

На правах рукописи



Мельников Антон Юрьевич

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСНЫХ
ДЕТАЛЯХ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ ЭЛАСТОМЕРОМ Ф-40С,
НАПОЛНЕННЫМ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск – наукоград РФ, 2023

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

Научный руководитель: **Ли Роман Иннакентьевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Жачкин Сергей Юрьевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», профессор
кафедры технологии машиностроения

Кононенко Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана»,
профессор кафедры «Технологии обработки
материалов»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский государственный
аграрный университет»

Защита диссертации состоится 06 октября 2023 г. в 10-00 часов на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 35.2.022.02 на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545) 9-44-12, 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 Минобрнауки РФ: <http://www.vak.minobrnauki.gov.ru/>.

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. Себестоимость сельскохозяйственной продукции в значительной мере определяется затратами, которые обеспечивают работоспособное состояние мобильной техники и технологического оборудования.

При восстановлении изношенных деталей современными способами значительно сокращаются затраты на ремонт техники и повышается ее надежность.

В сравнении с изготовлением новой детали, при восстановлении расход металла сокращается от 20 до 30 раз. Исключение металлургического цикла производства позволяет сэкономить в процессе восстановления 1 т изношенных, стальных деталей до 180 кВт/ч электроэнергии, 0,8 т угля, 0,5 т известняка, 175 м³ природного газа. Наибольшего экономического и технического эффекта удается достичь, когда восстанавливают корпусные детали сельскохозяйственной техники. Причина заключается в наиболее высокой материалоемкости и цене новых корпусных деталей и относительно не больших затратах при восстановлении.

Технология восстановления корпусных деталей полимерным материалом отличается простотой, низким энергопотреблением и расходом ремонтных материалов, исключает фреттинг-коррозию отверстий после восстановления, многократно увеличивает ресурс подшипниковых узлов.

Эффективность восстановления корпусных деталей существенно повышается при использовании полимерных нанокompозитов. Наполнение полимера наночастицами приводит к изменению его структуры, кардинальному улучшению его потребительских свойств. Представляют научную и практическую ценность исследования и последующая разработка новых полимерных нанокompозитов, создающих базу для высокоэффективных технологий восстановления, обеспечивающих увеличение послеремонтного ресурса корпусных деталей, повышение надежности и снижение затрат на ремонт 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., 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., Зорина В. А., Котина А. В., Кононенко А. С., Курчаткина В. В., Ли Р. И., Родионова Ю. В. и многих других отечественных ученых.

В настоящее время потребителю предлагается очень большой спектр наноразмерных частиц в качестве наполнителя: органоглины, дисперсные органические и неорганические наночастицы, и углеродные нанотрубки (УНТ). Анализ литературных источников показал, что в настоящее время отсутствует информация о композитах на основе эластомеров, наполненных углеродными нанотрубками, и предназначенных для восстановления посадочных отверстий корпусных деталей техники.

Представляет научный и практический интерес исследование и разработка полимерного нанокompозита на основе эластомера, наполненного углеродными

нанотрубками. Известные методы усталостных испытаний имеют общий недостаток: большая трудоемкость, а результаты испытаний пригодны только для образцов узкого диапазона типоразмеров. Необходимо разработать новый метод ускоренных усталостных испытаний, позволяющий оперативно получить достоверную информацию о выносливости полимерных посадок, обеспечить пригодность использования результатов испытаний применительно к любым типоразмерам подшипников качения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90070 по теме «Методология исследования и усталостных испытаний эластомерных нанокompозитов для восстановления корпусных деталей автомобилей».

Цель работы: повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автотракторной техники эластомером Ф-40С, наполненным углеродными нанотрубками, за счет повышения качества полимерных покрытий, увеличения их механических и теплофизических свойств, обеспечения высокой долговечности восстановленных посадок подшипников.

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

- теоретически обосновать улучшение потребительских свойств эластомера после наполнения УНТ;
- разработать метод ускоренных стендовых испытаний посадок подшипников, восстановленных полимерными материалами;
- исследовать деформационно-прочностные и адгезионные свойства нанокompозита эластомера Ф-40С, оптимизировать его состав и режим термической обработки;
- исследовать теплопроводность и термостойкость эластомерного нанокompозита;
- исследовать ультразвуковое диспергирование и определить рациональный режим обработки, дегазацию раствора эластомерного нанокompозита и дефектность покрытий, долговечность восстановленных посадок подшипников;
- разработать технологию восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях эластомерным нанокompозитом и дать ее технико-экономическую оценку.

Научная новизна диссертации заключается в теоретическом обосновании повышения механических свойств эластомера, наполненного углеродными нанотрубками, результатах фрактального анализа структуры нового нанокompозита, разработке нового метода усталостных испытаний полимерных материалов, регрессионной модели удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, исследовании механических и теплофизических свойств нового нанокompозита, определении рациональных режимов ультразвукового диспергирования материала, исследовании дефектности эластомерных нанокompозитных покрытий и долговечности посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании повышения механических свойств эластомера после наполнения углеродными нанотрубками,

результатах фрактального анализа структуры нового нанокompозита, разработке нового метода усталостных испытаний полимерных материалов.

Практическая значимость заключается в новом нанокompозите эластомера Ф-40С и технологии восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники.

Объект исследований. Растворы, пленки и покрытия из нанокompозитов на основе эластомера Ф-40С на стальных подложках, подшипники с посадками в корпусной детали, восстановленными нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С.

Предмет исследования. Деформационно-прочностные, адгезионные и теплофизические свойства нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, физические свойства, параметры ультразвукового диспергирования раствора нанокompозита, дефектность эластомерных нанокompозитных покрытий и долговечность восстановленных посадок подшипников качения.

Методология и методы исследования представлены теоретическими исследованиями в области формирования прочности и выносливости эластомерных нанокompозитов, экспериментальными исследованиями механических и теплофизических свойств нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, его ультразвукового диспергирования, оценки дефектности композитных покрытий и долговечности восстановленных посадок подшипников.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование улучшения потребительских свойств эластомера после наполнения УНТ;
- метод ускоренных стендовых испытаний посадок подшипников, восстановленных полимерными материалами;
- регрессионная модель удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, результаты экспериментального исследования деформационно-прочностных и адгезионных свойств, теплопроводности и термостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40С;
- результаты экспериментального исследования ультразвукового диспергирования и рациональный режим обработки, дегазации раствора нанокompозита, дефектность покрытий и долговечность восстановленных посадок подшипников;
- технология восстановления посадочных отверстий корпусных деталей нанокompозитом Ф-40С и оценка ее технико-экономической эффективности.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность результатов исследований подтверждается использованием современного исследовательского оборудования и приборов, фрактальным 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: научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ЛГТУ (г. Липецк) в 2016...2023 гг.; Международных научно-практических конференциях: ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов), 2017 г.; ЛГТУ (г. Липецк), 2018...2022 гг.; Саратовский гос. агр-й ун-т (г. Саратов), 2019 г.; Елецкий гос. ун-т (г. Елец), 2020 г.; Юго-Зап. гос. ун-т, (г. Курск), 2021 г.; Орловский гос. ун-т (г. Орел), 2021 г.; Орловский гос. агр-й ун-т (г. Орел), 2022 г.; заседании кафедры «Транспортные средства и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО ЛГТУ в 2023 г.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликованы 33 печатные работы, в том числе 3 публикации в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 10 публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки, и 3 патента на изобретение РФ. Общий объем публикаций составляет 12,9 п.л., автору принадлежит 9,7 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит: введение, пять глав, заключение, библиографический список и приложения. Объем работы 175 страниц машинописного текста. Диссертация включает 72 рисунка, 17 таблиц, 8 приложений и библиографический список из 167 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 корпусных деталей автомобилей, приведена классификация наноразмерных наполнителей для полимеров, дан анализ известных методов усталостных испытаний материалов. Анализ литературных источников показал, что при износах корпусных деталей автотракторной техники до 0,3 мм наиболее технологичным является восстановление деталей с применением полимерных материалов. После восстановления многократно повышается долговечность корпусных деталей, а также увеличивается ресурс подшипников, зубчатых колес и валов. Весьма перспективными являются исследование и разработка нанокompозитов на основе эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий корпусных деталей.

В настоящее время потребителю предлагается очень большой спектр наноразмерных частиц в качестве наполнителя: органоглины, дисперсные органические и неорганические наночастицы, и углеродные нанотрубки. УНТ обладают большой жесткостью и прочностью, высокими упругими свойствами, химической и термической стабильностью, хорошей электро- и теплопроводностью. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время отсутствует информация о полимерных композитах на основе эластомеров, наполненных углеродными нанотрубками, и предназначенных для восстановления посадочных отверстий

корпусных деталей техники. Представляет научный и практический интерес исследование и разработка полимерного нанокompозита на основе эластомера, наполненного углеродными нанотрубками.

Ресурс полимерной посадки подшипникового узла после восстановления в значительной мере определяется долговечностью полимерного слоя в сопряжении деталей подшипникового соединения. В этой связи особую актуальность приобретает вопрос исследования на усталость новых полимерных нанокompозитов при циклическом нагружении. В работе дан анализ методов усталостных испытаний материалов. Описаны достоинства и недостатки методов Шубина А. Г., Локати, Кравченко П. Е., Кудрявцева В. И., Пантелеева В. Н., Гольцева Д. И., метода одного образца. Общими недостатками этих методов являются большая трудоемкость и продолжительность испытаний, а их результаты ограничено пригодны для образцов узкого диапазона типоразмеров (влияние масштабного фактора).

Требуется разработка нового метода ускоренных усталостных испытаний, предусматривающего использование того же испытательного оборудования, и получение в более короткие сроки достоверной информации о выносливости полимерных посадок под действием циклических нагрузок, обеспечение пригодности использования результатов испытаний применительно к любым типоразмерам подшипников качения.

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

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности эластомерных нанокompозитов, наполненных углеродными нанотрубками (УНТ)» теоретически обосновано повышение механических свойств эластомера после наполнения углеродными нанотрубками, выполнен фрактальный анализ структуры нового нанокompозита, рассмотрены основные параметры, определяющие эффективное ультразвуковое диспергирование раствора полимерного композита, предложен новый метод усталостных испытаний полимерных материалов.

Усиление, прочность и деформация эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ. В соответствии с Гороховским А. В. повышение механических свойств нанокompозитов, наполненных УНТ, обусловлено двумя причинами. Первая причина заключается в интенсивном взаимодействии наночастиц с полимерной матрицей, что приводит к образованию в растворе полимера существенно большего количества центров кристаллизации. В итоге формируется материал, имеющий более высокую степень кристалличности и соответственно более высокую прочность. Второй причиной является вытянутая форма нанотрубок, благодаря которой в процессе отверждения полимера, в нем возникают ассиметричные поля напряжений (рисунок 1). Последние являются причиной образования в структуре полимерной матрицы групп макромолекул определенной ориентации.

Авторы в работе [New Scientist, 18 September 2004, p. 18.] отмечают особенность физических и механических свойств нанотрубок. В сравнении со сталью, нанотрубки имеют меньшую плотность в пять раз. При этом прочность нанотрубок в десятки раз превышает аналогичный параметр стали.

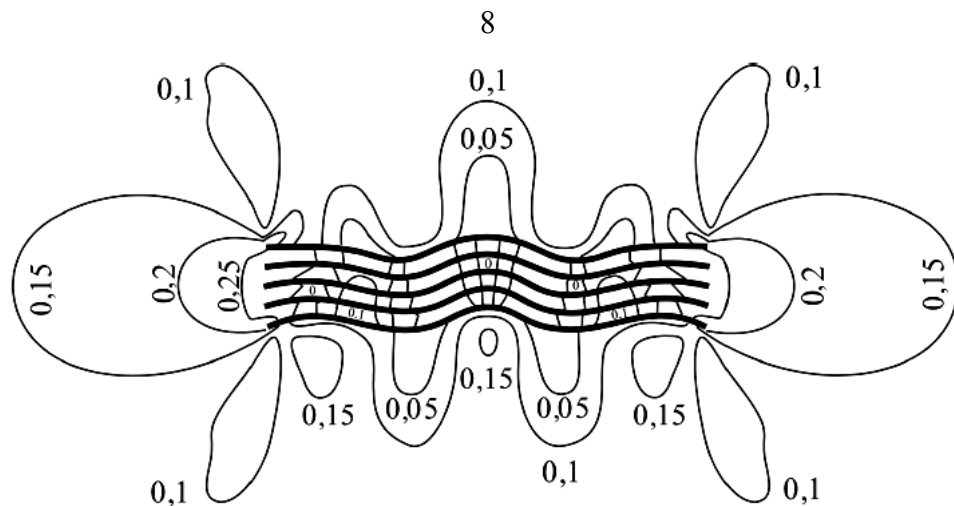


Рисунок 1 – Распределение механических напряжений в пространстве вокруг тактоида

Они считают, что размещение нанотрубки между соседними волокнами полимера, связывание её с ними углеводородными цепочками может повысить прочность на данном участке материала примерно до прочности нанотрубки (рисунок 2).

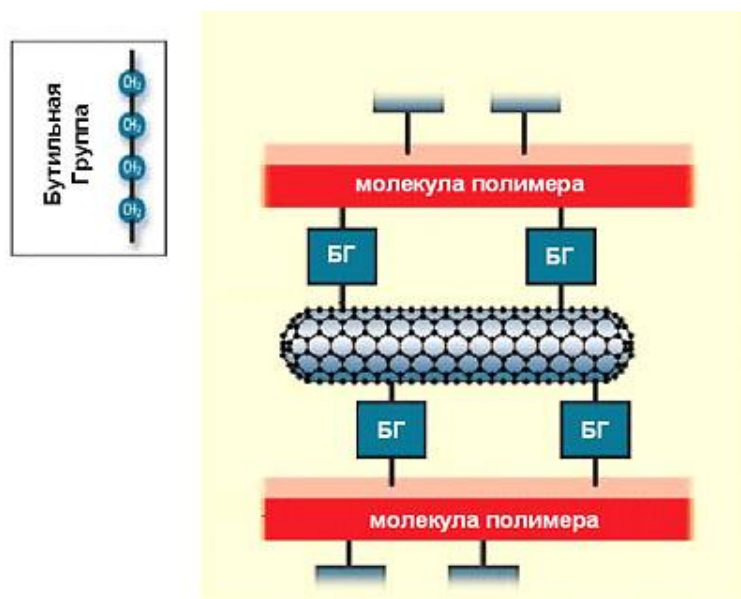


Рисунок 2 – Схематическое изображение нанотрубки, встроенной между молекулами полимера, соединённой с ними с помощью бутильных групп

В работе Козлова Г. В. показано, что основной причиной усиления полимерных нанокомпозитов, наполненных УНТ, является образование межфазных областей модуль упругости которых меньше аналогичного параметра УНТ, но значительно больше модуля упругости матричного полимера.

Степень усиления нанокомпозита, наполненного УНТ можно определить по формуле

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

где E_k и E_n – модули упругости композита и полимерной матрицы; φ_n и φ_{mf} – объемные относительные доли наночастиц наполнителя и межфазных областей, соответственно.

Формула для расчета степени усиления нанокompозитов, с учетом молекулярной подвижности полимерных цепей имеет вид

$$\frac{E_k}{E_n} = 1 + 0,32W^{1/2}\ell_{cm}, \quad (2)$$

где W – массовое содержание наночастиц наполнителя, %; ℓ_{cm} – длина статистического сегмента полимерной матрицы, нм.

С повышением содержания наночастиц наполнителя, включая УНТ, модуль упругости нанокompозитов увеличивается. Достигнув экстремального значения этот параметр уменьшается, что можно объяснить агрегированием наночастиц наполнителя.

Теоретическую прочность полимера можно приблизительно оценить по формуле Нарисава И.

$$\sigma_m \approx 0,1E. \quad (3)$$

Поэтому подобно модулю упругости, прочность нанокompозита с увеличением содержания УНТ будет возрастать до некоторого экстремума и затем из-за агрегации наночастиц уменьшаться.

Если в микрокомпозитах с увеличением содержания наполнителя деформация микрокомпозита однозначно уменьшается, то в нанокompозите, наполненном УНТ наблюдается увеличение деформации.

В работе Микитаева А. Г. указано, что отличием УНТ от других нанопополнителей (дисперсных частиц, органоглин) является их гладкая в атомном масштабе поверхность, что приводит к растяжению макромолекул матричного полимера на этой поверхности и образованию плотноупакованного межфазного слоя полимерная матрица-УНТ. Формирование плотноупакованных межфазных слоев приводит к изменению молекулярных и структурных характеристик полимерной матрицы (C_∞ , d_f , $\varphi_{кл}$, D_c), увеличению молекулярной подвижности и деформации нанокompозита.

Выносливость эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ. В виду того, что подшипники качения в узлах трансмиссии и ходовой части автотракторной техники работают в условиях циклического нагружения, основной причиной отказа посадок подшипников, восстановленных полимером, является усталостное разрушение. В соответствии с Гуняевым Г. М. начало усталостного разрушения в покрытии из полимерных композитов наблюдается в межфазной области. Разрушение УНТ маловероятно и возможно, если это агрегат из наночастиц.

Усталостная прочность композита, наполненного волокнами, зависит от механических свойств полимерной матрицы и армирующих волокон

$$\sigma_{x_N} = \sigma_m V_a \frac{E_a}{E_m} \xi. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что усталостная прочность композиции прямо пропорциональна прочности матрицы и модулю упругости армирующих волокон. Коэффициент ξ характеризует степень использования прочности матрицы при циклическом нагружении и наряду с природой матрицы учитывает влияние технологии изготовления композита, наличие в нем термических и усадочных напряжений.

Фрактальный анализ структуры нанокompозита. В современной теории усиления полимерных нанокompозитов от наполнения наночастицами используют три вида моделей: традиционная микромеханическая, перколяционная и фрактальная. В отличие от микромеханической модели, в перколяционной и фрактальной моделях в формулах для расчета модуля упругости композита не учитывается модуль упругости наполнителя. В соответствии с перколяционной и фрактальной моделями, благодаря наночастицам наполнителя, видоизменяется и фиксируется структура полимерной матрицы. После преобразования формула (2) получила вид

$$\ell_{cm} = \frac{\left(\frac{E_k}{E_n} - 1 \right)}{0,32 \sqrt{W_c}}. \quad (5)$$

В рамках фрактального анализа межфазный слой в наполненном эластомере является результатом взаимодействия двух фрактальных объектов: эластомера и поверхности частицы наполнителя. Толщина межфазного слоя определяется расстоянием взаимопроникновения этих объектов ℓ_{mf} . Так как модуль упругости наполнителя многократно больше аналогичного параметра матрицы, это взаимодействие выражается во внедрении наполнителя в полимерную матрицу на расстояние $\ell = \ell_{mf}$. Толщину межфазного слоя в этом случае можно определить по формуле

$$\ell_{mf} \approx a \left(\frac{r_n}{a} \right)^{\frac{2(d-d_s)}{d}}, \quad (6)$$

где a – нижний линейный масштаб фрактального поведения, который для полимеров принимают равным длине статистического сегмента ℓ_{cm} , r_n – радиус наночастицы (а точнее, агрегата наночастиц) наполнителя, для УНТ $r_n = 15$ нм; d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал, $d = 3$; d_s – фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя, для УНТ $d_s = 2$.

Далее построив систему из двух уравнений, используя результаты исследования деформационных свойств нанокompозита, определили статистическую гибкость полимерной цепи

$$\begin{cases} \lambda_p = C_\infty^{D_u-1} \\ C_\infty^{D_u} = \frac{2}{\varphi_{кл} + \varphi_n + \varphi_{мф}} \end{cases} \quad (7)$$

где λ_p – предельная степень вытяжки нанокompозита; D_u – фрактальная размерность участка полимерной цепи его фиксации (кластерами, физическими зацеплениями, узлами химической сшивки и тп); C_∞ – статистическая гибкость полимерной цепи; $\varphi_{кл}$ – объёмная доля узлов (кластеров) сетки физических зацеплений (узел сетки – контакт двух сегментов с замороженной молекулярной подвижностью).

Величину $\varphi_{кл}$ определили из зависимости

$$\varphi_{кл}^{np} = \varphi_{кл} (1 - \varphi_n) \rightarrow \varphi_{кл} = \frac{\varphi_{кл}^{np}}{1 - \varphi_n} \quad (8)$$

где $\varphi_{кл}^{np}$ – приведенное значение объёмной доли кластеров.

Для расчёта $\varphi_{кл}^{np}$ использовали уравнение

$$T_c = 20 - 262\varphi_{кл}^{np}.$$

Значения величины $C_\infty^{D_u}$ определяли при разном φ_n по формуле

$$C_\infty^{D_u} = \frac{2}{\varphi_{кл} + \varphi_n + \varphi_{мф}}. \quad (9)$$

Преобразовали верхнее уравнение (7) к виду

$$C_\infty = \frac{C_\infty^{D_u}}{\lambda_p}, \quad (10)$$

Затем рассчитали величину D_u

$$D_u = \frac{\ln(\lambda_p \times C_\infty)}{\ln C_\infty}. \quad (11)$$

Далее рассчитали фрактальную размерность структуры нанокompозита d_f , используя зависимость

$$C_\infty = \frac{2d_f}{d(d-1)(d-d_f)} + \frac{4}{3}. \quad (12)$$

После преобразования (12) получили

$$d_f = \left(C_\infty - \frac{4}{3} \right) \times (9 - 3d_f). \quad (13)$$

Фактор ориентации нанотрубок η определили из зависимости

$$\varphi_{мф} = 1,09\eta. \quad (14)$$

Размерность каркаса нанотрубок D_k определили, используя зависимость

$$\eta = 0,506(D_k - 2). \quad (15)$$

В таблице представлены результаты фрактального анализа.

Таблица – Структурные и молекулярные характеристики структуры эластомерного нанокompозита

№	W_c/φ_n	$l_{cm}, \text{нм}$	$l_{mf}, \text{нм}$	φ_{mf}	φ_{kl}	C_∞	D_u	d_f	η	D_k
1	0,05/0,015	1,68	4,58	0,023	0,201	2,99	1,9436	2,4976	0,021	2,04
2	0,1/0,03	5,83	6,9	0,08	0,204	2,06	1,1818	2,05	0,073	2,14
3	0,15/0,045	1,45	4,36	0,067	0,207	2,09	2,49	2,082	0,061	2,12

Чем больше фактор ориентации нанотрубок η , а также размерность каркаса D_k , тем больше ориентация нанотрубок и выше прочность и модуль упругости нанокompозита. Поэтому наиболее высокие механические свойства имеет нанокompозит с содержанием УНТ $W_c = 0,1$ масс.ч.

Ультразвуковое диспергирование растворов полимерных нанокompозитов. Деформационно-прочностные полимерных композитов существенным образом зависят от качества диспергирования компонентов, наличия агрегатов из частиц наполнителя, характера распределения частиц в объеме полимерной матрицы. Эффективность смешения и диспергирования растворов полимерных композитов можно повысить, используя ультразвуковую обработку (УЗО).

Колесников А. А. в работе установил основные параметры, определяющие эффективное ультразвуковое диспергирование раствора полимерного композита. К ним следует отнести амплитуду звукового давления и продолжительность ультразвукового озвучивания.

Сформулированы условия эффективного диспергирования раствора полимерного композита:

1) рекомендуемый интервал значений амплитуды звукового давления P_A при УЗО

$$2,0P_{\text{атм}} \leq P_A < 10P_{\text{атм}}, \quad (16)$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление;

2) максимально допустимый уровень раствора полимерного композита в ультразвуковой ванне $H_{\text{доп}}$ не должен быть больше N

$$H_{\text{доп}} \leq N, \quad (17)$$

где N – естественный фокус преобразователя.

Естественный фокус для дискового излучателя рекомендуется определять по формуле

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (18)$$

где D – диаметр излучателя; λ – длина волны.

Метод усталостных испытаний. Новый метод ускоренных испытаний полимерных материалов на выносливость разработали, используя за основу метод Кравченко. Предел выносливости и толщина полимерного покрытия имеют сильную взаимосвязь. С уменьшением толщины покрытия, увеличивается его предел выносливости. В этой связи, нами предложено на графике выносливости вместо напряжений цикла указывать значения толщины полимерного покрытия. Экстра-

поляция зависимости к оси ординат указывает в точке их пересечения значение максимальной допустимой толщины полимерной посадки.

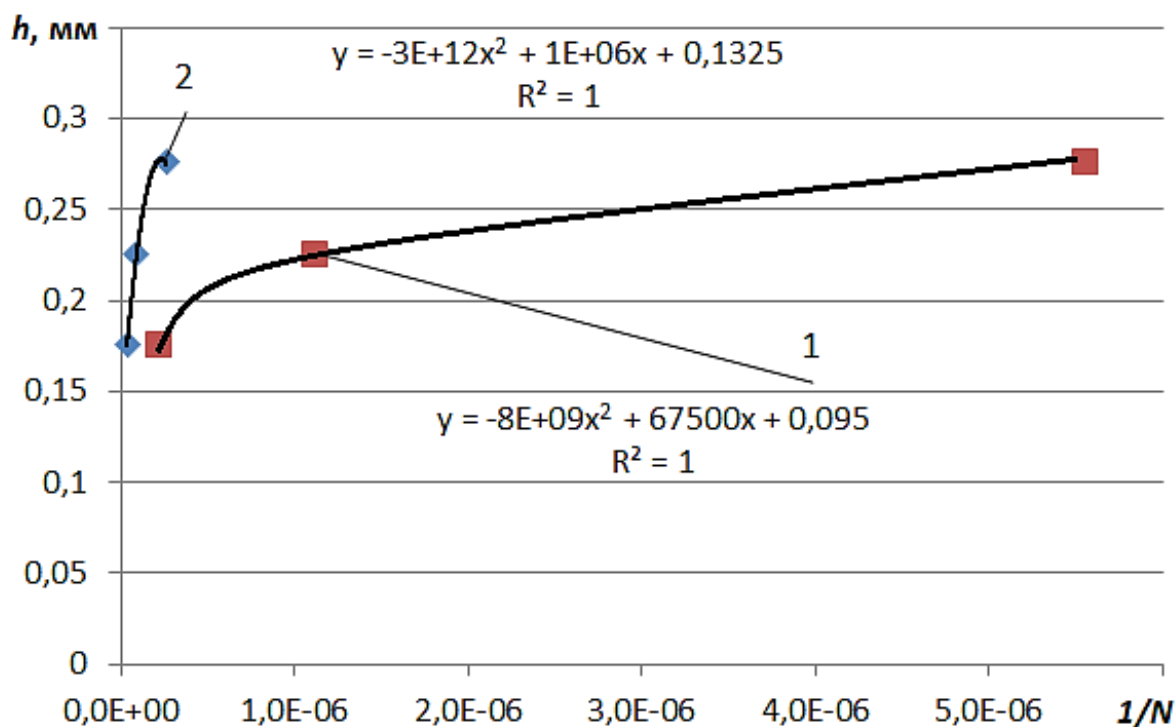
Предложен новый метод ускоренных стендовых испытаний на выносливость полимерных материалов. Первоначально стендовыми испытаниями устанавливаются ресурс полимерной посадки под действием радиальной циклической нагрузки для трех различных, заданных толщин полимерных покрытий. По трем опытными точкам строят графическую зависимость толщины покрытия от величины обратной количеству циклов нагружения (рисунок 3). Далее экстраполируют графическую зависимость до пересечения ее с осью ординат. Точка пересечения – это максимальная допустимая толщина полимерной посадки, сохраняющая работоспособность до конца базы испытаний. В завершении рассчитывают критерий подобия π_1 по формуле

$$\pi_1 = \frac{K(hS)^2}{\sigma_a}, \quad (19)$$

где h – толщина полимерного слоя, м; S – площадь полимерного слоя, м²; K – величина, постоянная для данного полимерного материала; σ_a – амплитуда напряжений, Па.

$$K = \frac{\rho \Delta F}{M}, \quad (20)$$

где ρ – плотность полимерного материала, кг/м³; ΔF – энергия активации, Дж; M – молярная масса полимерного материала, кг/моль.



1 – эластомер Ф-40С; 2 – нанокompозит на основе эластомера Ф-40С
Рисунок 3 – График для определения максимально допустимой толщины полимерного покрытия по методу ЛГТУ

Использование формулы (19) и критерия подобия π_1 позволяет рассчитать

максимальную допустимую толщину полимерной посадки для любых типоразмеров подшипников качения.

Новый метод ускоренных усталостных испытаний обеспечивает многократное сокращение объема и продолжительности экспериментальных исследований конструкционных материалов.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведены общая методика исследований и частные методики исследования механических и теплофизических свойств эластомерного нанокompозита, ультразвукового диспергирования и дегазации раствора нанокompозита, структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов, дефектности покрытий после ручного смешения и УЗО, долговечности посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокompозитом на его основе.

При исследовании механических свойств испытывали три состава нанокompозита:

- состав № 1: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., УНТ – 0,075 масс. ч.;
- состав № 2: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., УНТ – 0,100 масс. ч.;
- состав № 3: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., УНТ – 0,125 масс. ч.

Деформационно-прочностные свойства пленок эластомера Ф-40С исследовали в соответствии с ГОСТ 14236-81, ГОСТ 9550-81 и ГОСТ 12423-66. В качестве образцов использовали пленки нанокompозита прямоугольной формы, размерами: 50×10×0,15 мм, при расчетной длине составляющей 30 мм. Испытания образцов осуществляли на разрывной машине ИР 5047-50 с одновременной записью диаграммы "нагрузка-деформация".

Адгезию материала оценивали прочностью связи с металлом при отслаивании образцов (ГОСТ 21981-76). Образцами служили пластины 100×25×3 мм из стали 45, с шероховатостью поверхности Ra 0,63, на которые кистью № 5 наносили послойно покрытие из раствора полимера. Затем накладывали стальную сетку № 07 (ГОСТ 3826-82). Далее вновь послойно наносили покрытие.

При исследовании теплопроводности использовали метод температурного градиента. Метод основан на принципе доставки постоянного теплового потока от нагревателя к холодильнику, проходящего последовательно через эталонный и исследуемый образцы. Состав установки: холодильник, три диска из меди марки М1, диск из исследуемого материала, диск из оргстекла СО-95-К и нагреватель. Образцы изготовлены из нанокompозита в виде дисков диаметром 15,0 и толщиной 0,5 мм. Для тепловой изоляции от окружающей среды диски разместили в трубе из ПВХ, которую дополнительно опоясывает резиновая втулка. Температуры трех медных дисков T_1 , T_2 и T_3 измеряли в установившемся температурном режиме инфракрасным пирометром марки Testo 830-T4.

Термостойкость эластомера Ф-40С и его нанокompозита оценивали по изменению прочности и относительного удлинения образцов, после старения в условиях ограниченного доступа кислорода воздуха (ОДКВ) при температуре 200 °С в течение 2 ч. Образцы – полимерные пленки размерами 50×10×0,15 мм. Старение образцов проводили в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3. Испытания проводили на разрывной машине ИР 5082-50.

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

При исследовании процесса дегазации раствора нанокompозита с интервалом времени в 0,5 мин измеряли остаточную массу раствора весами лабораторными ВК 3000.1. В процессе озвучивания, температуру раствора нанокompозита измеряли инфракрасным пирометром Testo 830-T4.

Исследование структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов проводили на образцах пленок квадратной формы размерами 10×10×10 мм. Микроструктуру образцов нанокompозитов изучали методом растровой электронной микроскопии. Для исследований использовали электронно-ионный сканирующий микроскоп Quanta 600 FEG с электроннолучевой колонной, оснащенной вольфрамовым катодом, с ускоряющим напряжением от 200 эВ до 30 кВ, разрешением (при оптимальном WD) 3,5 нм при 35 кВ; 3,5 нм при 30 кВ в режиме естественной среды; < 15 нм при 1 кВ в режиме низкого вакуума.

Дефектность покрытий нанокompозита оценивали по ГОСТ 9407-84. Образцами являлись пленки нанокompозита после ручного и ультразвукового диспергирования. Оценочные параметры качества пленок: площадь разрушенного покрытия, размер и концентрация пор. Значения параметров определяли микроскопом МПБ-2, который обеспечивает 24-х кратное увеличение.

Исследование долговечности посадок «корпус-подшипник», восстановленных нанокompозитом, проводили на вибростенде. Значение циклической радиальной нагрузки на подшипниковый узел при испытаниях 20,0 кН. База испытаний $5,94 \times 10^7$ циклов нагружения. За критерий долговечности посадки приняли наработку до начала сдвига наружного кольца подшипника в посадочном отверстии.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты исследования механических и теплофизических свойств эластомерного нанокompозита, ультразвукового диспергирования и дегазации раствора нанокompозита, структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов, дефектности покрытий после ручного смешения и УЗО, долговечности посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокompозитом на его основе.

Деформационно-прочностные свойства эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе. Наиболее высокими механическими свойствами новый эластомерный нанокompозит обладает при следующем оптимальном составе (масс. ч.): эластомер Ф-40С – 100; УНТ – 0,1. В сравнении с полимерной матрицей прочность нанокompозита увеличилась на 32 %, деформация – 1,66 раза, удельная работа разрушения на 82 %, что характеризует его более высокую выносливость и создает условия для увеличения долговечности посадок подшипников после восстановления.

Адгезионные свойства эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе. Нанокompозит с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., по сравнению с полимер-

ной матрицей, обладает более высокой адгезией на 30 % и достигает значения $F = 7,3$ кН/м.

Модуль упругости эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе. Наполнение эластомера Ф-40С углеродными нанотрубками увеличивает модуль упругости материала на растяжение на 3 %, сжатие – 59 %. Увеличение модуля сжатия нанокомпозита снизит податливость опор качения, позволит наносить нанокомпозитное покрытие большей толщины при восстановлении подшипниковых отверстий в корпусных деталях, исключая смещение осей валов и подшипников выше допустимых значений.

Оптимизация термической обработки нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С. Реализован активный эксперимент по плану B_2 и получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокомпозита эластомера Ф-40С, наполненного УНТ, от температуры и времени термообработки в натуральных единицах.

$$Y = -1489,804 + 20,034x_1 + 27,053x_2 + 0,13x_1x_2 - 0,06765x_1^2 - 4,935x_2^2.$$

Поверхность отклика и ее двумерное сечение представлены на рисунках 4 и 5. Определен оптимальный режим термической обработки эластомерного нанокомпозита: температура $T = 150$ °С, время $t = 3$ ч, при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства. $\alpha_p = 35$ МДж/м³.

Теплопроводность эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе. Наполнение УНТ эластомера Ф-40С существенно увеличивает теплопроводность нанокомпозита до значения $\lambda_k = 10,6$ Вт/м×К, что в 36,55 раза превышает значение коэффициента теплопроводности ненаполненного эластомера.

Термостойкость эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе в условиях ОДКВ. Экспериментальные исследования показали, что углеродные нанотрубки «Таунит-М» это ингибиторы процесса термоокисления эластомера Ф-40С. Наполнение УНТ эластомера Ф-40С увеличивает, в сравнении с ненаполненным эластомером, увеличивает термостойкость нанокомпозита по прочности в 1,1 раза, по деформации – 1,17 раза.

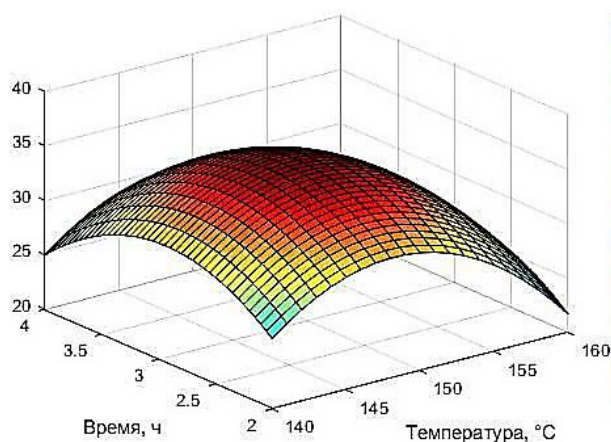


Рисунок 4 – Зависимость удельной работы разрушения α_p пленок эластомерного нанокомпозита от температуры T и времени t отверждения

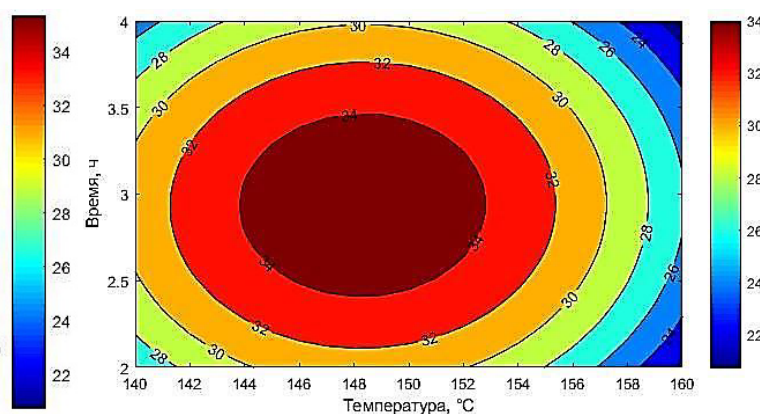


Рисунок 5 – Двумерное сечение поверхности отклика

Определение времени ультразвукового диспергирования раствора эластомерного нанокompозита. УЗО на протяжении $t = 10$ мин приводит к повышению температуры раствора нанокompозита до значения $T = 56$ °С и закипанию ацетона в растворе, что не допускается. Поэтому эффективное смешение и диспергирование, равномерное распределение углеродных нанотрубок в объеме раствора нанокompозита будут обеспечены при продолжительности УЗО последнего в течение $t = 6$ мин.

Исследование дегазации раствора эластомерного нанокompозита. Явление кавитации при УЗО раствора нанокompозита повышает его температуру и понижает квазиравновесную концентрацию, т.е. уменьшает концентрацию пузырьков газа в растворе в сравнении со стандартной температурой. По этой причине ультразвуковое диспергирование обеспечивает испарение растворителя до 10% от первоначальной массы раствора эластомерного нанокompозита, что способствует дальнейшему снижению пористости нанокompозитного покрытия.

Исследование структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после ручного смешения и УЗО. Ультразвуковая обработка, в сравнении с ручным смешением, многократно до 2,76 раза уменьшает размеры агрегатов и выравнивает их по размерам. Размеры агрегатов различаются не значительно – на 27,43 %.

После ручного смешения в состав агрегата помимо углерода входит большой перечень примесей: O, Al, Si, S, Fe, Ni.

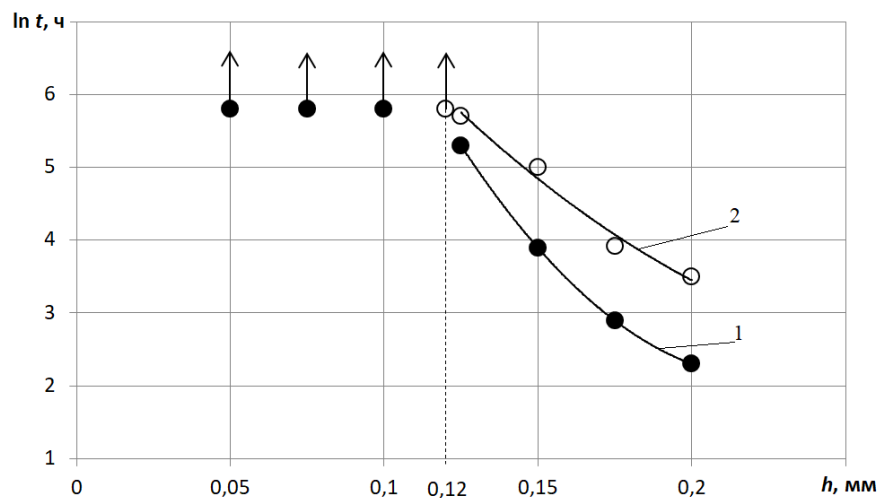
Состав агрегата после УЗО состоит из углерода и меди. Присутствие меди объясняется рассеянием электронов на медную часть BSE-детектора, по причине низкой проводимости образца и скопления заряда на его поверхности (т.е. это фон от детектора). Отсутствие остальных примесей можно объяснить влиянием УЗО, которая способствует очистке от них агрегатов наночастиц.

Дефектность и деформационно-прочностные свойства покрытий после ультразвукового диспергирования. Площадь разрушенной поверхности образцов, после ручного смешения составила $S_p = 20$ %. В образцах, сформированных после УЗО, параметр дефектности в 1,33 раза меньше и составил $S_p = 15$ %. Средний диаметр пор в нанокompозитных пленках после ручного смешения составил $d = 0,4...0,5$ мм, а в пленках после УЗО этот параметр меньше в 1,6 раза и достигает значений $d = 0,3...0,4$ мм. В пленках, после ручного смешения, содержание пор составило $K_{пор} = 1,6$ шт/см². После УЗО параметр дефектности уменьшился в 1,6 раза и составил $K_{пор} = 1$ шт/см².

Ультразвуковое диспергирование и дегазация раствора нанокompозита повышает качество покрытий и соответственно увеличивает их деформационно-прочностные и адгезионные свойства: прочность в 1,04 раза, деформацию в 1,09 раза, удельную работу разрушения в 1,05 раза, адгезию в 1,06 раза.

Исследования долговечности посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокompозитом на его основе. Ресурс посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом эластомера Ф-40С, превышает ресурс посадок не наполненного эластомера в зависимости от толщины полимерного покрытия от 1,5 до 11 раз (рисунок 6). Нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные

отверстия в корпусных деталях автомобилей с диаметральным износом до 0,28 мм.



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

Рисунок 6 – Зависимость долговечности t полимерных посадок подшипника 209 в корпусной детали от толщины полимерного покрытия h при радиальной нагрузке 20 кН

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

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

Разработанная технология восстановления корпусных деталей автотракторной техники внедрена в ООО «Сосновка-Зернопродукт» с. Большая Сосновка, Мичуринского района, Тамбовской области. Для оценки надежности восстановленных корпусных деталей с февраля 2021 г по ноябрь 2021 г в хозяйстве проводили эксплуатационные испытания автотракторной техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных корпусных деталей не наблюдалось.

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

Расчеты показали экономическую эффективность технологии восстановления корпусных деталей автотракторной техники. Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления в ООО «Сосновка-Зернопродукт» Мичуринского района, Тамбовской области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 240 тыс. р.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В соответствии фрактальной моделью основной причиной усиления нанокompозита является образование межфазных слоев. Межфазные слои, как и наночастицы, являются армирующим элементом в структуре полимерного нанокompозита, повышающими его модуль упругости и прочность. В отличие от микрокомпозитов, наполнение эластомера УНТ приводит к увеличению деформации материала. УНТ имеют гладкую в атомном масштабе поверхность, что приводит к растяжению макромолекул матричного полимера на этой поверхности и образованию плотноупакованного межфазного слоя с увеличенной молекулярной подвижностью. Выполнен фрактальный анализ структуры эластомерного нанокompозита и получены соответствующие молекулярные и структурные характеристики.

2. Разработан новый метод ускоренных стендовых испытаний на выносливость полимерных материалов, позволяющий рассчитать максимально допустимую толщину полимерной посадки для любого типоразмера подшипника качения. Новый метод ускоренных усталостных испытаний полимерных посадок позволит многократно сократить объем и продолжительность экспериментальных исследований материалов.

3. Разработан новый эластомерный нанокompозит с оптимальным составом: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., углеродные нанотрубки «Таунит-М» – 0,1 масс. ч. (патент на изобретение № 2751339 РФ). Получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С от режима термической обработки. Определен оптимальный режим нагрева: температура – 150 °С, время – 3 ч, при котором нанокompозит имеет высокую удельную работу разрушения 35,0 МДж/м³. В сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С, нанокompозит имеет более высокие механические свойства: прочность материала увеличилась на 32 %, деформация – 1,66 раза, адгезия – 30 %. Удельная работа разрушения повысилась на 82 %, что свидетельствует о более высокой выносливости материала и создает условия для повышения долговечности восстановленных посадок подшипников. Увеличение модуля упругости нанокompозита до 59 %, позволит уменьшить податливость восстановленной опоры при радиальном нагружении подшипника, исключить смещение осей подшипника относительно оси отверстия, увеличить предельно допустимую толщину полимерного покрытия при восстановлении корпусных деталей.

4. Наполнение эластомера УНТ увеличивает коэффициент теплопроводности нанокompозита в 36,55 раза (от 0,29 до 10,6 Вт/м×К), что позволит повысить теплоотвод и, соответственно, долговечность подшипниковых узлов. Коэффициенты старения нанокompозита по прочности увеличились в 1,1 раза, а по деформации – 1,17 раза, в сравнении с аналогичными показателями полимерной матрицы.

5. Определен рациональный режим ультразвуковой обработки раствора эластомерного нанокompозита: $N = 55$ Вт, $t = 6$ мин. УЗО способствует дегазации раствора. Испарение ацетона составляет около 10 % от первоначальной массы раствора нанокompозита, что приводит к уменьшению пористости эластомерного нанокompозитного покрытия. По сравнению с ручным смешением, концентрация пор уменьшилась в 1,6 раза, а площадь разрушенной поверхности покрытия в 1,33 раза. Соответственно повысились механические свойства покрытий: прочность увеличилась в 1,04 раза, деформация в 1,09 раза, удельная работа разрушения в 1,05 раза и адгезия в 1,06 раза. Ультразвуковая обработка, в сравнении с ручным смешением, многократно до 2,76 раза уменьшает размеры агрегатов и выравнивает их по размерам. Размеры агрегатов различаются не значительно – на 27,43 %.

6. Восстановление корпусных деталей нанокompозитом обеспечивает высокую долговечность посадок подшипников. Ресурс посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом эластомера Ф-40С, выше аналогичного параметра посадок не наполненного эластомера до 3,3 раза. Эластомерным нанокompозитом рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия в корпусных деталях автомобилей с диаметральным износом до 0,28 мм.

7. Разработана технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях автотракторной техники нанокompозитом эластомера Ф-40С. Технология восстановления внедрена в ООО «Сосновка-Зернопродукт» Мичуринского района, Тамбовской области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 240 тыс. р.

Рекомендации производству. Нанокompозит на основе эластомера Ф-40С (эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., УНТ «Таунит-М» – 0,1 масс. ч.), новая технология рекомендуются для восстановления корпусных деталей при ремонте автотракторной техники.

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

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а). в издании, рекомендованном ВАК Минобрнауки РФ:

1. Мельников, А. Ю. Метод оценки напряженного состояния полимерной оболочки в восстановленной корпусной детали [Текст] / Р. И. Ли, Ф. А. Кирсанов, А. В. Бутин, В. А. Малюгин, А. В. Пчельников, А. Ю. Мельников // Научное обозрение – 2017. – №19. – С. 58-63.

2. Мельников, А. Ю. Моделирование и исследование долговечности полимерного покрытия при циклическом нагружении с использованием критерия подобия [Текст] / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. В. Пчельников, А. Ю. Мельников // Научное обозрение – 2017. – №19. – С. 64-69.

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

4. Мельников, А. Ю. Перспективный полимерный нанокомпозит для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей [Текст] / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников // Наука в Центральной России. – 2021. – №3 (51). – С. 87-95.

5. Мельников, А. Ю. Параметры ультразвукового диспергирования растворов эластомерного нанокомпозита для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей [Текст] / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников // Наука в Центральной России. – 2021. – №4 (52). – С. 106-114.

6. Мельников, А. Ю. Перспективный эластомерный нанокомпозит для восстановления корпусных деталей автомобилей [Текст] / Завражнов А. И., Ли Р. И., Псарев Д. Н., Мельников А. Ю. // Сельский механизатор. – 2021. – №8. – С. 30-32.

7. Мельников, А. Ю. Исследование теплопроводности полимерных нанокомпозитов [Текст] / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Мельников А. Ю., Быконя А. Н. // Наука в Центральной России. – 2022. – №1 (55). – С. 81-91.

8. Мельников, А. Ю. Оптимизация состава и режима термической обработки эластомерного нанокомпозита для восстановления корпусных деталей техники [Текст] / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Мельников А. Ю., Быконя А. Н. // Наука в Центральной России. – 2022. – №2 (56). – С. 87-97.

9. Мельников, А. Ю. Метод ускоренных усталостных испытаний полимерных материалов [Текст] / Ли Р.И., Псарев Д.Н., Киба М.Р., Мельников А.Ю. // Наука в Центральной России. – 2022. – №3 (57). – С. 92-102.

10. Мельников, А. Ю. Термостойкость посадок подшипников качения, восстановленных эластомерными нанокомпозитами [Текст] / Ли Р. И., Ризаева Ю. Н., Мельников А. Ю., Псарев Д. Н., Киба М. Р. // Наука в Центральной России. – 2022. – №4 (58). – С. 122-130.

б). патенты на изобретение РФ:

11. Мельников, А. Ю. Стенд для испытания подшипников качения на долговечность [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2719624. Заявл. 08.07.2019. / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Ризаева Ю. Н., Пчельников А. В., Быконя А. Н., Мельников А. Ю. // Оpubл. 21.04.2020. – Бюл. № 12.

12. Мельников, А. Ю. Способ восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях покрытием из раствора полимерного материала [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2751339. Заявл. 18.03.2020. / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Ризаева Ю. Н., Киба М. Р., Быконя А. Н., Мельников А. Ю. // Оpubл. 13.07.2021. – Бюл. № 20.

13. Мельников, А. Ю. Композиция для покрытия металлических изделий [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2757271. Заявл. 19.10.2020. / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Быконя А. Н., Мельников А. Ю., Ерохин В. Е. // Оpubл. 12.10.2021. – Бюл. № 29.

в). прочие издания:

– в изданиях, включенных в систему цитирования (библиографическую базу) Scopus:

14. Lee, R., Psarev, D., Pchelnikov, A., Melnikov, A. Method for Calculation of Constructive and Mode Parameters of Infrared Heating Unit for Drying of Polymeric Coatings on a Metal Substrate. Proceedings – 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, pp. 633-635.

15. Lee, R., Psarev, D., Bykonya, A., Kiba, M., Melnikov, A. Mathematical Model of Infrared Heating of Body Parts of Cars and Tractors during Restoration with Polymer Materials.

Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020, 2020, pp. 788-792.

16. R. Li, D. Psarev, M. Kiba, A. Melnikov, V. Erokhin. Optimization of the Composition and Regime of Heat Treatment of Elastomeric Nanocomposite for Restoring Worn Out Car Body Parts – 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021, 2021, pp. 995-1000.

– **статьи в сборниках материалов Международных научных конференций:**

17. Мельников, А. Ю. Результаты экспериментальных исследований повышения эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения полимер-полимерной композицией [Текст] / Бутин А. В., Тоиров И. Ж., Мельников А. Ю. // 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. - Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2017. С. 79-81.

18. Мельников, А. Ю. Методы усталостных испытаний полимерных материалов [Текст] / Коломейченко А. В., Мельников А. Ю. // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ИТТ"2018. Материалы I международной научно-практической конференции. В 2-х томах. 2018. С. 117-123.

19. Мельников, А. Ю. Оценка выносливости полимерных материалов при усталостных испытаниях [Текст] / Ли Р. И., Мельников А. Ю. // В сборнике: Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники Материалы Международного научно-технического семинара имени В. В. Михайлова. Саратов, 2019. С. 228-232.

20. Мельников, А. Ю. Математическая модель расчета режимов инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях [Текст] / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Быконя А. Н., Пчельников А. В., Мельников А. Ю. // Системы управления, сложные системы: моделирование, у-тойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А. А. Шестакова (16-17 сентября 2020 года). Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина. Елец, 2020. С. 408-413.

21. Мельников, А. Ю. Методология исследования эластомерных нанокомпозитов для восстановления корпусных деталей автомобилей [Текст] / Ли Р. И., Кибя М. Р., Мельников А. Ю. // Сборник статей 3-й Международной научно-технической конференции: Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее. Курск, 2021. С. 231-233.

22. Мельников, А. Ю. Деформационно-прочностные свойства нанокомпозитов на основе эластомера Ф-40С [Текст] / Р. И. Ли, М. Р. Кибя, А. Ю. Мельников // Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее: сборник статей 3-й Международной научно-технической конференции (21 мая 2021 года)/ редкол.: Е. В. Агеев (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-т, 2021. - с. 234-237.

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

24. Мельников, А. Ю. Влияние ультразвуковой обработки на качество эластомерных нанокомпозитных покрытий [Текст] / Ерохин В. Е., Мельников А. Ю. // Интеллек-

туальные системы в аграрном и строительном комплексе. сборник материалов Международной научно-практической конференции. Орел, 2022. С. 222-227.

25. Мельников, А. Ю. Метод ускоренных усталостных испытаний полимерных материалов, применяемых для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей [Текст] / Р. И. Ли, А. Ю. Мельников // Техника и технологии: пути инновационного развития: Сборник научных трудов 11-й Международной научнопрактической конференции (30 июня 2022 года)/ редкол.: Горохов А. А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т.,- Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022, С. 194-198.

26. Мельников, А. Ю. Параметры ультразвукового диспергирования раствора эластомерного нанокompозита, содержащего углеродные нанотрубки [Текст] / Р. И. Ли, А. Ю. Мельников // Техника и технологии: пути инновационного развития: Сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции (30 июня 2022 года)/ редкол.: Горохов А. А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т.,- Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022, С. 199-204.

27. Мельников, А. Ю. Перспективный эластомерный нанокompозит для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей [Текст] / Р. И. Ли, А. Ю. Мельников, И. Ж. Тоиров // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: сборник статей международной научно-практической конференции 20–21 апреля 2022 года, г. Липецк – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2022. С. 291-297.

28. Мельников, А. Ю. Новый метод ускоренных усталостных испытаний полимерных материалов [Текст] / Р. И. Ли, А. Ю. Мельников // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: сборник статей международной научно-практической конференции 20–21 апреля 2022 года, г. Липецк – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2022. С. 301-308.

– **статьи в сборниках материалов прочих научных конференций:**

29. Мельников, А. Ю. Исследование деформационно-прочностных свойств полимерного нанокompозита [Текст] / Р. И. Ли, А. Ю. Мельников // Транспорт. Тенденции развития современной науки: материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, 14-18 апреля 2018 года, г. Липецк – Липецк: Изд-во Липецкого гос. тех. университета, 2018. – С. 186-188.

30. Мельников, А. Ю. Оценка выносливости полимерных материалов при ускоренных стендовых испытаниях [Текст] // Школа молодых ученых. Материалы областного профильного семинара. 2019. С. 108-111.

31. Мельников, А. Ю. Оценка выносливости полимерных материалов при ускоренных усталостных испытаниях [Текст] / Ли Р. И., Мельников А. Ю. // Инженерия в строительстве и транспорте. Тенденции развития современной науки: Материалы I Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых (06-07 июня 2020 года), г. Липецк: Изд-во Липецкого гос. тех. университета, 2020. – С. 86-90.

32. Мельников, А. Ю. Восстановление корпусных деталей автомобилей полимерными материалами с применением инфракрасной термообработки [Текст] / Быко-ня А. Н., Мельников А. Ю. // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2021. №1 (44). С. 48-53.

33. Мельников, А. Ю. Определение оптимальной термообработки полимерного нанокompозита [Текст] // Материалы областного профильного семинара "Школа молодых ученых" по проблемам технических наук. Тезисы и доклады семинара. Липецк, 2022. С. 138-141.

Подписано в печать 04.08.2023. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Объём 1,5 п.л. Тираж 116 экз. Заказ № 477.
Липецкий государственный технический университет.
Отдел полиграфических работ и услуг.
398055, Липецк, ул. Московская, 30.