. Быконя // Современное состояние садоводства Российской Федерации, проблемы отрасли и пути их решения. Материалы науч. -практ. конф. 17 – 18 сентября 2020 года в г. Мичуринске Тамбовской области. – Мичуринск-научоград РФ, 2020. – Тамбов: ООО «ТПС», 2020 – с. 208-213.
23. Быконя, А.Н. Стенд для испытания подшипниковых узлов сельскохозяйственного оборудования [Текст] / Р.И. Ли, А.Н. Быконя // Цифровизация агропромышленного комплекса [Электронный ресурс] : сборник научных статей II Междунар. науч.-практ. конф. В 2-х т. Тамбов, 21 – 23 октября 2020 г. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020 – с. 103-107.
24. Быконя, А.Н. Долговечность подшипников качения с посадкой в корпусной детали автомобиля, восстановленной эластомерным нанокompозитом [Текст] /

А.Н. Быконя, Р.И. Ли // ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ: ПУТИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ: Сборник научных трудов 10-й Международной научно-практической конференции (30 июня 2021 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т.,- Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2021, - с. 40-43.

25. Быконя, А.Н. Исследование трибологических параметров контакта в подшипниковых узлах, восстановленных эластомерными нанокompозитами [Текст] / Ли Р.И., Быконя А.Н., Мельников А.Ю., Ерохин В.Е. // В сборнике: Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. В 2-х т. Орел, 2021. С. 76-89.