

На правах рукописи



Псарев Дмитрий Николаевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДОК
ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В УЗЛАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ТЕХНИКИ ПОЛИМЕРНЫМИ НАНОКОМПОЗИТАМИ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Мичуринск, 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ)

- Научный консультант:** **Ли Роман Иннакентьевич**
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Зорин Владимир Александрович**,
заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО МАДИ, заведующий кафедрой производства и ремонта автомобилей и дорожных машин
Михальченко Александр Михайлович,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, профессор кафедры технического сервиса
Жачкин Сергей Юрьевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, профессор кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный аграрный университет»

Защита состоится 18 января 2024 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 35.2.022.02 по защите кандидатских и докторских диссертаций, созданного на базе ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ по адресу: 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, зал заседаний диссертационных советов (ауд. 1/206), тел./факс (47545) 3-88-13, доб. 382, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте университета: <http://www.mgau.ru/>, а также на официальном сайте ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: <https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Криволапов Иван Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вопрос импортозамещения отечественной продукцией, обеспечения продовольственной безопасности страны чрезвычайно актуален. Значительную долю в формировании цены с.х. продукции составляют затраты на технический сервис техники. С учетом того, что существенная доля сельскохозяйственной техники импортного производства, вопрос ее ремонта приобретает особую актуальность.

Подшипники качения относятся к типовым, наиболее многочисленным деталям в конструкции сельскохозяйственной техники. В этой связи долговечность подшипников существенным образом влияет на ее надежность. Основной из причин отказа подшипниковых узлов является износ из-за фреттинг-коррозии посадочных мест подшипников качения. Для восстановления посадочных мест подшипников используют большое количество способов восстановления.

Способы восстановления посадок подшипников качения полимерными материалами отличаются простотой технологии, не потребляют большого количества электроэнергии и имеют низкую себестоимость восстановления. Наличие упругого полимерного слоя исключает фреттинг-коррозию посадочных мест, понижает контактные напряжения и многократно увеличивает ресурс подшипниковых узлов.

Государственной программой Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации», утвержденной правительством Российской Федерации от 29 марта 2019 года №377 (с изменениями на 22 октября 2021 года), предусмотрена система приоритетов в которой к магистральным направлениям развития относятся:... технологии производства и использования новых материалов и веществ, включая редкие и редкоземельные материалы, полимерные композитные материалы, аддитивные технологии.

Исследования и разработка полимерных композитов является основным направлением в повышении эффективности восстановления посадок подшипников в узлах сельскохозяйственной техники. После наполнения полимерной матрицы частицами наполнителей значительно улучшаются потребительские свойства и снижается цена материала. В настоящее время особое внимание уделяется исследованиям и последующей разработке новых полимерных нанокompозитов. Потребителю отечественными товаропроизводителями предлагается большая номенклатура наноразмерных частиц (НРЧ) различной формы и материалов. Это создает благоприятные условия для исследования и разработки новых перспективных полимерных нанокompозитов, высокоэффективных технологий и технических средств для восстановления посадок подшипников качения, обеспечивающих увеличение ресурса подшипниковых узлов, повышение надежности и сокращение затрат при ремонте техники.

Степень разработанности темы. Решению научных проблем технологии ремонта автотракторной техники и восстановления изношенных деталей посвящены труды Агеева Е. В., Адигамова Н. Р., Голубева И. Г., Ерохина М. Н., Жачкина С. Ю., Казанцева С.П., Карагодина В. И., Лялякина В. П., Новикова А. Н., Черноиванова В. И. и многих других отечественных ученых.

Вопросам восстановления изношенных деталей техники полимерными материалами и композитами на их основе посвящены труды Астанина В. К., Бауровой Н. И., Гвоздева А. А., Зорина В. А., Котина А. В., Кононенко А. С., Курчаткина В. В., Ли Р. И., Михальченкова А.М., Родионова Ю. В. и многих других отечественных ученых.

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время посадки подшипников качения восстанавливают реактопластами (анаэробными герметиками, акриловыми адгезивами), эластомерами и композитами на их основе. Для наполнения композитов используют микрочастицы органического и неорганического происхождения. Перспективным направлением в повышении эффективности полимерных композитов является использование наночастиц. Наноразмерные наполнители значительно повышают механические и теплофизические свойства материала. Необходимо теоретическое обоснование выбора наночастиц, обеспечивающее улучшение механических и теплофизических свойств новых, перспективных нанокompозитов на основе реактопластов и эластомеров.

Ультразвуковая обработка (УЗО) полимерных композитов является перспективным способом смешения и диспергирования компонентов, однако вопрос влияния режимных параметров УЗО на качество диспергирующего смешения растворов эластомерных нанокompозитов исследован не в полной мере. УЗО анаэробных нанокompозитов экономически нецелесообразно из-за их относительно высокой цены, больших потерь раствора нанокompозита при диспергировании. Механизированное диспергирование не требует сложного технологического оборудования и потери раствора нанокompозита, в сравнении с УЗО, минимальные.

Анализ литературных источников показал отсутствие информации об обработке терморационным способом отверстий с нанесенными полимерными покрытиями при восстановлении корпусных деталей с.х. техники, который позволяет повысить качество полимерных покрытий и существенно снизить энергозатраты. Математическое моделирование инфракрасного нагрева корпусных деталей позволит разработать метод и программное обеспечение расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки.

Точностные характеристики отверстий с полимерным покрытием, в восстановленных корпусных деталях, существенно зависят от усадки полимера после отверждения. Профессор Ли Р.И. и сотрудники ЛГТУ разработали способ калибрования отверстий с полимерным покрытием, исключая влияние усадки, однако отсутствуют рекомендации по калиброванию покрытий из эластомерных нанокompозитов.

Работоспособность клеевого соединения «вал-подшипник» существенным образом зависит от соосности сопрягаемых деталей, которую обеспечивают центрирующим приспособлением. Детали типа «вал» в узлах с.х. техники отличаются большим разнообразием по номенклатуре, конфигурации и типоразмерам. Для эффективного восстановления посадок подшипников этих деталей адгезивами необходимо разработать метод расчета точностных характеристик деталей центрирующих приспособлений, что позволит оперативно и с достаточной точностью их определять для изготовления.

Полимерный слой в сопряжении «вал-подшипник» или «корпус-подшипник» снижает контактные напряжения при нагружении подшипников и повышает многократно ресурс подшипниковых узлов. Необходимы исследования трибологических параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадками, восстановленными полимерными нанокомпозитами, а также выносливости при циклическом нагружении посадок из полимерных нанокомпозитов.

Исследование вышеописанных научных вопросов позволит комплексно, системно решить научную проблему: исследование и разработка полимерных нанокомпозитов, способов и технических средств их обработки.

Решение данной научной проблемы позволит разработать технологические основы, обеспечивающие улучшение эксплуатационных свойств полимерных нанокомпозитов, повышение качества восстановления посадок и увеличение ресурса подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Липецкой области в рамках научного проекта №17-48-480268/17 по теме «Методология исследования полимерных композиционных наноматериалов и разработки технологии и оборудования для восстановления корпусных деталей транспорта и технологического оборудования металлургических и машиностроительных предприятий Липецкой области»; конкурса Управления образования Тамбовской области «Гранты для поддержки прикладных исследований молодых учёных 2018 года» по теме «Разработка технологии и оборудования для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники полимерными материалами»; РФФИ и Администрации Тамбовской области в рамках научного проекта №17-48-680702/17 по теме «Оценка модифицирующего действия углеродных нанотрубок (УНТ) на физико-механические свойства полимерных композиционных материалов».

Цель работы: повышение качества восстановления и увеличение ресурса подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники путем разработки технологических основ восстановления посадок подшипников качения полимерными нанокомпозитами, включающие научно-обоснованный выбор наноразмерных наполнителей, исследование и разработку перспективных способов и технических средств обработки материалов.

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

1. Разработать методологию исследования и выбора, на основе фрактального анализа, наноразмерных частиц наполнителей для полимерных композитов, предназначенных для восстановления посадок подшипников качения, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов.

2. Исследовать теплопроводность, тепло- и термостойкость, деформационно-прочностные и адгезионные свойства полимерных нанокомпозитов. Оптимизировать состав и режим термической обработки эластомерных нанокомпозитов.

3. Исследовать физические свойства растворов эластомерных нанокомпозитов и определить рациональный режим ультразвуковой обработки. Исследовать дега-

зацию растворов эластомерных нанокомпозитов, дефектность и структуру полимерных покрытий. Определить рациональный режим механизированного диспергирования анаэробного нанокомпозита.

4. Разработать математические модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и корпусных деталей автотракторной техники, и на их основе методы и компьютерные программы расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях. Исследовать, в сравнении с конвективным способом, дефектность эластомерных нанокомпозитных покрытий после инфракрасной сушки.

5. Провести экспериментальные исследования зависимости усилия резания покрытий эластомерных нанокомпозитов от переднего угла режущей кромки калибра-резца. Определить рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца и исследовать качество и точностные характеристики покрытий эластомерных нанокомпозитов.

6. Разработать метод расчета точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник».

7. Исследовать податливость опор на полимерных посадках, трибологические параметры, контактные напряжения и ресурс подшипников с посадками из полимерных нанокомпозитов, долговечность посадок подшипников при циклическом радиальном нагружении, восстановленных полимерными нанокомпозитами.

8. Разработать технологии, технологическое оборудование и оснастку для восстановления посадок подшипников качения полимерными нанокомпозитами, а также оценить их технико-экономическую эффективность.

Научную новизну диссертации составляют:

- методология исследования и выбора, на основе фрактального анализа, наночастиц наполнителей, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов;

- результаты экспериментальных исследований теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов, регрессионные модели зависимости удельной работы разрушения от состава и режима термической обработки эластомерных нанокомпозитов;

- результаты экспериментальных исследований ультразвукового диспергирования и дегазации растворов эластомерных нанокомпозитов, дефектности и структуры полимерных покрытий после УЗО, рациональные режимы УЗО нанокомпозитов и механизированного диспергирования анаэробного нанокомпозита;

- математические модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и корпусных деталей автотракторной техники, методы и компьютерные программы расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях, дефектность эластомерных нанокомпозитных покрытий после термической обработки конвективным и терморadiационным способами;

- экспериментальные зависимости усилия резания покрытий эластомерных нанокомпозитов от переднего угла режущей кромки калибра, рациональные гео-

метрические параметры режущей кромки калибра, качество и точностные характеристики покрытий эластомерных нанокомпозитов;

- метод расчета точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник»;

- результаты экспериментальных исследований податливости опор на полимерных посадках, трибологические параметры, контактные напряжения и долговечность подшипников с посадками из полимерных нанокомпозитов;

- результаты экспериментальных исследований долговечности посадок подшипников при циклическом радиальном нагружении, восстановленных полимерными нанокомпозитами.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методологии исследования и выбора наночастиц наполнителей для полимерных материалов, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов; математических моделей инфракрасного нагрева корпусных деталей техники, методах расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях; методе расчета точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник».

Практическая значимость заключается в новых нанокомпозитах на основе эластомеров Ф-40, Ф-40С и герметика АН-111, компьютерных программах расчета конструктивных и технологических параметров установок инфракрасного нагрева, технологиях восстановления с использованием ультразвукового и механизированного диспергирования растворов нанокомпозитов, технологической оснастке в виде калибрующего инструмента и центрирующих приспособлений.

Объект исследований. Пленки и полимерные покрытия, подшипники качения, посадки «вал-подшипник» и «корпус-подшипник», восстановленные нанокомпозитами на основе эластомеров Ф-40, Ф-40С и анаэробного герметика АН-111.

Предмет исследования. Деформационно-прочностные, адгезионные и теплофизические свойства нанокомпозитов на основе эластомера Ф-40, Ф-40С и анаэробного герметика АН-111, режимы УЗО растворов эластомерных нанокомпозитов и механизированного диспергирования анаэробного нанокомпозита, параметры инфракрасного нагрева корпусных деталей техники, зависимости усилия резания, повреждаемости и отклонений размеров эластомерных нанокомпозитных покрытий от геометрических параметров режущей кромки калибра, трибологические параметры, контактные напряжения и долговечность подшипников с посадками из полимерных нанокомпозитов; долговечность посадок подшипников при циклическом нагружении, восстановленных полимерными нанокомпозитами.

Методология и методы исследования. Методологическая, теоретическая и эмпирическая базы исследований представлены теоретическими исследованиями на основе теории перколяции и фрактального анализа структуры полимерных нанокомпозитов, теории тепло- и массообмена, регрессионным и дисперсионным анализом, экспериментальными исследованиями механических и теплофизических свойств полимерных нанокомпозитов, их ультразвуковой, механизированной и инфракрасной обработки, обработки резанием эластомерных покрытий, исследованием трибологических параметров и ресурса подшипников с посадками из

полимерных нанокompозитов, долговечности посадок подшипников при циклическом нагружении, восстановленных полимерными нанокompозитами.

Положения, выносимые на защиту:

- методология исследования и выбора, на основе фрактального анализа, наночастиц наполнителей, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокompозитов;

- математические модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и корпусных деталей автотракторной техники, методы и компьютерные программы расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях;

- регрессионные модели зависимости удельной работы разрушения от состава и режима термической обработки эластомерных нанокompозитов;

- рациональные режимы УЗО растворов эластомерных нанокompозитов и механизированного диспергирования анаэробного нанокompозита, теплофизические и механические свойства полимерных нанокompозитов, дефектность эластомерных нанокompозитных покрытий после термической обработки конвективным и терморadiационным способами, рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца, качество и точностные характеристики покрытий эластомерных нанокompозитов;

- метод расчета точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник»;

- результаты экспериментальных исследований трибологических параметров, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадками из полимерных нанокompозитов, долговечность посадок подшипников при циклическом радиальном нагружении, восстановленных полимерными нанокompозитами;

- технологии восстановления посадок подшипников качения на деталях типа «вал» и в корпусных деталях полимерными нанокompозитами и оценка их технико-экономической эффективности.

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

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса», конкретно, в областях исследований, представленных в пункте 20 «Методы и технические средства обеспечения надежности, долговечности, диагностики, технического сервиса, технологии упрочнения, ремонта и восстановления машин и оборудования».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международных научно-практических конференциях: ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ (г. Мичуринск) в 2015...2023 гг.; ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов), 2017, 2019 гг.; ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА (г. Иванов), 2017, 2018 гг.; ЛГТУ (г. Липецк), 2018...2022 гг.; Саратовский гос. агр-й ун-т (г. Саратов), 2019 г.; Елецкий гос. ун-т (г. Елец), 2020 г.; заседаниях кафедры стандартизации, метрологии и технического сервиса ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ в 2023 г.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликованы 74 печатные работы, в том числе 17 публикаций в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 21 публикация в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки, и 4 патента на изобретение РФ. Общий объем публикаций составляет 47,2 п.л., автору принадлежит 32,9 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит: введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Объем работы 478 страниц машинописного текста. Диссертация включает 215 рисунков, 47 таблиц, 20 приложений на 70 страницах и список литературы из 280 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы научная новизна результатов исследования, теоретическая 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 способы восстановления посадок подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники, современные полимерные композиты для восстановления посадок подшипников качения, формирование контактных напряжений и долговечность подшипниковых узлов с посадками, восстановленными полимерными материалами, способы технологического обеспечения при восстановлении посадок подшипников качения полимерными композитами.

Литературный обзор показал, что до 72% дефектуемых деталей имеют износ до 0,2 мм. Посадочные места под подшипники в деталях с износом до 0,2 мм можно эффективно восстанавливать полимерами и композитами на их основе.

Теплостойкость эластомеров Ф-40 и Ф40С не превышает 100°C. При большей температуре материалы переходят в вязкотекучее состояние. Температура подшипников обычного исполнения при эксплуатации составляет 70...90°C, поэтому необходимо, чтобы эластомерные нанокомпозиты имели более широкий температурный запас по теплостойкости.

Расчет теплопроводности микрокомпозитов по формулам Оделевского и Миснара дает заниженные результаты, отличающиеся от фактических, на 20...60%. Необходимо разработать метод расчета теплопроводности полимерных нанокомпозитов.

При эксплуатации восстановленного подшипникового узла автотракторной трансмиссии полимерная посадка подвергается термоциклированию. Воздействие повышенных и пониженных температур приводит к термическому старению полимерного материала. Вопрос влияния наночастиц на термостойкость эластомеров не изучен.

Усиление полимерных нанокомпозитов, в сравнении с не наполненными полимерами, описывают тремя видами моделей: традиционные микромеханические, перколяционные и фрактальные. В настоящее время активно развивается теория усиления полимерных нанокомпозитов на основе теории перколяции и фрактального анализа структуры наночастиц наполнителя и структуры нанокомпозита.

Представляют научный и практический интерес теоретические исследования механических свойств, оценки прочности полимерных нанокомпозитов на основе фрактального анализа.

Необходимость однородного заполнения полимерной матрицы углеродными нанотрубками (УНТ) усложняет и удорожает технологию приготовления нанокомпозита. Дисперсные металлические наночастицы, в сравнении с УНТ, благодаря своей форме лучше диспергируются. Поэтому предпочтительными для наполнения реактопластов и эластомеров являются дисперсные металлические наночастицы.

УЗО растворов композитов является перспективным способом смешения компонентов, однако вопрос влияния режимных параметров УЗО на качество диспергирующего смешения растворов эластомерных нанокомпозитов исследован не в полной мере. УЗО анаэробных нанокомпозитов экономически невыгодно из-за их относительно высокой цены и потерь раствора нанокомпозита при диспергировании. Механизированное диспергирование отличается простотой и потерей раствора нанокомпозита, в сравнении с УЗО, минимальные. Необходимо экспериментально обосновать рациональные режимы УЗО растворов эластомерных нанокомпозитов и механизированного смешения анаэробных нанокомпозитов, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения компонентов.

Литературный анализ выявил отсутствие информации об обработке терморационным способом отверстий с полимерными покрытиями при восстановлении корпусных деталей с.х. техники. Математическое моделирование инфракрасного нагрева корпусных деталей позволит разработать метод и программное обеспечение расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки. Термическая обработка инфракрасным нагревом позволит повысить качество полимерных покрытий и существенно снизить энергозатраты при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники.

Отсутствуют рекомендации по калиброванию покрытий из эластомерных нанокомпозитов и поэтому необходимы исследования калибрования отверстий с покрытиями из эластомерных нанокомпозитов, с целью определения рациональных геометрических параметров режущей кромки калибра.

Для эффективного восстановления посадок подшипников на валах адгезивами необходимо разработать метод расчета точностных характеристик деталей центрирующих приспособлений, что позволит оперативно и с достаточной точностью их определять для изготовления.

Полимерный слой в сопряжении «деталь-подшипник» снижает контактные напряжения при нагружении подшипников и повышает многократно ресурс подшипниковых узлов. Необходимы исследования трибологических параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадками, восстановленными полимерными нанокомпозитами, а также выносливости при циклическом нагружении посадок из полимерных нанокомпозитов.

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

Во второй главе «Методика экспериментальных исследований» приведены

общая и частные методики исследований механических, физических и теплофизических свойств эластомерных и анаэробных нанокompозитов, их ультразвуковой, механизированной и инфракрасной обработки, обработки резанием эластомерных покрытий, исследования трибологических параметров и ресурса подшипников с полимерными посадками, долговечности посадок подшипников при циклическом нагружении, восстановленных полимерными нанокompозитами.

Деформацию, прочность и модули упругости пленок эластомеров Ф-40, Ф-40С и их нанокompозитов исследовали в соответствии с ГОСТ 14236-81, ГОСТ 9550-81 и ГОСТ 12423-66.

Механические свойства клеевых соединений анаэробного герметика АН-111 и нанокompозитов на его основе оценивали по прочности, деформации и удельной работе разрушения при аксиальном сдвиге. Наполнителем использовали алюминиевый нанопорошок (ТУ 1791-003-36280340-2008).

Термостойкость эластомеров и нанокompозитов на их основе оценивали по изменению прочности и относительного удлинения образцов, после термического старения в условиях ограниченного доступа кислорода воздуха (ОДКВ).

Теплостойкость оценивали по изменению условного модуля упругости полимерного покрытия, в которое внедряли шариковый индентор при различных температурах нагрева образцов. Теплостойкость материала исследовали на модернизированном твердомере типа ТП. Исследования теплопроводности проводили по методу температурного градиента.

Исследование режимных и оценочных параметров УЗО раствора нанокompозита проводили, используя ультразвуковую ванну «GRAD 0,5 HOME STYLE», весы ВЛА-200М, вискозиметр типа ВПЖ-2. За оценочный параметр качества смешения компонентов приняли вязкость раствора нанокompозита.

Исследование структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов проводили на образцах пленок квадратной формы размерами 10×10×0,1 мм. Структуру образцов нанокompозитов изучали методом растровой электронной микроскопии.

Смешение и диспергирование раствора нанокompозита на основе анаэробного герметика Анатерм-111 проводили механизированной мешалкой. Вязкость раствора нанокompозита по завершении диспергирования определяли вискозиметром ВПЖ-2.

Образцы для инфракрасного нагрева: подшипниковые щиты электродвигателей серии 4А, корпуса коробок передач автомобилей ГАЗ-24 и ГАЗ-53 с изношенными подшипниковыми отверстиями. Подшипниковый щит, корпус коробки автомобиля ГАЗ-24 нагревали кварцевым инфракрасным излучателем (отражатель QTSR и лампа QTS мощностью 750 Вт). Корпус коробки автомобиля ГАЗ-53 нагревали излучателем QTS мощностью 1500 Вт и отражателем марки QTSR.

Исследовали калибрование покрытий трех составов: состав №1: Ф-40 – 100 масс.ч., НРЧ Al – 1,9 масс. ч., НРЧ Cu – 1,8 масс. ч.; состав №2: Ф-40С – 100 масс.ч., НРЧ Al – 0,09 масс. ч., НРЧ Cu – 0,03 масс. ч.; состав №3: Ф-40С – 100 масс.ч., НРЧ Al – 0,075 масс. ч.

Дефектность покрытий нанокompозита оценивали по ГОСТ 9407-84. Образцами являлись пленки и покрытия эластомерных нанокompозитов после УЗО, инфра-

красной обработки и калибрования. Оценочные параметры качества образцов: площадь разрушенного покрытия, размер и концентрация пор.

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 эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе (состав №1: Ф-40С – 100 масс.ч.; НРЧ Al – 0,075 масс.ч.; состав №2: Ф-40С – 100 масс.ч.; НРЧ Al – 0,09 масс.ч., НРЧ Cu – 0,03 масс.ч.).

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

Затем 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 0,125 мм.

Исследование ресурса подшипников качения с посадкой из нанокompозита проводили на стенде для испытания подшипников (патент № 2719624). За критерий долговечности подшипника приняли предельное значение радиального зазора.

Исследование долговечности посадок «корпус-подшипник», восстановленных нанокompозитом, проводили на вибростенде. За критерий долговечности посадки приняли наработку до начала сдвига наружного кольца подшипника в посадочном отверстии.

В третьей главе «Научные основы формирования эксплуатационных свойств полимерных нанокompозитов для восстановления посадочных мест подшипников качения в узлах техники» рассмотрены факторы, определяющие теплофизические свойства полимерных нанокompозитов, наполненных дисперсными металлическими наночастицами, проведен фрактальный анализ структуры полимерных нанокompозитов и рассмотрены их механические свойства, приведены регрессионные модели деформационно-прочностных свойств полимерных нанокompозитов.

Теплофизические свойства полимерных нанокompозитов, наполненных дисперсными металлическими наночастицами.

Термостойкость эластомерных нанокompозитов. Металлы переменной валентности могут быть катализаторами для одних и ингибиторами цепных радикальных процессов окисления для других видов каучука. Пиотровский К.Б. и Львов Ю.А. показали, что медь – это катализатор для натурального каучука, а для бутадиен-нитрильных каучуков (основа эластомера Ф-40С) – ингибитор процесса окисления. Для повышения термостойкости каучуков необходимо устранить слабые места в структуре материала и связать свободные радикалы, образующиеся при термораспаде. Наши исследования показали, что наночастицы меди и алюминия являются ингибиторами термоокисления эластомеров на основе бутадиен-нитрильных каучуков. Коэффициенты старения нанокompозита, наполненного наночастицами алюминия, по прочности в 1,17 раза, а по деформации в 1,2 раза больше аналогичных показателей не наполненного эластомера Ф-40С, у нанокompозита с наночастицами алюминия и меди, по прочности в 1,22 раза, а по деформации в 1,4 раза больше соответствующих показателей полимерной матрицы.

В сравнении с не наполненным эластомером Ф-40, коэффициенты старения нанокompозита, наполненного наночастицами алюминия и меди, по прочности увеличились в 1,8 раза, а по деформации – в 1,4 раза.

Теплостойкость эластомерных нанокompозитов. Теплостойкость полимерного материала определяет предельную допустимую температуру использования материала в условиях эксплуатации. Теплостойкость эластомера Ф-40С составляет 100°C. Теплостойкость, нанокompозита, наполненного наночастицами алюминия, увеличилась в 1,1 раза до 110°C. Теплостойкость нанокompозита, наполненного наночастицами алюминия и меди, увеличилась, в сравнении с матрицей, в 1,19 раза и составила 119°C. При взаимодействии полимера с частицей наполнителя имеет место «замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях и увеличение модуля упругости, что является причиной увеличения теплостойкости нанокompозитов, в сравнении с матрицей.

Теплопроводность полимерных нанокompозитов. Расчет теплопроводности полимерных нанокompозитов по известным формулам Оделевского, Миснара и Дульнева дает, в сравнении с фактическими, заниженные значения до 89 раз.

Для расчета коэффициента теплопроводности полимерных нанокompозитов в работе предлагается использовать формулы Бургера, с экспериментальным определением коэффициента C .

Формула Бургера для коэффициента теплопроводности λ_k двухкомпонентного полимерного композита

$$\lambda_k (\varphi_n + C\varphi_n) = \lambda_n \varphi_n + C\lambda_n \varphi_n, \quad (1)$$

где φ_n и φ_n – содержание полимера и наполнителя, масс.ч.; λ_n и λ_n – коэффициенты теплопроводности полимера и наполнителя, Вт/м²·К; C – коэффициент, $C = (\lambda_n / \lambda_n)^\alpha$.

Формула Бургера для коэффициента теплопроводности λ_k трехкомпонентного полимерного композита

$$\lambda_k [\varphi_n + C(\varphi_1 + \varphi_2)] = \lambda_n \varphi_n + C(\lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2), \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 , φ_1 и φ_2 – теплопроводность и объемное содержание наполнителей.

Экспериментально определяют коэффициент теплопроводности двух- и трехкомпонентных нанокompозитов при различном содержании наполнителей. Используя формулы (1) или (2) Бургера, рассчитывают для каждого состава коэффициент C и получают зависимость коэффициента C от содержания наполнителя φ_n , φ_1 и φ_2 , в виде функции $C = f(\varphi_n, \varphi_1, \varphi_2)$. В завершении функцию $C = f(\varphi_n, \varphi_1, \varphi_2)$ подставляют вместо коэффициента C в формулы (1) или (2).

Формулы Бургера, позволяют получить адекватные модели теплопроводности двухкомпонентных и трехкомпонентных нанокompозитов. Расхождение расчетных значений коэффициента теплопроводности с фактическими значениями в зависимости от содержания наполнителей составляет: для двухкомпонентных эластомерных нанокompозитов от 1,3 до 4,2%; трехкомпонентных от 0,7 до 6,3%.

Фрактальный анализ и деформационно-прочностные свойства полимерных нанокompозитов.

Увеличение модуля упругости полимерных нанокompозитов, наполненных дисперсными наночастицами. В соответствии с теорией перколяции степень усиления E_k/E_n полимерных нанокompозитов оценивают зависимостью

$$\frac{E_k}{E_n} = 1 + 11(\varphi_n + \varphi_{mf})^{1,7}, \quad (3)$$

где E_k и E_n – модули упругости композита и полимерной матрицы, Па; φ_{mf} – объемное содержание межфазных областей.

На поверхности наночастицы наполнителя, взаимодействующей с полимерной матрицей, образуется адсорбированный слой – межфазная область, которая имеет свойства, отличные от свойств полимерной матрицы.

В перколяционной и фрактальной моделях межфазные области, как и наночастицы, рассматривают как армирующий элемент в структуре полимерного нанокомпозита, повышающий его модуль упругости. Это обусловлено «замораживанием» молекулярной подвижности полимерной матрицы у поверхности наночастиц наполнителя.

Исследования Козлова Г.В., Заикова Г.Е. и Корнева Ю.В. показали, что в эластомерных нанокомпозитах, наполненных дисперсными наночастицами, образуется в среднем два межфазных слоя. Первый межфазный слой это результат взаимодействия поверхности наночастицы наполнителя с полимерной матрицей. Молекулярная подвижность в этом слое «заморожена», так как последний находится в стеклообразном состоянии. Второй межфазный слой формируется при взаимодействии стеклообразного межфазного слоя с полимерной матрицей.

Межфазный слой в полимерных композитах рассматривают как результат взаимодействия двух фракталов: полимерная матрица и поверхность наночастицы. Т.к. модуль упругости наполнителя многократно больше, чем у матрицы, взаимодействие фракталов сводится к внедрению поверхности наночастицы в матрицу. Поэтому расстояние взаимопроникновения фракталов составляет $l = l_{mf}$.

Толщину межфазного слоя определяли по формуле

$$l_{mf} \approx a \left(\frac{r_n}{a} \right)^{\frac{2(d-d_s)}{d}}, \quad (4)$$

где a – нижний линейный масштаб фрактального поведения, равный длине статистического сегмента l_{cm} ; r_n – радиус наночастицы наполнителя, нм; d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал, $d=3$; d_s – фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя.

Относительную объемную долю межфазных областей в нанокомпозите предлагается определять по формуле

$$\varphi_{mf} = (d_s - 2)\varphi_n \quad (5)$$

После подстановки формулы (5) в формулу (3) получены:

а) выражение, учитывающее наличие одного армирующего межфазного слоя и размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя

$$E_k = E_n \left\{ 1 + 11[\varphi_n (d_s - 1)]^{1,7} \right\} \quad (6)$$

б) выражение, учитывающее наличие двух армирующих межфазных слоев и размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя

$$E_k = E_n \left\{ 1 + 11[\varphi_n (2d_s - 3)]^{1,7} \right\} \quad (7)$$

Получили формулу для расчета модуля упругости нанокompозита на основе реактопласта (анаэробного герметика).

При течении тело подвержено сдвиговой деформации. При деформировании нанокompозита материал пребывает в вязкотекучем состоянии, для которого справедливо выполнение условия

$$\frac{\eta_k}{\eta_n} = \frac{G_k}{G_n}, \quad (8)$$

где η_k и η_n – вязкость полимерного композита и матрицы соответственно, Па·с; G_k и G_n – модули сдвига полимерного нанокompозита и матрицы соответственно, Па.

В работе Заикова Г.Е. вязкость композита на основе олигомера, наполненного частицами технического углерода, определяют по уравнению

$$\frac{\eta_k}{\eta_n} = 1 + \frac{2,5\varphi_n}{1-\varphi_n} \quad (9)$$

Формула (9) справедлива для анаэробных герметиков, которые как и олигомеры, относятся к реактопластам.

После подстановки (8) в (9) получили формулу расчета модуля жесткости (сдвига) анаэробного нанокompозита

$$G_k = G_n \left(1 + \frac{2,5\varphi_n}{1-\varphi_n}\right) \quad (10)$$

Анаэробный нанокompозит приняли изотропным. В виду того, что при восстановлении неподвижных соединений «вал-подшипник» толщина клеевого шва не превышает 0,05...0,075 мм, вполне справедливо допущение, что зависимость деформации нанокompозита от прилагаемой к нему нагрузки линейная. В таком случае справедливо выражение

$$G = \frac{E}{2 + 2\mu}, \quad (11)$$

где G и E – модули сдвига и Юнга материала, Па; μ – коэффициент Пуассона.

Выражение (11) подставили в формулу (10) и после преобразования получили

$$\frac{E_k}{2 + 2\mu_k} = \frac{E_n}{2 + 2\mu_n} \left(1 + \frac{2,5\varphi_n}{1-\varphi_n}\right), \quad (12)$$

где E_k и E_n – модули упругости нанокompозита и полимерной матрицы, Па; μ_k и μ_n – коэффициенты Пуассона нанокompозита и полимерной матрицы.

Вполне справедливо и достаточно достоверно допущение о равенстве коэффициентов Пуассона анаэробного герметика и нанокompозита на его основе.

При этом условии выражение (12) получит следующий вид

$$E_k \approx E_n \left(1 + \frac{2,5\varphi_n}{1-\varphi_n}\right) \quad (13)$$

По аналогии с формулами (3) и (5) для расчета модуля упругости эластомерного нанокompозита и объемной доли межфазных областей получены формулы аналогичные формулам (6) и (7):

а) формула расчета модуля упругости анаэробного нанокompозита, учитывающая наличие одного армирующего межфазного слоя и размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя

$$E_k \approx E_n \left[1 + \frac{2,5\varphi_n (d_s - 1)}{1 - \varphi_n (d_s - 1)} \right], \quad (14)$$

б) формула расчета модуля упругости анаэробного нанокompозита, учитывающая наличие двух армирующих межфазных слоев и размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя

$$E_k \approx E_n \left[1 + \frac{2,5\varphi_n (2d_s - 3)}{1 - \varphi_n (2d_s - 3)} \right] \quad (15)$$

Получены и предложены формулы (6), (7), (14) и (15) для расчета модуля упругости наполненных эластомеров и реактопластов. В этих формулах учтены деформационно-прочностные свойства полимерной матрицы E_n , объемное содержание φ_n и фрактальная размерность поверхности наночастиц наполнителя d_s .

Фрактальный анализ поверхности наночастиц и структуры полимерных нанокompозитов. *Классификация дисперсных наполнителей.* Наполнители делят по размерам наночастиц на 4 класса: разбавляющие наполнители (размеры частиц в диапазоне 10000-1000 нм), полуусиливающие – в диапазоне 1000-100 нм, усиливающие – в диапазоне 100-35 нм, суперусиливающие – в диапазоне 35-10 нм. Размер наночастиц алюминия и меди в нанокompозитах, предназначенных для восстановления посадочных мест подшипников, составляет 70 нм (ТУ 1791-003-36280340-2008). Степень усиления E_k/E_n в зависимости от содержания наполнителей составляет от 1,3 до 2,02. Поэтому можно сделать вывод, что наночастицы алюминия и меди следует отнести к усиливающим наполнителям.

Фрактальная размерность поверхности наночастиц наполнителя. Фрактальный анализ применяли к структуре трех нанокompозитов на основе эластомера Ф-40С: состав №1 (Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы алюминия – 0,075 масс.ч.); состав №2 (Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы алюминия – 0,09 масс.ч. и меди – 0,03 масс.ч.); состав №3 (Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы меди – 0,1 масс.ч.).

Фрактальная размерность поверхности наночастиц наполнителя d_s зависит от удельной поверхности S_u и размера наночастицы D_u , а также определяет степень усиления композита E_k/E_n и относит рассматриваемый наполнитель к конкретному типу (разбавляющие, полуусиливающие, усиливающие наполнители).

Величину d_s определили из формулы

$$E_k / E_n = 18 \left[1 - (d - d_s)^{1,7} \right]. \quad (16)$$

где d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал, $d=3$; E_k и E_n – модули упругости композита и матрицы соответственно, Па.

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований модуля упругости на растяжение $E_{кр}/E_{np}$ и фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя d_s .

В фрактальном анализе полимерных композитов частицы наполнителя характеризуются двумя важными характеристиками: фрактальной размерностью поверхности частиц d_s и фрактальной размерностью структуры частиц d_f .

В работе Микитаева А.К. фрактальную размерность поверхности частиц сажи d_s , используемую в качестве наполнителя эластомеров, определяют из уравнения

$$S_u = 410 \left(\frac{D_q}{2} \right)^{d_s-d} = K \left(\frac{D_q}{2} \right)^{d_s-d}, \quad (17)$$

где K – поправочный коэффициент, $K = 410$; S_u – удельная поверхность наночастиц, $\text{м}^2\text{г}^{-1}$; D_q – диаметр наночастиц, нм.

Таблица 1 – Экспериментальные значения модуля упругости и расчетные значения фрактальной размерности поверхности наночастиц наполнителя

№ п/п	Состав нанокompозита	Степень усиления, $E_{кр}/E_{нр}$	Фрактальная размерность поверхности наночастиц d_s
1	Эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы Al – 0,075 масс.ч.	1,96	2,17
2	Эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы Al – 0,09 масс.ч. и Cu – 0,03 масс.ч.	2,025	2,18
3	Эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы Cu – 0,1 масс.ч.	2,22	2,2

Расчет величины d_s по формуле (17) показал для наночастиц алюминия недопустимое значение $d_s=3,3$, т.е. поправочный коэффициент $K = 410$, принятый для саж, не корректен для металлических наночастиц. Используя паспортные данные производителя нанопорошков и расчетные величины d_s , определенные по формуле (16), внесены изменения в формулу (17).

Формула (17) получила вид

$$S_u = 220 \left(\frac{D_q}{2} \right)^{d_s-d} \quad (18)$$

Фрактальную размерность структуры наночастиц наполнителя эластомерного нанокompозита d_f определяли из формулы

$$\rho = \rho_{нл} \left(\frac{D_q}{2a} \right)^{d_f-d}, \quad (19)$$

где ρ и $\rho_{нл}$ – плотность фрактального агрегата и плотность компактных частиц в состоянии упаковки.

Плотность фрактального агрегата ρ определили по формуле

$$\rho = \frac{M}{V_q \times N_A}, \quad (20)$$

где M – молекулярная масса наполнителя; V_q – объем частицы наполнителя, $V_q = 146,53 \cdot 10^{-27} \text{м}^3$; N_A – число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$.

Фрактальная размерность d_f^k – это основная структурная характеристика, которая описывает распределение элементов структуры в пространстве.

Величину d_f^k можно определяли по формуле

$$d_f^k = (d-1)(1+\nu) \quad (21)$$

Значения коэффициента Пуассона для эластомерных нанокompозитов: $\nu_{Al}^k = 0,45$; $\nu_{Al+Cu}^k = 0,44$.

Объемную долю межфазных слоев в нанокompозите φ_{mf} рассчитали по формуле

$$\varphi_{mf} = \varphi_n \left[\left(\frac{R}{r_c} \right)^3 - 1 \right], \quad (22)$$

где φ_n – объемная доля наполнителя; r_c – радиус частицы наполнителя, $r_c = 35 \text{ нм}$.

Величину R рассчитали по формуле

$$R = \frac{D_c}{2} + \ell_{mf}, \quad (23)$$

где ℓ_{mf} – толщина межфазного слоя, $\ell_{mf} \cong a \left(\frac{D_c}{2a} \right)^{2(d-d_s)/d}$, нм.

Формирование химических связей «полимер-наполнитель». Химическая реакция двух структурных объектов возможна, когда их структура обеспечивает сближение реакционноспособных центров на расстояние, достаточное для протекания реакции. С увеличением шероховатости поверхности наночастиц d_s и длины статистического сегмента полимера l_{cm} ухудшаются условия для сближения реакционноспособных центров на расстояние, необходимое для протекания реакции.

Фрактальный объект имеет сложную структуру, которая включает узкие щели («фиорды»), поры и др., в которые доступ молекул полимера ограничен или невозможен. Сложность структуры оценивают размерностью «неэкранированной» (доступной для адсорбции) поверхности частиц наполнителя d_u , которую можно рассчитать по формуле

$$d_u = (d_s - 1) + \frac{d - d_s}{d_w}, \quad (24)$$

где d_w – размерность траекторий макромолекул каучука (основа эластомера Ф-40С), $d_w = 2$ (броуновское движение).

Следует отметить, что с увеличением более $d_u > 1,50$ эффективная размерность «неэкранированной» поверхности частиц $d_u^{\text{эф}}$ уменьшается.

$$d_u^{\text{эф}} = 2 - d_u \quad (25)$$

Вероятность формирования химических связей полимер-наполнитель определяется структурой поверхности частиц наполнителя и макромолекул каучука. Основные физические факторы, определяющие реакционную способность частиц наполнителя это: эффективная размерность «неэкранированной» поверхности частиц наполнителя $d_u^{\text{эф}}$, жесткость полимерной цепи, определяемая длиной статистического сегмента l_{cm} и площадью поперечного сечения макромолекулы S .

Для расчета длины статистического сегмента l_{cm} использовали зависимость

$$E_k / E_n = 1 + 0,32 \ell_{cm} \sqrt{W_c}, \quad (26)$$

где W_c – массовое содержание наполнителя, масс.ч.

После преобразования формула (26) получила вид

$$\ell_{cm} = \frac{\left(\frac{E_k}{E_n} - 1 \right)}{0,32 \sqrt{W_c}} \quad (27)$$

Показатель статистической гибкости полимерной цепи нанокompозитов рассчитали по формуле

$$C_{\infty} = \frac{2d_f^k}{d(d-1)(d-d_f^k)} + 4/3 \quad (28)$$

Длина скелетной связи основной цепи определена из зависимости

$$l_0 = \frac{l_{cm}}{C_{\infty}} \quad (29)$$

Фрактальная размерность участка полимерной цепи его фиксации (кластерами, физическими зацеплениями, узлами химической сшивки и т.п.)

$$D_u = \frac{\ln(\lambda_p * C_{\infty})}{\ln C_{\infty}} \quad (30)$$

где λ_p – предельная степень вытяжки нанокompозита.

Характеристики структуры эластомерных нанокompозитов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики структуры эластомерных нанокompозитов

W_c / φ_n	$E_{кр}/E_{нр}$	d_s	d_f	d_f^k	$l_{мф}, нм$	$\varphi_{мф}$	$l_{ст}, нм$	C_{∞}	l_0, A	d_u	$d_u^{\text{эф}}$	D_u
Состав №1: Ф-40С+Al												
0,075/0,02	1,96	2,17	2,77	2,9	20,7	0,07	10,9	10,9	1,0	1,58	0,42	1,51
Состав №2: Ф-40С+Al+Cu												
0,12/0,0236	2,02	2,18	2,82	2,88	18,5	0,073	8,54	9,3	0,92	1,59	0,41	1,53

В соответствии с высокими значениями размерности «неэкранированной» поверхности наночастиц наполнителей $d_u^{Al-\text{эф}}=0,42$ и $d_u^{Al+Cu-\text{эф}}=0,41$ можно сделать вывод о достаточно высокой реакционной способности наночастиц алюминия и меди при взаимодействии с раствором эластомера Ф-40С.

Из формулы (3) следует, что с увеличением объема межфазной доли $\varphi_{мф}$ увеличивается степень усиления нанокompозита $E_{кр}/E_{нр}$, поэтому нанокompозит состава №2 имеет более высокое значение модуля упругости, чем состав №1.

Исследование текучести эластомерных нанокompозитов с использованием фрактального анализа. Применительно к пластичным материалам предел текучести σ_m является важной эксплуатационной характеристикой. При постоянном напряжении σ_m материал продолжает деформироваться. Поэтому предел текучести σ_m определяет верхний предел напряжений в условиях эксплуатации. Предел текучести на сдвиг нанокompозита τ_m^k рассчитали по формуле

$$\tau_m^k = \tau_n + \frac{G_k b_B}{\lambda_u}, \quad (31)$$

где τ_n – предел текучести на сдвиг полимерной матрицы, Па; G_k – модуль сдвига нанокompозита, Па; b_B – вектор Бюргерса, нм; λ_u – расстояние между наночастицами в композите, нм.

Для определения предела текучести на сдвиг полимерной матрицы τ_n и предела текучести нанокompозита σ_m^k использовали следующее соотношение между нормальным напряжением σ и напряжением сдвига τ

$$\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad (32)$$

Модуль сдвига нанокompозита G_k определили, используя соотношение

$$G_k = \frac{E_k}{d_f^k}, \quad (33)$$

где E_k – модуль упругости композита; d_f^k – фрактальная размерность структуры композита.

Вектор Бюргерса рассчитали по уравнению

$$b_B = \left(\frac{60,5}{C_\infty} \right)^{1/2} \quad (34)$$

Расстояние между наночастицами в композите определили из зависимости

$$\lambda_q = \left[\left(\frac{4\pi}{3\varphi_n} \right)^{1/3} - 2 \right] * \frac{D_q}{2} \quad (35)$$

Наполнение эластомера Ф-40С наночастицами алюминия (состав №1) увеличивает предел текучести материала, по сравнению с матрицей, в 1,11 раза (от 14,1 до 15,7 МПа), предел текучести трехкомпонентного нанокompозита (состав №2) – в 1,14 раза (от 14,1 до 16,1 МПа). Увеличение предела текучести нанокompозитов обусловлено повышением их модуля упругости, в сравнении с матрицей.

Прочность полимерных нанокompозитов. Липатов выделил основные причины усиления эластомерных композитов: 1) особенности химической природы полимера и сильное межмолекулярное взаимодействие его с поверхностью частиц наполнителя; 2) образование вторичных структур частицами наполнителя; 3) перестройка при деформации молекулярной структуры наполненного материала без его разрушения; 4) разрушение структуры сетки - разрыв связей наполнитель-полимер или поперечных связей молекулярной сетки.

Алюминий обладает наиболее высокой удельной поверхностной энергией разрушения. Использование наночастиц алюминия в качестве наполнителя полимерных материалов повышает энергию разрушения, прочность, трещиностойкость и выносливость композитов. Наполнение эластомера Ф-40С дисперсными, алюминиевыми наночастицами увеличивает прочность нанокompозита в 1,53 раза, до $\sigma=21,64\text{МПа}$, алюминиевыми и медными наночастицами в 1,68 раза, до $\sigma=23,75\text{МПа}$, в сравнении с не наполненным эластомером.

Прочность эластомерного нанокompозита, наполненного дисперсными частицами, авторы в работе Микитаева, предлагают определять по основному уравнению фрактальной теории высокоэластичности

$$\sigma = \frac{E}{1+2\nu+4\nu^3} \left[\lambda_{\text{мол}}^{1+2\nu} - 2\nu\lambda_{\text{мол}}^{1-2\nu(1+\nu)} - (1-2\nu)\lambda_{\text{мол}}^{-2\nu} \right], \quad (36)$$

где E и ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона композита; $\lambda_{\text{мол}}$ – молекулярная кратность вытяжки.

Коэффициент Пуассона можно рассчитать по зависимости

$$\nu = \nu_n (1 - \varphi_n) + \nu_n \varphi_n,$$

где ν_n и ν_n – коэффициенты Пуассона полимера и наполнителя, коэффициент Пуассона полимера (каучука) $\nu_n=0,5$; для алюминия и меди равен 0,34.

Молекулярную кратность вытяжки определяют по формуле

$$\lambda_{\text{мол}} = \frac{\lambda}{1 - \varphi_n},$$

где λ – локальная (номинальная) кратность вытяжки, $\lambda = 1 + \varepsilon$.

Величину λ можно определить по зависимости

$$\lambda = 1 + \varepsilon,$$

где ε – деформация материала.

Анализ формулы (36) показал, что член формулы $\lambda_{\text{мол}}^{1+2\nu}$ требует корректировки, потому что при любых реально возможных значениях E и $\lambda_{\text{мол}}$ формула завышает расчетное значение прочности до $\sigma=1534\text{МПа}$, т.е. на два порядка (около 100 раз). Предлагается заменить вышеуказанный член формулы (36) на выражение $\lambda_{\text{мол}}^{-2\nu}$. Формула прочности получила следующий вид

$$\sigma = \frac{E}{1 + 2\nu + 4\nu^3} [2\nu(\lambda_{\text{мол}}^{-2\nu} + \lambda_{\text{мол}}^{-1-2\nu(1+\nu)})] \quad (37)$$

Предложена формула (37) для расчета прочности эластомерных нанокомпозитов. Расхождение расчетных значений прочности с фактическими не превышает 14%.

Прочность анаэробных нанокомпозитов. В полимерных микрокомпозитах и нанокомпозитах наблюдается различный механизм структурообразования, чем объясняется значительное изменение ряда свойств композитов, в частности, степени усиления. При сближении двух наночастиц до расстояния меньше суммарной толщины адсорбционных (межфазных) слоев, между ними происходит зацепление «петель» (межфазных слоев). Благодаря такому взаимодействию прочность нанокомпозита повышается.

Прочность анаэробного нанокомпозита, который представлен, как упругоизотропное твердое тело, можно рассчитать по формуле Гриффита, преобразованной Орованом и Ирвином

$$\sigma_F = Y \sqrt{2E\gamma_F / c}, \quad (38)$$

где σ_F – разрушающее напряжение, Па; Y – геометрическая константа, зависящая от формы и размеров образца; γ_F – удельная поверхностная энергия разрушения (энергия, поглощаемая в процессе образования единицы новой поверхности при росте трещины); c – длина трещины.

Наполнение наночастицами полимерной матрицы приводит к появлению микротрещин размером значительно меньше критического. С увеличением количества таких микротрещин требуется большее количество внешней энергии для разрушения образца. Поэтому прочность и выносливость анаэробного нанокомпозита, увеличиваются в сравнении с микрокомпозитом и матрицей.

Если в полимерную матрицу вводить активный наполнитель с большей поверхностной энергией разрушения, энергия разрушения композита, по сравнению с матричным полимером, увеличится.

На поверхности наночастиц наполнителя образуется межфазный слой полимера с пониженной молекулярной подвижностью. Наличие таких межфазных областей увеличивает модуль упругости материала и, в соответствии с (38), повышает прочность композита.

Металлические наночастицы взаимодействуя с полимерной матрицей могут принимать активное участие в процессах сшивания, образовывать дополнительные узлы или центры структурообразования, вокруг которых возникают ориентированные слои полимерной матрицы с плотной упаковкой входящих в нанокompозит компонентов. Такие узлы выдерживают экстремальные условия эксплуатации без разрушения. Поэтому наполнение анаэробных герметиков металлическими наночастицами позволит сократить время отверждения, увеличить прочность и долговечность нанокompозитов.

Прочность клеевых соединений нанокompозита на основе анаэробного герметика АН-111, при содержании наночастиц алюминия 0,075 масс.ч., в 1,23 раза превышает аналогичный параметр матрицы. При большем содержании наполнителя прочность нанокompозита снижается из-за агрегирования наночастиц.

Деформация и выносливость полимерных нанокompозитов. Деформация определяет существенным образом выносливость материала, деформацию колец подшипника и, соответственно контактные напряжения, виброактивность подшипникового узла при циклическом нагружении и др. При наполнении полимера микрочастицами прочность увеличивается, но при этом снижается деформация композита. Эта закономерность нарушается при наполнении полимерных материалов наночастицами. Увеличение пластичности полимерных нанокompозитов, наполненных дисперсными наночастицами и УНТ, отмечено в работах Микитаева и Елецкого.

Наполнение анаэробного герметика АН-111 наночастицами алюминия увеличивает деформацию материала. В сравнении с матрицей с деформацией $\varepsilon=8,5\%$, при содержании наполнителя m_n от 0,025 до 0,075 масс.ч., деформация увеличилась от 1,06 до 1,2 раза, до значения $\varepsilon=10,2\%$. При дальнейшем повышении содержания наночастиц деформация снижается.

Наполнение эластомера Ф-40С алюминиевыми наночастицами приводит также к увеличению деформации материала. В сравнении с матрицей с деформацией $\varepsilon=171\%$, при объемном содержании наполнителя φ_n от 0,0066 до 0,02, деформация увеличилась от 1,11 до 1,4 раза, до значения $\varepsilon=240\%$. При дальнейшем повышении содержания наночастиц деформация снижается.

В нанокompозите эластомера Ф-40С, наполненном наночастицами алюминия и меди, при содержании наночастиц φ_n от 0,0133 до 0,0236 деформация ε , в сравнении с матрицей, увеличилась от 1,2 до 1,34 раза, до значения $\varepsilon=230\%$. При дальнейшем повышении содержания наночастиц деформация снижается.

В эластомерных нанокompозитах, наполненных дисперсными наночастицами, образуются от одного до трех межфазных слоев. Первый межфазный слой, сформированный на поверхности наночастицы, имеет «замороженную» молекулярную подвижность и его поверхность можно принять гладкой в атомном масштабе. Тогда в результате взаимодействия этого слоя с матричным полимером, на наружной поверхности первого слоя макромолекулы растягиваются и образуется второй

плотнупакованный межфазный слой с измененными, по сравнению с объемной полимерной матрицей, молекулярными и структурными характеристиками. Этот межфазный слой является причиной увеличения деформации композита. Таким же образом взаимодействуют второй межфазный слой с матричным полимером и образуется третий межфазный слой.

Выносливость. Известно, что материал, требующий большую работу разрушения, обладает более высокой стойкостью к воздействию циклических нагрузок, большей выносливостью и, соответственно, долговечностью. Наполнение эластомера Ф-40 алюминиевыми и медными наночастицами увеличивает, в сравнении с не наполненным эластомером, удельную работу разрушения в 1,55 раза, до $\alpha_p = 13,0 \text{ МДж/м}^3$. Причиной являются более высокая прочность и деформация нанокompозита.

Наибольшее значение удельной работы разрушения имеет нанокompозит эластомера Ф-40С, наполненный наночастицами алюминия (состав №1) $\alpha_p = 52,95 \text{ МДж/м}^3$, алюминия и меди (состав №2) – $\alpha_p = 42,19 \text{ МДж/м}^3$. В сравнении с матрицей ($\alpha_p = 27,2 \text{ МДж/м}^3$) увеличение в 1,94 и 1,55 раза соответственно. Наполнение эластомеров дисперсными наночастицами алюминия и меди существенно повышает выносливость и долговечность материала.

Наночастицы активного наполнителя, помимо высокой удельной поверхности, имеют высокую адсорбционную способность. Адсорбция на поверхности наночастиц сегментов макромолекул вызывает деформацию молекулярного клубка и ориентацию нефиксированных сегментов из поверхности наночастицы в направлении объема полимерной матрицы. В итоге образуется упорядоченный, плотно упакованный и частично ориентированный межфазный слой полимера с «замороженной» молекулярной подвижностью, повышенной прочностью и выносливостью. С повышением содержания алюминиевых наночастиц удельная работа разрушения увеличивается. В сравнении с не наполненным герметиком АН-111 с удельной работой разрушения $\alpha_p = 71,2 \text{ МДж/м}^3$, величина α_p увеличилась до 1,28 раза, при массовом содержании наполнителя $m_n = 0,075 \text{ масс.ч.}$ и составила $\alpha_p = 91,4 \text{ МДж/м}^3$. При дальнейшем повышении содержания наночастиц наполнителя величина α_p снижается, что объясняется агрегированием наночастиц.

Регрессионные модели деформационно-прочностных свойств полимерных нанокompозитов. Оптимизация режима термической обработки эластомера Ф-40С наполненного алюминиевыми наночастицами. Реализован активный эксперимент по плану В₂ и получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита эластомера Ф-40С, наполненного алюминиевыми наночастицами, от температуры и времени термообработки в натуральных единицах.

$$U = -1790,77 + 24,4615x_1 + 102,605x_2 + 0,0135x_1x_2 - 0,0885x_1^2 - 17,785x_2^2 \quad (39)$$

Поверхность отклика и ее двумерное сечение представлены на рисунках 1 и 2.

Определен оптимальный режим термической обработки эластомерного нанокompозита: температура $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, время $t = 3 \text{ ч}$, при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства. $\alpha_p = 52 \text{ МДж/м}^3$.

Оптимизация состава эластомерного нанокompозита Ф-40С, наполненного алюминиевыми и медными наночастицами. Реализован активный эксперимент по плану В₂ и получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита эластомера Ф-40С от содержания алюминиевых и медных наночастиц в натуральных единицах.

$$Y = -1,3624 + 816,2925X_1 + 286,79X_2 + 487,5X_1X_2 - 4387,5X_1^2 - 4950X_2^2 \quad (40)$$

Определен оптимальный состав нового эластомерного нанокompозита: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,09 масс.ч.; медный нанопорошок – 0,03 масс.ч., при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства, $\alpha_p = 42,0 \text{ МДж/м}^3$.

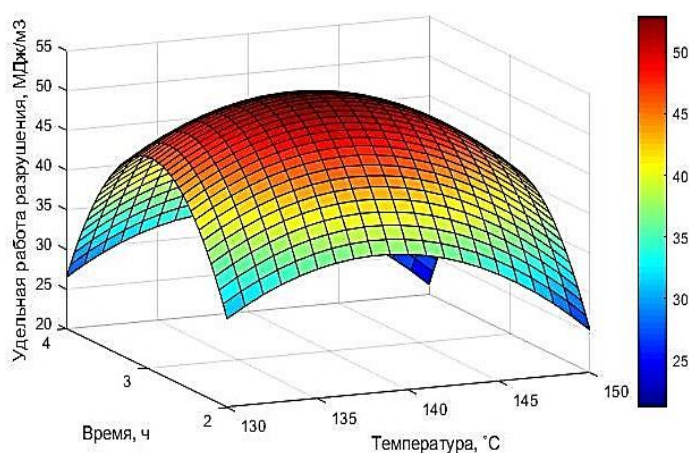


Рисунок 1 – Зависимость удельной работы разрушения α_p пленок эластомерного нанокompозита от температуры T и времени t отверждения

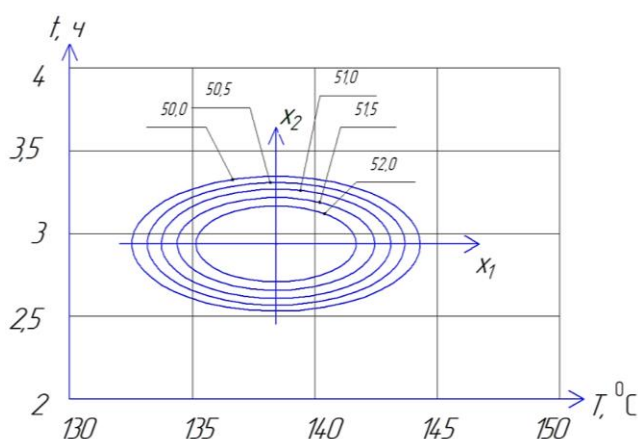


Рисунок 2 – Двумерное сечение поверхности отклика

Таким образом в третьей главе представлена методология исследования и выбора, на основе фрактального анализа, наночастиц наполнителей, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокompозитов, оптимизации их состава и условий отверждения.

В четвертой главе «Технологическое обеспечение восстановления посадочных мест подшипников качения полимерными нанокompозитами» приведены результаты исследования диспергирования растворов полимерных нанокompозитов ультразвуковым и механизированным способами, математические модели инфракрасного нагрева корпусных деталей с полимерными покрытиями, исследования обработки резанием эластомерных покрытий, трибологических параметров и ресурса подшипников с полимерными посадками, долговечности посадок подшипников при циклическом нагружении, восстановленных полимерными нанокompозитами.

Диспергирование растворов полимерных нанокompозитов. Диспергирование растворов эластомерных нанокompозитов ультразвуковой обработкой.

Для определения параметров УЗО растворов эластомерных нанокompозитов экспериментально исследовали физические свойства двух составов: состав №1:

Ф-40С – 100 масс.ч, наночастицы алюминия – 0,075 масс.ч.; состав №2: Ф-40С – 100 масс.ч., наночастицы алюминия 0,09 масс.ч.; меди – 0,03 масс.ч.

С увеличением содержания металлических наночастиц в растворе плотность и скорость звука в составах №1 и №2 увеличивается, что повышает звуковое давление P_a . Коэффициент адиабатической сжимаемости уменьшается, что также увеличивает величину P_a , и, соответственно критерий эрозионной активности.

С повышением содержания наполнителя давление насыщенного пара в растворе эластомерного нанокompозита уменьшается, что вызывает увеличение критерия эрозионной активности и повышение интенсивности диспергирования растворов нанокompозитов.

Исследование режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования растворов эластомерных нанокompозитов. При ультразвуковом диспергировании температура раствора эластомерного нанокompозита состава №2 достигает 45°C, что в сравнении с составом №1, на 3°C выше, т.е. в 1,07 раза. Более высокая температура объясняется большим в 1,24 раза значением критерия эрозионной активности χ , более активным протеканием кавитации.

После УЗО количество испарившегося ацетона в составах №1 и №2, в сравнении с ручным (8 и 9 г), больше в 2,25 и 2,22 раза (18 и 20 г) соответственно.

Определен рациональный режим УЗО эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2: мощность озвучивания $N = 55$ Вт; время обработки $t = 6$ мин.

Качество покрытий из эластомерных нанокompозитов после УЗО. Ультразвуковая обработка растворов эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2, в сравнении с ручным смешением, снижает дефектность и повышает качество полимерных покрытий: размер пор уменьшается до 1,4 раза, площадь разрушенного покрытия уменьшается до 1,4 раза, а концентрация пор снижается до 1,42 раза.

Исследование структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после УЗО. С повышением содержания наполнителей в композите размеры агрегатов наночастиц увеличиваются. Агрегат имеет рыхлую, неоднородную структуру, в которой превалирует углерод с вкраплениями частиц алюминия и меди. УЗО, в сравнении с ручным смешением, уменьшает многократно от 2,05 до 3,6 раза размеры агрегатов и выравнивает их по размерам.

Исследование эффективности смешения и диспергирования раствора нанокompозита на основе анаэробного герметика Анатерм-111 механизированным способом. Оценочным параметром качества смешения и диспергирования раствора анаэробного нанокompозита приняли вязкость материала. Чем больше эта величина, тем более равномерно распределены частицы наполнителя в объеме раствора эластомера. В качестве переменных факторов приняли: время обработки t и частоту вращения рабочего органа мешалки n . При времени обработки $t = 3 \dots 5$ мин и частоте вращения $n = 1100$ мин⁻¹, значения вязкости увеличиваются в 1,5 раза от 3,86 до 5,77 Па·с. При большем времени обработки значения вязкости стабилизируются. Поэтому, при данной скорости, временем механизированной обработки приняли $t = 5$ мин. Увеличение частоты вращения мешалки с 1100 до 1490 мин⁻¹ уменьшает время обработки материала в 1,67 раза, с 5 до 3 мин. Поэтому при изготовлении нанокompозита на основе герметика АН-111 ре-

комендуется следующий режим механизированной обработки: частота вращения мешалки $n = 1490 \text{ мин}^{-1}$, время обработки материала $t = 3 \text{ мин}$.

Математические модели инфракрасного нагрева корпусных деталей с полимерными покрытиями. Математическая модель инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей. Уравнение баланса мощности инфракрасного излучения при нагреве тела в произвольный момент времени можно записать в виде

$$q_{изл} = q_1 + q_2 + q_3, \quad (41)$$

где $q_{изл}$ – мощность инфракрасного излучения, полученная телом от излучателя; q_1 – мощность, отдаваемая на лучеиспускание нагретым телом; q_2 – мощность, отдаваемая телом при свободном конвективном теплообмене с внешней средой в условиях неограниченного пространства; q_3 – мощность, расходуемая на нагрев тела.

В соответствии с законом Стефана-Больцмана для серого тела величину q_1 рекомендуется определять по формуле

$$q_1 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F, \quad (42)$$

где ε – степень черноты серого тела, для чугуна $\varepsilon = 0,60 \dots 0,70$; C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; T – абсолютная температура тела, К; F – площадь поверхности тела, м^2 .

В соответствии с законом Ньютона-Рихмана величину q_2 рекомендуется рассчитывать по формуле

$$q_2 = k(T - T_0)F, \quad (43)$$

где k – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_0 – температура окружающей среды, К.

Мощность, расходуемую на нагрев тела q_3 , рекомендуется определять по зависимости

$$q_3 = C_v m \frac{dT}{d\tau}, \quad (44)$$

где C_v – изохорная теплоёмкость тела, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; m – масса тела, кг; $dT/d\tau$ – скорость роста температуры тела, $\text{К}/\text{с}$; τ – время, с.

После подстановки (42)...(44) в формулу (41) получили выражение

$$q_{изл} = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F + k(T - T_0)F + C_v m \frac{dT}{d\tau}. \quad (45)$$

Для заданных неизменных условий нагрева ввели константу нагревания

$$H = \frac{C_v m}{kF + \frac{\varepsilon C_0 F}{25} \left(\frac{T}{100} \right)^3} = const. \quad (46)$$

Далее получили формулу для определения температуры тела в установившемся режиме нагрева $T_{уст}$

$$T_{уст} = T_0 + \frac{Hq_{изл}}{C_v m}. \quad (47)$$

Коэффициент теплоотдачи тела k , при установившемся режиме нагрева получили, используя зависимость (46)

$$k = \frac{\frac{q_{\text{изл}}}{F} - \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4}{T_{\text{уст}} - T_0}. \quad (48)$$

Получена формула для определения времени нагрева тела τ до заданной температуры T

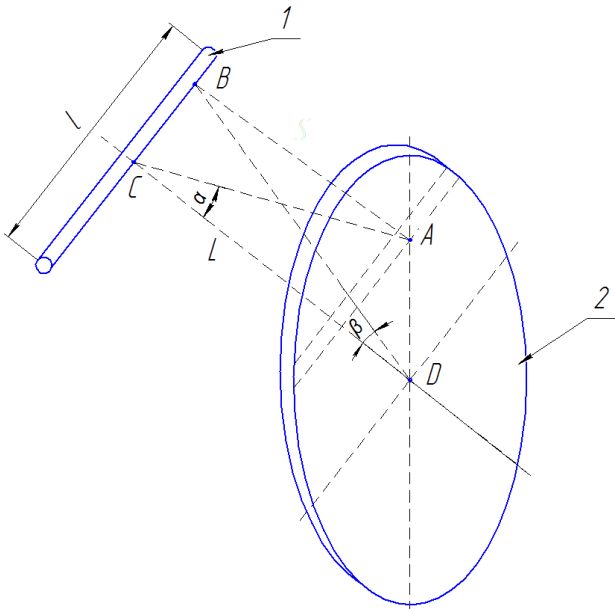
$$\tau = H \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}} \right). \quad (49)$$

где \dot{T}_0 – скорость роста температуры корпусной детали, К/с.

Получена формула для расчета потребной мощности инфракрасного излучения от ИК-излучателя

$$q_{\text{изл}} = \frac{4Q_{\text{изл}}\eta\varepsilon}{\varphi l} \int_0^{\alpha_0} \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - (L \operatorname{tg} \alpha)^2}}{\cos \alpha} d\alpha \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (50)$$

где η – КПД излучателя; $Q_{\text{изл}}$ – электрическая мощность излучателя, Вт; l – длина излучателя, м; φ – угол рассеивания отражателя; D – диаметр щита, м.



1 – инфракрасный излучатель; 2 – подшипниковый щит; т. А – точка на элементарной площадке $d\delta$ подшипникового щита; т. В и С – точки на элементарных участках излучателя; т. D – центр оси вращения подшипникового щита; $\angle \alpha$ – угол падения инфракрасного луча на поверхность щита в вертикальной плоскости, $0 \leq \angle \alpha \leq \alpha_0$; $\angle \beta$ – угол обзора точечных источников инфракрасного излучения из центра подшипникового щита в горизонтальной плоскости, $0 \leq \angle \beta \leq \beta_0$; L – расстояние от инфракрасного излучателя до подшипникового щита; l – длина инфракрасного излучателя

Рисунок 3 – Инфракрасный нагрев подшипникового щита (к формуле (50))

На основе разработанной математической модели инфракрасного нагрева корпусных деталей разработана блок-схема расчета. С использованием блок-схемы и

среды разработки *Lazarus (Free Pascal)* получена компьютерная программа расчета конструктивных и режимных параметров установки инфракрасной сушки полимерных покрытий в подшипниковых щитах.

Для оценки корректности полученной математической модели, метода и компьютерной программы расчета проведен контрольный эксперимент. Относительная погрешность в определении температуры составила от 1,6% до 4,3%, относительная погрешность в определении времени нагрева – от 3,9 до 5,3%.

Математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей трансмиссии автотракторной техники. На основе полученной математической модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей разработана математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей автомобилей и тракторов. Корпусную деталь коробки передач автомобиля представили как пустотелый короб, с двумя боковыми, одной нижней и двумя торцевыми стенками.

Уравнение баланса теплового потока для картера коробки передач можно представить в следующем виде

$$q_{изл} = q_{щлуч} + q_{стлуч} + q_{щконв} + q_{стконв} + q_M + q_m, \quad (51)$$

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

Величины $q_{щлуч}$, $q_{щконв}$ и q_M следует рассчитывать по формулам (42), (43) и (44).

В результате проведенных теоретических исследований получены формулы остальных членов формулы (51)

$$q_{стлуч} = \int_{F_{ст}} \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 dF_{ст}, \quad (52)$$

где $T_{ст}$ – температура нижней и боковых стенок, К; $F_{ст}$ – суммарная площадь нижней и боковых стенок, м².

$$q_{стконв} = \int_{F_{ст}} k_{ст} (T_{ст} - T_0) dF_{ст}, \quad (53)$$

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

$$q_m = \int_m c_v \frac{dT_{ст}}{dt} dm, \quad (54)$$

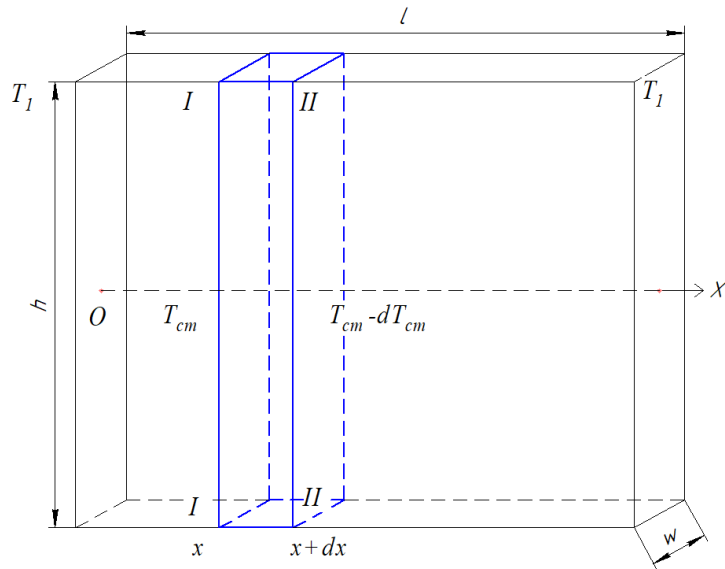
где m – суммарная масса нижней и боковых стенок, кг.

Боковую стенку представили как однородную призму размерами: $l \times w \times h$ (рисунок 4).

Получено дифференциальное уравнение нагрева корпусной детали

$$\lambda w \frac{d^2 T_{ст}}{dx^2} = 2 \left[k_{ст} (T_{ст} - T_0) + \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right], \quad (55)$$

где λ – теплопроводность материала стенки, Вт/м×К; w – толщина стенки, м.



$l \times w \times h$ – длина, толщина и высота боковой стенки, м;
 T_1 – температура в торцевой части боковой стенки, К
 Рисунок 4 – Боковая стенка корпусной детали

Общее решение уравнения (55) имеет вид

$$T_{cr} - T_0 = C_1 \text{ch}(bx) + C_2 \text{sh}(bx). \quad (56)$$

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

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

В результате получили закон распределения температуры вдоль боковой стенки корпусной детали

$$T_{cr} = T_{cr}(x) = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{\text{sh}(bl)} \{ \text{sh}(bx) + \text{sh}[b(l-x)] \} \quad (57)$$

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

$$q_{\text{бокст2}} = 2 \left[\int_0^l \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{cr}}{100} \right)^4 h dx + \int_0^l k_{cr} (T_{cr} - T_0) h dx \right] \quad (58)$$

Тепловой поток, который передаётся нижней стенке при установившемся режиме нагрева

$$q_{\text{нижст2}} = 2 \int_0^l \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{cr}}{100} \right)^4 z dx + \int_0^l k_{cr} (T_{cr} - T_0) z dx, \quad (59)$$

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 (58) и (59) по формуле

$$q_2 = 2q_{\text{бокст2}} + q_{\text{нижст2}} \quad (60)$$

Тепловой поток на нагрев торцевых стенок

$$q_1 = 2 \frac{(T_1 - T_0) c_v M}{H_{\text{эксп}}}, \quad (61)$$

Суммарный поглощаемый тепловой поток q , который идет на восполнение тепловых потерь для поддержания установившегося режима нагрева корпусной детали, следует определять как сумму величин (60) и (61).

$$q = q_1 + q_2 \quad (62)$$

Расстояние от излучателя до детали L , обеспечивающее облучение торцевой стенки детали по высоте h (рисунок 5), рассчитывают по формуле

$$L = \frac{h \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_0}{2}\right)}{2} \quad (63)$$

Тепловой поток от инфракрасного излучателя с заданными конструктивными параметрами и расстоянием L , поглощаемый корпусной деталью, определяют по формуле

$$q_{\text{изл}} = \frac{4\eta\varepsilon Q_{\text{изл}} \sin(\beta_0) z \alpha_0}{l\varphi} - 8 \frac{\eta Q_{\text{изл}} \sin(\beta_0)}{l\varphi} \int_0^{\gamma_0} \sqrt{\frac{d^2}{4} - (L \operatorname{tg} \gamma)^2} d\gamma \quad (64)$$

где 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 5).

Расчет по формуле (64) проводят в среде ПТС Mathcad Prime 3.0.

Формула для расчета времени нагрева корпусной детали имеет вид

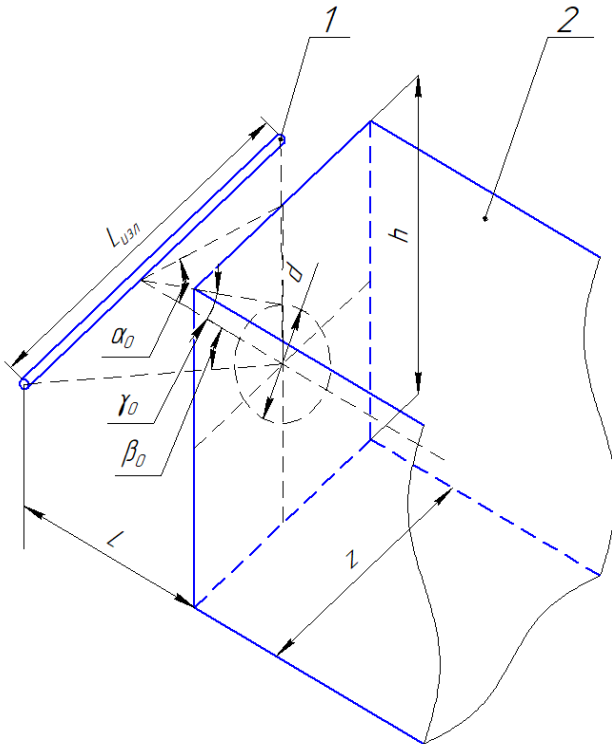
$$\tau = H_{\text{кд}} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{T_{\text{уст}} - T_0}{\dot{T}_0 H_{\text{кд}}}} \right), \quad (65)$$

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

На основе полученной математической модели разработан метод, включающий алгоритм и компьютерную программу расчета конструктивных и режимных параметров установки терморadiационной обработки полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники. Программа включает базу данных о конструктивных параметрах инфракрасных излучателей и рефлекторов. В конце расчета программа печатает: конструктивные ($Q_{\text{изл}}$, $l_{\text{изл}}$) и режимные (L , τ) параметры установки инфракрасной сушки полимерных покрытий.

Проведена оценка дефектности покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С (состав №1), обработанных конвективным и терморadiационным способами. В

сравнении с конвективным, терморрадиационный способ существенно повышает качество покрытий: площадь разрушенного покрытия уменьшилась в 1,33 раза, концентрация пор в покрытии – в 1,24 раза, размер пор – на 15%.



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 5 – Инфракрасный нагрев корпусной детали

Обеспечение точностных характеристик отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях. Исследовали покрытия эластомерных нанокомпозитов трех составов: состав №1: Ф-40 – 100 масс.ч., Al – 1,9 масс. ч. и Cu – 1,8 масс. ч.; состав №2: Ф-40С – 100 масс.ч., Al – 0,09 масс. ч. и Cu – 0,03 масс. ч.; состав №3: Ф-40С – 100 масс.ч., Al – 0,075 масс. ч.

Увеличение переднего угла режущей кромки калибра-резца γ приводит к уменьшению усилия резания F покрытий эластомерных нанокомпозитов. Экспериментальные зависимости носят линейный характер. При максимальном значении переднего угла режущей кромки калибра-резца $\gamma=70^\circ$ обработка покрытий эластомерных нанокомпозитов проводится с минимальным усилием резания. Усилие резания покрытий состава №1 составляет $F=1,94\text{кН}$. В отличие от значений передних углов калибров $\gamma=50$ и 60° величина F снизилась на 21 и 10% соответственно.

Усилие резания при обработке покрытий составов №2 и №3 составляет соответственно: 1,90 и 1,85 кН. В сравнении с передними углами калибров $\gamma=50$ и 60°

величина F снизилась на 15 и 8% для покрытий состава №2 и 8 и 5% для покрытий состава №3.

Минимальную дефектность имеют покрытия после калибрования резцом с рациональным углом режущей кромки $\gamma=70^\circ$. При этом: площадь разрушения покрытия составляет 5,12; 4,0 и 3,5%, овальность – 4; 3 и 3 мкм, отклонение от заданного размера Δ – 18; 17 и 16 мкм для составов №1, №2 и №3 соответственно. В сравнении с углами $\gamma=50^\circ$ и 60° : площадь разрушения уменьшилась от 1,8 до 2,9 раза, овальность от 1,67 до 4,3 раза, величина Δ от 1,26 до 1,7 раза.

С повышением содержания наполнителей в нанокompозите дефектность покрытий повышается. Поэтому максимальные значения площади разрушения покрытия, овальности, отклонения от заданного размера имеют отверстия с покрытиями состава №1, а минимальные – состава №3.

Максимальное значение переднего угла режущей кромки калибрующего инструмента $\gamma=70^\circ$ ограничивается условием прочности и долговечности режущего инструмента. При дальнейшем увеличении переднего угла γ ресурс инструмента резко снижается.

Рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра приняты следующие: передний угол $\gamma=70^\circ$, задний угол $\alpha=10^\circ$. При данных параметрах образуется сливная стружка, которая является условием обеспечения высокого качества обработки поверхности полимерного покрытия. С увеличением модуля упругости и геометрических размеров отверстия усилие резания при калибровании полимерных покрытий многократно увеличивается.

Расчет точностных характеристик центрирующих приспособлений для клеевых соединений типа «вал-подшипник». По технико-экономическим показателям наиболее оптимальным является вероятностный метод расчета способом одного квалитета. Данный метод обеспечивает требуемую соосность деталей клеевых соединений в центрирующем приспособлении (рисунок 6).

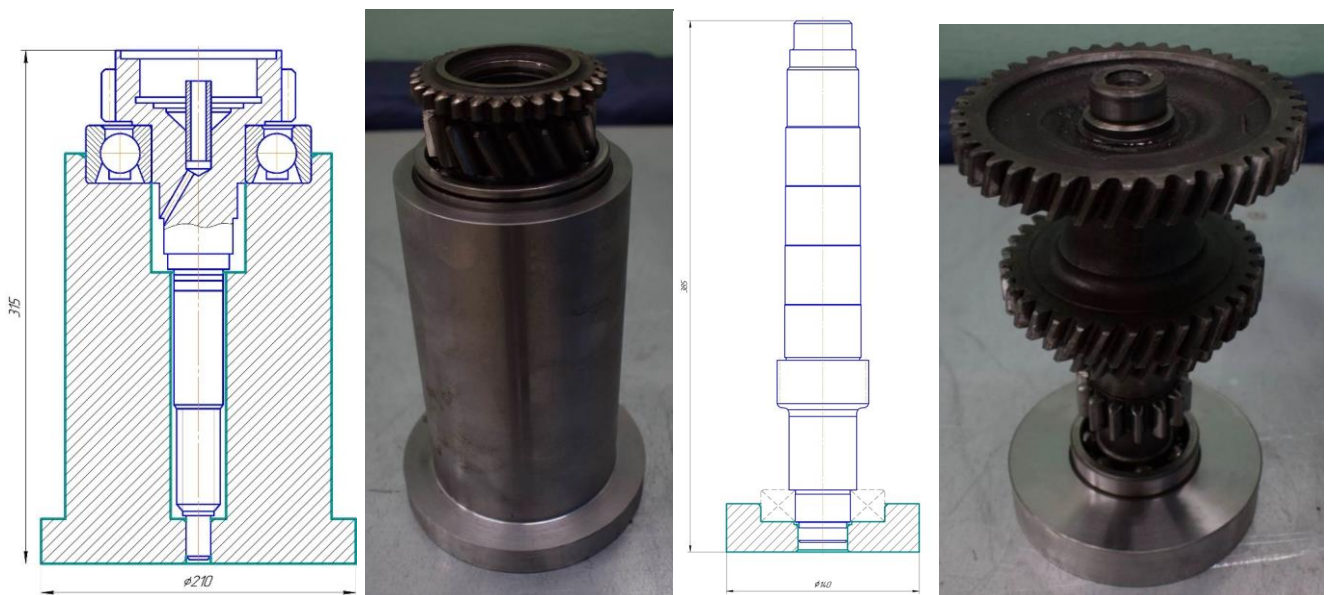


Рисунок 6 – Центрирующие приспособления для клеевых соединений типа «вал-подшипник»

Исследование коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С. С увеличением толщины подложки из эластомера и нанокompозитов коэффициент Кирхгофа η растет по линейным зависимостям. При максимальной толщине подложки $h=0,15\text{мм}$ величина η имеет наибольшие значения: состав №2, $\eta=8,2\cdot 10^{-5}\text{мм}^2/\text{Н}$; состав №1, $\eta=7,7\cdot 10^{-5}\text{мм}^2/\text{Н}$. Превышение, в сравнении с подложкой из эластомера ($\eta=7,5\cdot 10^{-5}\text{мм}^2/\text{Н}$), минимальное и составляет соответственно 9,3 и 2,7%.

Коэффициент податливости упругого основания $k_{\text{п}}$ с увеличением толщины полимерной подложки h уменьшается по линейным зависимостям. При максимальной толщине подложки $h=0,15\text{мм}$ величина $k_{\text{п}}$ имеет наименьшие значения: состав №2 $k_{\text{п}}=47\text{Н}/\text{мм}^2$, состав №1 $k_{\text{п}}=44\text{Н}/\text{мм}^2$, эластомер $k_{\text{п}}=40\text{Н}/\text{мм}^2$.

Исследование контактных напряжений и долговечности подшипников качения с посадками, восстановленными нанокompозитом эластомера Ф-40С. В подшипниках 209 с посадками из эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2, 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 2,0 до 2,12 раза, первых боковых тел качения увеличилась от 2,1 до 2,27 раза.

Благодаря упругой полимерной посадке, 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 1,26 до 1,28 раза, на первые боковые тел качения увеличилась от 1,24 до 1,27 раза. При этом часть радиальной нагрузки на подшипник перераспределилась на вторые боковые тела качения.

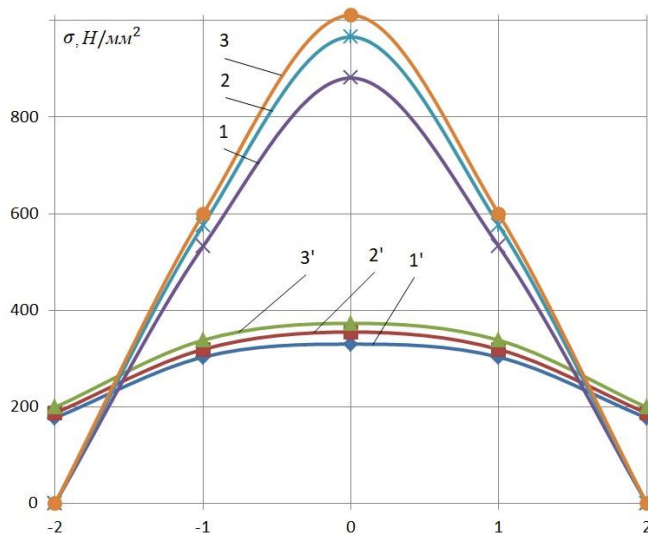
В зависимости от радиальной нагрузки на подшипник контактное напряжение (рисунок 7) на центральном теле качения снизилось с 2,72 до 2,52 раза, на первых боковых телах качения с 1,8 до 1,67 раза.

Ресурс подшипника 209 с посадками, восстановленными нанокompозитами: состава №1 составляет 49,18 млн. об.; состава №2 – 46,12 млн. об., что в 3,3 и 3,1 раза больше расчетного ресурса (14,87 млн.об.).

Исследование долговечности посадок, восстановленных полимерными нанокompозитами. На рисунке 8 представлены результаты исследования долговечности восстановленных посадок подшипников 209 при различной толщине полимерных покрытий эластомера Ф-40С и нанокompозитов состава №1 и №2, нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН. Исследования показали, что долговечность посадок эластомерных нанокompозитов превышает ресурс посадки из не наполненного эластомера от 1,81 до 2,7 раза. Предельный диаметральный износ посадочных отверстий подшипников в корпусных деталях, подлежащий компенсации при восстановлении эластомером Ф-40С составляет 0,24 мм, нанокompозитами составов №1 и №2 – 0,25 мм.

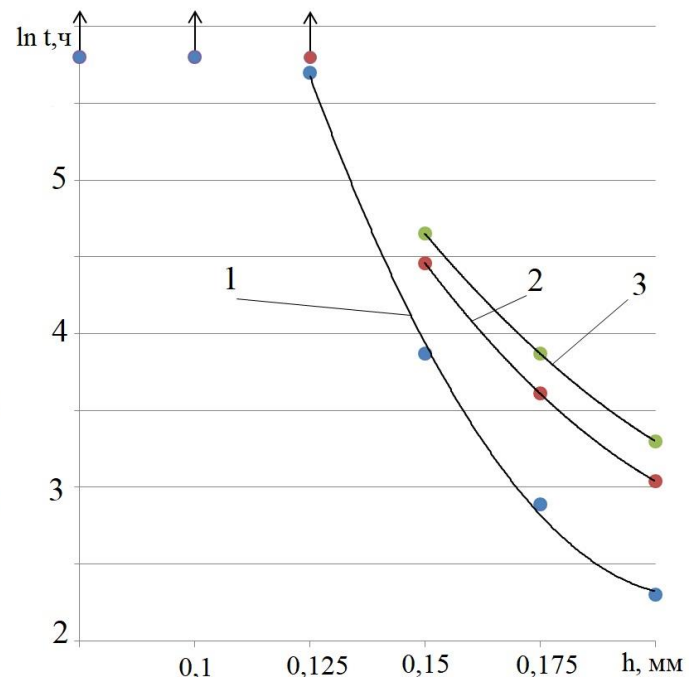
Наполнение эластомеров Ф-40 и Ф-40С нанопорошками алюминия и меди повышает теплопроводность материала и значительно увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура деталей подшип-

никового узла, с посадками, восстановленными нанокompозитами ниже: 1) до 16°С в сравнении с эластомером Ф-40С; 2) до 5,5°С для состава №1 и до 10°С для состава №2 в сравнении с эластомером Ф-40С.



0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения; 1, 2, 3 – нагрузка на тела в подшипнике со стандартной посадкой под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н, соответственно; 1', 2', 3' – соответственно, нагрузка на тела в подшипнике с посадкой из нанокompозита состава №1 под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166; 4860 Н

Рисунок 7 – Контактные напряжения в подшипнике 209



1 – эластомер Ф-40С; 2 – состав №2; 3 – состав №1

Рисунок 8 – Ресурс полимерных посадок t подшипника 209 при различной толщине полимерного покрытия h , нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН

В пятой главе «Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка» приведены разработанные технологии восстановления корпусных деталей и посадок подшипников на деталях типа «вал» нанокompозитами на основе эластомеров Ф-40, Ф-40С и анаэробного герметика АН-111, их экономическая эффективность.

Технология восстановления корпусных деталей эластомерными нанокompозитами содержит операции: подготовка поверхности изношенных отверстий в корпусной детали; измерение износа отверстий; обезжиривание поверхностей отверстий; приготовление нанокompозита с ультразвуковым диспергированием; нанесение покрытий, их обработка терморadiационным способом; калибрование полимерных покрытий и контроль качества восстановления.

Технология восстановления посадок подшипников качения нанокompозитом герметика АН-111 содержит операции: подготовка сопрягаемых поверхностей деталей к склеиванию; измерение износа посадочных мест деталей под подшипник; обезжиривание сопрягаемых поверхностей деталей соединения; приготовление

полимерного нанокompозита с механизированным диспергированием; нанесение полимерного нанокompозита на сопрягаемые поверхности деталей, сборка и центрирование деталей клеевого соединения; отверждение клеевого шва и контроль качества склеивания.

Технологии восстановления прошли производственную проверку: нанокompозит на основе эластомера Ф-40 в ЗАО «Агрофирма «Русь» Липецкой области (годовой экономический эффект 360 тыс. руб); нанокompозит на основе эластомера Ф-40С ООО «Сосновка-Зернопродукт» Тамбовской области (годовой экономический эффект 240 тыс. руб) и ООО «ОКА МОЛОКО» Рязанской области (годовой экономический эффект 430 тыс. руб); нанокompозит на основе анаэробного герметика АН-111 в ФГБУ «ОС «Мичуринская» Тамбовской области (годовой экономический эффект 425 тыс. руб). Восстановлены посадочные места подшипников в картерах и на валах коробок передач, раздаточных коробок, автомобилей КАМАЗ, УАЗ, тракторов МТЗ и др. Испытания показали высокую надежность техники. За указанный период испытаний отказы техники, из-за низкого ресурса восстановленных узлов, отсутствовали.

Новые нанокompозиты и технологии восстановления посадок подшипников внедрены и используются при ремонте технологического оборудования в промышленных и машиностроительных предприятиях ООО «Липецкий механический завод» (г. Липецк), АО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий», ООО «ИНОКС РЕМ» (г. Воронеж).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методология исследования и выбора на основе фрактального анализа дисперсных наночастиц наполнителей для полимерных композитов, предназначенных для восстановления посадочных мест подшипников качения, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокompозитов.

2. Наночастицы меди и алюминия являются ингибиторами термоокисления эластомеров на основе бутадиен-нитрильных каучуков и поэтому повышают их термостойкость. Коэффициенты старения нанокompозита, наполненного алюминиевыми наночастицами, по прочности в 1,17 раза, а по деформации в 1,2 раза больше аналогичных показателей не наполненного эластомера Ф-40С, у нанокompозита, наполненного алюминиевыми и медными наночастицами, по прочности в 1,22 раза, а по деформации в 1,4 раза больше соответствующих показателей полимерной матрицы.

В нанокompозитах образуются межфазные области с пониженной, «замороженной» молекулярной подвижностью полимера. Это приводит к повышению модуля упругости эластомерных нанокompозитов, в сравнении с матрицей до 2,1 раз. Увеличение модуля упругости повышает теплостойкость нанокompозитов, в сравнении с не наполненным эластомером, от 1,1 до 1,23 раза.

Теплопроводность двух- и трехкомпонентных полимерных нанокompозитов следует определять по формуле Бургера с использованием поправочного коэффициента. Расхождение расчетных значений с фактическими не превышает 7%.

3. Наночастицы и межфазные области являются армирующим элементом в структуре полимерного нанокompозита, повышающим его модуль упругости.

Предложены формулы для расчета модуля упругости нанокомпозитов на основе эластомеров и анаэробных герметиков. В формулах учтены деформационно-прочностные свойства полимерной матрицы, объемное содержание и фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя.

4. Выполнен фрактальный анализ: наночастиц наполнителей – размерности поверхности d_s , размерности структуры наночастиц d_f и размерности структуры нанокомпозитов d_f^k . Предложена формула расчета величины d_s для эластомерных нанокомпозитов.

Фрактальная размерность поверхности наночастиц алюминия и меди составляет $d_{sAl}=2,17$ и $d_{sCu}=2,20$, а размерность структуры наночастиц – $d_{fAl}=2,77$ и $d_{fCu}=2,82$, что позволяет сделать вывод, что наночастицы алюминия и меди следует отнести к усиливающим наполнителям, обеспечивающим более чем двукратное усиление модуля упругости нанокомпозитов на растяжение, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С.

Размерность «неэкранированной» поверхности наночастиц наполнителей составляет: $d_u^{Al-\phi}=0,42$ и $d_u^{Al+Cu-\phi}=0,41$, что подтверждает достаточно высокую реакционную способность наночастиц алюминия и меди при взаимодействии с растворами эластомеров.

Фрактальная размерность структуры композитов d_f^k составляет: у нанокомпозита, наполненного алюминиевыми наночастицами $d_f^k=2,9$; у нанокомпозита, наполненного алюминиевыми и медными наночастицами – $d_f^k=2,88$. Характеристики наночастиц алюминия и меди d_s и d_f , структуры нанокомпозитов d_f^k отличаются незначительно, что объясняет достаточно близкие значения степени усиления материалов.

5. Увеличение модуля упругости повышает предел текучести нанокомпозитов. Наполнение эластомера Ф-40С алюминиевым нанопорошком увеличивает предел текучести материала в 1,11 раза, от 14,1 до 15,7 МПа, с алюминиевым и медным нанопорошками – в 1,14 раза, от 14,1 до 16,1 МПа.

Наполнение эластомера Ф-40С дисперсными, алюминиевыми наночастицами увеличивает прочность нанокомпозита в 1,53 раза, до $\sigma=21,64\text{МПа}$, алюминиевыми и медными наночастицами в 1,68 раза, до $\sigma=23,75\text{МПа}$, в сравнении с не наполненным эластомером. Предложена формула для расчета прочности эластомерных нанокомпозитов. Расхождение расчетных значений прочности с фактическими не превышает 14%.

Наполнение анаэробных герметиков дисперсными, металлическими наночастицами повышает поверхностную энергию разрушения материала. Образование на поверхности частиц наполнителя межфазных областей полимера с пониженной («замороженной») молекулярной подвижностью приводит к увеличению модуля упругости и, соответственно, прочности нанокомпозита до $\tau=32,6\text{МПа}$, что в 1,23 раза больше прочности полимерной матрицы.

6. В отличие от микрокомпозитов, в полимерных нанокомпозитах, наполненных дисперсными металлическими наночастицами увеличивается деформация. Благодаря низкому объемному содержанию, наночастицы свободно перемещаются с полимерной матрицей, которая свободно растягивается. Вязкое сопротивление

ние перемещению наночастиц с высокой адгезией к полимерной матрице увеличивает деформацию нанокомпозита при разрыве.

Деформация эластомера Ф-40С с алюминиевыми наночастицами увеличилась, в 1,4 раза, до значения $\varepsilon=240\%$, алюминиевыми и медными наночастицами в 1,34 раза, до значения $\varepsilon=230\%$.

Деформация анаэробного нанокомпозита, наполненного алюминиевыми наночастицами, в сравнении с не наполненным герметиком АН-111, увеличилась в 1,2 раза, до $\varepsilon=10,2\%$.

Увеличение прочности и деформации нанокомпозитов, в сравнении с матрицей, однозначно увеличивает их удельную работу разрушения, характеризующую выносливость материала. Наполнение эластомеров дисперсными наночастицами алюминия и меди существенно повышает выносливость и долговечность материала. Удельная работа разрушения нанокомпозита, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С, наполненного наночастицами алюминия и меди увеличилась в 1,55 раза, до значения $\alpha_p=42,19\text{МДж/м}^3$, наполненного алюминиевыми наночастицами в 1,94 раза, до значения $\alpha_p=52,95\text{МДж/м}^3$. Удельная работа разрушения нанокомпозита на основе анаэробного герметика АН-111 в 1,28 раза больше матрицы и достигает значения $\alpha_p=91,4\text{МДж/м}^3$.

7. На основании полученных регрессионных моделей зависимости удельной работы разрушения пленок эластомерных нанокомпозитов от режима термической обработки и состава наполнителей определены:

- оптимальный режим термической обработки эластомерного нанокомпозита Ф-40С, наполненного алюминиевыми наночастицами: температура $T = 140^\circ\text{C}$, время $t = 3,0$ ч., при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства $\alpha_p = 52,0 \text{ МДж/м}^3$.

- оптимальный состав нового эластомерного нанокомпозита: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевые наночастицы – 0,09 масс.ч.; медные наночастицы – 0,03 масс.ч., при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства, $\alpha_p = 42,0 \text{ МДж/м}^3$.

8. Исследованы физические свойства растворов эластомерных нанокомпозитов и определен рациональный режим ультразвуковой обработки: мощность озвучивания $N = 55$ Вт; время УЗО растворов нанокомпозитов $t = 6$ мин. Установлено, что в растворах эластомерных нанокомпозитов после ультразвукового диспергирования, в зависимости от содержания наполнителей, в сравнении с ручным механическим смешением, количество испарившегося растворителя превышает аналогичный параметр на 12 – 13%, дефектность значительно снижается, а качество полимерных покрытий повышается: площадь разрушенного покрытия уменьшается до 1,36 раза, размер пор уменьшается до 2 раз, а концентрация пор снижается до 30 %.

Исследования структуры и элементного состава показали, что с повышением содержания наполнителей в составе нанокомпозитов размеры агрегатов наночастиц увеличиваются. Ультразвуковое диспергирование, по сравнению с ручным смешением, обеспечивает многократное от 2,05 до 3,6 раза уменьшение размеров агрегатов и выравнивание их по размерам. Определен рациональный режим механизированного диспергирования при изготовлении нанокомпозита на основе гер-

метика АН-111: частота вращения рабочего органа $n = 1490 \text{ мин}^{-1}$, время обработки материала $t = 3 \text{ мин}$.

9. Получены математические модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и корпусных деталей автотракторной техники, на их основе разработаны методы и компьютерные программы расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях. Исследования показали, что в сравнении с конвективным способом, у покрытий нанокompозита эластомера Ф-40С после инфракрасной сушки значительно повышается качество покрытий: площадь разрушенного покрытия уменьшилась в 1,33 раза, концентрация пор в покрытии – в 1,24 раза, размер пор – на 15%.

10. В ходе экспериментальных исследований зависимости усилия резания покрытий эластомерных нанокompозитов от переднего угла режущей кромки калибра-резца получили рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца, которые обеспечивают минимальное значение радиальной составляющей силы резания, наиболее высокое качество и точностные характеристики покрытий эластомерных нанокompозитов: передний угол $\gamma = 70^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$. Разработан метод расчета размерных цепей и точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник».

11. Благодаря повышению деформационно-прочностных свойств нанокompозитов, в сравнении с не наполненным эластомером, увеличивается коэффициент Кирхгофа 19,4% и коэффициент податливости упругого основания соответственно 31,2%. По этим причинам снижаются контактные напряжения в подшипниках и увеличивается жесткость опор, уменьшается смещение осей сопрягаемых деталей подшипникового узла при радиальном нагружении. В зависимости от состава нанокompозита и радиальной нагрузки на подшипник контактное напряжение на центральном теле качения снизилось до 2,52 и 2,72 раза, на первых боковых телах качения до 1,67 и 1,8 раза. Ресурс подшипников 209 с посадками, восстановленными нанокompозитами: состава №1 составляет 49,18 млн. об.; состава №2 – 46,12 млн. об., что в 3,3 и 3,1 раза больше расчетного ресурса (14,87 млн. об.).

Наполнение эластомеров Ф-40 и Ф-40С нанопорошками алюминия и меди повышает теплопроводность материала и значительно увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура деталей подшипникового узла, с посадками, восстановленными нанокompозитами, в сравнении с не наполненными эластомерами ниже на 5,5...10 °С. Исследования на выносливость посадок эластомерных нанокompозитов показали, что рекомендуется восстанавливать корпусные детали техники с диаметральным износом посадочных отверстий под подшипники: нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 до 0,24 мм; нанокompозитами на основе эластомера Ф-40С составов №1 и №2 до 0,25 мм.

Нанокompозитом на основе герметика АН-111 рекомендуется восстанавливать посадочные места подшипников на валах с износом до 0,12 мм, в корпусных деталях – до 0,25 мм.

12. Разработаны технологии восстановления посадок подшипников в корпусных деталях и на валах нанокompозитами на основе эластомеров Ф-40, Ф-40С и

герметика АН-111. Технологии восстановления внедрены в ООО «Сосновка-Зернопродукт», ФГБУ «ОС «Мичуринская» Мичуринского района Тамбовской области, ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области и ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александровского района Рязанской области. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения новых технологий составил около 1,5 млн. руб. Новые нанокompозиты и технологии восстановления посадок подшипников внедрены и используются при ремонте технологического оборудования в промышленных и машиностроительных предприятиях Центрально-Черноземного региона.

Рекомендации производству. Нанокompозиты на основе эластомеров Ф-40 и Ф-40С, технологии их применения рекомендуются для восстановления корпусных деталей с.х. техники. Нанокompозит на основе герметика АН-111, технология его применения рекомендуется для восстановления корпусных деталей и деталей типа «вал» при ремонте автотракторной техники.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Создание новых полимерных нанокompозитов. Разработка технологий и технических средств восстановления посадок подшипников качения полимерными нанокompозитами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. **Псарев, Д. Н.** Технология механизированного нанесения полимерных покрытий на подшипники качения / Д. Н. Псарев, Р. И. Ли, В. В. Хатунцев [и др.] – Текст : непосредственный // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – Т.30, №5. – С. 86-88.

2. **Псарев, Д. Н.** Анализ и выбор критериев подобия при моделировании процессов формирования полимерных покрытий при ремонте сельскохозяйственной техники / Д. Н. Псарев, М. М. Мишин, В. В. Хатунцев, С. Ю. Астапов – Текст : электронный // Молочнохозяйственный вестник ; электронный периодический теоретический и научно-практический журнал / редакция А.Л. Бирюков ; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2017. – №1. – С. 119-126. – URL: <http://molochnoe.ru/journal> (30.03.2017).

3. **Псарев, Д. Н.** Способ восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники с использованием полимерных материалов / Д. Н. Псарев, В. В. Хатунцев, С. Ю. Астапов, М. М. Мишин – Текст : электронный // Молочнохозяйственный вестник ; электронный периодический теоретический и научно-практический журнал / редакция А.Л. Бирюков ; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – Вологда-Молочное. – 2017. – №1. – С. 127-133. – URL: <http://molochnoe.ru/journal> (30.03.2017).

4. **Псарев, Д. Н.** Ультразвуковая обработка растворов полимерных композиционных материалов при восстановлении корпусных деталей машин / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. А. Колесников – Текст : непосредственный // Научный журнал «Научное обозрение». – 2017. – №8. – С. 57-62.

5. **Псарев, Д. Н.** Моделирование и исследование долговечности полимерного покрытия при циклическом нагружении с использованием критерия подобия / Р.

И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. В. Пчельников, А. Ю. Мельников – Текст : непосредственный // Научный журнал «Научное обозрение». – 2017. – №19. – С. 64-69.

6. **Псарев, Д. Н.** Эластификация «жестких» адгезивов для восстановления посадок подшипников / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. В. Мироненко – Текст : непосредственный // Научный журнал «Научное обозрение». – 2017. – №20. – С. 71-76.

7. **Псарев, Д. Н.** Модификация эластомера для восстановления корпусных деталей автотракторной техники / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2018. – Т.13. – №3(50). – С. 90-95.

8. **Псарев, Д. Н.** Долговечность полимерных композиционных материалов на основе анаэробного герметика АН-111 / А. С. Кононенко, Д. Н. Псарев, А. Б. Рожнов – Текст : непосредственный // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». – 2018. – №6(88). – С. 45-50.

9. **Псарев, Д. Н.** Стойкость к старению и вибрационным нагрузкам полимерного композиционного материала на основе анаэробного герметика «АН-111» / А. С. Кононенко, Д. Н. Псарев, А. Б. Рожнов – Текст : непосредственный // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». – 2019. – №5(93). – С. 4-8.

10. **Псарев, Д. Н.** Теоретические аспекты терморadiационного нагрева изношенных корпусных деталей техники при восстановлении / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. Н. Быконя, А. В. Пчельников, А. Ю. Мельников – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2020. – №1(43). – С. 50-59.

11. **Псарев, Д. Н.** Эластомерный нанокompозит для восстановления изношенных корпусных деталей автотракторной техники / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2021. – №1(49). – С. 69-79.

12. **Псарев, Д. Н.** Перспективный полимерный нанокompозит для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2021. – №3(51). – С. 87-95.

13. **Псарев, Д. Н.** Параметры ультразвукового диспергирования растворов эластомерного нанокompозита для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2021. – №4(52). – С. 106-115.

14. **Псарев, Д. Н.** Перспективный эластомерный нанокompозит для восстановления корпусных деталей / А. И. Завражнов, Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. Ю. Мельников – Текст : непосредственный // Сельский механизатор. – 2021. – №8. – С. 30-32.

15. **Псарев, Д. Н.** Исследование теплопроводности полимерных нанокompозитов / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников, А. Н. Быконя – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №1(55). – С. 81-91.

16. **Псарев, Д. Н.** Оптимизация состава и режима термической обработки эластомерного нанокompозита для восстановления корпусных деталей техники / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников, А. Н. Быконя – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №2(56). – С. 87-98.

17. **Псарев, Д. Н.** Метод ускоренных усталостных испытаний полимерных материалов / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №3(57). – С. 92-102.

18. **Псарев, Д. Н.** Механические свойства и качество эластомерных покрытий после инфракрасной обработки / Р. И. Ли, Ю. Н. Ризаева, А. Н. Быконя, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №4(58). – С. 110-121.

19. **Псарев, Д. Н.** Термостойкость посадок подшипников качения, восстановленных эластомерными нанокompозитами / Р. И. Ли, Ю. Н. Ризаева, А. Ю. Мельников, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №4(58). – С. 122-130.

20. **Псарев, Д. Н.** Метод расчета установок инфракрасной обработки полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники / Р. И. Ли, Ю. Н. Ризаева, А. Н. Быконя, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №5(59). – С. 110-119.

21. **Псарев, Д. Н.** Фрактальный анализ структуры и механические свойства эластомерного нанокompозита для восстановления деталей техники / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. Ю. Мельников – Текст : непосредственный // Аграрный научный журнал. – 2023. – №8. – С. 134-138.

б) патенты на изобретение РФ:

22. **Патент № 2678063 Российская Федерация, МПК С09J 133/00 (2006.01), С09J 11/04 (2006.01), В28В 1/00 (2006.01), В82Y 30/00 (2011.01), В82Y 40/00 (2011.01).** Композиция для склеивания металлических изделий: № 2018100453 : заявл. 09.01.2018 : опубл. 22.01.2019 / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Малюгин В. А., Быконя А. Н. ; заявитель ФГБОУ ВО «ЛГТУ». – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.

23. **Патент № 2719624 Российская Федерация, МПК G01M 13/04 (2006.01).** Стенд для испытания подшипников качения на долговечность: № 2019121503 : заявл. 08.07.2019 : опубл. 21.04.2020 / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Ризаева Ю. Н., Пчельников А. В., Быконя А. Н., Мельников А. Ю. ; заявитель ФГБОУ ВО «ЛГТУ». – 16 с. : ил. – Текст : непосредственный.

24. **Патент № 2751339 Российская Федерация, МПК В29С 41/22 (2006.01), В23Р 6/00 (2006.01), С23С 24/00 (2006.01).** Способ восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях покрытием из раствора полимерного материала: № 2020111470 : заявл. 18.03.2020 : опубл. 13.07.2021 / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Ризаева Ю. Н., Киба М. Р., Быконя А. Н., Мельников А. Ю. ; заявитель ФГБОУ ВО «ЛГТУ». – 18 с. : ил. – Текст : непосредственный.

25. **Патент № 2757271 Российская Федерация, МПК С09D 5/08 (2006.01), С09D 7/61 (2018.01), С09D 161/14 (2006.01), С09D 109/02 (2006.01), В82Y 30/00 (2011.01).** Композиция для покрытия металлических изделий: № 2020134361 : заявл. 19.10.2020 : опубл. 12.10.2021 / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Быконя А. Н., Мельников А. Ю., Ерохин В. Е. ; заявитель ФГБОУ ВО «ЛГТУ». – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

в) прочие издания:

- в изданиях, включенных в систему цитирования (библиографическую ба-

3y) Scopus:

26. **Psarev, D. N.** A promising polymer material for repairing body parts of machines / R. I. Li, D. N. Psarev, A. V. Mironenko, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2017. – Vol. 10, №4 – Pp. 318–321.

27. **Psarev, D. N.** Theoretical Concerns in Selection of Metal Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition / R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, №1 – Pp. 15–19.

28. **Psarev, D. N.** Promising nanocomposite based on elastomer F-40 for repairing base members of machines/ R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, №2 – Pp. 128–132.

29. **Psarev, D. N.** A polymeric nanocomposite for fixing bearings during assembly and repair of equipment/ R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, №3 – Pp. 261–265.

30. **Psarev, D. N.** Modification of anaerobic sealants by metal nanoparticles/ R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, №4 – Pp. 376–380.

31. **Psarev, D. N.** A mathematical model of infrared heating of auto body parts during restoration by a polymer material/ R. I. Li, D. N. Psarev, A. N. Bykonya – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2020. – Vol. 13, №2 – Pp. 172–176.

32. **Psarev, D. N.** The technique of automated applying of polymer coatings used for repair of tractor parts / D. N. Psarev, V. V. Khatuntsev, M. M. Mishin, S. Y. Astapov, A. B. Rozhnov – Текст : непосредственный // XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, 10–13 September 2019, Don State Technical University, Russian Federation. – IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019 – Vol. 403 – Pp. 012011.

33. **Psarev, D.** Method for Calculation of Constructive and Mode Parameters of Infrared Heating Unit for Drying of Polymeric Coatings on a Metal Substrate / R. Lee, D. Psarev, A. Melnikov, A. Pchelnikov – Текст : непосредственный // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 20-22 Nov. 2019, Lipetsk State Technical University, Russian Federation. – IEEE, 2019 – Pp. 633-635.

34. **Psarev, D.** Mathematical model of infrared heating of body parts of cars and tractors during restoration with polymer materials/ R. Lee, A. Bykonya, M. Kiba, A. Melnikov, D. Psarev – Текст : непосредственный // 2st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2020), 10-13 Nov. 2020, Lipetsk State Technical University, Russian Federation. – IEEE, 2020 – Pp. 788-792.

35. **Psarev, D.** Mathematical model of tribological parameters of contact between components of high longevity metal-polymer angular-contact bearing/ R. Lee, A. Pchelnikov, A. Bykonya, M. Kiba, D. Psarev – Текст : непосредственный // 2st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2020), 10-13 Nov. 2020, Lipetsk State Technical University, Russian Federation. – IEEE, 2020 – Pp. 793-796.

36. **Psarev, D. N.** Calculation of structural and operational parameters of a facility for infrared heating of base parts during restoration with a polymer material/ R. I. Li, Yu. N. Rizaeva, D. N. Psarev, A. N. Bykonya – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2020. – Vol. 13, №4 – Pp. 32–36.

37. **Psarev, D. N.** The fractal approach and the effect of nanoadhesive in polymer nanocomposites / R. I. Lee, Y. N. Rizaeva, K. A. Manaenkov, D. N. Psarev, M.R. Kiba – Текст : непосредственный // International Scientific Conference CAMSTech-2020: Advances in Material Science and Technology 31 July 2020, Krasnoyarsk, Russia – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. – Vol. 919 – Pp. 022042.

38. **Psarev, D. N.** Technology for forming a multi-layer polymer coating when restoring worn-out landing holes in the body parts of equipment / R. I. Lee, Y. N. Rizaeva, D. N. Psarev, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // International Scientific Conference CAMSTech-2020: Advances in Material Science and Technology 31 July 2020, Krasnoyarsk, Russia – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. – Vol. 919 – Pp. 032020.

39. **Psarev, D. N.** A mathematical model of thermal irradiation processing of polymer coatings during restoration of automobile body parts/ R. I. Li, D. N. Psarev, A. N. Bykonya, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2021. – Vol. 14, №3 – Pp. 376-380.

40. **Psarev, D. N.** A method for calculating the parameters of a unit for thermoradiation treatment of polymer coatings in the restoration of car body parts / R. I. Li, Yu. N. Rizaeva, D. N. Psarev, A. N. Bykonya, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2021. – Vol. 14, №4 – Pp. 517-521.

41. **Psarev, D.** Optimization of the composition and regime of heat treatment of elastomeric nanocomposite for restoring worn out car body parts / R. Li, D. Psarev, M. Kiba, A. Melnikov, V. Erokhin – Текст : непосредственный // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2021), 10-12 Nov. 2021, Lipetsk State Technical University, Russian Federation. – IEEE, 2021 – Pp. 995-1000.

42. **Psarev, D. N.** Elastomeric nanocomposite for recovery of worn-out basic parts of agricultural machinery/ R. I. Lee, Y. N. Rizaeva, A. N. Bykonya, D. N. Psarev, T. N. Sukhareva, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // 2021 International Conference on agricultural science and engineering, ASAE 2021, Michurinsk, Russia, 12-14 апреля 2021 года – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. – Vol. 845 – Pp. 012126.

- в издании, включенном в РИНЦ:

43. **Псарев, Д. Н.** Расчет напряженного состояния и моделирование долговечности полимерного покрытия в восстановленной корпусной детали / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Н. Быконя, А. В. Пчельников – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2017. – №4(59). – С. 31-37.

44. **Псарев, Д. Н.** Полимерный нанокompозит для восстановления посадок подшипников качения автомобилей / В. А. Малюгин, Д. Н. Псарев, А. В. Бутин – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – №3(62). – С. 34-40.

45. **Псарев, Д. Н.** Технологическое обеспечение восстановления посадок подшипников качения автомобилей полимерным нанокompозитом / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, В. А. Малюгин – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – №4(63). – С. 28-34.

46. **Псарев, Д. Н.** Улучшение эластомерного нанокompозита при восстановлении корпусных деталей автомобилей после инфракрасной обработки / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. Н. Быконя – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – №1(76). – С. 24-30.

-статьи в сборниках материалов Международных научных конференций:

47. **Псарев, Д. Н.** Оптимизация состава полимерного нанокompозита для восстановления корпусных деталей автотракторной техники / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства ; Сборник научных докладов XIX международной научно-практической конференции, посвященной году экологии в России и 80-летию Тамбовской области, 27-28 сентября 2017 года, ГНУ ВНИИТИН, г. Тамбов. – Тамбов : Изд-во Першина Р.В., 2017. – С. 16-19.

48. **Псарев, Д. Н.** Стабилизация наноразмерных частиц в растворах полимеров / Д. Н. Псарев // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ; материалы I международной научно-практической конференции 12-13 декабря 2018 года. В 2 т. Т.2. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2018. – С. 149-156.

49. **Псарев, Д. Н.** Исследование модуля упругости эластомера Ф-40 и его модификации Ф-40С / Д. Н. Псарев, П. С. Скородумов, С. Н. Ложков – Текст : непосредственный // Инновационные подходы к разработке технологий производства, хранения и переработки продукции растениеводческого кластера ; материалы Всероссийской научно-практической конференции, 13 февраля 2020 года, г. Мичуринск. – Мичуринск : Издательство Мичуринский государственный аграрный университет, 2020. – С. 191-194.

50. **Псарев, Д. Н.** Исследование процессов отверждения полимерных материалов / К. А. Зайцева, Д. Н. Псарев – Текст : электронный // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК ; материалы Международной научно-практической конференции 21-23 октября 2020 года. – Наука и образование. – 2020. – Т.3, №4. – URL: <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/2515>.

51. **Псарев, Д. Н.** Теплофизические свойства эластомерных нанокompозитов для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей / Р. И. Ли, Ю. Н. Ризаева, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Современные проблемы материаловедения ; сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ. – Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2021. – С. 20-21.

Заказ № 136. Подписано в печать 09.10.23 г.

Формат 60*84 1/16. Усл.печ. 2.56 л. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО "БиС"

Тамбовская область, г. Мичуринск, Липецкое шоссе, д. 95 а