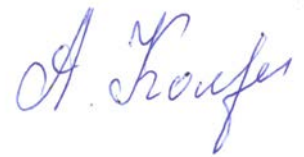


На правах рукописи



Колесников Александр Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ
КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ ПОЛИМЕРНЫМИ
КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПОСЛЕ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.22.10 Эксплуатация автомобильного транспорта

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2017

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

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

Защита диссертации состоится **«18» апреля 2017 года в 10:00 часов** на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.111.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: г. **Орел, ул. Московская, д. 77., ауд. 426.**

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

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

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

Телефон для справок +79155080508

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 999.111.03



Катунин А.А.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Корпусные детали являются наиболее дорогими деталями в конструкции машин, составляя до 20% по количеству и до 45% по массе от других деталей, определяя надежность работы агрегата и машины в целом.

Существует множество способов восстановления корпусных деталей с высокотемпературным воздействием на них, что приводит к нарушению их геометрии. Они не обеспечивают фреттингостойкости и повышение ресурса восстановленных посадочных отверстий. Эти способы восстановления энерго- и трудоемки, требуют наличия специального оборудования и квалификации персонала.

При восстановлении корпусных деталей полимерными материалами нет вышеперечисленных недостатков, не требуется высокая квалификация рабочих и оборудование, увеличивается ресурс подшипниковых узлов при минимуме затрат.

Все более широкое распространение получают полимерные композиционные материалы (ПКМ) с дисперсными металлическими наполнителями. Введение наполнителей в полимерную матрицу позволяет получить материалы с совершенно новыми эксплуатационными свойствами. Существенную роль в формировании потребительских свойств ПКМ играет распределение частиц наполнителя по объему полимерной матрицы. Технологической проблемой является равномерное распределение дисперсных частиц наполнителя по объему полимерной матрицы. Поэтому актуальной задачей является разработка способов получения ПКМ с высокой однородностью распределения металлических частиц наполнителя в полимерной матрице.

Степень разработанности темы. Вопросам технического сервиса автомобильной техники посвящены труды Афанасьева Л.Л., Власова В.М., Денисова А.С., Зорина В.А., Карагодина В.И., Крамаренко Г.В., Кузнецова Е.С., Мирошникова Л.В., восстановлению корпусных деталей автотракторной техники полимерными материалами – труды Курчаткина В. В., Котина А. В., Ли Р. И., Кононенко А. С., Башкирцева В. Н., Гаджиева А. А., Гвоздева А. А., Мельниченко И. М., Шубина А. Г. и многих других отечественных ученых.

Литературный обзор показал, что вопрос введения наполнителей в полимерную матрицу эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях машин, исследован не в полной мере. При ультразвуковом введении наполнителя в полимер основным параметром ультразвуковой обработки (УЗО) рассматривают время обработки ПКМ. Свойства материала, параметры акустического поля, диспергирование наполнителей при УЗО не учитываются. В качестве оценочного параметра качества смешения приняты потребительские свойства ПКМ (прочность, ударная вязкость, герметизирующая способность и др.). Однако эти свойства зависят также от множества других факторов: качества подготовки подложки, условий отверждения и др. Такой поверхностный подход нельзя считать достаточным и исчерпывающим.

Требуется дальнейшего исследования вопрос обоснования режимных и технологических параметров УЗО, а также оценочных параметров качества диспергирующего смешения раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 при УЗО.

Работа выполнена в соответствии с госконтрактами №2187ГУ1/2014 от 06.06.2014 г. и №9054ГУ2/2015 от 22.12.2015 г. по теме «Разработка конструкционного полимерного композиционного материала», финансируемыми Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа "УМНИК") и планом госбюджетных научно-исследовательских работ ЛГТУ на 2011...2016 годы по теме 05.02.01 «Разработка перспективных технологий восстановления и упрочнения деталей машин и технологического оборудования» на кафедре "Транспортные средства и техносферная безопасность".

Цель работы. Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автомобильной техники за счет повышения качества покрытий из полимерных композиционных материалов, нанесенных после ультразвуковой обработки, повышения прочности и обеспечения высокой долговечности восстановленных посадок подшипников.

Объект исследований. Раствор ПКМ на основе эластомера Ф-40, пленки и полимерные покрытия, корпусные детали трансмиссии автомобилей с посадками «корпус-подшипник», восстановленными композицией на основе эластомера Ф-40.

Предмет исследования. Зависимости оценочных параметров диспергирующего смешения раствора композиции на основе эластомера Ф-40 от режима УЗО материала, дегазация раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 при механическом и ультразвуковом диспергировании, физические, деформационно-прочностные и адгезионные свойства ПКМ на основе эластомера Ф-40, дефектность полимерных покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40 после механического и ультразвукового диспергирования, долговечность посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ на основе эластомера Ф-40.

Методика исследования представлена теоретическими исследованиями на основе теории ультразвуковой кавитации жидкости, прочности и долговечности полимерных композиционных материалов, экспериментальными исследованиями оценочных параметров диспергирующего смешения и дегазации раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40, физических, деформационно-прочностных и адгезионных свойств ПКМ на основе эластомера Ф-40, дефектности полимерных покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40, долговечности посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ на основе эластомера Ф-40.

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

На защиту выносятся:

- теоретические предпосылки повышения эффективности диспергирующего смешения компонентов ПКМ при ультразвуковой обработке;
- зависимости оценочных параметров диспергирующего смешения раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 от режима УЗО материала, результаты исследований дегазации раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 при механическом и ультразвуковом диспергировании, регрессионная модель прочности пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40, результаты исследований физических и адгезионных свойств ПКМ на основе эластомера Ф-40, дефектности полимерных покрытий

ПКМ на основе эластомера Ф-40 после механического и ультразвукового диспергирования, долговечности посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ на основе эластомера Ф-40;

– технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях ПКМ на основе эластомера Ф-40, включающая УЗО материала и технико-экономическая эффективность ее использования.

Научная новизна диссертации заключается в теоретическом обосновании условий эффективного диспергирования и дегазации растворов полимерных композиционных материалов при ультразвуковой обработке, режимных и технологических параметров УЗО, обеспечивающих повышение качества нанесенных покрытий при восстановлении корпусных деталей, исследовании оценочных параметров диспергирующего смешения и дегазации раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 при УЗО, регрессионной модели прочности пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40, исследовании физических и адгезионных свойств ПКМ на основе эластомера Ф-40 после УЗО, дефектности полимерных покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40 после ультразвукового диспергирования, долговечности посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ на основе эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки.

Практическая ценность заключается в разработанной технологии восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автомобильной техники ПКМ на основе эластомера Ф-40, включающей УЗО материала.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов ЛГТУ (г. Липецк) в 2012...2016 гг.; Международных научно-практических конференциях: ФГБНУ ГОСНИТИ, (г. Москва) в 2012 и 2016 гг.; БГАУ (г. Белгород) в 2012 и 2014 гг.; ОГУ (г. Орел) в 2016 г.; ТГТУ и ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов) в 2012, 2013 и 2016 гг.; МичГАУ (г. Мичуринск) в 2016 г.; СГАУ (г. Ставрополь), 2016 г.; заседании кафедры "Транспортные средства и техносферная безопасность" ЛГТУ в 2016 г.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе шесть статей в изданиях из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», получен патент на изобретение РФ №2537864. Общий объем публикаций составляет 7,5 п.л., автору принадлежит 4,9 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 11 таблиц, 4 приложения и библиографию из 120 наименований.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований» рассмотрены факторы, влияющие на физико-механические свойства ПКМ, показана перспективность применения УЗО для диспергирующего смешения компонентов ПКМ, представлены полимерные композиционные материалы и способы восстановления корпусных деталей машин, сформулированы цель и задачи исследований.

Для достижения заданных физико-механических свойств покрытий из ПКМ при восстановлении корпусных деталей машин, особое внимание необходимо уделять качеству подготовки поверхности субстрата перед его нанесением. Обязательно наличие таких операций как очистка от загрязнений, механическая обработка в виде зачистки, обезжиривание восстанавливаемых поверхностей. При приготовлении композиции следует учитывать специфические свойства металлических частиц дисперсных наполнителей и осуществлять их соответствующую обработку в виде тщательного просушивания до ввода в полимерную матрицу.

Физико-механические свойства ПКМ в значительной мере зависят от качества смешения компонентов ПКМ. Чем более равномерно распределены частицы наполнителя по объему полимерной матрицы, тем выше деформационно-прочностные свойства ПКМ. Поэтому повышение качества смешения является перспективным направлением улучшения ПКМ. УЗО позволяет существенно повысить качество смешения и улучшить физико-механические свойства ПКМ, поэтому представляют научный и практический интерес исследования УЗО ПКМ, предназначенных для восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автомобильной техники.

Перспективность применения УЗО для повышения качества смешения компонентов ПКМ подтверждается в работах Тренисовой А.Л., Ахматовой О.А., Гаджиева А.А., Кононенко А.С. Однако, в качестве оценочного параметра качества смешения приняты потребительские свойства ПКМ (прочность, ударная вязкость, герметизирующая способность, твердость и др.). Эти свойства зависят не только от качества смешения, но и других факторов: качества подготовки подложки, условий отверждения и др. Свойства материала, параметры акустического поля, диспергирование наполнителей при УЗО не учтены. Необходимы теоретические исследования, которые позволят обосновать режимные, технологические параметры УЗО, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения и дегазации растворов ПКМ, обосновать выбор оценочных параметров качества смешения и диспергирования.

При восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники в работах Котина А.В., Гаджиева А.А., Бутина А.В., Бочарова А.В., Машина Д.В. и др. используются ПКМ на основе эпоксидных смол, анаэробных и акриловых адгезивов, эластомеров. ПКМ на основе эластомера Ф-40 отличается большей экономической эффективностью, по сравнению с ПКМ на основе анаэробных и акриловых адгезивов. При сопоставимой цене наполнителей, цена анаэробных и акриловых адгезивов составляет от 18000 до 22000 руб/кг, в то время как эластомер Ф-40 – 410 руб/кг. Поэтому для исследования влияния УЗО на качество полимерных покрытий выбрали раствор ПКМ на основе эластомера Ф-40.

Пористость – один из главных дефектов снижающих качество покрытий из раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40. Причиной пористости является испарение паров ацетона при отверждении эластомера Ф-40. Дегазация раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 в ходе УЗО должна уменьшить пористость и повысить качество покрытий, нанесенных из этого материала. Вопрос влияния УЗО на дегазацию раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 не изучен и требует всестороннего исследования.

После УЗО материала существенно меняются его физические свойства, поэтому необходимо с учетом УЗО скорректировать технологию восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники ПКМ на основе эластомера Ф-40.

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

- теоретически обосновать режимные, технологические параметры ультразвуковой обработки, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения и дегазации растворов ПКМ;
- исследовать физические свойства ПКМ на основе эластомера Ф-40;
- исследовать качество смешения, зависимости оценочных параметров диспергирующего смешения раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 от режима ультразвуковой обработки материала;
- исследовать дегазацию раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 при механическом и ультразвуковом диспергировании;
- исследовать деформационно-прочностные и адгезионные свойства ПКМ эластомера Ф-40 и оптимизировать режим его термической обработки;
- исследовать дефектность полимерных покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40 после механического и ультразвукового диспергирования;
- исследовать долговечность посадок «корпус-подшипник», выполненных композицией на основе эластомера Ф-40.

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности диспергирующего смешения компонентов ПКМ при ультразвуковой обработке» обоснованы режимные и технологические параметры УЗО, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения и дегазации растворов ПКМ, исследованы оценочные параметры диспергирующего смешения и дегазации раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке.

Обоснование выбора параметра оценки качества смешения компонентов ПКМ. Большинство современных оценок качества смеси основано на методах статистического анализа. В качестве критерия оценки качества смеси используют индекс смешения. Качество смеси определяют сравнением теоретической дисперсии σ^2 с экспериментальной S^2 , рассчитанной по концентрации диспергируемого компонента (C_i) в отобранных в процессе смешения пробах.

Качество смешения оценивают также коэффициентом неоднородности (вариации) смеси K_c

$$K_c = \frac{100}{C_0} \sqrt{\frac{\sum (C_i - C_0) M_i}{M - 1}}, \quad (1)$$

где C_0 – концентрация частиц компонента при идеальном (предельном) распределении в смеси (K_c в этом случае $\rightarrow 0$).

Для оценки качества смешения, с помощью микроскопического метода, определяют коэффициент однородности K_0 по формуле Грина

$$K_0 = \Delta d \sqrt{\frac{\sum N_i}{\sum N_i A^2}}, \quad (2)$$

где Δd – повторяющаяся разность в выбранной шкале размеров частиц; $\sum N_i$ – сумма всех частиц в поле зрения микроскопа; $A = B - d_i$ – расхождение между размером i -ой частицы d_i и средним размером частиц всего спектра B .

Качество смешения считают удовлетворительным при $K_0 \geq 0,35 - 0,40$.

Для оценки качества смешения также используют: химический метод количественного анализа; электрохимический метод; метод основанный на измерении электропроводности; спектральный анализ. Недостатком описанных методов является их сложность и значительная трудоемкость.

В работе Ахматовой О. В. при смешении компонентов ПКМ на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, наполненного глиной Cloisite 30В, различными способами (ручное и механизированное смешение, смешение УЗО) качество смешения оценивали по вязкости ПКМ. Чем выше вязкость, тем более равномерно распределен наполнитель в объеме полимерной матрицы. Вискозиметрический способ отличается простотой и достаточно точно отражает распределение частиц в полимерной матрице на момент оценки качества смешения.

Проанализировав методы оценки качества смешения компонентов ПКМ, в работе принят для исследований вискозиметрический метод.

Режимные и оценочные параметры ультразвукового диспергирования растворов ПКМ. При ультразвуковых колебаниях в жидкости возникает кавитация – образование полостей за счет местного снижения давления. Различают три группы полостей. Условия их возникновения определяются соотношением амплитуды звукового P_A и гидростатического P_0 давлений (рисунок 1). Начальный размер полостей первой группы R_0 меньше критического R_k . Они пульсируют, не значительно меняя свой первоначальный размер, в течение значительного количества периодов колебаний (рисунок 1, а).

Вторую группу представляют пульсирующие полости, начальный размер которых R_0 больше резонансного R_r . При расширении они существенно увеличиваются, однако в фазе сжатия полости не успевают захлопнуться и пульсируют около определенного среднего максимального радиуса \bar{R}_{max} (рисунок 1, б).

Полости третьей группы значительно увеличиваются в размерах в фазе расширения и успевают захлопнуться в фазе сжатия. Пульсации захлопывающихся полостей вызывают пиковый рост давления в микрообъемах на много порядков превышающий амплитуду давления, создаваемого внешним источником колеба-

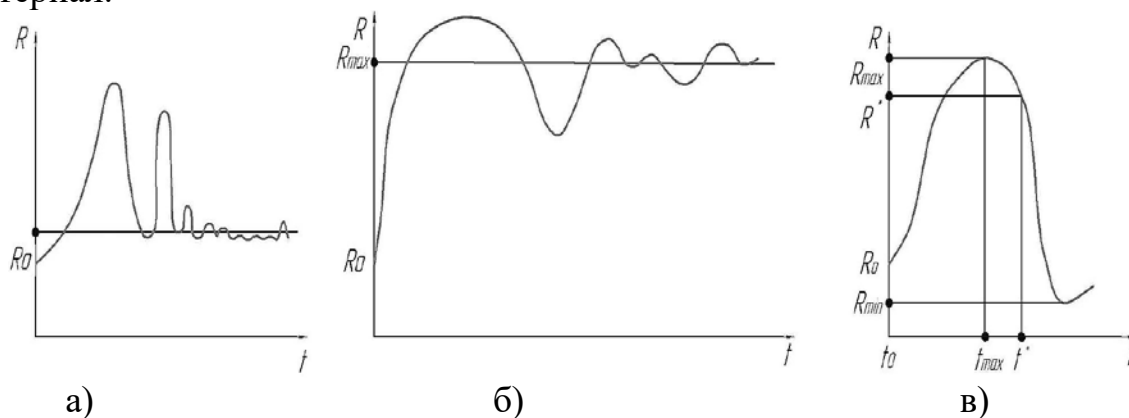
ний. При захлопывании полостей в микрообъемах возникают высокие давления до 100 МПа, а температура повышается до 1000°C. Поэтому необходимым условием эффективного диспергирования наполнителя, более равномерного распределения его частиц по объему полимерной матрицы является наличие при УЗО ПКМ захлопывающихся полостей третьей группы.

Для оценки качества диспергирования наполнителей в ПКМ приняли безразмерный критерий эрозионной активности χ , предложенный Агранатом Б. А. и Брониним Ф.А.

$$\chi = \frac{8,14(P_A - P_0)^{\frac{5}{2}}(0,2P_A + P_0)^{\frac{7}{2}}}{P_A^3 P_{II}^3} \quad (3)$$

где P_{II} – давление насыщенного пара жидкости; P_A – среднее звуковое давление, действующее на пузырек в фазе сжатия; P_0 – гидростатическое давление.

Чем больше значение χ , тем более активно воздействует акустическое поле на материал.



а)

б)

в)

а – $P_A \ll P_0$; б – $P_A \gg P_0$; в – $P_A \geq P_0$

Рисунок 1 – Характерные пульсации полостей, формирующихся в акустическом поле

Как следует из формулы (3), значение критерия χ для ПКМ определяется значениями гидростатического P_0 и звукового P_A давлений. Давление насыщенного пара жидкости P_{II} можно считать постоянной величиной для рассматриваемого раствора ПКМ.

Условие максимума критерия эрозионной активности χ при переменном гидростатическом давлении P_0 по Агранату Б.А. имеет вид

$$\chi = \chi_{\max}, \text{ при } P_A = 2P_0 \quad (4)$$

В техническом плане проще варьировать амплитудой звукового давления, чем гидростатическим давлением. Поэтому, если принять гидростатическое давление P_0 постоянным, то из формулы (3) следует, что с увеличением амплитуды звукового давления P_A значение критерия χ будет монотонно расти по линейной зависимости. Возникает вопрос: какие значения должна иметь амплитуда звукового давления, чтобы обеспечить эффективное диспергирование раствора ПКМ? В результате анализа численного решения уравнения движения паро-газового пузырька в звуковом поле Агранатом Б. А. определены условия при которых кави-

тационный пузырек вырождается в пульсирующий: отношения $P_0 / P_A < 0,1$ и $P_0 / P_A > 0,8$.

С учетом вышеизложенного, граничные условия, при которых возникают захлопывающиеся полости, будут иметь вид

$$1,25P_0 < P_A < 10P_0 \quad (5)$$

С учетом условий (4) и (5) диапазон амплитуды звукового давления, в котором обеспечивается эффективное диспергирование раствора ПКМ, находится в пределах

$$2,0P_0 \leq P_A < 10P_0 \quad (6)$$

Амплитуду звукового давления можно рассчитать по формуле

$$P_A = \rho C \omega A, \quad (7)$$

где ρ – плотность; C – скорость распространения волны; ω – циклическая частота колебаний; A – амплитуда смещения.

Преобразовав формулу (7) получили формулу

$$P_A = \rho \sqrt{\frac{1}{\beta_{ад} \cdot \rho}} \cdot \omega \cdot \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{\beta_{ад}}} \cdot \sqrt{\frac{2I}{C}} = \sqrt{\frac{2W}{S_t}} \sqrt{\frac{\rho}{\beta_{ад}}}, \quad (8)$$

где W – мощность УЗО; S_t – площадь поверхности преобразователя; $\beta_{ад}$ – коэффициент адиабатической сжимаемости раствора.

Из формулы (8) следует, что звуковое давление P_A зависит от интенсивности УЗ обработки I и свойств раствора ПКМ ρ и $\beta_{ад}$. Если принять свойства раствора ПКМ ρ и $\beta_{ад}$ постоянными, звуковое давление будет зависеть от интенсивности УЗ обработки I , т.е. от мощности УЗ обработки W . Меняя мощность УЗО и, соответственно амплитуду звукового давления, можно получить захлопывающиеся полости, высокие значения критерия эрозионной активности и добиться эффективного диспергирования наполнителей в растворе полимера.

Из-за незначительного уровня раствора ПКМ в УЗ ванне гидростатическое давление P_0 приравняли к атмосферному $P_{атм}$, после чего условие (6) приняло вид

$$2,0P_{атм} \leq P_A < 10P_{атм}$$

или

$$2,0 \times 10^5 \text{ Па} \leq P_A < 10^6 \text{ Па} \quad (9)$$

На эффективность ультразвукового диспергирования также влияет распределение волны от источника звука в пространстве. Для обеспечения эффективного диспергирования раствора ПКМ необходимо, чтобы уровень раствора в ультразвуковой ванне $H_{дон}$ был в пределах ближней зоны, т.е. не превышал значение естественного фокуса N (рисунок 2).

Получена формула для расчета допускаемого уровня раствора ПКМ в ультразвуковой ванне

$$H_{дон} = \frac{\pi D^4}{16 \lambda L B}, \quad (10)$$

где D – диаметр излучателя; λ – длина волны; L и B – длина и ширина ультразвуковой ванны соответственно.

Дегазация растворов ПКМ при ультразвуковой обработке. Поры являются дефектом полимерного покрытия и инициаторами процесса разрушения покрытия. Они возникают из-за выделения пузырьков газа из жидкого полимера в процессе его полимеризации и определение условий, обеспечивающих снижение пористости покрытия, является важной технологической задачей.

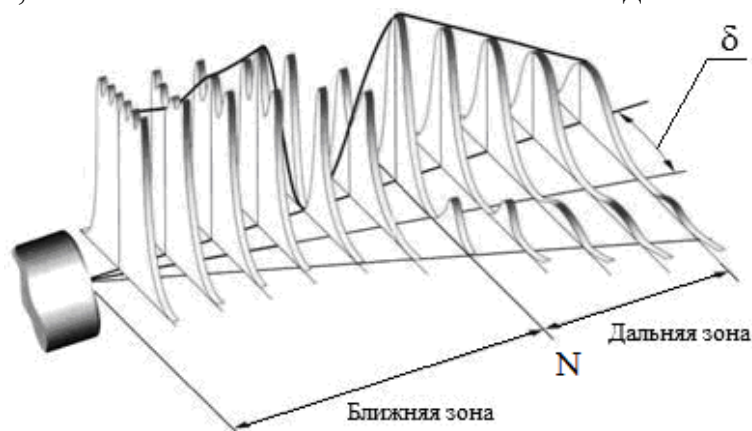


Рисунок 2 – Ближняя и дальняя зоны звукового поля

Процесс ультразвуковой дегазации включает две стадии. На первой стадии дегазации пузырьки газа колеблются в акустическом поле и их размеры увеличиваются вследствие диффузии в них растворенного газа. Помимо диффузии, увеличение размеров пузырьков вызвано коалесценцией, т.е. слиянием пар или групп пузырьков под действием сил акустигидродинамического происхождения – это гидродинамические потоки (силы Бернулли) и акустические течения (силы Бьеркнесса). На второй стадии ультразвуковой дегазации пузырьки газа, достигнув определенного размера, поднимаются к поверхности жидкости и выделяются в атмосферу (окружающую среду).

Условие всплытия пузырька газа в жидком металле при этом имеет вид

$$P_{H_2} > P_0 + h\rho + \frac{2\sigma}{r}, \quad (11)$$

где P_{H_2} – давление газа в пузырьке, P_0 – давление атмосферы на поверхность ванны с раствором, h – высота столба раствора над пузырьком, ρ – плотность расплава, σ – поверхностное натяжение расплава, r – радиус пузырька.

Из формулы (11) следует, что чем больше плотность и поверхностное натяжение жидкости при УЗО, тем больше должно быть давление газа в пузырьке для его всплытия.

Скорость всплытия пузырька на поверхность предложено определять по уравнению Стокса

$$g = \frac{2}{9} g \frac{r^2}{\mu} (\rho - \gamma), \quad (12)$$

где g – ускорение силы тяжести; μ – динамическая вязкость расплава; γ – плотность газа.

Из формулы (12) следует, что в полимерных растворах с меньшей вязкостью больше скорость всплытия пузырьков газа на поверхность и более благоприятные

условия для дегазации.

Изменение концентрации газа в жидкости в акустическом поле за время облучения определяется выражением

$$C = C_p' + (C_0 - C_p')e^{-\beta t}, \quad (13)$$

где C_p' – квазиравновесная концентрация пузырьков газа; C_0 – начальная концентрация; t – время; β – параметр, определяемый интенсивностью звука I и частотой f звуковых колебаний, $\beta = A(E - E_0)^n$; A и n – коэффициенты, определяемые акустическими условиями; E_0 – минимальное значение объемной плотности энергии E , при которой еще наблюдается дегазация.

Установлено, что в докавитационном режиме скорость изменения концентрации V_c пропорциональна интенсивности звука I , а ее эмпирическая зависимость от частоты f имеет вид

$$\frac{dC}{dt} = V_c = Bf^n e^{-kt}, \quad (14)$$

где B , n , k – константы.

В кавитационном режиме скорость изменения концентрации V_c растет с увеличением интенсивности звука быстрее, чем в докавитационном режиме, т.е. кавитация интенсифицирует выделение газа из жидкости. Зависимость носит нелинейный характер.

Таким образом, чем больше частота f и интенсивность I УЗ колебаний, тем больше скорость дегазации V_c и меньше концентрация газа C в жидкости.

Однако при очень высокой интенсивности звука может реализоваться такой режим колебаний кавитационных пузырьков, при котором уменьшается скорость дегазации. Имеются в виду пульсирующие полости второй группы. Поэтому условие эффективного диспергирования: $2,0P_0 \leq P_A < 10P_0$ актуально и является также условием эффективной дегазации полимерного раствора.

По данным Л. Д. Розенберга, чем выше температура жидкости, тем ниже значение квазиравновесной концентрации, устанавливающейся под действием УЗО. При УЗО раствора ПКМ, благодаря кавитации, повышается его температура и уменьшается значение квазиравновесной концентрации C_p' , т.е. снижается концентрация пузырьков газа в растворе по сравнению со стандартной температурой. Поэтому ультразвуковое диспергирование растворов ПКМ способствует их эффективной дегазации и снижению пористости покрытий из ПКМ.

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведены общая методика исследований и частные методики исследования физических свойств и дегазации раствора ПКМ, режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования раствора ПКМ, деформационно-прочностных свойств пленок ПКМ после УЗО, адгезии и дефектности полимерных покрытий из раствора композиции, долговечности посадок подшипников восстановленных ПКМ на основе эластомера Ф-40 после УЗО.

Физические свойства модификаций композиции на основе эластомера Ф-40 исследовали в соответствии с ГОСТ 18481-81, ГОСТ 2405-88 и ГОСТ 1756-2000.

ГОСТ, регламентирующий исследование коэффициента адиабатической сжимаемости растворов ПКМ, отсутствует. В этой связи относительное изменение объема $\frac{\Delta V}{V}$ при увеличении давления определяли экспериментально, используя оригинальную методику и пьезометр оригинальной конструкции.

Исследование режимных и оценочных параметров УЗО раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 проводили, используя ультразвуковую установку "GRAD 0,5 НОМЕ STYLE", весы марки ВЛА-200М, вискозиметр типа ВПЖ-2. За оценочный параметр качества смешения компонентов приняли вязкость раствора ПКМ.

При исследовании процесса дегазации раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 с интервалом времени в 2 мин измеряли остаточную массу раствора ПКМ весами лабораторными ВК 3000.1. В процессе озвучивания, температуру раствора ПКМ измеряли инфракрасным пирометром Testo 830-T4.

Когезионную прочность пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40 оценивали при одноосном растяжении. Образцами являлись пленки размерами 60×15×0,15 мм, с расчетной длиной образца 30 мм. Образцы испытывали на разрывной машине ИР 5082-50.

Для выявления оптимального режима термической обработки пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40 проведен активный эксперимент по композиционному плану В₂. В качестве функции отклика Y приняли разрушающее напряжение σ_p , МПа, а независимыми факторами: x_1 – температуру термической обработки, °С, x_2 – время отверждения, ч.

Исследование адгезионных свойств покрытий из ПКМ на основе эластомера Ф-40 проводили по методу определения прочности связи герметика с металлом при отслаивании (ГОСТ 21981-76). В качестве образцов использовали металлические пластины с размерами 100×25×3 мм, изготовленные из стали 45, с шероховатостью поверхности R_a 0,63. На пластины кистью №5 послойно наносили покрытие из композиции, после чего накладывали железную сетку №07 (ГОСТ 3826-82). Затем на сетку вновь послойно наносили композицию.

Дефектность образцов оценивали по ГОСТ 9407-84. Образцами являлись пленки эластомера Ф-40 и ПКМ на его основе без и после ультразвуковой обработки. Качество пленок оценивали по площади разрушенного покрытия, размерам (диаметр пузырьков) и количеству пузырьков на единицу площади. Определение количества и измерение размера пор (пузырьков) проводили микроскопом МПБ-2, обеспечивающим 24-х кратное увеличение.

Исследование долговечности посадок «корпус-подшипник», восстановленных ПКМ на основе эластомера Ф-40, приготовленной ручным смешением и УЗО, проводили на вибростенде. Значение циклической радиальной нагрузки при исследовании долговечности посадок 20,0 кН. База испытаний $5,76 \times 10^7$ циклов нагружения. За критерий долговечности посадки приняли наработку до начала сдвига наружного кольца подшипника в посадочном отверстии.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» приведены результаты исследования физических свойств раствора ПКМ

на основе эластомера Ф-40, диспергирующего смешения и дегазации раствора ПКМ при УЗО, оптимизации режима термической обработки пленок из раствора ПКМ после УЗО, адгезионных свойств и дефектности покрытий ПКМ, долговечности посадок подшипников в корпусных деталях восстановленных ПКМ на основе эластомера Ф-40.

Исследование физических свойств раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40. Исследованы физические свойства модификаций композиции на основе эластомера Ф-40. Состав №1: эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., высокодисперсный алюминиевый порошок ПАП-1 (ГОСТ 5494-95) – 5 масс.ч., высокодисперсный бронзовый порошок БПП-1 (ТУ 48-21-150-72) – 0,6 масс.ч. Состав №2: эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., порошок ПАП-1 – 16 масс.ч., порошок БПП-1 – 1,8 масс.ч. Состав №3: эластомер Ф-40 100 масс.ч., порошок ПАП-1 – 25 масс.ч., порошок БПП-1 – 2,6 масс.ч.

Исследования показали, что с увеличением концентрации металлических наполнителей плотность раствора ПКМ увеличивается. Минимальную плотность $\rho = 897,15 \text{ кг/м}^3$ имеет модификация эластомера Ф-40 с составом №1, т.к. доля металлических наполнителей в нем наименьшая. В составе №2 содержание наполнителей в 3,18 раза выше, чем в составе №1, и соответственно плотность больше $\rho = 906,15 \text{ кг/м}^3$. Состав №3 имеет наибольшую долю металлических наполнителей в полимерной матрице, поэтому плотность состава №3 максимальная $\rho = 931,95 \text{ кг/м}^3$.

Адиабатическая сжимаемость раствора ПКМ с увеличением концентрации металлических наполнителей снижается до 1,75 раза, от 0,07 до 0,04. Максимальное изменение объема жидкости $\Delta V = 0,07$ при повышении давления наблюдается в составе №1, т.к. доля жидкости (ацетона) в нем на единицу объема наибольшая. В составе №2 изменение объема жидкости составило $\Delta V = 0,06$. Состав №3 имеет наименьшую долю ацетона на единицу объема, поэтому изменение объема жидкости минимальное $\Delta V = 0,04$.

Затем по значениям адиабатической сжимаемости рассчитали скорость звука в модификациях раствора ПКМ. В составе №1 скорость звука минимальная $C = 899 \text{ м/с}$. Это объясняется минимальным содержанием металлических наполнителей и максимальной концентрацией жидкости (ацетона) в композиции. В составе №2 скорость звука выше на 64 м/с ($C = 963 \text{ м/с}$), по сравнению с составом №1. В составе №3 скорость звука максимальная $C = 965 \text{ м/с}$.

Исследования показали, что максимальное давление насыщенного пара имеет место у раствора не наполненного эластомера Ф-40, $P_{\text{п}} = 37,4 \text{ кПа}$. В наполненных растворах эластомера Ф-40 давление насыщенного пара уменьшается с 33,6 кПа в составе №1 до 23,9 кПа в составе №3. Снижение давления насыщенного пара в растворах модификаций ПКМ объясняется первым законом Рауля: при растворении в жидкости какого-либо вещества давление насыщенного пара этой жидкости понижается.

Увеличение плотности и скорости звука, уменьшение коэффициента адиабатической сжимаемости растворов ПКМ повышают амплитуду звукового давления при УЗО. Уменьшение давления насыщенного пара раствора ПКМ и повышение амплитуды звукового давления при фиксированном гидростатическом давлении

увеличивают критерий эрозионной активности, т.е. повышают эффективность диспергирующего смешения. Однако наилучшие деформационно-прочностные и адгезионные свойства ПКМ формируются в первую очередь за счет оптимального состава компонентов ПКМ, а УЗО улучшает вышеуказанные свойства ПКМ только по сравнению с ручным смешением. Поэтому в дальнейших экспериментальных исследованиях режимных параметров УЗО, процесса дегазации и др. исследовали ПКМ с оптимальным составом компонентов.

Исследование режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40. Зависимости критерия эрозионной активности χ от гидростатического давления P_0 при фиксированной мощности W УЗО раствора ПКМ имеют экстремум в виде максимума. По результатам предыдущих экспериментов определили значения критерия эрозионной активности χ при различной мощности УЗО. Максимальные значения критериев эрозионной активности χ обеспечиваются: при мощности $W = 40$ Вт при значении гидростатического давления ниже атмосферного ($P_0 = 95000$ Па), при мощностях УЗО $W = 50; 55$ и 60 Вт – выше атмосферного ($P_0 = 105000; 110000$ и 115000 Па).

В техническом плане гораздо проще варьировать амплитудой звукового давления, чем гидростатическим давлением. Для этого достаточно оснастить ультразвуковую ванну регулятором мощности. Поэтому исследования влияния мощности УЗО на критерий эрозионной активности растворов ПКМ проводили при гидростатическом давлении равном атмосферному, $P_0 = 100000$ Па. Экстремум в виде максимума критерия эрозионной активности $\chi = 65,219$ имеет место при гидростатическом давлении равном атмосферному $P_0 = 100000$ Па и мощности УЗО $W = 44,7802 \approx 45$ Вт.

Зависимость звукового давления P_A от мощности УЗО W линейно возрастающая. Значения звукового давления при мощности УЗО $W \geq 45$ Вт входят в интервал значений по условию (9), обеспечивающему эффективное диспергирование раствора ПКМ.

Зависимость критерия эрозионной активности χ от мощности УЗО W линейная (рисунок 3). С увеличением мощности УЗО W эффективность диспергирования раствора ПКМ повышается. Необходимо отметить, что эта зависимость справедлива только при соблюдении условия (9), иначе будут образовываться полости 1 или 2 группы, и эффективность диспергирования будет низкой.

Исследовано качество смешения раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 при различной длительности УЗО. Качество смешения, т.е. равномерность распределения наполнителя в полимерной матрице оценивали по вязкости ПКМ. Эксперимент показал, что вязкость раствора ПКМ с увеличением времени УЗО повышается от $0,22$ до $0,6$ Па·с (рисунок 4). Максимального значения вязкости $\eta = 0,6$ Па·с раствор ПКМ достигает при времени УЗО $t = 20$ мин, при больших значениях времени УЗО вязкость растет не значительно. Поэтому при мощности УЗО 55 Вт оптимальным временем обработки раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40, при котором достигается максимальное качество смешения наполнителей в полимерной матрице, является время $t = 20$ мин.

На следующем этапе исследовали качество смешения при различном уровне раствора ПКМ в ультразвуковой ванне. С увеличением уровня раствора ПКМ в ультразвуковой ванне вязкость композиции при УЗО уменьшается по линейной зависимости, что свидетельствует о снижении качества смешения. Поэтому уровень h раствора ПКМ в ванне при ультразвуковом диспергировании не должен быть более расстояния, равного фокусу преобразователя N , в нашем случае $h = 14$ мм.

Исследование дегазации раствора композиции на основе эластомера Ф-40 при УЗ обработке. Исследованы зависимости температуры раствора ПКМ от времени смешения при ручном механическом смешении и УЗО. Установлено, что при ручном смешении температура раствора ПКМ с течением времени снижается с 20 до 8⁰С. Понижение температуры раствора ПКМ обусловлено испарением ацетона и возникшим в этой связи холодильным эффектом. При УЗО температура раствора ПКМ в первые 10 мин повышается от 20 до 48,8⁰С по нелинейной зависимости, в течение последующих 14 мин повышение температуры от 48,8 до 53,8⁰С происходит по линейной зависимости. Повышение температуры раствора ПКМ обусловлено явлением кавитации.

Получены зависимости остаточной массы раствора ПКМ от времени смешения при ручном механическом смешении и УЗО. В первые 4...6 мин., испарение ацетона происходит примерно одинаково, в последующие 18...20 мин. остаточная масса раствора ПКМ уменьшается с 101,5 до 83,4 г. при ручном смешении, а при УЗО – до 56,8 г. Количество испарившегося ацетона при УЗО в 2,5 раза больше, чем при ручном смешении раствора ПКМ, что подтверждает корректность теоретических положений.

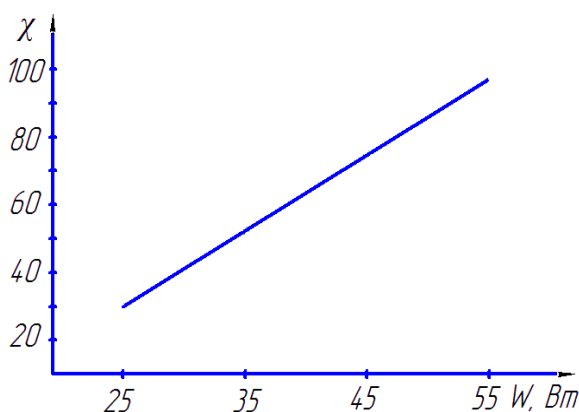


Рисунок 3 – Зависимость критерия эрозионной активности χ раствора ПКМ на основе Ф-40 от мощности ультразвукового излучения W

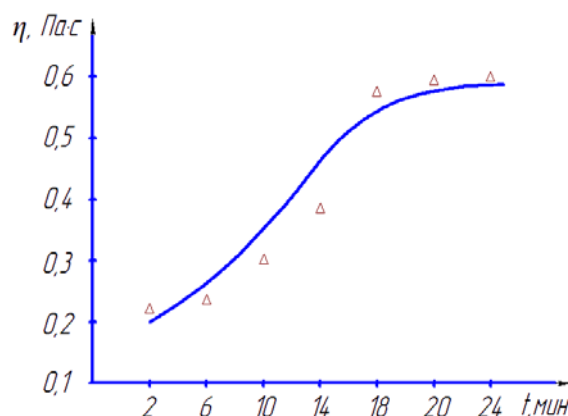


Рисунок 4 – Зависимость вязкости η раствора композиции на основе эластомера Ф-40 от времени ультразвуковой обработки t

Оптимизация ТО раствора композиции на основе эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки. Реализован активный эксперимент и получена регрессионная модель зависимости прочности Y пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40 от температуры x_1 и времени термической обработки x_2 . Поверхность отклика показана на рисунке 5.

Уравнение регрессии в натуральных единицах имеет вид

$$Y = -92,356 - 0,00619 x_1 + 12,8 x_2 + 0,0136 x_1 x_2 - 0,00619 x_1^2 - 2,792 x_2^2 \quad (15)$$

Определен оптимальный режим термической обработки пленок ПКМ на основе эластомера Ф-40. Максимальную прочность 14,87 МПа имеют пленки композиции, обработанные при температуре 120⁰С в течение 2,5 ч.

Исследование адгезионных свойств покрытий композиции на основе эластомера Ф-40. Адгезионная прочность ПКМ приготовленного ручным механическим смешением составляет 3,71 кН/м, после УЗО – 4,26 кН/м. При использовании УЗО адгезионные свойства ПКМ повышаются в 1,15 раза по сравнению с материалом, приготовленным ручным смешением.

Исследование дефектности полимерных покрытий из раствора эластомера Ф-40 и композиции на его основе. Исследованиями установлено, что дефектность полимерных покрытий после УЗО снизилась. Площадь разрушенного покрытия в полимерных покрытиях не наполненного эластомера Ф-40 уменьшилась с 6,1% (ручное смешение) до 4,76% (после УЗО материала). Показатель дефектности снизился до 1,28 раза. Средний диаметр пор в покрытиях эластомера Ф-40 без УЗО составляет 0,4...0,5 мм, а в покрытиях после УЗО – 0,3...0,4 мм. Размер пор уменьшился до 1,6 раз. Помимо уменьшения размеров пор, концентрация пор (количество пузырьков на 1 см²) в покрытиях после УЗО снизилась. В покрытии эластомера Ф-40 без УЗО концентрация пузырьков составляет 69, в покрытиях после УЗО – 53 шт./см². Концентрация пор в покрытии после УЗО уменьшилась на 30 %.

В полимерных покрытиях ПКМ, полученных после ручного смешения, площадь разрушенного покрытия составила 4,04%, в покрытиях после УЗО – 2,96%. Показатель дефектности снизился до 1,36 раза. Средний диаметр пор в покрытиях композиции, полученных после ручного смешения, составил 0,2...0,3 мм, а в покрытиях после УЗО – 0,15...0,25 мм. Размер пор уменьшился до 2 раз. В покрытиях ПКМ без УЗО концентрация пузырьков составляет 45, в покрытиях после УЗО – 33 шт/ см². Концентрация пор в покрытии ПКМ после УЗО снизилась на 36 % (рисунок 6).

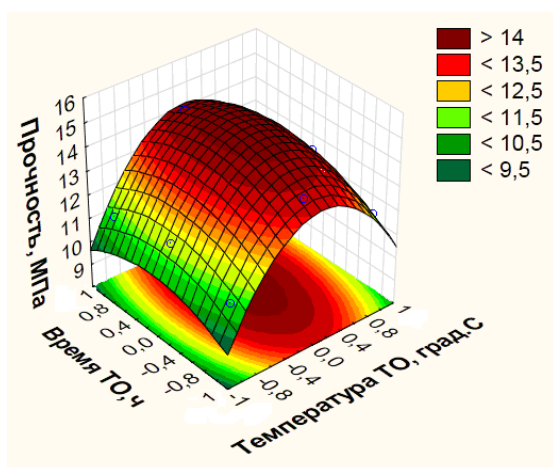
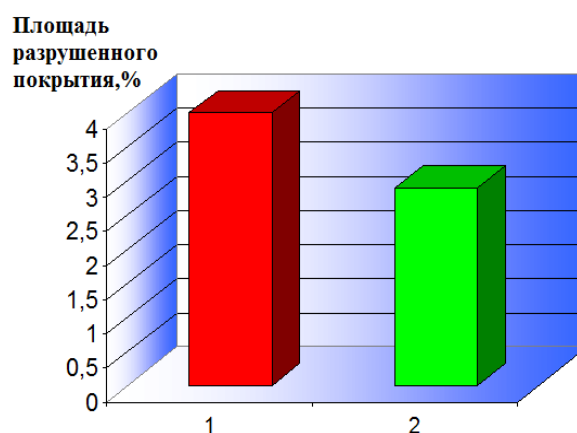


Рисунок 5 – Зависимость прочности пленок композиции на основе эластомера Ф-40 от температуры и времени отверждения



1 – при ручном смешении; 2 – после УЗО
Рисунок 6 – Площадь разрушенного покрытия в покрытиях композиции эластомера Ф-40

Исследование долговечности посадок, восстановленных композицией на основе эластомера Ф-40 без и с УЗ обработкой. Стендовые испытания при циклическом нагружении покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40 показали, что использование УЗО повышает выносливость и соответственно долговечность восстановленных посадок подшипников по сравнению с покрытиями, полученными ручным смешением до 1,45 раза. Максимально допускаемая толщина покрытия ПКМ при восстановлении посадочных отверстий корпусных деталей с использованием УЗ обработки составляет 0,125 мм.

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

По результатам проведенных исследований разработана технология восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автомобильной техники композицией на основе эластомера Ф-40, которая содержит следующие операции: очистка посадочных отверстий под подшипники в корпусной детали; измерение посадочных отверстий для определения износа; обезжиривание посадочных отверстий; приготовление композиции на основе эластомера Ф-40 с использованием ультразвуковой обработки; нанесение композиции на основе эластомера Ф-40 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 автомобильной техники 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 автомобильной техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных корпусных деталей не наблюдалось.

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

Расчеты показали экономическую эффективность технологии восстановления корпусных деталей автомобильной техники. Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области составил около 360 тыс. руб.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Получена формула (8) для расчета амплитуды звукового давления по мощности УЗО. Определены условия эффективного диспергирования раствора ПКМ для восстановления корпусных деталей автомобильной техники: амплитуда звукового давления при УЗО должна удовлетворять условию (9), максимально допускаемый уровень раствора ПКМ в ультразвуковой ванне – условию (10).

2. При УЗО раствора ПКМ, благодаря кавитации, повышается его температура и уменьшается значение квазиравновесной концентрации C_p^l , т.е. снижается концентрация пузырьков газа в растворе по сравнению со стандартной температурой. Поэтому ультразвуковое диспергирование растворов ПКМ способствует их эффективной дегазации и снижению пористости покрытий из ПКМ.

3. Исследованы физические свойства растворов ПКМ на основе эластомера. С повышением концентрации дисперсных частиц металлических наполнителей в растворах ПКМ на основе эластомера Ф-40 увеличивается плотность от 897,15 до 931,95 кг/м³, скорость звука от 899 до 965 м/с, уменьшается коэффициент адиабатической сжимаемости от $1,38 \cdot 10^{-9}$ до $7,902 \cdot 10^{-10}$ м²/Н, а давление насыщенного пара раствора ПКМ от 33,6 до 23,9 кПа. При этом в растворах ПКМ увеличивается критерий эрозионной активности, т.е. повышается эффективность диспергирующего смешения. Однако следует учитывать, что наилучшие деформационно-прочностные и адгезионные свойства ПКМ формируются в первую очередь за счет оптимального состава компонентов ПКМ, а УЗО улучшает вышеуказанные свойства ПКМ только по сравнению с ручным смешением. Поэтому режимные параметры УЗО следует определять для раствора ПКМ с оптимальным составом компонентов.

4. Экспериментально подтверждена корректность условий (9) и (10), обеспечивающих эффективное ультразвуковое диспергирование растворов ПКМ на основе эластомеров. Определены технологические параметры эффективного ультразвукового диспергирования раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 в ультразвуковой ванне "GRAD 0,5 HOME STYLE": мощность УЗО $W = 55$ Вт; время УЗО $t = 20$ мин (0,33 ч); уровень раствора ПКМ в ультразвуковой ванне $h \leq 14$ мм.

5. Количество испарившегося ацетона при УЗО в 2,5 раза больше, чем при ручном смешении раствора полимерной композиции эластомера Ф-40, что снижает пористость и повышает качество его полимерных покрытий.

6. Получена регрессионная модель зависимости прочности пленок композиции на основе эластомера Ф-40 от температуры и времени термической обработки. Определен оптимальный режим термической обработки пленок композиции на основе эластомера Ф-40. Максимальной прочностью 14,87 МПа обладают пленки композиции, термообработанные при температуре $T=120^{\circ}\text{C}$, продолжительностью $t = 2,5$ ч.

7. Ультразвуковая обработка раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40, по сравнению с ручным смешением, существенно повышает качество полимерных покрытий: размер пор уменьшается до 2 раз, концентрация пор снижается до 30%, площадь разрушенного покрытия уменьшается до 1,36 раза. В результате долговечность восстановленных посадок подшипников по сравнению с покрытиями, полученными ручным смешением, увеличивается до 1,45 раза.

8. На основе результатов исследований разработана технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях композицией на основе эластомера Ф-40, включающая УЗО материала. Рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия с диаметральным износом до 0,25 мм. Технология восстановления внедрена в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 360 тыс. руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

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

1. **Колесников, А.А.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники при модификации эластомеров / Ли Р. И., Машин Д. В., Кирсанов Ф. А., Колесников А. А. // Труды ГОСНИТИ. М.: Изд-во ГОСНИТИ, 2013. - т. 111, ч. 2, – С. 134-136.

2. **Колесников, А.А.** Исследование физических свойств полимерных композиционных материалов на основе эластомера Ф-40 с высокодисперсными металлическими наполнителями для оценки диспергирующего смешения компонентов / Ли Р. И., Колесников А.А. // Труды ГОСНИТИ. - М.: Изд-во ГОСНИТИ, 2014. - Т. 117. – С. 173-178.

3. **Колесников, А.А.** Оптимизация режима термической обработки посадочных отверстий корпусных деталей автотракторной техники, восстановленных композицией эластомера Ф-40 / Ли Р. И., Колесников А.А. // Труды ГОСНИТИ. - М.: Изд-во ГОСНИТИ, 2015. - Т. 121. – С. 250-254.

4. **Колесников, А.А.** Параметры ультразвукового диспергирования растворов полимерных композиционных материалов / Ли Р. И., Колесников А.А., Киба М.Р. // Все материалы. Энциклопедический справочник. – М.: Изд-во ООО Наука и технологии, 2016. - №9. – С. 23-28.

5. **Колесников, А.А.** 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.

6. **Колесников, А.А.** Повышение эффективности восстановления корпусных деталей автомобильной техники полимерными композитами после ультразвуковой обработки [Текст] / Р. И. Ли, А.А. Колесников // Научное обозрение – 2017. - №2. – С. 58-64.

В сборниках научных трудов и материалах конференций:

7. **Колесников, А.А.** Деформационно-прочностные свойства полимерного нанокomпозиционного материала на основе эластомера Ф-40 [Текст] / Ли Р. И., Бутин А.В., Колесников А.А. // IV Междунар. науч.-инновац. молодежная конф.: «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент», Тамбов, 2012. С.162-164.

8. **Колесников, А.А.** Исследование деформационно-прочностных свойств композиции на основе эластомера Ф-40 [Текст] / Ли Р. И., Машин Д.В., Сафонов В.Н., Колесников А.А. // Междунар. науч.-произв. конф.: Современные проблемы инновационного развития агроинженерии и информационных технологий: – Белгород.: Изд-во Белгородской ГСХА, 2012. С. 207.

9. **Колесников, А.А.** Ультразвуковое диспергирование дисперсных металлических наполнителей в растворах полимерных композиционных материалов / Р.И. Ли, А.А. Колесников // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства : сборник науч. докладов XVII Междунар.науч.-практ. конф., 24-25 сентября 2013 г., г. Тамбов. – Тамбов : Изд-во Першина Р.В., 2013. – С. 203-207.

10. **Колесников, А.А.** Ультразвуковое диспергирование растворов по-

лимерных композиционных материалов / Ли Р. И., Колесников А.А. // Област. науч.-практ. конф. по проблемам технических наук: – Липецк.: Изд-во ЛГТУ., 2013. – С. 48-53.

11. **Колесников, А.А.** Выявление оптимальных режимов ультразвукового воздействия при создании новых полимерных композиционных материалов / Р.И. Ли, А.А. Колесников // «Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии энергоэффективности и IT-технологий»: матер. XVIII Междунар. науч.-произв. конф. Белгород, 26-27 мая 2014 / БелГАУ. – п. Майский: Изд-во БелГАУ им. В.Я. Горина, 2014. – С. 162.

12. **Колесников, А.А.** Повышение качества покрытий полимерной композиции на основе эластомера Ф-40С при ультразвуковой обработке [Текст] / Р.И. Ли, А.А. Колесников // Современная металлургия начала нового тысячелетия. К 80-летию НЛМК (Программа «Кадры для регионов»): сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конференции 17-21 ноября 2014 г. Ч. 1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, с. 132-135.

13. **Колесников, А.А.** Повышение качества покрытий полимерной композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке / Р.И. Ли, А.А. Колесников // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства : сборник науч. докладов XVIII Междунар.науч.-практ. конф., 23-24 сентября 2015 г., г. Тамбов. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2015. – С. 261-262.

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

15. **Колесников, А.А.** Дегазация растворов полимерных композиционных материалов как основополагающий способ повышения качества полимерных покрытий при ультразвуковой / Р.И. Ли, А.А. Колесников // Научно-технический прогресс в АПК проблемы и перспективы: сборн. науч. статей Междунар.науч. -практ. конф. в рамках XVIII Междунар. агропром. выставки "Агроуниверсал-2016", 30 марта – 1 апреля 2016 г., г. Ставрополь: АГРУС Ставропольского ГАУ, 2016. – С. 321-333.

16. **Колесников, А.А.** Ультразвуковая дегазация растворов полимерных композиционных материалов как основа повышения качества полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники / Ли Р. И., Колесников А.А. // II Междунар. науч.-практ. конф.: Информационные технологии и инновации на транспорте: – Орел.: Изд-во ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2016. – С. 258-264.

17. **Колесников, А.А.** Условия эффективного ультразвукового диспергирования растворов полимерных композитов при восстановлении корпусных деталей сельскохозяйственной техники [Текст] / Р. И. Ли, А. А. Колесников // Повышение эффективности и экологические аспекты использования ресурсов в с/х производстве: сборн. научн. докладов Междунар. научн. конференции, 6-7 октября 2016 г., г. Тамбов / ФГБНУ ВНИИТиН. – Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2016. – 22-25 с.