

На правах рукописи



Киба Мария Романовна

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОСАДОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ
В КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЯХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ
НАНОКОМПОЗИТОМ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРА Ф-40**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск-наукоград РФ, 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» на кафедре «Стандартизация, метрология и технический сервис»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Псарев Дмитрий Николаевич

Официальные оппоненты: **Жачкин Сергей Юрьевич,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», кафедра автоматизированного оборудования машиностроительного производства, профессор
Кононенко Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», кафедра «Технологии обработки материалов», профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I»

Защита диссертации состоится 09 декабря 2020 г. в 10:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» 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.ed.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 «_____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Михеев
Николай Владимирович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эффективность отечественного сельскохозяйственного производства России в значительной степени определяется ценой производимой продукции. Затраты на технический сервис сельскохозяйственной техники и технологического оборудования перерабатывающих предприятий составляют существенную статью в себестоимости сельскохозяйственной продукции. Восстановление изношенных деталей позволяет значительно снизить затраты на ремонт машин и оборудования, повысить его надежность. Для восстановления требуется в 20-30 раз меньше металла, чем при изготовлении аналогичных новых деталей. При исключении металлургического цикла восстановление 1 тн стальных деталей позволяет сэкономить 180 кВт/ч электроэнергии, 0,8 тн угля, 0,5 тн известняка, 175 м³ природного газа. Наиболее высокий экономический и технический эффект достигается при восстановлении корпусных деталей техники. Это объясняется их большой материалоемкостью и ценой с одной стороны и относительно невысокими затратами на восстановление с другой стороны. При дефектации корпусных деталей последние в большинстве случаев выбраковывают по причине износа посадочных отверстий под подшипники качения. Перспективным направлением, обеспечивающим высокую эффективность восстановления посадочных отверстий корпусных деталей, является разработка полимерных композитов. Благодаря наполнению полимерной матрицы высокодисперсными частицами, существенно повышаются потребительские свойства материала и понижается его цена. Большую научную и практическую актуальность имеют исследования и последующая разработка новых полимерных нанокомпозитов, что создает предпосылки для разработки перспективных высокоэффективных технологических процессов восстановления посадочных отверстий, которые могут увеличить послеремонтный ресурс корпусных деталей, повысить надежность и сократить затраты при ремонте 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» и планом госбюджетных научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО МичГАУ на 2016...2020 годы по теме № 6 «Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта деталей с.-х. техники и оборудования» на кафедре «Стандартизация, метрология и технический сервис» Мичуринского государственного аграрного университета.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам восстановления изношенных деталей автотракторной техники полимерными материалами посвящены труды Астанина В. К., Башкирцева В. Н., Бауровой Н. И., Жачкина С. Ю., Котина А. В., Кононенко А. С., Курчаткина В. В., Ли Р. И., Родионова Ю. В., Пухова Е. В. и многих других отечественных ученых.

Для компенсации износа посадочных отверстий подшипников в корпусных деталях при восстановлении используют анаэробные герметики, акриловые

адгезивы, эластомеры и композиты на их основе. Анализ способов восстановления, в которых используются вышеуказанные материалы, показал, что наиболее технологичным является восстановление отверстий нанесением покрытия из растворов эластомеров и композитов на их основе.

В настоящее время в России выпускается широкий ассортимент различных наночастиц. Однако, вопрос обоснования выбора наночастиц для наполнения эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий корпусных деталей, не изучен и требует всестороннего исследования. Представляют большой научный и практический интерес исследования механических, теплофизических свойств и разработка полимерного нанокompозита на основе эластомера Ф-40, наполненного металлическими наночастицами.

Не изучен и требует исследования вопрос калибрования, оценки качества и точности отверстий с покрытиями, выполненными нанокompозитом на основе эластомера Ф-40.

Цель исследования. Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 за счет повышения качества полимерных покрытий, увеличения их тепло- и термостойкости, теплопроводности, обеспечения высокой долговечности восстановленных неподвижных соединений подшипников.

Задачи исследования:

- разработать теоретические предпосылки повышения эффективности эластомеров для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях при введении металлических наноразмерных наполнителей;
- исследовать деформационно-прочностные и адгезионные свойства нанокompозита на основе эластомера Ф-40, наполненного металлическими наночастицами, и оптимизировать его состав;
- исследовать тепло- и термостойкость, теплопроводность нанокompозита Ф-40;
- определить экспериментально рациональные геометрические параметры режущего инструмента и исследовать повреждаемость покрытий нанокompозита Ф-40 после калибрования;
- исследовать долговечность и тепловой баланс посадок «подшипник-корпус», восстановленных нанокompозитом Ф-40;
- разработать технологию восстановления посадочных отверстий корпусных деталей нанокompозитом Ф-40 и оценить ее технико-экономическую эффективность.

Научная новизна результатов исследования. Заключается в теоретическом обосновании повышения тепло- и термостойкости, теплопроводности, прочности и долговечности посадок подшипников качения, восстановленных композитами на основе эластомеров, наполненных металлическими наночастицами, регрессионной модели удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40, исследовании деформационно-прочностных и адгезионных свойств, теплопроводности, тепло- и термостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40, определении оптимальных геометрических па-

раметров режущей кромки калибра, исследовании повреждаемости и отклонений от заданных размеров полимерных покрытий после механической обработки калибром, долговечности посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в обосновании выбора наночастиц наполнителей, обеспечивающих повышение деформационно-прочностных, адгезионных и теплофизических свойств, увеличение долговечности посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом.

Практическая ценность заключается в разработанных нанокompозите на основе эластомера Ф-40, наполненном металлическими наночастицами, технологии и технологической оснастке для его использования при восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники.

Объект исследования. Пленки и полимерные покрытия, посадки «корпус-подшипник», восстановленные нанокompозитом на основе эластомера Ф-40, наполненном металлическими наночастицами.

Предмет исследования. Деформационно-прочностные, адгезионные и теплофизические свойства нанокompозита на основе эластомера Ф-40, зависимости усилия резания, повреждаемости и отклонений размеров покрытий от геометрических параметров режущей кромки калибра, долговечность посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом.

Методология и методы исследования. Методологическая, теоретическая и эмпирическая базы исследований представлены теоретическими исследованиями на основе теории теплопроводности, тепло- и термостойкости, прочности, долговечности полимерных композитов, экспериментальными исследованиями деформационно-прочностных, адгезионных и теплофизических свойств, долговечности посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом.

Положения, выносимые на защиту:

– теоретические предпосылки повышения эффективности эластомеров для восстановления корпусных деталей при введении металлических наноразмерных наполнителей;

– регрессионная модель удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40, результаты экспериментального исследования деформационно-прочностных и адгезионных свойств, теплопроводности, тепло- и термостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40, калибрования, оценки качества и точности покрытий нанокompозита после механической обработки калибром, долговечности посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом;

– технология восстановления посадочных отверстий корпусных деталей нанокompозитом Ф-40 и оценка ее технико-экономической эффективности.

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

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на конференциях:

научных конференциях сотрудников ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ (2015...2020); XIX международной научно-практической конференции «Повышение эффективности и экологические аспекты использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве», ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов, 2016); XII Международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления», ЛГТУ (г. Липецк, 2017); XV Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (г. Курск, 2020); II Международной научно-технической конференции «Автомобили, транспортные системы и процессы» (г. Курск, 2020); заседании кафедры «Стандартизация, метрология и технический сервис» (г. Мичуринск, 2020).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве, пункт 4 «Исследование и разработка технологии и средств восстановления, упрочнения изношенных деталей тракторов, автомобилей, сельскохозяйственных и мелиоративных машин, оборудования перерабатывающих отраслей АПК».

Публикации. По результатам выполненной работы опубликовано 25 печатных работ, в том числе 5 публикаций в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 4 публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки, и 3 патента на изобретение РФ. Общий объем публикаций составляет 10,8 п.л., автору принадлежит 7,3 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список литературы из 140 наименований. Работа представлена на 164 страницах машинописного текста, включает 74 рисунка и 15 таблиц. Приложения включают 8 наименований и представлены на 12 страницах.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований» рассмотрены наночастицы для наполнения полимеров, дан анализ полимерных материалов и композитов для восстановления посадок подшипников качения в узлах с.х. техники. Проведен анализ способов обеспечения точности размеров посадочных отверстий при восстановлении полимерами.

В настоящее время потребителю предлагается широкий ассортимент наночастиц различной формы, размера, органической и не органической природы. Однако, вопрос обоснования выбора наночастиц для наполнения эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, не изучен и требует всестороннего исследования.

Полимерные материалы являются теплоизоляторами, поэтому в тяжело нагруженных подшипниковых узлах с посадками, восстановленными полиме-

рами, при эксплуатации ухудшен теплоотвод. Увеличение температуры полимерного материала из-за гистерезиса, затрудненный теплоотвод могут привести к существенному росту температуры деталей подшипника, смазочного материала и явиться причиной снижения ресурса подшипникового узла. В работе Машина Д.В. установлено, что при наполнении металлическими частицами теплопроводность микрокомпозита на основе эластомера Ф-40С увеличилась, в сравнении с не наполненным эластомером, в 73,96 раза. Анализ показал, что вопрос влияния наночастиц на теплопроводность эластомеров, не изучен и требует исследования.

Теплостойкость эластомеров Ф-40 и Ф-40С не превышает 100°C. Этот параметр ограничивает применение эластомеров для восстановления посадок тяжело нагруженных подшипниковых узлов техники. Литературный обзор показал, что вопрос влияния наночастиц на теплостойкость эластомеров, не изучен и требует исследования.

Деформационно-прочностные и адгезионные свойства являются одними из основных потребительских свойств разрабатываемого нанокомпозита. Необходимо исследовать эти свойства при наполнении эластомера Ф-40 наночастицами.

Подшипниковые узлы агрегатов трансмиссии сельскохозяйственной техники в ходе эксплуатации подвержены постоянному термоциклированию. Для обеспечения высокой долговечности восстановленной посадки подшипника полимерное покрытие должно иметь высокую термостойкость. Увеличение термостойкости – это актуальная задача при разработке новых нанокомпозитов, предназначенных для восстановления отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники. Литературный обзор показал, что вопрос влияния металлических наночастиц на термостойкость эластомера Ф-40 не изучен и требует исследования. Необходимо теоретически обосновать выбор металлических наночастиц наполнителя для композита на основе эластомера Ф-40, обеспечивающего увеличение термостойкости материала.

Анализ литературных источников показал, что способ калибрования, разработанный в патенте на изобретение РФ № 2604238, является наиболее технологичным для обеспечения точности размеров посадочных отверстий в корпусных деталях при восстановлении полимерными материалами. Этот способ обеспечивает высокое качество и точность полимерного покрытия после калибрования. Представляют научный и практический интерес всесторонние исследования процесса калибрования, качества и точности отверстий с покрытиями, выполненными нанокомпозитом на основе эластомера Ф-40.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования, представленные ранее.

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления корпусных деталей нанокомпозитами на основе эластомеров» исследовано влияние металлических наночастиц наполнителей на свойства полимерных композитов. Рассмотрены условия, при которых обеспечивается повышение теплопроводности, тепло- и термостойкости, прочности и долговечности полимерных нанокомпозитов для восстановления посадок подшип-

ников. Исследовано влияние геометрических параметров режущей кромки калибра-резца на качество и точность размеров отверстий с полимерным покрытием при калибровании.

Повышение термостойкости композита эластомера при введении металлических наночастиц. Металлы переменной валентности могут быть катализаторами для одних и ингибиторами цепных радикальных процессов окисления для других видов каучука. Характер каталитического действия металла переменной валентности определяет строение каучука. Исследования Пиотровского К.Б. и Львова Ю.А. показали, что медь является катализатором для натурального каучука, а для бутадиен-нитрильных каучуков этот металл – ингибитор процесса окисления. Условием повышения термостойкости каучуков является устранение слабых мест в структуре материала и связывание свободных радикалов, которые образуются в процессе термораспада. В работе Михайлюк А.Е. установлено, что введение наночастиц металлов переменной валентности в эластомер увеличивает энергию активации процесса термодеструкции полимерного материала, т.е. повышает термостойкость композита. Поверхности частиц имеют активные центры, которые образуют хемосорбционные связи с макромолекулами полимера. Наночастицы металлов никеля, меди, свинца и висмута увеличивают термическую стойкость полимерной матрицы этиленпропиленового каучука и увеличение достигает 37°C. Стабилизирующий эффект при термической деструкции эластомера вызван возникновением хемосорбционных связей между металлическими наночастицами и макромолекулами полимера. Металлы, которые использовали в качестве наполнителей, по степени увеличения термостойкости эластомера к высокотемпературной деструкции можно расположить в следующей последовательности:

$$Bi < Pb < Ni < Cu .$$

Как упоминалось ранее, медь является ингибитором процесса окисления бутадиен-нитрильных каучуков. В основе эластомера Ф-40 лежит бутадиен-нитрильный каучук СКН-40, поэтому, чтобы повысить термостойкость нанокompозита на основе эластомера Ф-40 следует использовать наночастицы меди. Из перечня металлов, медь имеет наиболее высокую энергию ионизации, поэтому следует ожидать, что наночастицы меди образуют с макромолекулами каучука СКН-40 прочные хемосорбционные связи, вследствие чего термостойкость нанокompозита на основе эластомера Ф-40 увеличится.

Модуль упругости эластомерного нанокompозита. В нанокompозитах при взаимодействии полимера с частицей наполнителя на поверхности последней образуется адсорбированный слой (межфазная область), который свойствами существенно отличается от полимерной матрицы. Имеет место «замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, т.е. у поверхности наночастиц наполнителя. Частицы наполнителя и межфазные области являются армирующим элементом эластомерного нанокompозита, повышающим его модуль упругости. В работе Козлова Г.В. исследован композит на основе бутадиенстирольного каучука, наполненный наношунгитом. Установлено, что модуль упругости межфазного слоя меньше аналогичного параметра наполнителя только лишь на 23-45%, однако больше модуля упругости полимера до 8,5 раз. Ввод

лиофилизированных к каучуку высокодисперсных частиц алюминия, марганца, железа оказывает вулканизирующее и усиливающее действие на композиты на основе хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков.

Введение металлических наночастиц в раствор эластомера увеличивает его вязкость. Причиной увеличения вязкости и повышения сопротивления течению являются межфазные области с «замороженной» молекулярной подвижностью полимера в этих (межфазных) областях. Благодаря высокой удельной поверхности наночастиц, эффективное насыщение полимеров наполнителем (достижение экстремальных деформационно-прочностных свойств) достигается при низких концентрациях, до 5 масс.ч. Получим формулу для расчета модуля упругости эластомерного нанокомпозита

Для суспензий с очень низкой концентрацией твердых частиц вязкость суспензии (полимерного нанокомпозита) справедливо уравнение Эйнштейна

$$\eta = \eta_1(1 + k_E \varphi_2), \quad (1)$$

где η и η_1 – вязкости суспензии и жидкой фазы, Па·с; K_E – коэффициент Эйнштейна, φ_2 – объемная доля твердых частиц.

При течении тело подвержено сдвиговой деформации. Следует отметить, что вязкотекучее и высокоэластическое состояния полимера очень похожи. Исходя из вышеизложенного, для полимеров, которые находятся в высокоэластическом состоянии выполняется условие

$$\frac{\eta}{\eta_1} = \frac{G}{G_1}, \quad (2)$$

где G и G_1 – модули сдвига полимерного нанокомпозита и полимерной матрицы соответственно, Па.

После подстановки (1) в (2) получили формулу расчета модуля жесткости (сдвига) эластомерного композита

$$G = G_1(1 + k_E \varphi_2) \quad (3)$$

Эластомерный композит приняли изотропным. Так как при восстановлении посадочных отверстий толщина полимерного покрытия не может быть больше 0,15 мм, будет справедливым допущение о линейном характере зависимости деформации материала от нагрузки. В этом случае выполняется соотношение

$$G = \frac{E}{2 + 2\mu} \quad (4)$$

Формулу (4) подставили в выражение (3) и после преобразования получили

$$\frac{E_{нк}}{2 + 2\mu_{нк}} = \frac{E_{нм}}{2 + 2\mu_{нм}}(1 + k_E \varphi_2), \quad (5)$$

где $E_{нк}$ и $E_{нм}$ – модули упругости нанокомпозита и полимерной матрицы; $\mu_{нм}$ – коэффициент Пуассона полимерной матрицы.

Приближенно, с достаточной достоверностью, можно принять равенство коэффициентов Пуассона эластомера и эластомерного нанокомпозита. В этом случае формула (5) преобразуется к виду

$$E_{нк} \approx E_{нм}(1 + k_E \varphi_2) \quad (6)$$

Формула (6) позволяет рассчитать модуль упругости эластомерного нанокompозита. В формуле учтены механические свойства матрицы (модуль упругости эластомера), форма и удельная поверхность наночастиц наполнителя и их содержание в композите.

Особенности повышения прочности и трещиностойкости эластомерных композитов. На усиление полимерных композитов в т.ч. эластомерных, влияют следующие факторы: размер и форма частиц наполнителя, вид распределения по объему полимерной матрицы, смачиваемость частиц наполнителя полимерным материалом и соответствующая адгезия между ними.

Размер частиц наполнителя определяет длину трещин, возникающих в матрице эластомера под нагрузкой, и соответственно его прочность. Прочность резины на основе бутадиенового каучука, наполненной наночастицами размером 70 нм, увеличивается до 3,8 раз. Вследствие того, что наночастицы имеют высокую удельную поверхность, количество микротрещин на единицу объема, образующихся в эластомерной матрице, будет существенно больше, чем в композите, наполненном микроразмерными частицами. Поэтому требуется приложить больше энергии для развития микротрещин и разрушения материала, наполненного наночастицами.

Различная форма частиц влияет в основном на их способность к образованию цепочечных и разветвленных структур. Композит будет иметь наиболее высокую прочность при равномерном распределении наночастиц по объему полимерной матрицы. Образование агломератов наночастиц приводит к возникновению дефектных областей и снижению прочности материала.

Влияние адгезии полимера к наполнителю рассмотрено в работе Воюцко-го С.С. Адгезионная теория усиления эластомеров рассматривает композит как множество микроскопических адгезионных соединений типа эластомер – частица наполнителя. Установлено, что имеет место линейная зависимость прочности композитов от значений адгезии, которая подтверждает корректность адгезионной теории усиления эластомеров. Увеличение прочности эластомерного композита, который содержит цепочечные структуры, обеспечивается не за счет контакта частиц наполнителя между собой, а благодаря наличию в зазоре, окружающем место контакта, молекул полимера, каждая из которых прочно связана по крайней мере с двумя частицами наполнителя.

Различают четыре основных фактора усиления эластомеров: выравнивание напряжений при разрыве связей эластомер-наполнитель, притупление растущих трещин в материале, увеличение рассеивания энергии в объеме материала по линии разрыва, образование цепочечных структур частиц наполнителя между собой.

Наполнение полиуретановых каучуков высокодисперсными частицами железа приводит к возникновению координационных соединений на границе раздела азотсодержащий полимер – металл. Образование хемосорбционных связей между макромолекулами полимера и ультрадисперсными частицами металлов отмечено в композитах на основе карбоксилатного каучука. В работе Михайлюк А.Е. в матрице эластомера СКЭПТ-40 на основе этиленпропиленового каучука, при высоких сдвиговых деформациях синтезированы наночасти-

цы металлов переменной валентности. В нанокompозитах на основе эластомера СКЭПТ-40 образуются хемосорбционные связи между макромолекулами каучука и поверхностью металлических наночастиц, что увеличивает прочность и термостойкость материалов.

Резины на основе хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков с высокодисперсными частицами металлов отличаются повышенными деформационно-прочностными свойствами. Причиной являются прочные связи каучук-металл, образующиеся в момент раскрытия двойных связей. Алюминий имеет наиболее высокую удельную поверхностную энергию разрушения. Использование частиц алюминия в качестве наполнителя полимерных материалов повышает поверхностную энергию разрушения, прочность, трещиностойкость и выносливость композитов. Поэтому, наполнение эластомера Ф-40 на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-40, наночастицами алюминия приведет к увеличению прочности и долговечности нанокompозита.

Повышение теплостойкости, и теплопроводности композита эластомера при введении металлических наночастиц. Эластомеры ГЭН-150(В), герметик 6Ф, лаки Ф-40 и Ф-40С, в сравнении с анаэробными герметиками, акриловыми и цианакрилатными адгезивами, отличаются относительно не высокой теплостойкостью. Теплостойкость герметика 6Ф, лаков Ф-40 и Ф-40С, имеющих примерно одинаковую основу составляет около 100°C. Учитывая, что подшипники обычного исполнения нагреваются при работе до температур 70...90°C, необходимо, чтобы полимерные материалы для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, обладали большим температурным запасом по теплостойкости.

Наполнение полимерных материалов микроразмерными металлическими частицами практически не изменяет теплостойкость и температуру стеклования композита. Теплостойкость микрокомпозита фактически определяется теплостойкостью полимерной матрицы.

Совершенно другая картина наблюдается в полимерных нанокompозитах. Наполнение полимерной матрицы металлическими наночастицами, приводит к образованию сетчатых образований с наночастицами в узлах. По этой причине молекулярная подвижность полимерных цепей уменьшается, а теплостойкость соответственно увеличивается. В нанокompозитах при взаимодействии полимера с частицей наполнителя на поверхности последней образуется адсорбированный слой (межфазная область), который свойствами существенно отличается от полимерной матрицы. Имеет место «замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, т.е. у поверхности наночастиц наполнителя. Модуль упругости межфазного меньше аналогичного параметра материала наполнителя, но многократно превышает модуль упругости полимера матрицы. В виду высокой удельной поверхности наночастиц наполнителя, доля межфазных областей в полимерном нанокompозите значительно больше, чем в микрокомпозите. «Замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, повышение модуля упругости, являются причиной увеличения теплостойкости нанокompозита в сравнении с не наполненным эластомером.

Коэффициент теплопроводности трехкомпонентного полимерного нанокомпозита можно определить по формуле

$$\lambda_K = \lambda_1 \cdot \left[\frac{\varphi_2}{1-\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\varphi_1}{\frac{1}{(1-\nu_{12})} - \frac{\varphi_1}{3}} \right) + \frac{\varphi_3}{1-\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\varphi_1}{\frac{1}{(1-\nu_{13})} - \frac{\varphi_1}{3}} \right) \right], \quad (7)$$

где λ_K , λ_1 , λ_2 и λ_3 – коэффициенты теплопроводности композита, полимера и наполнителей, $\frac{Bm}{m \cdot K}$; φ_1 , φ_2 , φ_3 – объемные доли полимера и наполнителей; $\nu_{12} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; $\nu_{13} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1}$.

Вместо отношений ν_{12} и ν_{13} в формулу (7) подставим теплопроводности компонентов смеси и окончательно получим

$$\lambda_K = \lambda_1 \cdot \left[\frac{\varphi_2}{1-\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\varphi_1}{\frac{1}{(1-\frac{\lambda_2}{\lambda_1})} - \frac{\varphi_1}{3}} \right) + \frac{\varphi_3}{1-\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\varphi_1}{\frac{1}{(1-\frac{\lambda_3}{\lambda_1})} - \frac{\varphi_1}{3}} \right) \right] \quad (8)$$

Формула (8) позволяет, используя коэффициенты теплопроводности и объемные доли эластомера и двух наполнителей, рассчитать коэффициент теплопроводности трехкомпонентного полимерного композита.

Наиболее высоким коэффициентом теплопроводности обладают частицы серебра, меди и алюминия. В виду очень высокой цены использование серебра в качестве наполнителя не является экономически целесообразным. По этой причине, для повышения теплопроводности нанокомпозита на основе эластомера Ф-40 следует в качестве наполнителей использовать наночастицы меди и алюминия.

Технологическое обеспечение точности размеров отверстий с полимерным покрытием размерным калиброванием. Известные способы формования отверстий с полимерным покрытием при восстановлении корпусных деталей обладают существенным недостатком: на точность размеров отверстий с полимерным покрытием после формования в значительной степени влияет усадка полимерного материала при отверждении. Усадку трудно учесть, так как она зависит от качества отбора компонентов и приготовления полимерного композита, условий отверждения и других факторов.

Разработан способ, в котором калибрование отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях проводят после термической обработки покрытия, поэтому влияние усадки полимера на размер восстановленного отверстия полностью исключено (Патент на изобретение РФ № 2604238). Технологическая оснастка для калибрования состоит из базирующей детали и калибра.

Для любого обрабатываемого полимерного материала можно экспериментально определить критический передний угол резца, обеспечивающий нулевое значение радиальной составляющей силы резания $P_y = 0$. После механи-

ческой обработки резцом, который заточен на критический передний угол, полимерное покрытие будет иметь наиболее точные размеры и минимальную шероховатость.

Исследования в работе Кирсанова Ф.А. показали, что определение рациональных геометрических параметров режущей кромки калибра, обеспечивает заданный размер отверстия, восстановленного эластомером Ф-40С и высокое качество полимерного покрытия после калибрования. Представляют практический интерес исследования процесса калибрования, качества и точности отверстий с покрытиями, выполненными нанокompозитом на основе эластомера Ф-40, с целью определения рациональных геометрических параметров режущей кромки калибра.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» описаны общая методика исследований и частные методики исследования деформационно-прочностных и адгезионных свойств, теплопроводности, тепло- и термостойкости нанокompозита эластомера Ф-40, усилия резания при калибровании, повреждаемости и точностных характеристик покрытий нанокompозита, долговечности и теплового баланса посадок подшипников в корпусных деталях, восстановленных нанокompозитом на основе эластомера Ф-40.

На начальном этапе исследовали прочность и деформацию пленок нанокompозитов четырех составов: состав № 1: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1,6 масс. ч., Cu – 1,4 масс. ч.; № 2: Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1,8 масс. ч., Cu – 1,6 масс. ч.; № 3: Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2,0 масс. ч., Cu – 1,8 масс. ч.; № 4: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2,2 масс. ч., Cu – 2,0 масс. ч. Исследования проводили по ГОСТ 14236-81, ГОСТ 9550-81 и ГОСТ 12423-66. Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5047-50.

Для оптимизации состава нанокompозита провели многофакторный эксперимент, используя композиционный план В₂. За функцию отклика Y принята удельная работа разрушения α_p , МДж/м³, в качестве независимых факторов выбрали: X₁ – содержание алюминиевых наночастиц (ТУ 1791-003-36280340-2008), масс.ч., X₂ – медных наночастиц (ТУ 1791-003-36280340-2008), масс.ч.

Адгезию полимерных материалов оценивали прочностью связи материала с металлом при отслаивании образцов. Исследовали составы: №1 эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1 масс. ч., Cu – 0,6 масс. ч.; №2: Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2 масс. ч., Cu – 1,6 масс. ч.; №3: Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 3 масс. ч., Cu – 2,6 масс. ч. При изготовлении образцов подложкой использовали пластину из стали 45. Размеры пластины: 100×25×3 мм. Шероховатость поверхности Ra 0,63. На обработанную поверхность пластины наносили послойно волосяной кистью №5 покрытие из раствора нанокompозита. Далее на покрытие накладывали железную сетку №07 (ГОСТ 3826-82). Затем на уложенную сетку послойно наносили слой раствора материала. Расчетная длина соединения сетки с пластиной посредством нанокompозита составляла 70 мм.

Теплостойкость оценивали по изменению условного модуля упругости полимерного покрытия, в которое внедряли шариковый индентор при различных температурах нагрева образцов. По достижении и выше температуры теп-

лостойкости материала модуль упругости последнего резко уменьшается. Образцы представляли собой цилиндрические диски диаметром 30 и толщиной 5 мм, изготовленные из стали 3. На поверхность диска наносили покрытие из раствора нанокompозита толщиной 0,2 мм. Теплостойкость покрытий из эластомерного нанокompозита исследовали, используя модернизированный твердомер типа ТП.

Исследования теплопроводности проводили, используя метод температурного градиента. В основе метода лежит принцип доставки постоянного теплового потока от источника тепла (нагревателя) к охлаждающему устройству (холодильнику), который проходит при этом через эталонный и исследуемый образцы. Установка включает холодильник, через который протекает холодная вода, три диска из меди марки М1, диск из исследуемого материала, диск из оргстекла СО-95-К и нагреватель. Образцы для исследования теплопроводности представляли собой диски диаметром 15,0 и толщиной 0,5 мм, которые были изготовлены из эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе. Теплоизоляцию дисков от окружающей среды обеспечивают труба из ПВХ, в которую эти диски помещены, а также резиновая втулка, которая опоясывает последнюю. Температуры трех медных дисков T_1 , T_2 и T_3 измеряли в установившемся температурном режиме инфракрасным пирометром марки Fluke-62.

Термостойкость эластомера Ф-40 и его нанокompозита оценивали по изменению прочности и относительного удлинения образцов, после старения в условиях ограниченного доступа кислорода воздуха (ОДКВ) при температуре 250°C в течение 8 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.

При исследовании усилия резания в качестве образцов использовали втулки с покрытием нанокompозита эластомера Ф-40, нанесенным на поверхность отверстий. Втулки изготовлены из стали 40Х. Для калибрования покрытий нанокompозита изготовили калибры-резцы из стали 40Х с передним углом режущей кромки: 50, 60 и 70° и задним углом 10°. Испытания проводили на разрывной машине ИР 5082-50. Повреждаемость покрытий после калибрования оценивали по ГОСТ 9.407-84.

Долговечность и тепловой баланс посадок подшипников, восстановленных полимерными материалами исследовали на вибростенде. За базу испытаний приняли $5,76 \times 10^7$ циклов нагружения (330 ч работы стенда). Восстановленные полимерные посадки испытывали при циклической нагрузке 20,0 кН до разрушения, момент которого фиксировали по провороту наружного кольца подшипника относительно втулки. При исследовании теплообразования в посадках подшипников, восстановленных эластомером Ф-40 и нанокompозитом на его основе, значения циклической радиальной нагрузки на подшипниковые узлы составляли: $P = 9,9; 15,8$ и 20,0 кН. Нагрузку изменяли посредством разведения дебалансов на различные углы установки. Перепад температуры определяли измерением температуры наружного кольца подшипника и втулки корпуса инфракрасным пирометром Fluke-62.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты исследований деформационно-прочностных и адгезионных свойств нанокompозита эластомера Ф-40. Исследованы теплофизические свойства эластомера Ф-40 и его нанокompозита. Приведены результаты исследований долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40 и его нанокompозитом.

Исследование и оптимизация состава нанокompозита. Исследовали прочность и деформацию пленок нанокompозитов четырех составов. Наибольшая прочность $\sigma_p = 16,11 \text{ МПа}$ наблюдается у состава № 2. В сравнении с не наполненным эластомером увеличение на 23%, с составами № 3, № 1 и № 4 прочность больше на 2%, 8% и 15%, соответственно. С увеличением концентрации алюминиевого и медного нанопорошков деформация уменьшается от 62% до 54%.

Реализован активный эксперимент и получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита, от содержания наночастиц алюминия и меди. Уравнение регрессии в натуральных единицах имеет вид

$$Y = -15,296 + 18,903X_1 + 13,509X_2 - 0,15X_1X_2 - 5,08X_1^2 - 4,08X_2^2, \quad (11)$$

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

Определен оптимальный состав нанокompозита на основе эластомера Ф-40. Максимальной удельной работой разрушения $13,0 \text{ МДж/м}^3$ обладают пленки композита, следующего состава: эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., алюминиевого нанопорошка – 1,9 масс. ч. и медного нанопорошка – 1,8 масс. ч.

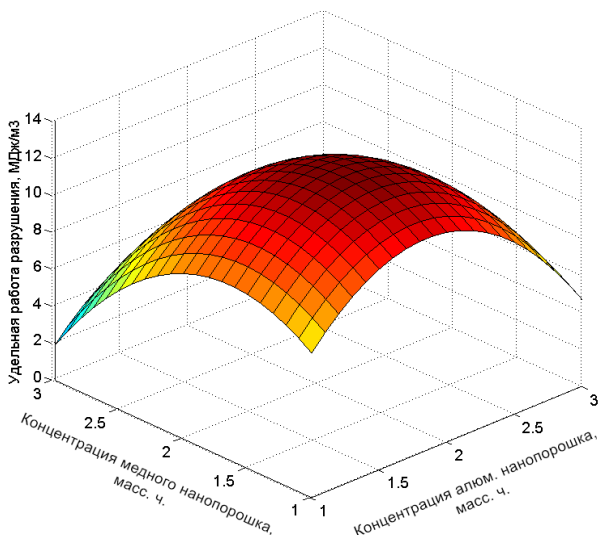


Рисунок 1 – Поверхность отклика

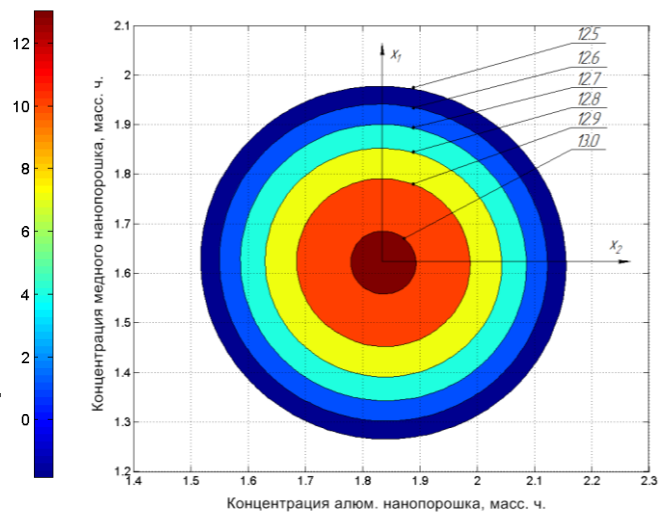


Рисунок 2 – Двумерное сечение поверхности отклика

Исследование модуля упругости нанокompозита. Наполнение эластомера Ф-40 алюминиевыми и медными наночастицами увеличивает модуль упругости материала: на растяжение в 1,2, сжатие – 1,3 раза.

Исследование адгезии нанокompозита на основе эластомера Ф-40.

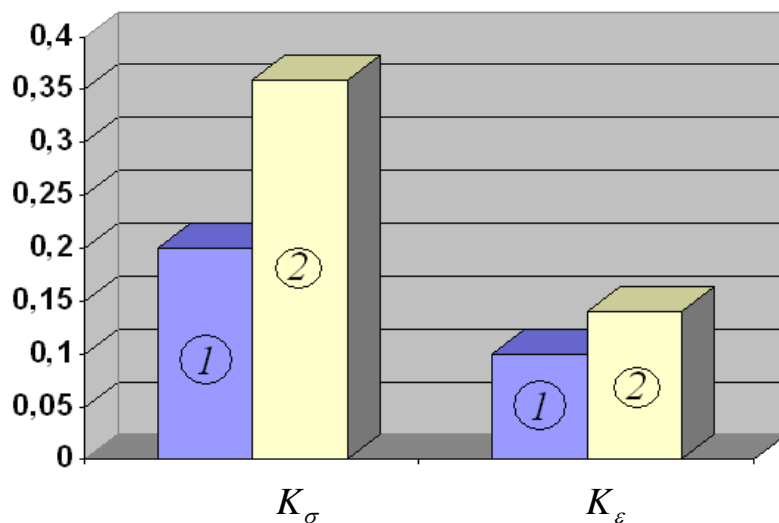
Минимальную адгезию имеют покрытия эластомера Ф-40, $F = 3310 \text{ Н/м}$. Максимальную адгезию имеют покрытия состава № 2. Показатель адгезии составляет $F = 9560 \text{ Н/м}$ и превышает аналогичный параметр не наполненного эластомера в 2,89 раза, покрытий состава № 1 и № 3 – 1,57 и 1,17 раза.

Поэтому, с учетом результатов проведенного активного эксперимента, принят оптимальный состав нанокompозита: раствор эластомера Ф-40 – 100 масс. ч., нанопорошок алюминия – 2,0 масс. ч., нанопорошок меди – 1,6 масс. ч. Этот состав обеспечивает наиболее высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства материала.

Исследование теплостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40. Теплостойкость не наполненного эластомера Ф-40 составляет 100°C . Теплостойкость, при наполнении эластомера нанопорошками меди и алюминия, повысилась в сравнении с не наполненным эластомером в 1,23 раза и составила 123°C .

Исследование теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе. Коэффициент теплопроводности нанокompозита составил $\lambda_k = 21,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. В сравнении с эластомером Ф-40 ($\lambda_n = 0,56 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$) параметр увеличился в 38,9 раза.

Исследование термостойкости эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе в условиях ОДКВ. На рисунке 3 показаны коэффициенты старения по прочности K и относительному удлинению K_ϵ эластомера Ф-40 и его нанокompозита. Термостойкость нанокompозита, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40, существенно повысилась. Коэффициенты старения нанокompозита по прочности в 1,8 раза, а по деформации в 1,4 раза больше аналогичных показателей полимерной матрицы, что является подтверждением увеличения термостойкости нанокompозита.



1 – эластомер Ф-40; 2 – нанокompозит

Рисунок 3 – Коэффициенты старения

по условной прочности K_σ и относительному удлинению K_ϵ

Исследование зависимости усилия резания покрытий нанокompозита от переднего угла режущей кромки калибра-резца. С увеличением переднего угла режущей кромки калибра-резца γ усилие резание F покрытия нанокompозита эластомера Ф-40 снижается по линейной зависимости. При наименьшем значении переднего угла режущей кромки калибра-резца $\gamma = 50^\circ$ усилие резание покрытия нанокompозита имеет максимальное значение $F = 2,32 \text{ кН}$.

Увеличение переднего угла режущей кромки калибра до значения $\gamma = 60^\circ$ уменьшает усилие резание покрытия нанокompозита на 8% до значения $F = 2,14 \text{ кН}$. Максимальное значение переднего угла режущей кромки калибра $\gamma = 70^\circ$ обеспечивает минимальное усилие резания покрытия нанокompозита эластомера Ф-40 $F = 1,94 \text{ кН}$. Усилие резания F , в сравнении с передними углами калибров $\gamma = 50$ и 60° уменьшилось на 21 и 10% соответственно. В результате исследований определены рациональные геометрические параметры калибра-резца, которые составляют: передний угол $\gamma = 70^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$.

Установлено, что при равных значениях переднего угла режущей кромки калибров значения усилия резания покрытий нанокompозита эластомера Ф-40 значительно больше, чем покрытий не наполненного эластомера Ф-40С. Увеличение усилия резания покрытий составляет от 2,32 до 5,6 раза.

Исследование повреждаемости и точностных характеристик покрытий нанокompозита после калибрования. Покрытие нанокompозита после калибрования режущим инструментом с передним углом режущей кромки $\gamma = 50^\circ$ имеет максимальные повреждения. Площадь разрушенного покрытия нанокompозита составила 13,28 %. Увеличение переднего угла режущей кромки калибра до $\gamma = 60^\circ$ уменьшило площадь разрушения покрытия и этот показатель составил 10,23 %. Калибр с рациональными геометрическими параметрами ($\gamma = 70^\circ$) обеспечивает наиболее высокое качество обработки. Площадь разрушения покрытия, в сравнении с углами $\gamma = 50$ и 60° , уменьшилась в 2,6 и 2,0 раза и ее значение составило 5,12 %. Также обеспечиваются наиболее высокие точностные характеристики отверстий с полимерным покрытием. В сравнении с калибрами с передними углами режущей кромки $\gamma = 50$ и 60° , овальность отверстия с полимерным покрытием меньше в 1,75 и 1,5 раза и ее значение составляет 8 мкм, а отклонение от заданного размера параметр Δ уменьшается в 1,67 и 1,39 раза до значения $\Delta = 18 \text{ мкм}$.

Исследование долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом эластомера Ф-40. Стендовые испытания показали, что наполнение эластомера Ф-40 металлическими наночастицами повышает выносливость материала и соответственно долговечность восстановленных посадок подшипников в корпусной детали при циклическом нагружении. Максимальная допустимая толщина покрытия эластомера Ф-40 составляет 0,1 мм, а его нанокompозита – 0,125 мм (рисунок 4).

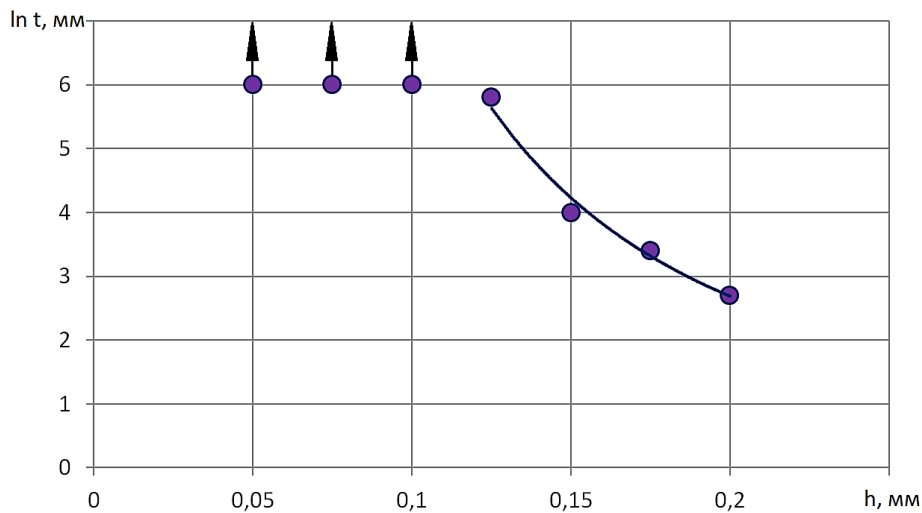


Рисунок 4 – Ресурс полимерных посадок t подшипника 209 при различной толщине полимерного покрытия из нанокompозита на основе эластомера Ф-40, нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН

Нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия под подшипники в корпусных деталях с диаметральным износом до 0,25 мм.

Исследования теплового баланса показали, что наполнение эластомера Ф-40 нанопорошками алюминия и меди существенно повышает теплопроводность полимерного покрытия и увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура втулки подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, составила 44, 49 и 54°C при значениях циклической радиальной нагрузки $P = 9,9; 15,8$ и 20,0 кН соответственно, что на 6,4; 10,9 и 22,8% меньше чем у не наполненного эластомера. Температура наружного кольца подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, составила 37, 40 и 43°C при значениях циклической радиальной нагрузки 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно, что на 7,5; 9,1 и 10,4% меньше чем у не наполненного эластомера.

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

Технология восстановления корпусных деталей нанокompозитом эластомера Ф-40 содержит операции: подготовка поверхности изношенных отверстий в корпусной детали; измерение износа отверстий; обезжиривание поверхностей отверстий; приготовление нанокompозита, включая ультразвуковое диспергирование; нанесение покрытий и их термическая обработка; калибрование полимерных покрытий и контроль качества восстановления.

Разработанная технология восстановления корпусных деталей нанокompозитом эластомера Ф-40 внедрена в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области. Для оценки надежности восстановленных корпусных деталей с марта 2015 г. по ноябрь 2016 г. в хозяйстве проводили эксплуатационные испытания автотракторной техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных посадок

подшипников не наблюдалось. Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления на предприятии составил 360 тыс. руб.

Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО МичГАУ изучении дисциплин: «Технологические процессы технического обслуживания и ремонта транспортно-технологических машин и оборудования», «Основы технологии производства и ремонта транспортно-технологических машин и оборудования», «Нанотехнологии в техническом сервисе» и др.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Наночастицы меди, благодаря высокой энергии ионизации, взаимодействуя с макромолекулами бутадиен-нитрильного каучука СКН-40, образуют прочные хемосорбционные связи, которые обеспечивают стабилизирующий эффект при термической деструкции и повышают термостойкость эластомера. Наполнение эластомера Ф-40 наночастицами меди и алюминия повышает модуль упругости, прочность и долговечность выносливость материала. Получена формула для расчета модуля упругости эластомерного нанокompозита, которая учитывает деформационно-прочностные свойства полимерной матрицы, форму, удельную поверхность и концентрацию наночастиц наполнителя в композите.

При вводе металлических наночастиц в полимерную матрицу, образуются сетчатые образования с наночастицами в полимерных цепях. При этом молекулярная подвижность цепей снижается, а теплостойкость нанокompозита увеличивается. Медь и алюминий обладают наиболее высокой теплопроводностью. Поэтому наполнение эластомера Ф-40 наночастицами меди и алюминия повысит теплостойкость и теплопроводность нанокompозита.

2 Получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40 от концентрации наполнителей. Наиболее высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства имеет оптимальный состав нанокompозита: эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 2,0 масс. ч. и медный нанопорошок – 1,6 масс. ч. Нанокompозит имеет высокую удельную работу разрушения 12,9 МДж/м³. В сравнении с не наполненным эластомером модуль упругости нанокompозита увеличился до 1,65 раза, а адгезия – 2,9 раза.

3 Теплостойкость нанокompозита повысилась, в сравнении с не наполненным эластомером, в 1,23 раза и составила 123°C. Наполнение наночастицами алюминия и меди увеличивает коэффициент теплопроводности нанокompозита до $\lambda_k = 21,8 \frac{Вт}{м \cdot К}$, что в 38,9 раза превышает коэффициент теплопроводности эластомера Ф-40. Коэффициенты старения нанокompозита по прочности в 1,8 раза, а по деформации в 1,4 раза больше аналогичных показателей полимерной матрицы, что является подтверждением увеличения термостойкости нанокompозита.

4 Рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца (передний угол $\gamma = 70^0$, задний угол $\alpha = 10^0$) обеспечивают высокое ка-

чество и точностные характеристики покрытий после калибрования. Площадь разрушения покрытия составила около 5 %, овальность отверстия с полимерным покрытием 8 мкм, а отклонение от заданного размера 18 мкм. Усилие резания полимерных покрытий при калибровании зависит от модуля упругости материала и геометрических размеров отверстия, с увеличением последних усилие резания многократно увеличивается от 2,3 до 5,6 раза.

5 Наноккомпозитом на основе эластомера Ф-40 рекомендуется восстанавливать корпусные детали техники с диаметральным износом посадочных отверстий под подшипники до 0,25 мм. Наполнение эластомера Ф-40 нанопорошками алюминия и меди повышает теплопроводность материала и значительно увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура деталей подшипникового узла, с посадкой, восстановленной наноккомпозитом эластомера Ф-40, ниже до 16°С в сравнении с ненаполненным материалом.

6 Разработана технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях наноккомпозитом эластомера Ф-40. Технология восстановления внедрена в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района, Липецкой области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 360 тыс. руб.

Рекомендации производству. Наноккомпозит на основе эластомера Ф-40 (эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 2,0 масс. ч. и медный нанопорошок – 1,6 масс. ч.) и новая технология рекомендуются для восстановления корпусных деталей при ремонте сельскохозяйственной техники.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Создание новых наноккомпозитов на основе эластомеров, наполненных металлическими наночастицами. Разработка технологий восстановления посадок подшипников качения новыми наноккомпозитами.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

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

1. **Kiba, M. R.** Technology and Equipment for High-Precision Polymer Restoration of Fitment Holes in Automotive Housing Parts. / R. I. Li, F. A. Kirsanov, M. R. Kiba // ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2016, Vol. 9, No. 3, pp. 312-316.

2. **Kiba, M. R.** Parameters of Ultrasonic Dispersion of Polymer-Composite Solutions. / R. I. Li, A. A. Kolesnikov, M. R. Kiba // ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2017, Vol. 10, No. 2, pp. 185–188.

3. **Kiba, M. R.** A promising polymer material for repairing Body Parts of Machines. / R. I. Li, D.N. Psarev, A.V. Mironenko, M. R. Kiba //ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2017, Vol. 10, No. 4, pp. 318-321.

4. **Kiba, M. R.** Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. / R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba // ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 15-19.

5. **Kiba, M. R.** Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. / R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba // ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 128-132.

б) в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

6. **Киба, М. Р.** Теоретические аспекты нанесения полимерных покрытий на подшипники качения [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, М.Р. Киба // Научный журнал «Научное обозрение». – 2015. – № 3. – С. 44-49;

7. **Киба, М.Р.** 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.

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

9. **Киба, М.Р.** Исследование трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения автомобилей [Текст] / Р.И. Ли, М.Р. Киба, А.Н. Быконя // Наука в Центральной России» – 2020. – № 4 (46) – С. 76-84.

в) статьи в сборниках материалов научных конференций:

10. **Киба, М.Р.** Анализ и выбор длины волны и оборудования для инфракрасной сушки покрытий из растворов эластомеров в подшипниковых узлах автотракторной техники, восстановленных полимерными материалами [Текст] / Р.И. Ли, В.Н. Сафонов, М.Р. Киба // Повышение эффективности и экологические аспекты использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве: сборн. науч. докладов Междунар. науч. конф., 6-7 октября 2016 года, г. Тамбов / ФГБНУ ВНИИТиН. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2016. – С. 33-35.

11. **Киба, М.Р.** Модель формирования полимерного покрытия на поверхности вращающейся цилиндрической детали [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, М.Р. Киба // Современные сложные системы управления: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. 24-27 октября 2017 года, г. Липецк – Липецк: Изд-во Липецкого гос. тех. университета, 2017. – С. 240-244.

12. **Киба, М.Р.** Модель деформационно-прочностных свойств нанокompозита на основе эластомера Ф-40 [Текст] / Р.И. Ли, М.Р. Киба, А.А. Коломейченко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Сборник научных статей XV Междунар. науч.-практ. конф., 19-20 марта 2020 г. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2020. – С. 182-184.

13. **Киба, М.Р.** Стенд для исследования контактных напряжений и долговечности подшипниковых узлов автотракторной техники [Текст] / Р.И. Ли, А.Н. Быконя, М.Р. Киба // АВТОМОБИЛИ, ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ: настоящее, прошлое и будущее: сборник статей 2-й Международной научно-технической конференции (22 мая 2020 года) / редкол.: Е.В. Агеев (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. – С. 173-175.

г) прочие издания:

14. **Киба, М. Р.** Технология производства металлополимерных подшипников качения [Текст] / Р. И. Ли, М. Р. Киба // Клеи. Герметики. Технологии – 2016. – № 1. – С. 29-33;

15. **Киба, М. Р.** Технология и оснастка для высокоточного восстановления полимером посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники [Текст] / Р. И. Ли, Ф. А. Кирсанов, М. Р. Киба // Клеи. Герметики. Технологии – 2016. – № 3. – С. 28-33.

16. **Киба, М.Р.** Параметры ультразвукового диспергирования растворов полимерных композиционных материалов [Текст] / Р.И. Ли, М.Р. Киба // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 9. – С. 23-28.

17. **Киба, М.Р.** Технологические аспекты повышения эффективности ультразвукового диспергирования раствора композиции эластомера Ф-40 [Текст] / Р.И. Ли, А.А. Колесников, М.Р. Киба // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2016. – № 12. – С. 23-25.

18. **Киба, М. Р.** Перспективный полимерный материал для восстановления корпусных деталей машин [Текст] / Р. И. Ли, Д.Н. Псарев, А.В. Мироненко, М. Р. Киба // Клеи. Герметики. Технологии – 2017. – № 5. – С. 34-37.

19. **Киба, М.Р.** Восстановление корпусных деталей автотракторной техники композицией эластомера Ф-40 [Текст] / Р.И. Ли, Д. Н. Псарев, А. А. Колесников, М. Р. Киба // Научная мысль. – 2017. – № 3. – С. 183-185.

20. **Киба, М.Р.** Перспективный композиционный материал для восстановления корпусных деталей автотракторной техники композицией эластомера Ф-40 [Текст] / Р.И. Ли, Д. Н. Псарев, А. В. Мироненко, М. Р. Киба // Научная мысль. – 2017. – № 3. – С. 186-188.

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

22. **Киба, М.Р.** Калибрование отверстий с полимерным покрытием при восстановлении корпусных деталей автомобилей полимерным материалом [Текст] / Р. И. Ли, Ф. А. Кирсанов, М. Р. Киба // Мир транспорта и технологических машин – 2018. – № 3 (62) – С. 12-18.

д) патенты на изобретение РФ:

23. **Киба, М. Р.** Устройство для калибрования посадочных отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2604238. Заявл. 05.02.2015 / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А., Киба М. Р. // Оpubл. 10.12.2016. – Бюл. № 34.

24. **Киба, М. Р.** Клей для соединения однородных изделий из металла, стекла, пластмасс и керамики [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2635152. Заявл. 04.07.2016 / Ли Р. И., Мироненко А. В., Киба М. Р., Сафонов В. Н., Гончаров Е. Ю., Сериков В. В. // Оpubл. 09.11.2017. – Бюл. № 31.

25. **Киба, М. Р.** Композиция для склеивания металлических изделий [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2678063. Заявл. 09.01.2018. / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Малюгин В. А., Быконя А. Н. // Оpubл. 22.01.2019. – Бюл. № 3.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ
Подписано в печать 07.10.2020 г. Формат 60x84 ¹/₁₆,
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 1,3. Тираж 100 экз. Ризограф
Заказ № 20534

Издательско-полиграфический центр
Мичуринского государственного аграрного университета
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101,
тел. +7 (47545) 3-88-34

