

ФГБОУ ВО ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Ли Р. И.

Липецк – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1 Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований.....	11
1.1 Физико-механические свойства покрытий из полимерных композиционных материалов.....	11
1.2 Применение ультразвуковой обработки для диспергирующего смешения компонентов полимерных композиционных материалов, предназначенных для восстановления корпусных деталей.....	19
1.3 Полимерные композиционные материалы и технологии для восстановления корпусных деталей автомобильной техники.....	27
1.4 Выводы. Цель и задачи исследований.....	43
2 Теоретические предпосылки повышения эффективности диспергирующего смешения компонентов ПКМ при ультразвуковой обработке.....	48
2.1 Обоснование выбора параметра оценки качества смешения компонентов ПКМ.....	48
2.2 Режимные и оценочные параметры ультразвукового диспергирования растворов ПКМ.....	56
2.3 Дегазация растворов ПКМ при ультразвуковой обработке.....	64
3 Методика экспериментальных исследований.....	72
3.1 Общая методика исследований.....	73
3.2 Методика исследования физических свойств растворов композиций на основе эластомера Ф-40.....	75
3.3 Методика исследования режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования раствора композиции на основе эластомера Ф-40.....	80
3.4 Методика исследования дегазации раствора композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке.....	83
3.5 Методика исследования когезионной прочности пленок	

композиции на основе эластомера Ф-40.....	85
3.6 Методика исследования адгезионных свойств покрытий композиции на основе эластомера Ф-40.....	89
3.7 Методика исследования дефектности полимерных покрытий из раствора эластомера Ф-40 и композиции на основе.....	91
3.8 Методика исследования долговечности посадок подшипников качения восстановленных раствором композиции на основе эластомера Ф-40.....	91
4 Результаты экспериментальных исследований и их анализ.....	96
4.1 Исследование физических свойств раствора композиции на основе эластомера Ф-40.....	96
4.2 Исследование диспергирующего смешения раствора композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке.....	97
4.2.1 Исследование качества смешения раствора композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке.....	100
4.2.2 Исследование режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования раствора композиции на основе эластомера Ф-40.....	103
4.3 Исследование дегазации раствора композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке.....	110
4.4 Оптимизация режима термической обработки раствора композиции на основе эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки.....	112
4.5 Исследование адгезионных свойств покрытий композиции на основе эластомера Ф-40.....	122
4.6 Исследование дефектности полимерных покрытий из раствора эластомера Ф-40 и композиции на его основе.....	123
4.7 Исследование долговечности посадок подшипников качения восстановленных раствором композиции на основе эластомера Ф-40.....	133
5 Реализация результатов исследований и их	

технико-экономическая оценка.....	137
5.1 Технологические рекомендации.....	137
5.2 Расчет экономической эффективности восстановления корпусных деталей автомобилей в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области.....	138
Общие выводы.....	145
Список литературы.....	147
Приложения.....	160

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях санкций стран ЕС, США и других стран вопрос импортозамещения отечественной продукцией чрезвычайно актуален. Существенную роль в конкурентоспособности отечественных изделий играет ее цена, в которой значительную долю составляют транспортные издержки. В свою очередь стоимость автомобильных транспортных перевозок определяется надежностью автомобильного транспорта, затратами на его поддержание в работоспособном состоянии.

Изнашивание отверстий в подшипниковых узлах корпусных деталей является одной из основных причин преждевременного выхода из строя агрегатов автомобильной техники. По данным ГОСНИТИ, поверхности посадочных отверстий подшипников и стаканы у 80% корпусных деталей требуют восстановления [1]. Вследствие этого на сегодняшний день возникает необходимость создания и использования исключительно новых материалов и технологий восстановления, которые смогут соответствовать уровню современного ремонтного производства, обеспечить деталям требуемый послеремонтный технический ресурс, повышение надежности узлов, агрегатов и машины в целом [2...27].

Корпусные детали являются наиболее дорогими деталями в конструкции машин, составляя до 20% по количеству и до 45% по массе и стоимости, от остальных групп деталей определяя надежность работы агрегата и машины в целом [28]. Существует множество способов восстановления посадочных мест подшипников качения: установка дополнительной детали, наплавка, нанесение гальванических покрытий, электроконтактная приварка стальной ленты и другие способы [29...47]. Данные методы восстановления чаще всего предусматривают воздействие на восстанавливаемые корпусные детали высоких температур, которые приводят к структурным изменениям, процессам релаксации материала детали, вследствие чего происходит нарушение её параметров точности. Кроме того, не обеспечивается требуемая прочность восстановленных соединений в процессе по-

слеремонтной эксплуатации, так как не удастся устранить причины ослабления посадки ПС: технологические погрешности при механической обработке и возникновение фреттинг-коррозионного изнашивания посадочных отверстий. Данные способы восстановления энерго- и трудоемки, требуют наличия специального оборудования и определенной квалификации персонала.

Избежать вышеперечисленных недостатков при ремонте машин позволяет использование полимерных материалов. При данном методе ремонта отсутствует необходимость в высокой квалификации работников и специальном оборудовании, в связи с чем, он является одним из наиболее простых и дешевых. Согласно данным ГНУ ГОСНИТИ за счет применения полимерных материалов удастся сократить трудоёмкость ремонта автомобильной техники на 20-30 %, себестоимость работ на 15-20%, снизить расход чёрных и цветных металлов на 40-50% [48].

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе дисперсных металлических наполнителей получают все более широкое распространение. Введение наполнителей в полимерную матрицу позволяет получить материалы с совершенно новыми эксплуатационными свойствами. Существенную роль в формировании потребительских свойств полимерного композиционного материала играет распределение частиц наполнителя по объему полимерной матрицы. Технологической проблемой является равномерное распределение дисперсных частиц наполнителя по объему полимерной матрицы. При вводе наполнителей смешение осуществляют механическим способом (вручную или механизированным способом мешалкой), ультразвуковой обработкой (УЗО) или комбинированным способом (предварительное ручное смешение с последующей УЗО).

Поэтому актуальной задачей является тщательное изучение путей получения ПКМ на основе дисперсных металлических наполнителей с высокой однородностью распределения частиц 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.

Требует 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", приложение А) 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".

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 композицией на основе эластомера Ф-40, включающей ультразвуковую обработку материала.

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.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на:

- научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Липецкого государственного технического университета в 2012...2016 гг.;
- IV Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» 24 – 26 октября 2012 г., ТГТУ (г. Тамбов), 2012 г.;
- Международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии» 20 - 21 ноября 2012 г., Бел. ГСХА (г. Белгород), 2012 г.;
- XVII Международной научно-производственной конференции "Научные проблемы технического сервиса сельскохозяйственных машин", ГОСНИТИ (г. Москва), 2012 г.;
- Областной научно-практической конференции по проблемам технических наук "МОЛОДЕЖЬ-НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО", ЛГТУ (г. Липецк), 2013 г.;
- XVII международной конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – Новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства», ГНУ ВНИИТИН (г. Тамбов), 2013 г.;
- XVIII международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии, энергоэффективности и IT технологий», Бел. ГСХА (г. Белгород), 2014 г.;
- XII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК», СГАУ (г. Ставрополь), 2016 г.;
- 2-ой Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте», ОГУ имени И.С.Тургенева (г. Орел), 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, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получен патент на изобретение РФ №2537864 (приложение Б).

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.

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.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Физико-механические свойства покрытий из полимерных композиционных материалов

Существенную роль в достижении заданных физико-механических свойств покрытий из полимерного композиционного материала при восстановлении корпусных деталей машин, играет качество подготовки поверхности субстрата перед его нанесением. Некачественная подготовка поверхности приводит к пониженной адгезии, а в некоторых случаях и к разрушению полимерного покрытия. Малейшее отклонение от параметров технологического процесса подготовки поверхностей может повлечь за собой снижение адгезионных свойств материала. Выбранный способ подготовки поверхности должен обеспечивать максимально возможную прочность соединения ПКМ с поверхностью субстрата, а также его устойчивость в условиях эксплуатации.

Основной целью процесса подготовки поверхности субстрата является удаление всех загрязнений и получение равномерной по всей площади шероховатости.

Поверхности восстанавливаемых посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях в большинстве случаев покрыты влагой, загрязнениями органического (жировые пленки на основе масел) и неорганического (грязь, песок) происхождения. Отсюда возникает необходимость наличия обязательной операции очистки, которую проводят в растворах синтетических моющих средств.

Следующей операцией процесса подготовки поверхности субстрата является ее механическая обработка в виде зачистки (шлифования). При наличии на восстанавливаемой поверхности детали следов коррозии зачистку осуществляют металлическими щетками, шлифовальной шкуркой с целью удаления корродированного поверхностного слоя. Зачистку проводят до появления металлического

блеска у поверхности субстрата. В этом случае удаляется поверхностный дефектный слой и значительно возрастает активность поверхности субстрата в формировании адгезионных связей с молекулами ПКМ.

Дополнительно механическая обработка придает поверхности шероховатость, за счет чего увеличивается площадь контакта полимерного покрытия с субстратом, что положительно сказывается на адгезионных и физико-механических свойствах покрытия из ПКМ. После зачистки посадочные отверстия обезжиривают.

Обезжиривание заключается в протирке изношенной поверхности тканью, смоченной растворителем. Адгезия полимерных покрытий в значительной мере определяется качеством обезжиривания, поэтому обезжиривание должно быть тщательным. Не допускается касание руками обезжиренных поверхностей перед нанесением покрытий из ПКМ.

При идеальной подготовке поверхности разрушение полимерных покрытий происходит по слою ПКМ (когезионное разрушение), а не по границе раздела ПКМ - субстрат.

Подготовленная поверхность под нанесение ПКМ высокоактивна, особенно легко покрывается окисной пленкой и способна поглощать содержащиеся в воздухе загрязняющие примеси, пыль и влагу. Поэтому необходимо проводить нанесение покрытия как можно быстрее по окончании подготовки восстанавливаемых поверхностей.

При использовании металлических порошков в качестве наполнителей необходимо учитывать их специфические особенности и осуществлять соответствующую подготовку до ввода в полимерную матрицу. Поверхность частиц медных и алюминиевых порошков покрыта оксидной пленкой, а в некоторых случаях и специфической смазкой применяемой в процессе их производства [49]. Это приводит к затруднению адгезионного контакта частиц наполнителей с полимерной матрицей, что препятствует достижению необходимых показателей адгезионной прочности.

Избыточная влага приводит к слипанию частиц, ухудшению сыпучести, увеличению пористости, появлению пузырей (особенно в пленке), деструкции и ухудшению физико-механических свойств. Во избежание подобных негативных воздействий, снижения адсорбции влаги и повышения адгезии металлические порошки подвергают тщательному просушиванию для достижения требуемых параметров влажности. Допустимая влажность полимерных порошков и гранулятов после сушки для получения ПКМ и покрытия не должна превышать 0,01 – 0,2% в зависимости от природы полимера [50].

Сушку порошкообразных наполнителей, полимерных порошков и гранулятов осуществляют нагретым воздухом в камерных сушилках полочного типа. Высушенный наполнитель или гранулят в процессе хранения на открытом воздухе может сорбировать влагу из воздуха, что следует учитывать при организации технологии получения ПКМ и покрытий [51].

Рассматривая вопросы подготовки поверхности субстрата и компонентов ПКМ не нужно забывать о важности выбора способа непосредственного совмещения компонентов (смешения) при его создании.

Смешение – это сложные физико-механические и физико-химические процессы, связанные с воздействием силовых полей, перемещением исходных компонентов смеси в объеме смесительного аппарата по сложным траекториям, с образованием системы, характеризующейся статически случайным распределением компонентов [52]. Различают два основных механизма смешения: простое и диспергирующее. Под простым смешением принято понимать процесс, в результате которого происходит статически случайное распределение частиц исходных компонентов в объеме смеси без изменения их начальных размеров. Диспергирующее смешение это процесс смешения, который сопровождается изменением (уменьшением) начальных размеров частиц компонентов, связанный с их дроблением, разрушением агрегатов, деформированием и распадом дисперсной фазы. Основной задачей диспергирующего смешения является разрушение агрегатов твердых частиц наполнителя и равномерное распределение их в объеме жидкого полимера.

Чем более равномерно распределены частицы наполнителя в объеме матрицы полимера, тем выше деформационные и прочностные свойства ПКМ.

Равномерность распределения и соответственно физико-механические свойства ПКМ в значительной мере зависят от способа смешения компонентов композиции. Различают механическое смешение (ручное или с помощью мешалок различных конструкций) и ультразвуковое. Метод механического смешения ПКМ отличается простотой, не требует сложного технологического оборудования, однако имеет недостатки: низкая эффективность диспергирования, длительность операций, загрязнение обрабатываемого материала примесями от мелющих тел аппаратов, шаров и др., удовлетворительный результат по распределению частиц в композиции.

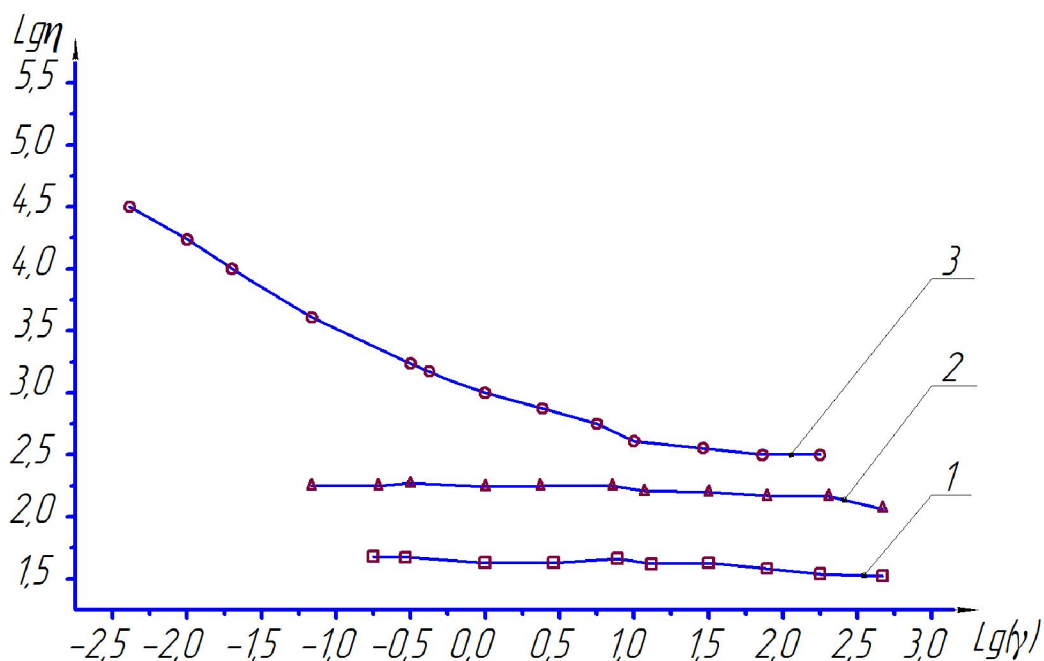
Ультразвуковое смешение в отличие от механического позволяет достичь более высокого качества распределения частиц по объему полимерной матрицы, обладает возможностью диспергирования агломератов частиц, а также способствует ускорению технологического процесса.

В работе Тренисовой А. Л. композицию на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, наполненную глиной Cloisite 30В, готовили различными способами смешения: механическое смешение; ультразвуковая обработка (УЗО) в установке типа "Ванна" при частоте 35 кГц и мощности 50 Вт; применение ультразвука с погружным волноводом с диаметром волновода 1,5 см, при частоте колебаний 22 кГц и мощности 100 Вт [53]. Эффективность диспергирующего смешения частиц наполнителя в матрице полимера оценивали по варьированию вязкости композиций, содержащих глину (рисунок 1.1).

Чем выше вязкость раствора ПКМ, тем выше эффективность диспергирующего смешения частиц наполнителя в полимерной матрице.

При механическом смешении ПКМ частицы наполнителя в силу своей высокой поверхностной энергии имеют склонность к агрегированию друг с другом или с другими частицами, в связи с чем происходит образование достаточно

крупных комков. Это приводит к получению полимерных композиционных материалов обладающих свойствами отличными от ожидаемых [53].



1 – механическое смешение; 2 – механическое смешение + УЗО в течение 30 мин в установке "Ванна"; 3 – УЗО с погружным волноводом

Рисунок 1.1 – Зависимость вязкости η от скорости сдвига γ для системы ЭД-20 + ДАДФС, содержащей 5 масс. ч. Cloisite 30B

Как следует из рисунка 1.1 наиболее низкая вязкость, а следовательно и эффективность диспергирующего смешения имеет место при механическом смешении (зависимость 1). Применение УЗО в установке типа "Ванна" увеличило вязкость раствора ПКМ приблизительно в 1,3 раза, соответственно повысилась эффективность диспергирующего смешения. При использовании погружного волновода и увеличении мощности УЗО до 100 Вт, вязкость и, следовательно, эффективность диспергирующего смешения максимальные.

В работе Ахматовой О. В. исследовали различные композиции на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, наполненные силикатными нанотрубками, различными видами глин (монтмориллонит Na^+ , обработанный различными модификаторами). Армирующим наполнителем выступало стекловолокно. Для модифика-

ции эпоксидного олигомера также использовали высокотермостойкий термопластичный полиариленэфиркетон (ПАЭК), а для отверждения – диаминдифенилсульфон (ДАДФС).

Методом электронной микроскопии автором получены микрофотографии эпоксидного олигомера после модифицирования наноглиной (рисунок 1.2). Как видно из рисунка 1.2, при воздействии ультразвука происходит самое оптимальное смешение.

Деформационно-прочностные свойства ПКМ существенным образом зависят от способа смешения. На рисунке 1.3 показана адгезионная прочность ПКМ на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, наполненного глиной Cloisite 30В, которую смешивали с полимерной матрицей различными способами. Как следует из рисунка 1.3 наиболее высокие показатели прочности достигаются после УЗО материала. Исследованиями установлено, что после ультразвуковой обработки адгезионная прочность ПКМ с глиной Cloisite 30В увеличивается до 15%, ударная вязкость – в 2 раза, трещиностойкость на 20%.

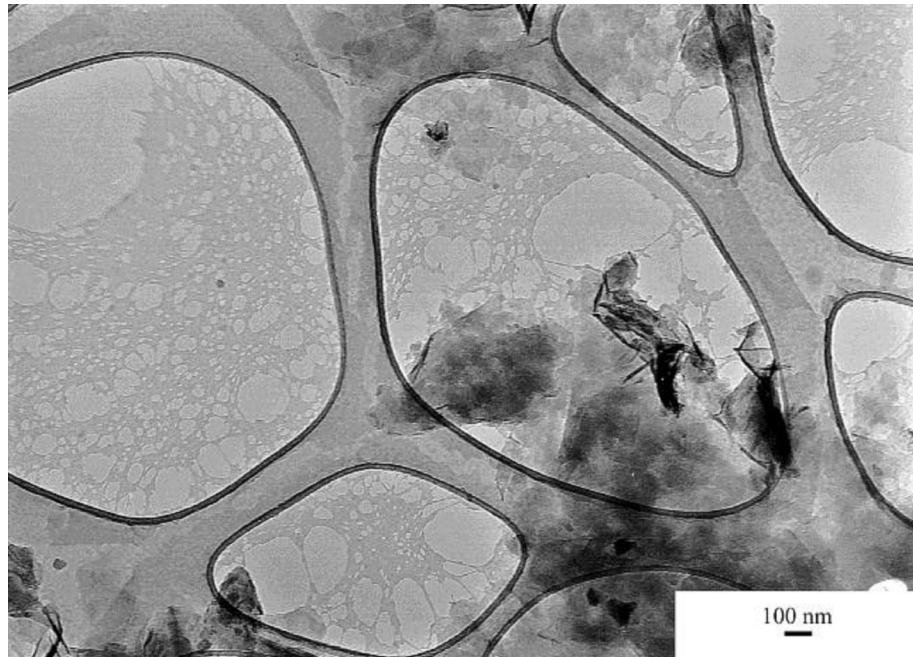
Наполнение силикатными нанотрубками при воздействии ультразвука увеличивает ударную вязкость ПКМ на основе ЭД-20 на 80%, а трещиностойкость на 25% [54].

В работе Гаджиева А. А. исследовано влияние ультразвуковой обработки на физико-механические свойства терморезактивных полимерных композиций (ЭД-16+АСТ-Т), эластифицированных герметиком 6Ф. Установлено, что при воздействии ультразвукового поля у рассматриваемого ПКМ твердость увеличивается в 1,7 раза, адгезионная прочность – на 65...70%, прочность при растяжении – на 60...65%, ударная вязкость на – 70...75% [55 9].

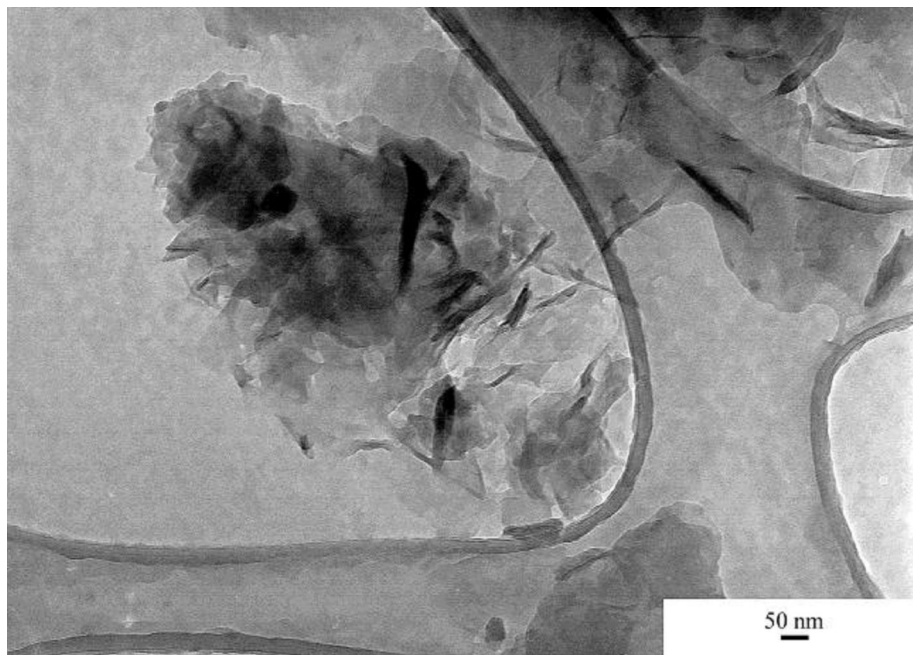
Выводы

1 Физико-механические свойства ПКМ в значительной мере зависят от качества смешения компонентов ПКМ, поэтому повышение качества смешения является перспективным направлением улучшения ПКМ.

2 УЗО позволяет существенно повысить качество смешения и улучшить физико-механические свойства ПКМ, поэтому представляют научный и практический интерес исследования УЗО ПКМ, которые предназначены для восстановления посадочных мест подшипников в корпусных деталях автомобильной техники.



а)



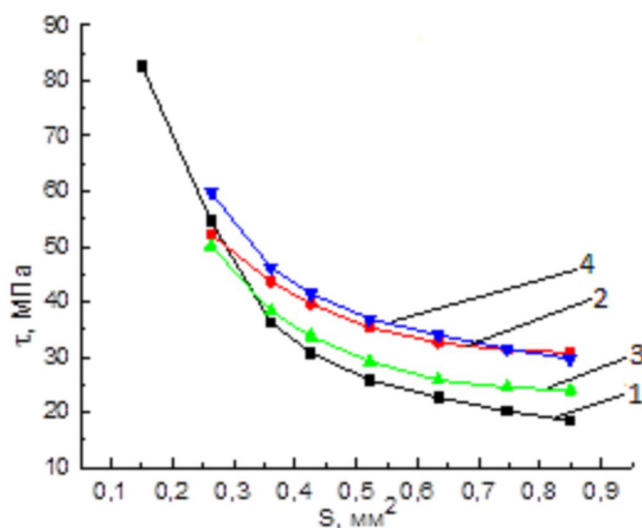
б)



в)

а) – механическое смешение; б) – смешение на высокоскоростной мешалке в течение 20 мин; в) - смешение при воздействии ультразвука в течение 12 мин

Рисунок 1.2 – Микрофотографии ПКМ на основе ЭД-20, содержащей 5 масс.ч. глины Cloisite 30В



1 – ЭД-20 + 30 масс.ч. ДАДФС; 2 – ЭД-20 + 30 масс.ч. ДАДФС + 0,5 масс.ч. Cloisite 30В (смешение вручную); 3 – ЭД-20 + 30 масс.ч. ДАДФС + 0,5 масс.ч. Cloisite 30В (смешение на высокоскоростной мешалке); 4 – ЭД-20 + 30 масс.ч. ДАДФС + 0,5 масс.ч. Cloisite 30В (12 мин.УЗО)

Рисунок 1.3 – Зависимость адгезионной прочности τ от площади соединения S

1.2 Применение ультразвуковой обработки для диспергирующего смешения компонентов полимерных композиционных материалов, предназначенных для восстановления корпусных деталей

Применение ультразвука позволяет добиться существенной интенсификации различных процессов химических технологий, которые протекают в жидких средах. В основе ультразвуковой интенсификации процессов лежит введение ультразвуковых колебаний непосредственно в жидкие среды. На сегодняшний день успешно реализуются несколько способов введения колебаний ультразвука в обрабатываемые жидкие среды. К наиболее распространенным относятся – ультразвуковая обработка методом погружения рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы в технологический объем, а также обработка в установках типа «Ванна» с пьезоэлектрическими излучателями, прикрепленными к днищу. Ультразвуковое диспергирование позволяет добиться получения высокодисперсных, однородных и химически чистых смесей при создании полимерных композиционных материалов [56].

Кавитация является одним из основных факторов, который определяет воздействие ультразвука на процессы, протекающие в жидких средах. Анализ литературных источников позволил установить, что под ультразвуковой кавитацией подразумевается возникновение в жидкой среде в фазе отрицательного давления звукового поля парогазовых полостей. Другими словами это нарушение целостности жидкости в ее слабых местах, где нарушен баланс межмолекулярных сил сцепления частиц жидкости (газообразные микровключения, твердые микрочастицы и др. причины).

Процесс развития одиночной кавитационной полости состоит из трех последовательных этапов. Первый этап включает в себя расширение кавитационной полости из начального парогазового зародыша, находящихся всегда в большом количестве в жидкости, обусловленное понижением давления (фаза разряжения) в жидкости из за воздействия отрицательной фазы звукового давления. Данный

процесс определяется разностью значений переменного звукового и постоянного статического давлений. На втором этапе происходит захлопывание образовавшейся кавитационной полости под воздействием положительной фазы звукового давления (фаза сжатия, компрессия). Третий этап состоит из процесса вторичного мгновенного расширения кавитационной полости со скоростью 250 м/с, происходящего под действием парогазовой смеси сжатой внутри полости до нескольких тысяч атмосфер. Данный процесс подобен точечному микровзрыву в результате которого, и происходит разрушение и диспергирование твердых тел. Таким образом, вторичное мгновенное расширение полости обуславливает микроударное действие кавитации, которое успешно используется в процессах ультразвукового диспергирования [57].

Сущность процесса ультразвукового диспергирования состоит в нарушении связей между частицами агломератов порошкового наполнителя. Существует три вида таких связей между частицами агломератов: действие капиллярных сил, действие сил Ван-дер-Ваальса и так называемые «мостики твердого вещества». Наибольшей величины достигают силы при наличии «мостиков твердого вещества», превышающие силы Ван-дер-Ваальса, достигающих значений от 10^{-5} до 10^{-2} Па [58,59].

На основании проведенных исследований [60], предположено, что в момент захлопывания пузырька имеет место образование мощных микропотоков типа кумулятивных струй. Появление микроструй происходит из за отклонения поверхности пузырька от сферической формы. Развитие каждого отдельно взятого кавитационного пузырька происходит не изолированно от других пузырьков, а во взаимодействии с ними на коротких расстояниях. Близость стенок пузырьков и наличие градиентов давления не исключает общей деформации формы пузырьков и их сплющивание. Вихревые движения жидкости в ультразвуковых полях провоцируют создание растягивающего напряжения, способствующего искривлению стенки пузырька, образованию углублений, впадин. На заключительном этапе захлопывания кавитационного пузырька жидкость проникает в появившиеся углуб-

ления микроструями и пронизывает пузырек высокой скоростью, равной нескольким тысячам метров в секунду.

Ударное воздействие микроструй разрушающе воздействует на частицы твердых тел, которые находятся в зоне захлопывания кавитационных пузырьков. Частицы порошка с размерами сопоставимыми с величиной поперечного сечения кумулятивных струй, устремляются струйками и могут обладать кинетической энергией, необходимой для разрушения остроугольных кромок частиц твердых тел, а в случае прямого соударения способны разрушать сами частицы, которые обладают дефектами структуры.

Ультразвуковое диспергирование успешно применяется на практике, в случае если напряжение, которое действует на поверхность частицы при захлопывании кавитационной полости, превышает величину прочности материалов подвергаемых измельчению. Отсюда следует, что процесс диспергирования в акустическом поле с учетом наличия кавитации происходит под ударным воздействием волн, которые образуются при захлопывании пузырьков и под действием микроструй жидкости, возникающих при захлопывании отличных от сферических кавитационных пузырьков. Превалирование одного из возможных механизмов при акустическом диспергировании происходит за счет масштабного фактора, т.к. это зависит от начальной формы кавитационного пузырька при захлопывании. В случаях, когда размером твердой частицы значительно меньше размера кавитационного пузырька, то отсутствуют условия для искажения формы пузырька на начальной стадии зародыша и он захлопнется с образованием ударной волны. Если же размеры твердого тела превосходят над размерами пузырька, его форма становится отличной от сферической и при захлопывании образуется микроструйка жидкости. Оптимизация параметров ультразвукового диспергирования связана с созданием условий для максимально возможной степени развития кавитации при неизменной или увеличенной скорости схлопывания кавитационных пузырьков [57].

Анализ литературных источников показал, что эффективность ультразвукового диспергирования жидких сред в первую очередь зависит от степени развитости кавитации в обрабатываемой жидкой среде, величины кавитационного облака и равномерности распределения УЗ колебаний по всему технологическому объему. Степень развитости кавитации зависит от множества факторов, основными из которых выступают физические характеристики жидкости подлежащей обработке (плотность, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения), количество и интенсивность УЗ колебаний).

Поэтому, чтобы обеспечить благоприятные условия для кавитации, необходимы всесторонние экспериментальные исследования физических свойств раствора ПКМ, предназначенного для восстановления корпусных деталей автомобильной техники.

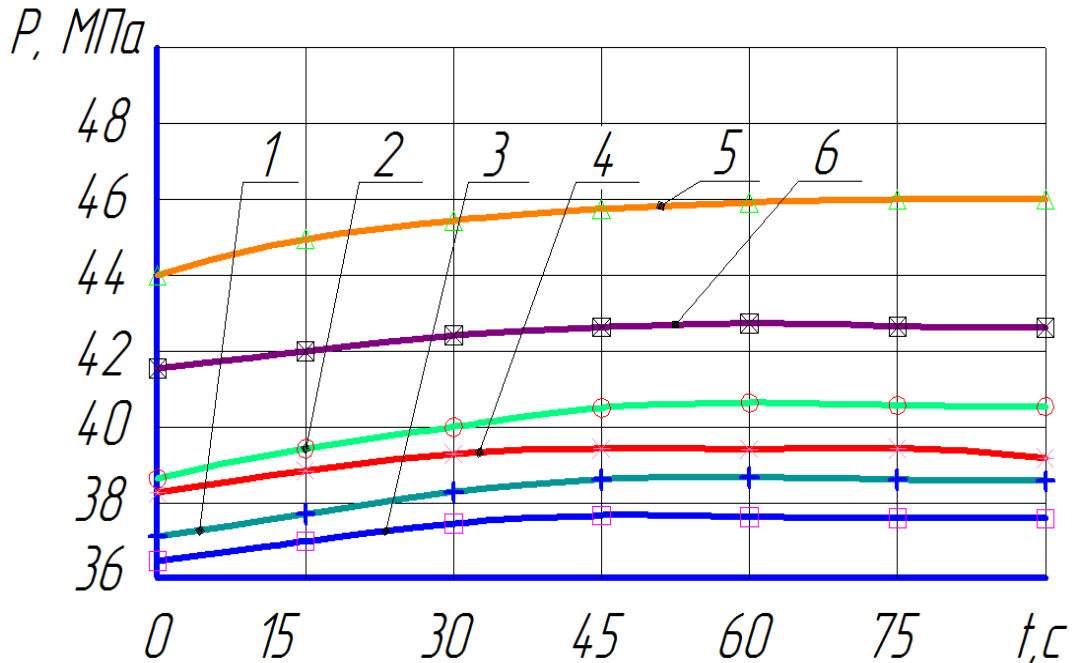
Возникновение процесса диспергирования частиц наполнителя в облучаемой жидкости, возможно при наличии звукового поля с определенной частотой и интенсивностью ультразвуковых колебаний. Интенсивность ультразвука должна превышать пороговое значение обычно составляющее несколько Вт/см² и зависящее в свою очередь от состояния поверхности твердой фазы и кавитационной прочности жидкости.

В настоящее время вопрос ультразвукового смешения полимерных композиционных материалов, предназначенных для восстановления деталей, изучен не достаточно.

В работе Кононенко А. С. после смешения вручную герметиков с нанонаполнителями композицию обрабатывали в ультразвуковом поле частотой 22 кГц в течение 15...600 с [56]. Исследованиями установлен интенсивный рост герметизирующей способности композиций в течение первых 15...45 с озвучивания (рисунок 1.4).

При воздействии ультразвука продолжительностью свыше 300 с происходит понижение герметизирующей способности у отдельных композиций. Результаты исследований по определению времени смешения нанонаполнителя Бемит с герметика-

ми в ультразвуковом поле показали, что повышение герметизирующей способности составов на основе Автогерметика, Автогермесила, Анатерм-501 и Loctite-518 происходит в течение 45 с, а Loctite-598 и Loctite-5920 – в течение 60 с.



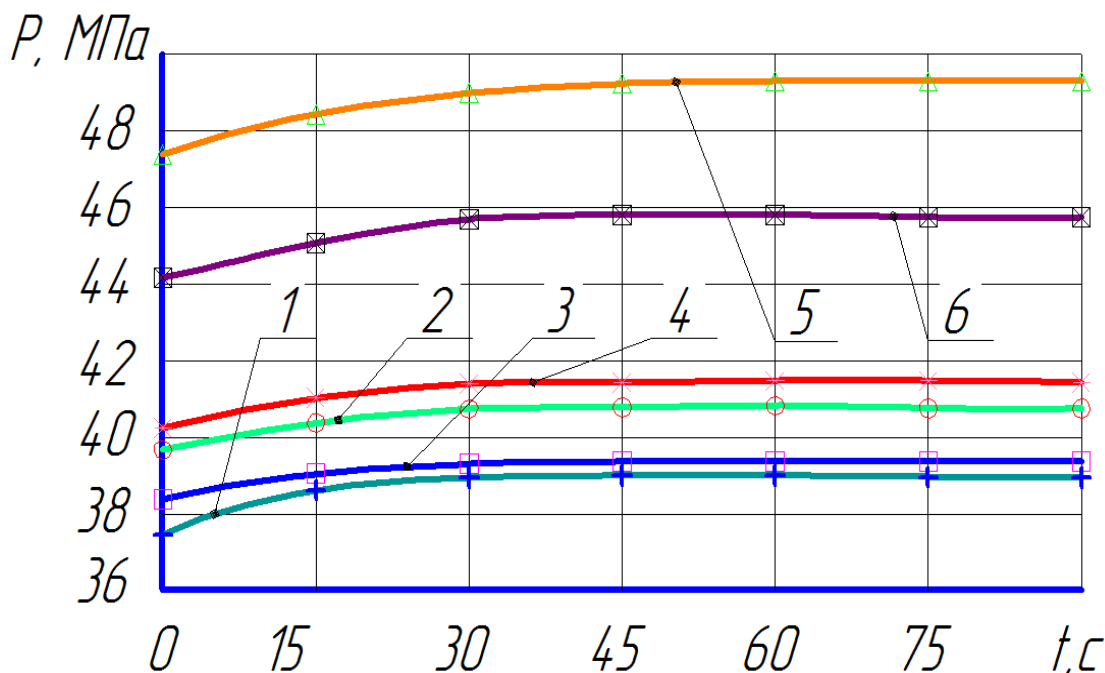
1 – Анатерм-501; 2 – Loctite-518; 3 – Автогерметик; 4 – Автогермесил;
5 – Loctite-598; 6 – Loctite-5920

Рисунок 1.4 – Зависимости герметизирующей способности P композиций с наполнителем Бемит от времени смешения t в ультразвуковом поле

У нанокomпозиций на основе анаэробных составов она увеличилась на 5,2...5,4 % и силиконовых – на 3,1...4,3 %. Рост продолжительности озвучивания до 90 с не вызывает существенного влияния на изменение герметизирующей способности составов.

Стремительное повышение герметизирующей способности композиций с наночастицами серебра происходило при их УЗО в течение 40...45 с: у композиции на основе Анатерм-501 оно достигло 4,6 %, Loctite-518 – 4,1 %, Автогерметика – 2,6 %, Автогермесила – 3,1 %, Loctite-598 – 4,3 % и Loctite-5920 – 4,1 % (рисунок 1.5). При дальнейшем ультразвуковом воздействии до 90 с герметизирующая способность нанокomпозиций изменялась не существенно.

В работе Гаджиева А. А. исследовано влияние ультразвуковой обработки на физико-механические свойства терморезистивных полимерных композиций (ЭД-16+АСТ-Т), эластифицированных герметиком 6Ф. Основным режимным параметром УЗО композиционного материала также является время УЗО. На рисунке 1.6 показаны зависимости адгезионной прочности (рисунок 1.6, а) и твердости (рисунок 1.6, б) ПКМ от времени УЗО [55].

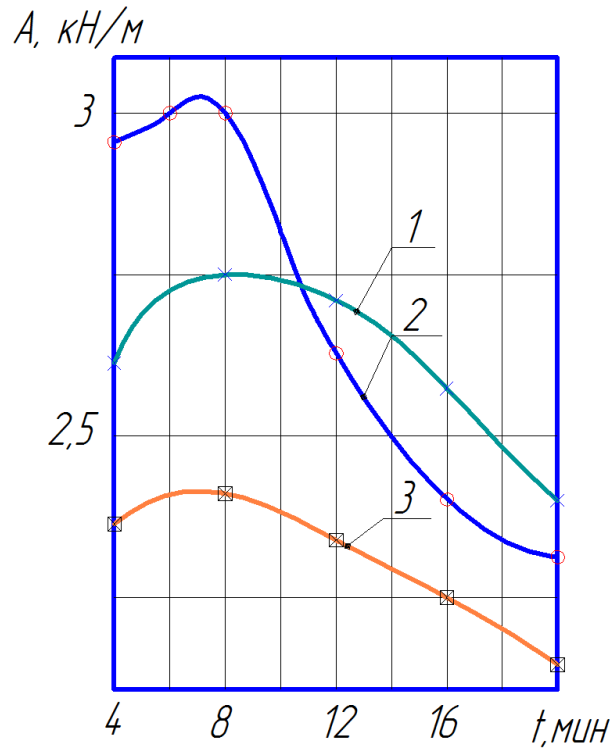


1 – Анатерм-501; 2 – Loctite-518; 3 – Автогерметик; 4 – Автогермесил;
5 – Loctite-598; 6 – Loctite-5920

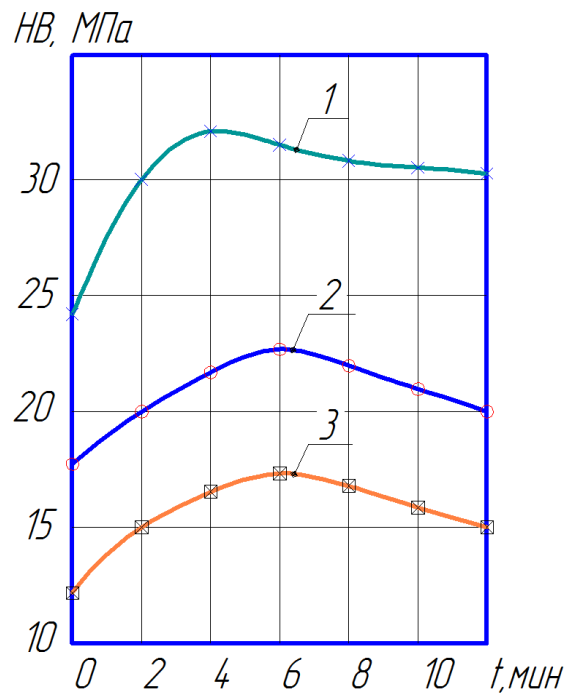
Рисунок 1.5 – Зависимости герметизирующей способности P композиций наполненных наночастицами серебра от времени смешения t в ультразвуковом поле

Зависимости физико-механических свойств полимерных покрытий от продолжительности УЗО имеют экстремальный характер. Рекомендуется обработка ПКМ при мощности ультразвука 150 Вт и продолжительности обработки – 10...20 мин.

Как следует из вышеизложенного, основным параметром УЗО в работах [53, 55, 61, 62] рассматривают время обработки ПКМ, при фиксированной интенсивности ультразвука, что явно недостаточно.



а



б

а – адгезионная прочность; б - твердость

Рисунок 1.6 – Зависимости адгезионной прочности A и твердости HB эпоксидных композиций от времени ультразвукового воздействия t

Свойства материала, параметры акустического поля, диспергирование наполнителей при УЗО не учитываются. Поэтому необходимы теоретические исследования, которые позволят обосновать режимные, технологические параметры ультразвуковой обработки, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения и дегазации растворов ПКМ.

В качестве оценочного параметра качества смешения приняты потребительские свойства ПКМ (прочность, ударная вязкость, герметизирующая способность, твердость и др.). Однако, эти свойства зависят не только от качества смешения и диспергирования, но и множества других факторов: качества подготовки подложки, условий отверждения и др. Такой поверхностный подход нельзя считать достаточным и исчерпывающим. Необходимо провести анализ и обосновать выбор оценочных параметров качества смешения и диспергирования.

Научный, а также практический интерес представляют исследования качества ультразвукового диспергирования растворов ПКМ, предназначенных для восстановления корпусных деталей.

Выводы

1) Ультразвуковая обработка ПКМ является перспективным способом совмещения компонентов с возможностью диспергирования наполнителя, однако вопрос влияния режимных параметров УЗО на качество диспергирующего смешения растворов ПКМ исследован не в полной мере и требует дальнейшего развития. Необходимы теоретические исследования, которые позволят обосновать режимные, технологические параметры ультразвуковой обработки, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения.

2) Необходимо обосновать выбор оценочных параметров качества смешения и диспергирования, исследовать зависимости оценочных параметров диспергирующего смешения раствора ПКМ, предназначенного для восстановления корпусных деталей, от режима ультразвуковой обработки материала.

1.3 Полимерные композиционные материалы и технологии для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники

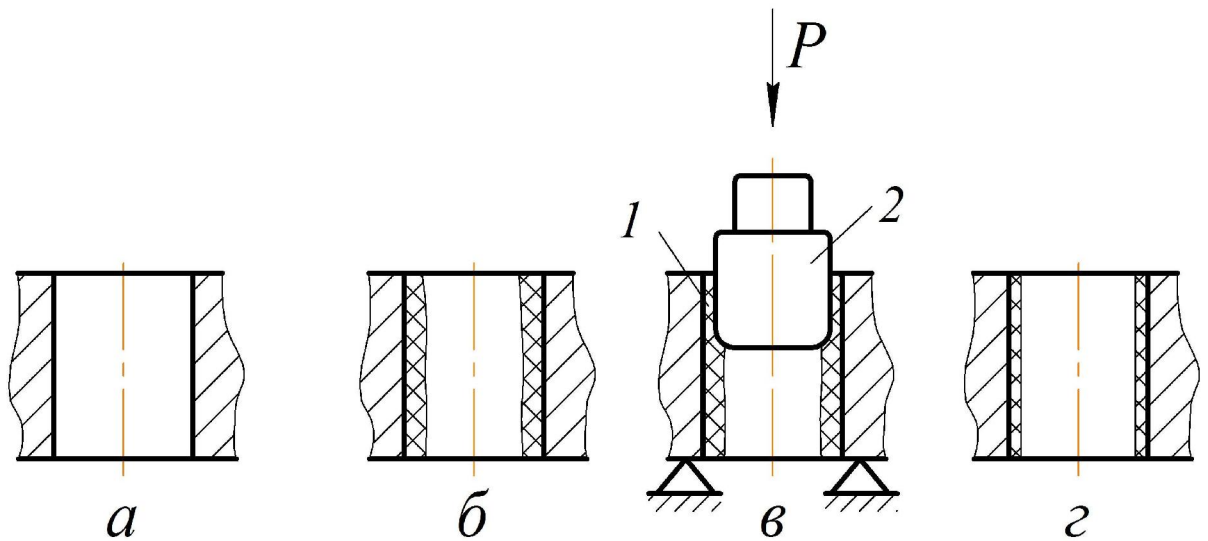
Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все более широкое применение при ремонте машин. Среди положительных свойств ПКМ необходимо отметить высокие показатели фрикционных и антифрикционных качеств, достаточную прочность, устойчивость к маслу, бензину, воде, способность сохранения формы детали, выдерживать определенную нагрузку и температуру. Кроме наличия ценных физико-механических свойств использование полимерных материалов способно снизить трудоемкость ремонта и технического обслуживания машин на 20-30% и уменьшить расход дефицитных материалов (черного и цветного металла, сварочных и наплавочных материалов, припоя и т. д.) на 40-50%. При работе с полимерными материалами отсутствует необходимость в сложном оборудовании и высокой квалификации рабочих. Использование ПКМ возможно в условиях специализированных ремонтных предприятий, в мастерских хозяйств, а также в полевых условиях [63...72].

Восстановление посадочных мест подшипников корпусных деталей автомобильной техники осуществляют ПКМ на основе эпоксидных смол, анаэробных герметиков, акриловых адгезивов и эластомеров.

Сотрудниками ГОСНИТИ разработан способ, используемый при восстановлении посадочных мест подшипников в корпусных деталях полимерным композитом на основе эпоксидной смолы ЭД-16 (рисунок 1.7, а...г).

Способ содержит операции: зачистка до металлического блеска поверхности подшипникового отверстия, обезжиривание, подготовка эпоксидного композита, нанесение композита слоем 1...1,5 мм на заранее очищенную и обезжиренную поверхность отверстия, частичное отверждение (до состояния пластичности),

калибрование в соответствии с заданными размером и формой, полное отверждение композиции, удаление наплывов, контроль качества покрытия визуально.



а – изношенное отверстие, очищенное и обезжиренное; б – нанесенный, частично отвержденный слой эпоксидной композиции; в – калибрование; 1 – эпоксидная композиция; 2 – калибр; г – покрытие эпоксидной композиции после полного отверждения

Рисунок 1.7 – Схема последовательности этапов восстановления корпусной детали калиброванием

Восстановление посадочных мест подшипников корпусных деталей размерным калиброванием эпоксидные композиции, кроме достаточной адгезии к металлу, высокой прочности и износостойкости, не должны быть склонны к стеканию с вертикальных поверхностей детали. Для этого используют в композиции разного рода наполнители. Рекомендуются следующие композиции (в масс. ч.):

- эпоксидная смола ЭД-16 – 100, железный порошок – 120, портландцемент марки 500 – 60, олигоамид Л-19 – 35;

- эпоксидная смола ЭД-16 – 100, дибутилфталат – 15, железный порошок – 160, полиэтиленполиамин – 11.

Представленными составами осуществляют восстановление посадочных мест подшипников корпусов водяных насосов, коробок переключения передач, раздаточных коробок, крышек распределительных шестерен двигателей и т.д. при износе отверстий до 0,2 мм.

Калибрование отверстий с полимерным покрытием осуществляют с использованием механических или гидравлических прессов, вертикально-расточных и сверлильных станков, а также калибров заданных размеров.

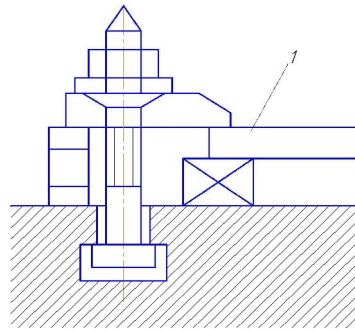
При калибровании отверстий с полимерным покрытием применяют устройство включающее базирующую деталь и калибр. Станочный стол или прессовый служат в качестве базирующей детали. Фиксацию корпусной детали производят-выполняют по известным типовым схемам на станочном столе (рисунок 1.8) [62].

Калибр закрепляют в шпинделе станка. Центрирование оси калибра по отношению к восстанавливаемому посадочному отверстию осуществляют по поверхности отверстия не подвергнутой износу. В случае, когда износ охватывает всю поверхность посадочного отверстия используется технологическая база присоединяемой детали. Монтируют крышку подшипника, закрепляя болтами в резьбовых отверстиях корпусной детали.

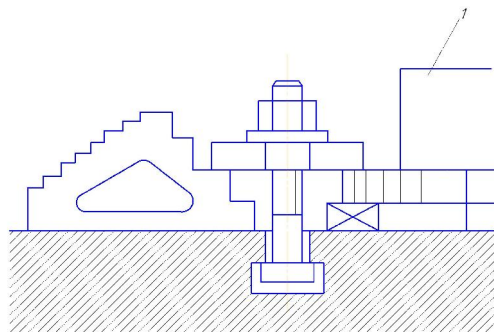
Калибр центрируют по поверхности отверстия крышки подшипника, которая не изношена. Устройство калибра показано на рисунке 1.7, в. Заходная часть калибра имеет закругленную форму. Калибр изготавливается учитывая припуски на калибрование (припуски учитывают усадку полимерного материала), которые для отдельно рассматриваемых составов эпоксидных композиций, размера отверстий подлежащих восстановлению, условий калибрования следует определять опытным путем.

Рабочие поверхности калибров подвергают хромированию, шлифованию и полированию, после чего протачивают маслосборные канавки, за исключением случаев, когда высота калибра невелика. Перед калиброванием во избежание при-

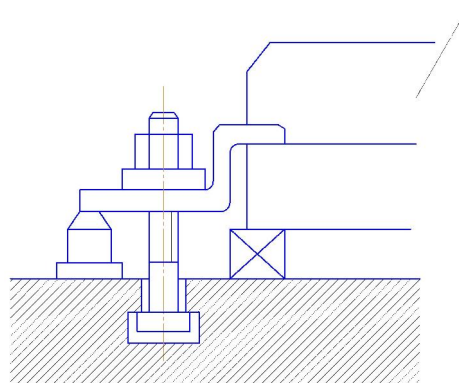
липания эпоксидной композиции рабочая поверхность калибра подлежит смазыванию тонким слоем масла АКЗ_п-6. Перемещая калибр вдоль оси отверстия, происходит устранение отклонений от правильной геометрической формы, отверстие приобретает окончательный размер с одновременным уплотнением слоя полимерного материала.



а)



б)



в)

1 – деталь

Рисунок 1.8 – Схема крепления корпусной детали на монтажном столе станка с помощью простейших приспособлений

По окончании калибрования деталь подлежащую восстановлению держат при комнатной температуре на протяжении 10 ч или при 60°C – 2 ч, при использовании полиэтиленполиамин для отверждения.

Применяя отвердитель горячего отверждения олигоамид Л-19 после калибрования деталь держат при температуре 50°C – 2 ч, затем при 100°C – 1 ч и 150°C – 1 ч.

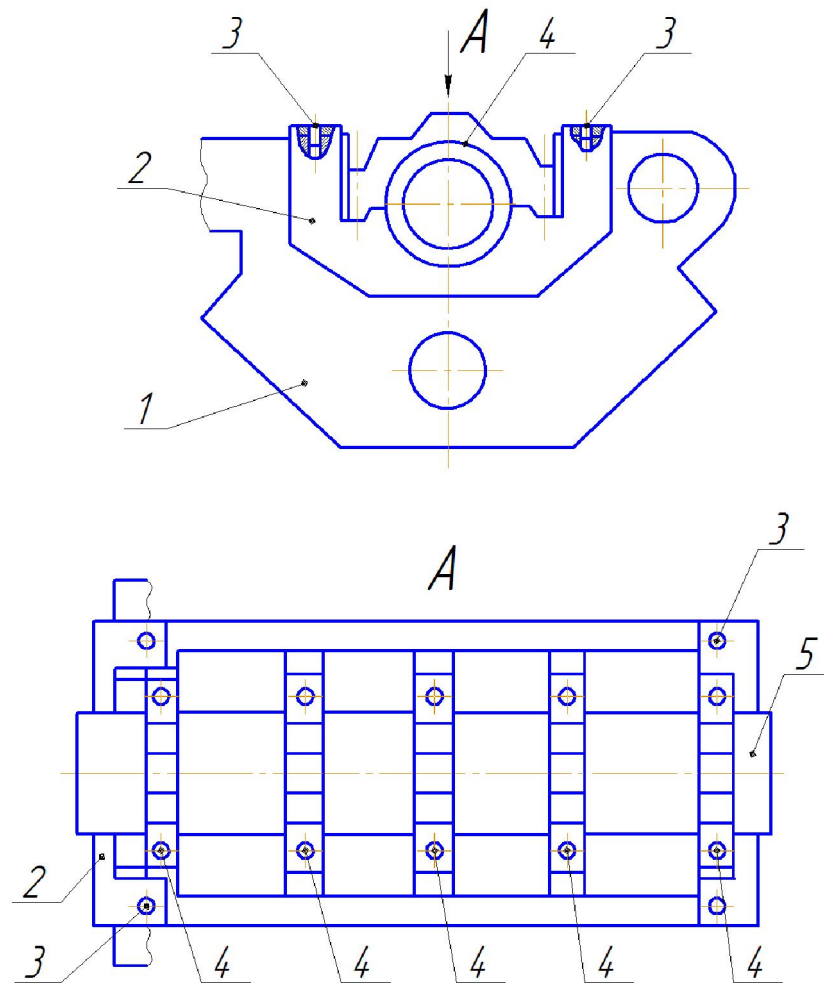
Восстанавливаемая деталь охлаждается совместно с термошкафом со скоростью 1 град/мин. После окончательного охлаждения детали измеряют диаметр восстановленного отверстия.

Способ имеет недостатки: повышенная шероховатость поверхности восстановленных отверстий, геометрическая погрешность формы отверстий, недостаточная жизнеспособность композиции. Полимерные покрытия имеют низкий ресурс из-за того, что эпоксидная смола после отверждения находится в стеклообразном состоянии. Поэтому в современной практике способ восстановления посадочных отверстий размерным калиброванием эпоксидных составов практически не применяется.

Котиним А. В. с сотрудниками разработан состав ПКМ на основе анаэробного герметика АН-6В и способ восстановления отверстий в корпусных деталях. В качестве наполнителя используют медный порошок при следующем соотношении компонентов, масс.ч.: анаэробный герметик АН-6В – 99...98,5; медный порошок – 1... 1,5. Способ реализуют при восстановлении гнезд под вкладыши коренных подшипников блоков цилиндровых двигателей (рисунок 1.9). Состав наносят на поверхности изношенных отверстий и формуют его оправкой, установленной на опоры, привязанные к заводским технологическим базам. На плоскость разъема блока 1 цилиндров устанавливают специальные опоры 2 таким образом, чтобы установочные пальцы 3 вошли в технологические отверстия блока.

Предварительно зачищенные поверхности опор под вкладыши коренных подшипников и крышки обезжиривают. Затем на постели наносят состав. После

нанесения состава, на опоры 2 устанавливают скалку 5, предварительно смазанную маслом М-8, и закрепляют крышки подшипников 4.



1 – блок цилиндров двигателя; 2 – специальные опоры; 3 – установочные пальцы;
4 – крышки подшипников; 5 – скалка [73]

Рисунок 1.9 – Схема реализации способа восстановления корпусных деталей

Полимеризацию осуществляют в течение 2 ч., после чего отворачивают болты крепления крышек, снимают их, снимают скалку 5 и опоры 2 и в заключении проводят контроль восстановленных отверстий.

Данное изобретение позволяет повысить износостойкость гнезд до 65%, в два раза повысить ресурс агрегата [73].

В работе [74] предложен состав ПКМ на основе анаэробного герметика: анаэробный герметик АН-111 – 78,08; наполнители: порошок акрилового лака

АК-506 – 21,7, порошок сплава железа с никелем наноразмерный – 0,22%. Прочность соединений восстановленных ПКМ на основе АН-111, составляет 28,2 МПа, что на 22% больше прочности клеевых соединений не наполненного герметика АН-111.

Наряду с достоинствами ПКМ имеет недостатки:

1. Наноразмерные порошки имеют высокую стоимость, точности отбора компонентов требует высокой степени точности;

2. Прочность клеевых соединений композиции, в сравнении с прочностью клеевых соединений не наполненного герметика АН-111 повышается незначительно;

3. Время отверждения клеевых соединений композиции анаэробного герметика АН-111 при введение наполнителей не сокращается.

В работе [51] разработан ПКМ на основе анаэробного герметика АН-112, который предназначен для восстановления неподвижных соединений тяжело нагруженных подшипников качения. Состав ПКМ (в %): анаэробный герметик АН-112 – 100, порошок алюминиевый ПАП-1 – 12; пудра бронзовая БПП – 0,35. Клеевые соединения, выполненные вышеупомянутым ПКМ отличаются большой прочностью, высокой скоростью полимеризации, многократным до 23 раз увеличением теплопроводности клеевого шва. Нагрев при циклическом нагружении неподвижных соединений подшипников, восстановленных ПКМ на основе АН-112, уменьшился на 12°С. Температура восстановленного подшипника 209 по сравнению со стандартным подшипником с посадкой J_s7/16 не превышала 3...5 °С.

Ресурс клеевых соединений ПКМ на основе АН-112 увеличился до 30%, в сравнении с не наполненным герметиком АН-112.

В работе Бутина А.В. предложен полимер-полимерный композиционный материал (ППКМ) на основе акрилового клея АН-105. Состав полимер-полимерной композиции: акриловый клей АН-105 – 100 масс.ч.; эластомер Ф-40 – 12 масс.ч. Ввод раствора эластомера Ф-40 в полимерную матрицу АН-105 увеличил эластичность материала. Удельная работа деформации при аксиальном

сдвиге клеевых соединений ППКМ увеличилась на 70%, по сравнению с не наполненным клеем АН-105. Модуль механических потерь ППКМ на основе адгезива АН-105 уменьшился на 54%. Понижилась виброактивность подшипниковых узлов. Амплитуда вибрации подшипникового узла восстановленного ПКМ на основе клея АН-105 уменьшилась до 9%, по сравнению с узлом восстановленным не наполненным клеем [75].

Благодаря эластомеру, существенно увеличилась выносливость и ресурс восстановленных неподвижных соединений подшипников при циклическом нагружении. Максимальная допустимая толщина клеевого шва при восстановлении неподвижных соединений клеем АН-105 составляет 0,125мм, а ППКМ на его основе – 0,15мм. Ресурс подшипника при восстановлении неподвижных соединений ППКМ на основе клея АН-105 составляет при циклическом нагружении 186,72 млн.об., что в 4,4 раза выше расчетной и на 15% выше чем у ненаполненного полимера. Стоимость ППКМ в 1,3 раза ниже цены адгезива АН-105.

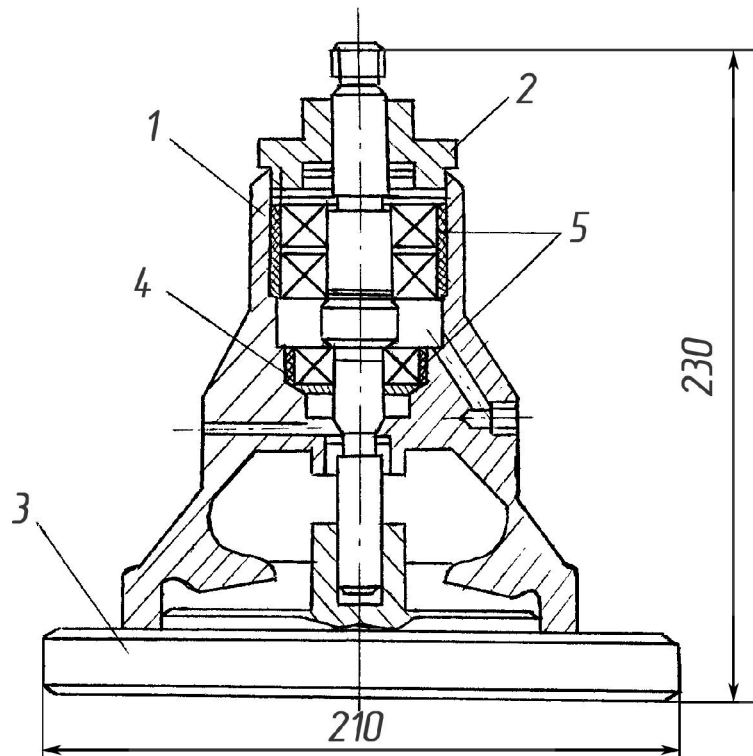
Чтобы клей равномерно распределился по зазору в сопряжении склеиваемых деталей, последние устанавливают вертикально (рисунок 1.10).

Проблема центрирования склеиваемых деталей существенно возрастает при восстановлении неподвижных соединений подшипников в корпусных деталях агрегатов трансмиссии. Сложно фиксировать вал с подшипниками и шестернями в вертикальном положении, выбирать технологические базы и др.

В работе Котина А.В. разработаны состав на основе анаэробного герметика АН-6В и способ калибрования восстанавливаемых посадочных отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях. Состав ПКМ: герметик Анатерм-6В – 100 масс.ч., тальк – 20 масс.ч., бронзовая пудра – 2 масс.ч. [73]

На рисунке 1.11 показана схема формования композиции. Разработана технология восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях, которая включает в себя следующие операции: монтаж корпусной детали 1 на технологическую базу; подготовка посадочных отверстий методом зачистки и обезжиривания их поверхностей; нанесение слоя ПКМ; формование отверстия с

полимерным покрытием 2 под заданный размер. Для этого в отверстие вводят оправку 3 с раздвижными кольцами 4, находящимися в сжатом состоянии.



1 – корпус; 2 – крышка; 3 – основание; 4,5 – адгезив [76...78]

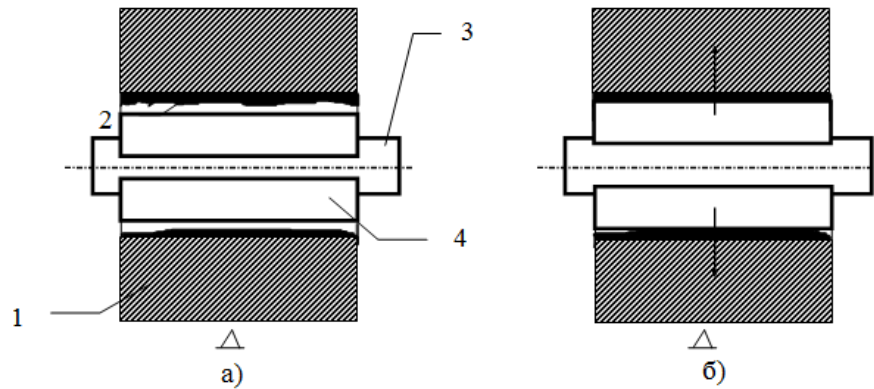
Рисунок 1.10 – Центрирующее приспособление для склеивания корпуса водяного насоса и подшипников 304, 305 с валом

Чтобы исключить прилипание ПКМ, поверхности колец обработаны алмазным выглаживанием.

Перед формованием отверстий на поверхность колец наносят тонкий слой масла АКЗп-6. После введения в отверстия кольца разжимают, при этом происходит калибрование отверстия с полимерным покрытием под заданный размер. После завершения полимеризации ПКМ кольца сжимают и оправку выводят из отверстия.

Для реализации вышеописанного способа Котиным А. В. разработано устройство для восстановления отверстий в корпусе коробки передач автомобиля

ГАЗ-53 (рисунок 1.12), которое представляет собой плиту 1 с левой 2 и правой 3 стойками закрепленными на ней.



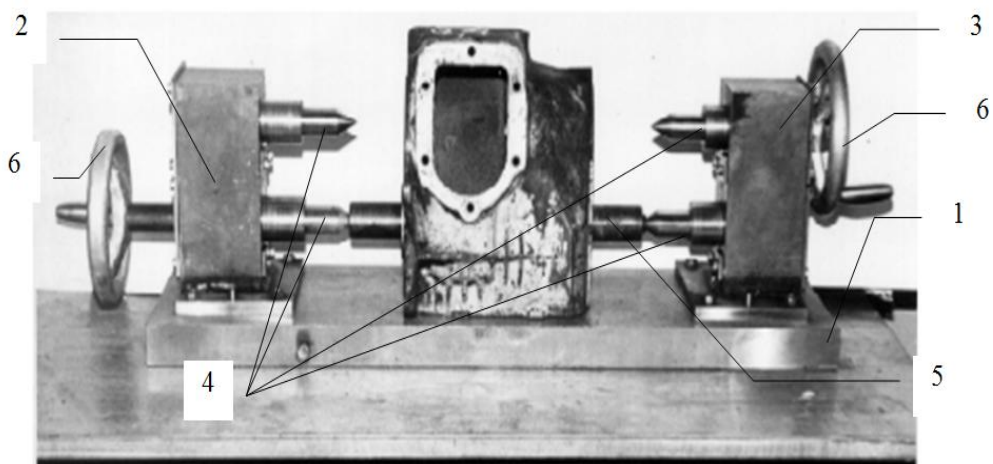
а) оправка с кольцами в сжатом состоянии; б) калибрование полимерной композиции разжимающимися кольцами; 1 – корпусная деталь; 2 – слой полимерной композиции; 3 – оправка; 4 – раздвижные полукольца

Рисунок 1.11 – Схема формирования полимерной композиции на поверхности изношенных отверстий корпусных деталей

Обе стойки имеют два центра 4, центрирующие скалки 5. Маховиками 3 центры стоек могут перемещаться в горизонтальной плоскости. Расстояние от центра до центра приспособления равно $100,625 + 0,05$ мм. Перекос и непараллельность общей оси центров на базовой длине 250 мм не превышает 0,04 мм. Завершив нанесение композиции на основе анаэробного герметика АН-6В на восстанавливаемые поверхности, вращением маховиков, рабочие части скалок медленно вводятся в отверстия. После чего их рабочие поверхности разжимаются, при этом происходит калибрование слоя полимера в необходимый размер. В завершении отверждения композиции конусы удаляют из оправок, вращением маховиков выводят скалки из восстановленных отверстий, и деталь демонтируют с приспособления.

Эксплуатационными испытаниями установлено, что средняя наработка до отказа опытной партии коробок передач составила 175980 км, что в 2,01 раза пре-

вышает аналогичный показатель безотказности у контрольной партии коробок передач, отремонтированных на АО АРЗ «Саранский» по типовой технологии (55100 км).



1 – плита; 2 – левая стойка; 3 – правая стойка; 4 – центра;
5 – нижняя скалка; 6 – маховики [73]

Рисунок 1.12 – Приспособление для восстановления отверстий корпуса коробки передач автомобиля ГАЗ-53

В работе Машина Д.В. разработан ПКМ на основе эластомера Ф-40С, наполненный дисперсными алюминиевым и бронзовым порошками. Состав ПКМ, масс.ч.: эластомера Ф-40С – 87,0; алюминиевая пудра ПАП-1 – 16,0; бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 [79]. Ввод наполнителей увеличил модуль упругости композита на 11, а адгезионные свойства на 10%, податливость опор, восстановленных композицией снизилась от 1,29 до 1,37 раз, коэффициент теплопроводности до 74 раз, в сравнении с не наполненным материалом. Компенсируемый максимально допускаемый диаметральный износ отверстий увеличился на 0,05 мм, т.е. до 0,25 мм.

На основе результатов исследований разработана технология восстановления посадочных отверстий подшипников в корпусных деталях, включающая следующие операции: подготовка посадочных отверстий очисткой; выявление износа

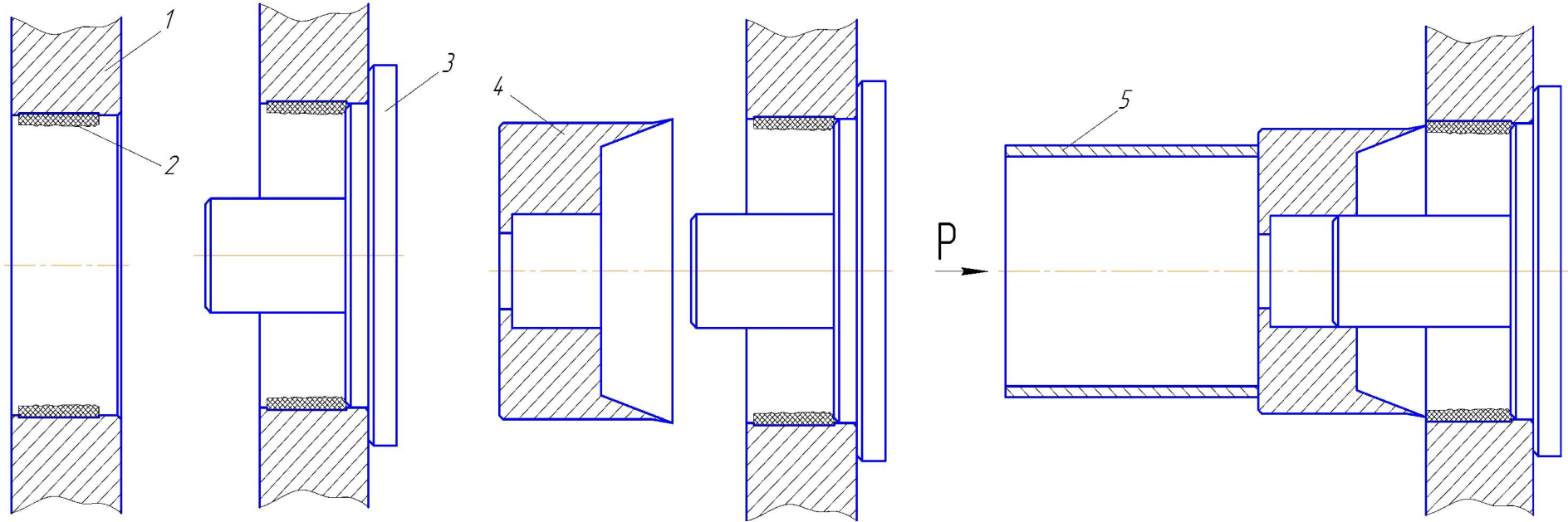
измерением посадочных отверстий; обезжиривание посадочных отверстий; подготовка композиции; нанесение полимерного композита на подготовленные посадочные отверстия подшипников; термическая обработка нанесенных полимерных покрытий; контроль качества полимерных покрытий в восстановленной детали.

Значительную роль в повышении качества восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях полимерными материалами играет вопрос обеспечения точности размеров восстановленных отверстий. Кирсановым Ф. А. предложен способ, который исключает влияние усадки полимерного материала при отверждении, на основе способа разработаны технология и технологическая оснастка, обеспечивающие повышение точности размера отверстий с полимерным покрытием.

Технология восстановления содержит операции: подготовка посадочных мест подшипников в виде очистки; измерение подлежащих восстановлению подшипниковых отверстий для выявления износа; обезжиривание посадочных отверстий; нанесение эластомера Ф-40С на посадочные места подшипников; термическая обработка полимерных покрытий после нанесения; калибрование покрытия эластомера Ф-40С под заданный размер и форму; контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали.

Калибрование выполняют следующим образом. До упора в торец вставляют в отверстие корпусной детали базирующую деталь. При этом ступень среднего диаметра базирующей детали базируется по не изношенной поверхности отверстия сопрягаемой детали (рисунок 1.13). В случае износа всей поверхности посадочного отверстия, используется технологическая база присоединяемой детали [61].

Монтируют крышку подшипника, закрепляя болтами в резьбовых отверстиях корпусной детали. В отверстие крышки подшипника вставляют базирующую деталь, при этом ступень среднего диаметра базирующей детали базируется по не изношенной поверхности отверстия (рисунок 1.14).



а)

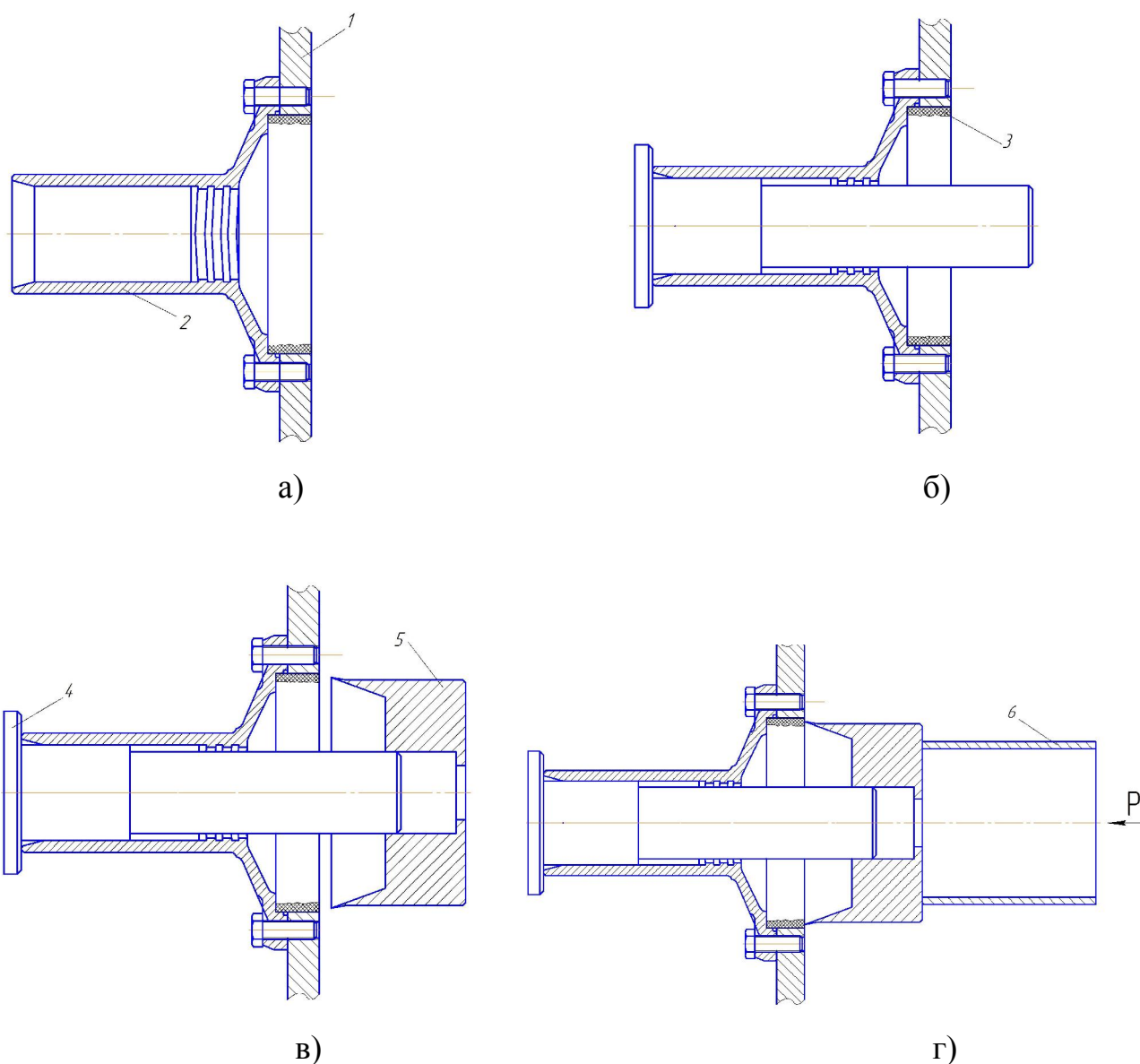
б)

в)

г)

а – изношенное отверстие с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирующей детали в отверстие корпусной детали; в – установка калибра на хвостовик базирующей детали; г) калибрование; 1 – корпусная деталь; 2 – полимерное покрытие; 3 – базирующая деталь; 4 – калибр; 5 – монтажная труба

Рисунок 1.13 – Схема последовательности этапов калибрования отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали (подшипниковый щит, корпус водяного насоса двигателя)



а – изношенные отверстия в корпусной детали и в крышке подшипника с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирующей детали в не изношенное отверстие сопрягаемой детали; в – установка калибра на хвостовик базирующей детали; г) калибрование; 1 – корпусная деталь; 2 – крышка подшипника 3 – полимерное покрытие; 4 – базирующая деталь; 5 – калибр; 5 – монтажная труба

Рисунок 1.14 – Схема последовательности этапов калибрования отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали (корпус коробки передач, корпус раздаточной коробки автомобиля или трактора)

Поворачивают корпусную деталь таким образом, придавая базирующей детали вертикальное положение. После чего с противоположной стороны отверстия надевают калибр на хвостовик базирующей детали, на который устанавливают торцом монтажную трубу и легкими ударами молотка перемещают калибр вдоль отверстия с полимерным покрытием пока в торцевую стенку калибра не упрется торец хвостовика.

Перемещаясь, калибр режущей кромкой срезает лишний слой полимерного материала и таким образом выдерживается требуемый размер и форма отверстия с полимерным покрытием.

Автором предложены геометрические параметры калибра-резца принятые за оптимальные: передний угол $\gamma = 70^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$, позволяющие добиться высокого качества и точности покрытия: площадь разрушенного покрытия эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом не превышает 4,2 % а отклонение от круглости находится в пределах 3 мкм.

Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники ПКМ на основе эластомера Ф-40 и Ф-40С отличается большей экономической эффективностью, т.е. меньшими затратами по сравнению с ПКМ на основе анаэробных герметиков или акриловых адгезивов. При сопоставимой цене наполнителей, цена анаэробных герметиков и акриловых адгезивов составляет от 18000 до 22000 руб/кг, в то время как эластомер Ф-40 – 410 руб/кг. Технологическая оснастка, применяемая для калибрования покрытий из ПКМ на основе эластомера Ф-40 (рисунки 1.13. и 1.14), конструктивно значительно проще, чем оснастка на рисунке 1.12 и, следовательно, ее цена меньше. Поэтому для исследования влияния УЗО на качество полимерных покрытий выбрали раствор ПКМ на основе эластомера Ф-40 .

Одним из дефектов снижающих качество покрытий из раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 является пористость. Причиной пористости является испарение паров ацетона при полимеризации эластомера Ф-40.

При УЗО жидких металлов имеет место дегазация. На рисунке 1.15 показана дегазация водорода в расплаве алюминия при УЗО [80]. Как видно из рисунка 1.15, при исходном содержании водорода в расплавах алюминия 0,3 и 0,6 см³/100 г скорость дегазации в последнем больше, однако через 6 мин УЗО концентрация водорода стабилизируется в обоих случаях на уровне 0,12 см³/100 г.

Вопрос влияния УЗО на дегазацию раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 не изучен и требует всестороннего исследования. Дегазация раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 в ходе УЗО должна уменьшить пористость и повысить качество покрытий, нанесенных из этого материала.

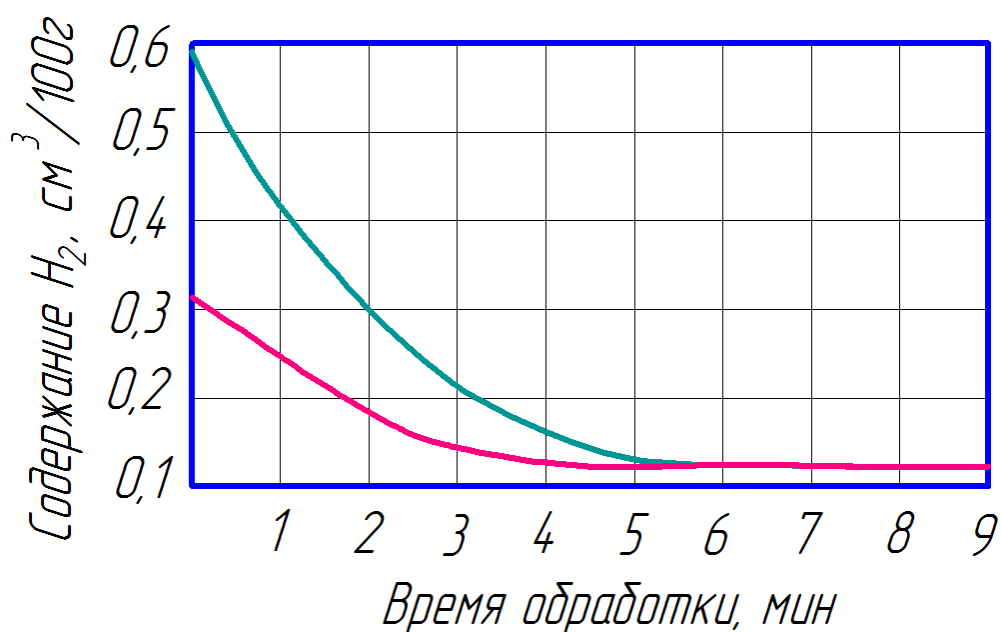


Рисунок 1.15 – Зависимость содержания водорода в расплаве алюминия от времени ультразвуковой обработки [80]

После УЗО обработки материала существенно меняются его физические свойства, поэтому необходимо скорректировать режим термической обработки покрытий из раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40.

Представляют научный и практический интерес исследования, направленные на дальнейшее повышение эффективности технологии восстановления поса-

дочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники ПКМ на основе эластомера Ф-40 за счет УЗО материала.

Выводы

1 Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники ПКМ на основе эластомеров отличается большей эффективностью по сравнению с ПКМ на основе анаэробных герметиков или акриловых адгезивов. Поэтому для исследования влияния УЗО на качество полимерных покрытий выбрали раствор ПКМ на основе эластомера Ф-40 .

2 Представляют научный и практический интерес исследования влияния УЗО на дегазацию раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40, режим термической обработки и деформационно-прочностные свойства покрытий из раствора ПКМ.

3 Необходимо с учетом УЗО скорректировать технологию восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники ПКМ на основе эластомера Ф-40.

1.4 Выводы. Цель и задачи исследований

Разработка новых полимерных композитов является перспективным направлением в повышении эффективности восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники. Использование наполнителей в составе полимера позволяет добиться целенаправленного изменения потребительских свойств материала и, как правило, снижения его стоимости. Создание материалов с новым комплексом свойств является основной тенденцией на пути разработки новых технологических процессов восстановления корпусных деталей автомобильной техники, способствующих дальнейшему повышению долговечности подшипниковых узлов и снижению затрат на ремонт.

Практический интерес представляют исследования ПКМ наполненных дисперсными металлическими порошками, что объясняется улучшением ряда потребительских свойств материала (механических, теплофизических и др.)

Введение частиц может улучшить эти характеристики, однако необходимо хорошее диспергирование частиц наполнителей в полимере. В связи с этим актуальной проблемой является исследование путей получения ПКМ с высокой однородностью распределения частиц наполнителя в полимерной матрице. Повышение качества смешения компонентов является перспективным направлением улучшения ПКМ.

Равномерность распределения и соответственно физико-механические свойства ПКМ в значительной мере зависят от способа смешения компонентов композиции. Различают механическое смешение (ручное или с помощью мешалок различных конструкций) и ультразвуковое. Метод механического смешения ПКМ отличается простотой, не требует сложного технологического оборудования, однако имеет недостатки: низкая эффективность диспергирования, удовлетворительный результат по распределению частиц в композиции, длительность операций, загрязнение обрабатываемого материала примесями от мелющих тел аппаратов, шаров и др.

Ультразвуковое смешение выгодно отличается более высокой эффективностью диспергирования агломератов частиц, обеспечивает высокое качество распределения частиц по объему полимерной матрицы, улучшенные физико-механические свойства ПКМ, способствует ускорению технологического процесса. Поэтому представляют научный и практический интерес исследования УЗО ПКМ, предназначенных для восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автомобильной техники.

Диспергирование частиц наполнителя в облучаемой жидкости, возможно при наличии ультразвукового поля с определенной частотой и интенсивностью ультразвуковых колебаний. Интенсивность ультразвука зависит от кавитационной прочности жидкости и состояния поверхности твердой фазы.

В настоящее время вопрос ультразвукового смешения полимерных композиционных материалов, предназначенных для восстановления деталей, изучен не достаточно. Свойства материала, параметры акустического поля, дисперги-

рование наполнителей при УЗО не учитываются. Поэтому необходимы теоретические исследования, которые позволят обосновать режимные, технологические параметры ультразвуковой обработки, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения компонентов в растворе ПКМ.

В качестве оценочного параметра качества смешения приняты потребительские свойства ПКМ (прочность, ударная вязкость, герметизирующая способность, твердость и др.). Однако, эти свойства зависят не только от качества смешения и диспергирования, но и множества других факторов: качества подготовки подложки, условий отверждения и др. Такой поверхностный подход нельзя считать достаточным и исчерпывающим. Необходимо провести анализ и обосновать выбор оценочных параметров качества смешения и диспергирования, исследовать зависимости оценочных параметров диспергирующего смешения раствора ПКМ, предназначенного для восстановления корпусных деталей, от режима ультразвуковой обработки материала.

Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники ПКМ на основе эластомера Ф-40 и Ф-40С отличается большей экономической эффективностью, т.е. меньшими затратами по сравнению с ПКМ на основе анаэробных герметиков или акриловых адгезивов. Поэтому для исследования влияния УЗО на качество полимерных покрытий выбрали раствор ПКМ на основе эластомера Ф-40.

Одним из дефектов снижающих качество покрытий из раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 является пористость. Причиной пористости является испарение паров ацетона при полимеризации эластомера Ф-40. Вопрос влияния УЗО на дегазацию раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 не изучен и требует всестороннего исследования. Дегазация раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 в ходе УЗО уменьшит пористость и повысит качество покрытий, нанесенных из этого материала.

После УЗО обработки материала существенно меняются его физические

свойства, поэтому необходимо скорректировать режим термической обработки покрытий из раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 .

Представляют научный и практический интерес исследования влияния УЗО на дегазацию раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40, режим термической обработки и деформационно-прочностные свойства покрытий из раствора ПКМ.

Необходимо с учетом УЗО скорректировать технологию восстановления посадочных мест подшипников в корпусных деталях автомобильной техники ПКМ на основе эластомера Ф-40.

Данная работа преследует цель повышения 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.

По результатам 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 композита на основе эластомера Ф-40;
- исследовать качество смешения, зависимости оценочных параметров диспергирующего смешения раствора композита на основе эластомера Ф-40 от режима ультразвуковой обработки материала;
- исследовать дегазацию раствора композита на основе эластомера Ф-40 при механическом и ультразвуковом диспергировании;
- исследовать деформационно-прочностные и адгезионные свойства композита на основе эластомера Ф-40 и оптимизировать режим его термической обработки;
- исследовать дефектность полимерных покрытий композита на основе эластомера Ф-40 после механического и ультразвукового диспергирования;

- исследовать долговечность посадок «корпус-подшипник», выполненных композитом на основе эластомера Ф-40;
- разработать технологию восстановления посадочных отверстий корпусных деталей композитом на основе эластомера Ф-40, включающую УЗО и оценить ее технико-экономическую эффективность.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО СМЕШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ПКМ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

2.1 Обоснование выбора параметра оценки качества смешения компонентов ПКМ

Многообразие исходных компонентов, их агрегатного состояния, конструкций аппаратов для смешения, назначение смеси при получении ПКМ позволяет сделать принципиальный вывод об относительности понятия качества смешения [81]. Чаще всего под процессом смешения понимается получение из исходной неоднородной смеси однородной, которая характеризуется статистически случайным распределением компонентов в объеме.

Используемые методы количественного описания процесса смешения основаны на статистическом анализе, на сравнении генеральной дисперсии с фактическим значением среднеквадратичного отклонения концентраций диспергируемого вещества. На рисунке 2.1 показана картина перехода от абсолютно несмешанной исходной системы (а) к статистически случайному распределению частиц диспергируемого компонента (черные точки) в объеме (б, в, г) дисперсной среды (белое поле). При идеальном статистическом смешении распределение $P(x)$ доли диспергируемого компонента (x) вещества в отбираемых пробах подчиняется биномиальному закону [82, 83]

$$P(x) = \frac{N!}{b!(N-b)!} q^b (1-q)^{N-b}, \quad (2.1)$$

где N – суммарное число частиц двух фаз в пробе; b – число частиц диспергируемой фазы в пробе; q – относительное содержание диспергируемой фазы.

Биномиальное распределение характеризуется определенным разбросом (среднеквадратичное отклонение содержания диспергируемого компонента в пробах) или генеральной дисперсией (σ^2).

В этом случае генеральная (теоретическая) дисперсия распределения определяется по формуле [83]

$$\sigma^2 = q(1-q) / N \quad (2.2)$$

За критерий качества смешения для реальных смесей принимают значение дисперсии (s^2), которое рассчитывают по концентрации диспергируемого компонента (c_i), в отбираемых в процессе смешения пробах (не менее 10...25 проб) [82]

$$s^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M c_i^2 - \frac{1}{M(M-1)} \left\{ \sum_{i=1}^M c_i \right\}^2 \quad (2.3)$$

где M – число проб.

По сравнению с размером частиц размер пробы должен быть большим, но небольшим по отношению к объему смеси. Рекомендуют минимальный размер пробы определять как [81]

$$N_{\text{мин}} = 9 / q(1-q) \quad (2.4)$$

Определение качества смешения сводится к сравнению s^2 и σ^2 с использованием критериев Фишера, Стьюдента, Пирсона.

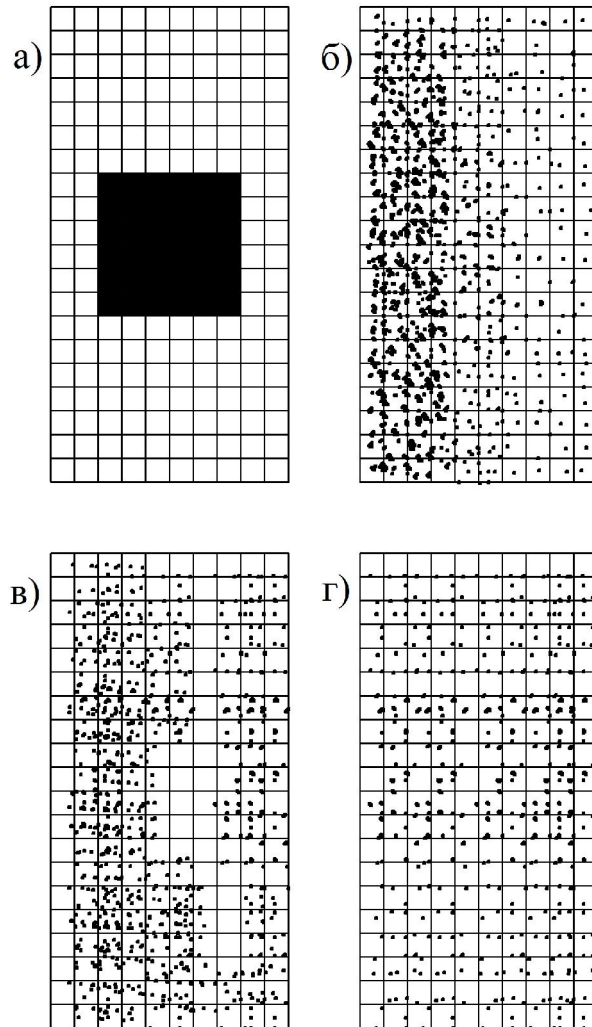
Идеального смешения на практике достичь практически невозможно, по-

этому широко используются оценка качества по критериям смешения (I_1 или I_2)

$$I_1 = \sigma^2 / s^2 \text{ или } I_2 = (\sigma_0^2 - s^2) / (\sigma_0^2 - \sigma^2),$$

где σ_0^2 – дисперсия исходной системы, $\sigma_0^2 = q(1-q)$

Величина I изменяется в интервале от 0 (несмешанная система) до 1 (система идеально смешанная).



черная клетка – размер диспергируемого вещества;

белая клетка – размер пробы

Рисунок 2.1 – Упорядоченное (а, б, в) и случайное (г)

распределение частиц в смеси

Широкое распространение для оценки качества смешения получил коэффициент неоднородности (вариации) смеси – K_c , определяемый экспериментально и рассчитываемый как [81]

$$K_c = \frac{100}{C_0} \sqrt{\frac{\sum(C_i - C_0)M_i}{M - 1}}, \quad (2.5)$$

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

При смешении значение выбранного критерия качества изменяется и достигает своего предела, что характеризует достижение предельного уровня качества данной смеси на данном оборудовании при заданных технологических параметрах смешения.

Хорошее качество смешения, достигается при определенном минимальном значении деформации сдвига (γ_{\min}) при ламинарном смешении систем жидкость – твердый компонент, жидкость – жидкость, которая для промышленного смесительного оборудования составляет 800...3000 рад. Так при смешении в смесителях Бенбери $\gamma_{\min} = 800...300$ рад, в экструдерах – 1000...2100 рад, на вальцах и каландрах – 2100...2600 рад [81].

Смешение высоковязких жидкостей (расплавы полимеров) осуществляется за счет сдвиговых деформаций в рабочих органах машин, в результате чего происходит процесс деформирования компонентов смеси. Данный процесс сопровождается вытягиванием диспергируемого компонента в полосы уменьшающейся толщины, увеличением поверхности раздела фаз и статистически случайным распределением исходных компонентов в смеси. Одним из удобных методов оценки

качества смешения таких смесей является определение средней ширины полос.

Реальное смешение расплавов полимеров с плотностью около 10^3 кг/м³ и вязкостью в пределах $10^2 \dots 10^6$ Па·с происходит в ламинарном режиме течения при значениях критерия Рейнольдса менее 2320 [81].

Воздействие сдвига при перемешивании сводится к вытягиванию диспергируемого компонента (жидкого или твердого) в полосы с уменьшающейся толщиной. Среднее расстояние между слоями одного и того же компонента в системе свидетельствует о степени сдвиговых воздействий. Вытягивание и утончение полосы диспергируемого компонента удобнее рассматривать в зазоре между параллельными пластинами (рисунок 2.2). В этом случае деформация сдвига равна $\gamma = L/H$ или $\gamma = ctg \varphi$. С деформацией сдвига средняя ширина полос (r) связана соотношением

$$r = (r_0 / \gamma q)(\eta_1 / \eta_2) \quad (2.6)$$

где r_0 – начальная ширина полос; q – объемное содержание диспергируемой фазы; η_1 и η_2 – вязкость дисперсионной и дисперсной среды.

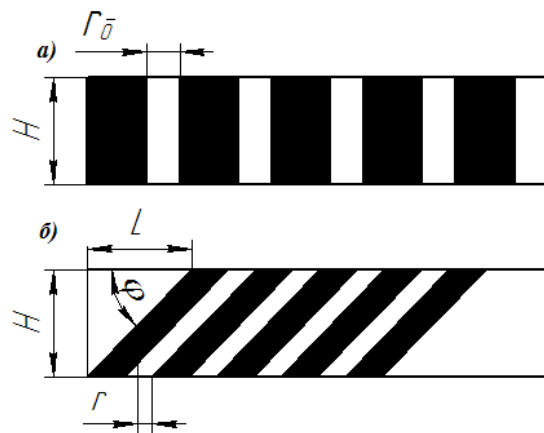
С уменьшением толщины полосы качество смешения повышается. Средняя толщина полос с увеличением времени смешения уменьшается и установлена ее связь с объемом смеси (V) и поверхностью раздела фаз (S) [81]

$$r = 2V / S \quad (2.7)$$

Рассчитать минимальное значение деформации сдвига ($\gamma_{\text{мин}}$) с учетом вязкости исходных компонентов можно задав критерий смешения (I) [81]

$$\gamma_{\min} = \frac{2,1\eta_2}{q\eta_1} \sqrt[3]{I / q(1-q)} \quad (2.8)$$

Зависимость (2.8) свидетельствует о возрастании оптимального значения деформации сдвига при введении малых количеств дисперсной фазы от доли до нескольких процентов. Таким образом, достижение хорошего качества смешения требует большего времени, что экономически невыгодно.



а – исходное состояние; б – после деформирования

Рисунок 2.2 – Влияние деформации сдвига на ширину полос

Для достижения высокой равномерности распределения малых количеств компонента в смеси используют стадию предварительного получения концентрата, содержащего до 30% дисперсной фазы с последующим его введением в основной компонент.

Деформация сдвига оказывает влияние на статистические критерии качества смешения, а также свойства дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов.

Время смешения, достижения деформации сдвига с минимальным значением определяется конструкцией смесителя, параметрами смешения, свойствами

исходных компонентов и их взаимодействием на границе раздела фаз [81].

Для оценки качества смешения также используют микроскопический метод. Для проведения подобного анализа в смесь вводят красящие вещества или подвергают окрашиванию один из компонентов смеси, что и вещества подлежащие смешению, но отличающиеся окраской. В результате микроскопического анализа определяют: содержание окрашенного компонента, его распределение в объеме основного компонента, форму и размер частиц компонентов. Результаты микроскопического анализа обрабатывают по методу Таггарта. Для этого подсчитывают общее число частиц наполнителя и определяют коэффициент однородности K_0 по формуле Грина [83]

$$K_0 = \Delta d \sqrt{\frac{\sum N_i}{\sum N_i A^2}}, \quad (2.9)$$

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 .

Значение величины B находят по формуле

$$B = \frac{\sum N_i d_i}{\sum N_i} \quad (2.10)$$

Если $K_0 \geq 0,35 - 0,40$, то качество смешения считают удовлетворительным.

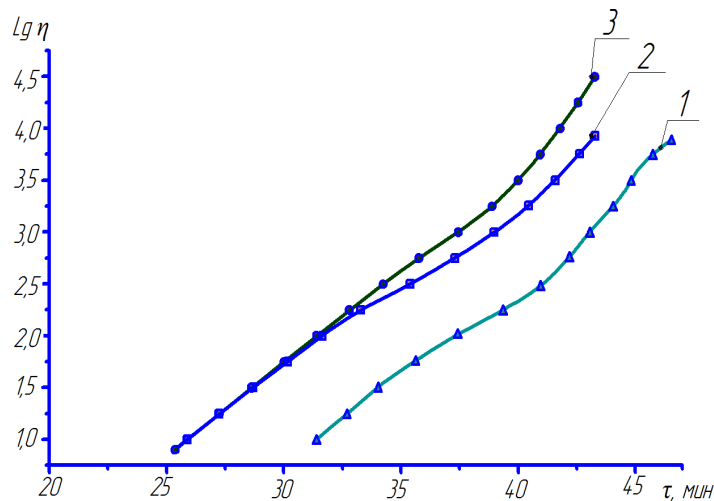
Среди других методов оценки качества смешения используют: химический метод количественного анализа (весовой или объемный); электрохимический метод; метод основанный на измерении электропроводности; спектральный анализ

(рентгеноскопия или инфракрасная спектроскопия).

Используя статистические критерии, необходимо уделять особое внимание определению числа частиц в пробе N , так как эта величина сильно влияет на генеральную дисперсию.

Рассмотренные выше методы оценки качества смешения требуют большого количества материала и образцов, отличаются сложностью и значительной трудоемкостью, не отражают распределение частиц в матрице на момент диспергирования.

В работах Тренисовой А. Л. и Ахматовой О. В. смешение компонентов ПКМ на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, наполненного глиной Cloisite 30В, осуществляли различными способами (ручное смешение, высокоскоростное механическое смешение, смешение в ультразвуковом поле). При этом равномерность распределения наполнителя в полимерной матрице оценивали по вязкости ПКМ (рисунок 2.3).



1 – ненаполненный; 2 – механическое смешение; 3 – ультразвук

Рисунок 2.3 – Зависимость вязкости $\lg \eta$ от времени отверждения для систем ЭД-20+ДАДФС и ЭД-20+ДАДФС, содержащей 5 масс.ч. наполнителя (наноалмазов)

При ультразвуковой обработке происходит изменение структуры наполни-

теля, разрушаются агрегаты частиц глины, при этом происходит уменьшение их размеров, при этом их число возрастает и соответственно растет удельная поверхность, что способствует более высокой степени взаимодействия олигомера и частиц. Это способствует возникновению больших значений вязкости смесей, приготовленных с ультразвуковой обработкой, и к резкому и существенному повышению вязкости [53]. Чем выше вязкость, тем более равномерно распределен наполнитель в объеме полимерной матрицы.

В отличие от способов, рассмотренных выше, вискозиметрический способ отличается простотой, достаточно точно отражает распределение частиц в полимерной матрице на момент оценки качества смешения.

Проанализировав вышеизложенные методы, в настоящей работе для оценки качества смешения компонентов полимерного композиционного материала на основе эластомера Ф-40 выбрали для использования вискозиметрический метод.

Вывод

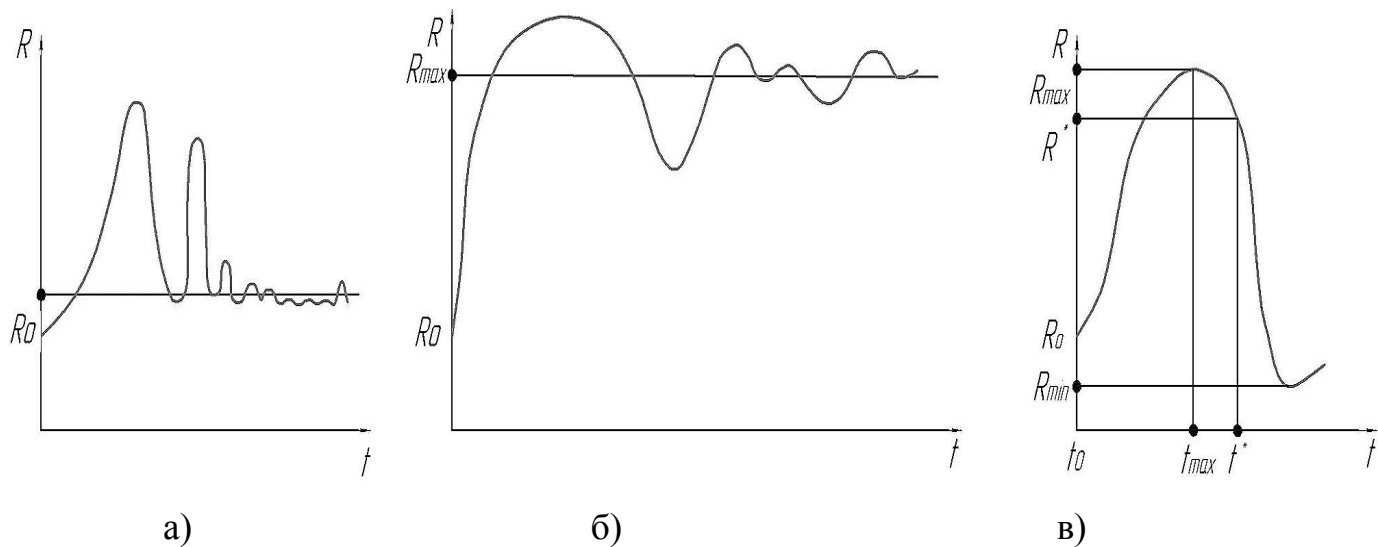
Оценку качества смешения частиц наполнителя с раствором полимерного материала при УЗО предлагается проводить по вязкости. Вискозиметрический способ отличается простотой, достаточно точно отражает распределение частиц в полимерной матрице на момент оценки качества смешения. Чем более равномерное распределение частиц в объеме полимерной матрицы, тем выше вязкость раствора.

2.2 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. Начальный размер полостей первой группы R_0 меньше критического R_k [84]. Они пульсируют, не значительно меняя свой первоначальный размер, в течение значительного количества периодов колебаний (рисунок 2.4, а). Пульси-

рующиеся полости возникают при условии, когда амплитуда звукового давления P_A значительно меньше гидростатического давления P_0 .

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 2.4, б). Пульсирующие полости второй группы возникают при амплитуде звукового давления P_A значительно превышающей гидростатическое давление P_0 .



а – $P_A \ll P_0$; б – $P_A \gg P_0$; в – $P_A \geq P_0$ [60]

Рисунок 2.4 – Характерные пульсации полостей, формирующихся в акустическом поле

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 намного превышающий амплитуду давления, создаваемого внешним источником колебаний. Полости третьей группы имеют место при амплитуде звукового давления P_A равной или не значительно превышающей гидростатическое давление P_0

(рисунок 2.4, в). При захлопывании полостей в микрообъемах возникают высокие давления до 100 МПа, а температура повышается до 1000°С. 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. [60]

$$\chi = \frac{R_{\max}^3}{R_{\min}^3 \Delta t_{\min} f}, \quad (2.11)$$

где R_{\max} и R_{\min} – средний максимальный и минимальный радиусы кавитационной полости; Δt_{\min} – продолжительность фазы захлопывания; f – частота колебаний.

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

$$\chi = \frac{8,14(P_A - P_0)^5 (0,2P_A + P_0)^7}{P_A^3 P_{\Pi}^3} \quad (2.12)$$

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

Как следует из формулы (2.12), значение критерия χ для ПКМ определяется значениями гидростатического P_0 и звукового P_A давлений. Давление насыщенного пара жидкости P_{Π} можно считать постоянной величиной для рассматриваемого раствора полимера. Рассмотрим влияние переменных факторов P_0 и P_A на критерий χ .

С увеличением гидростатического давления P_0 при фиксированном звуковом давлении P_A критерий эрозионной активности χ имеет экстремум в виде максимума [60]. При повышении звукового давления P_A экстремумы критерия эрозионной активности χ увеличиваются, смещаясь вправо по оси абцисс.

Если взять в качестве переменной гидростатическое давление P_0 , то при $P_A = 2P_0$ вторая производная функции $d^2\chi/dP_0^2 < 0$, т. е. функция χ имеет максимум при $P_A = 2P_0$.

Условие максимума критерия эрозионной активности χ при переменном гидростатическом давлении P_0 имеет вид

$$\chi = \chi_{\max}, \text{ при } P_A = 2P_0 \quad (2.13)$$

В техническом плане проще варьировать амплитудой звукового давления, чем гидростатическим давлением. Поэтому более подробно рассмотрим влияние звукового давления на процесс кавитации.

Если принять гидростатическое давление P_0 постоянным, то из формулы (2.12) 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 парогазового пузырька в звуковом поле Агранатом Б. А. определены условия при которых кавитационный 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

$$1,25P_0 < P_A < 10P_0 \quad (2.14)$$

С учетом условий (2.13) и (2.14) диапазон амплитуды звукового давления, в котором обеспечивается эффективное диспергирование раствора ПКМ, находится в пределах

$$2,0P_0 \leq P_A < 10P_0 \quad (2.15)$$

Амплитуду звукового давления можно рассчитать по формуле

$$P_A = \rho C \omega A, \quad (2.16)$$

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

Скорость распространения звуковых волн в жидкости можно рассчитать по формуле [85]

$$C = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad} \cdot \rho}}, \quad (2.17)$$

где β_{ad} – коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

Амплитуду смещения определяют по формуле

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho \cdot C}} \quad (2.18)$$

где I – интенсивность УЗО [86].

Преобразуем формулу (2.16) подставив в нее формулы (2.17) и (2.18)

$$P_A = \rho \sqrt{\frac{1}{\beta_{ад} \cdot \rho}} \cdot \omega \cdot \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{\beta_{ад}}} \cdot \sqrt{\frac{2I}{C}} = \sqrt{\frac{2W}{S_t}} \sqrt{\frac{\rho}{\beta_{ад}}}, \quad (2.19)$$

где W – мощность УЗО; S_t – площадь поверхности преобразователя.

Из формулы (2.19) 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, то звуковое давление зависит 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 эффективное диспергирование наполнителей в растворе полимера [87].

Так как уровень раствора ПКМ в ванне УЗО не значителен, гидростатическое давление P_0 приравняем к атмосферному $P_{атм}$. Тогда условие (2.15) примет вид

$$2,0P_{атм} \leq P_A < 10P_{атм} \quad (2.20)$$

или

$$2,0 \times 10^5 \text{ Па} \leq P_A < 10^6 \text{ Па} \quad (2.21)$$

На эффективность ультразвукового диспергирования влияет распространение волны в пространстве от источника звука. Выделяют две зоны звукового поля преобразователя: ближнюю и дальнюю зону (рисунок 2.5).

Ближней зоной считается район непосредственно перед преобразователем. В этой области амплитуда эха минует серию максимумов и минимумов. На последнем максимуме, расположенным на расстоянии N от преобразователя, которое называют естественным фокусом преобразователя, ближняя зона заканчива-

ется.

Дальней зоной считается район за пределами естественного фокуса N , где давление звукового поля постепенно падает до нулевых значений [88].

Поэтому для обеспечения эффективного диспергирования раствора ПКМ необходимо, чтобы уровень раствора в ультразвуковой ванне $H_{дон}$ не превышал значение естественного фокуса.

Естественный фокус N для дискового излучателя выражается формулой

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda}, \quad (2.22)$$

где D – диаметр излучателя; λ – длина волны.

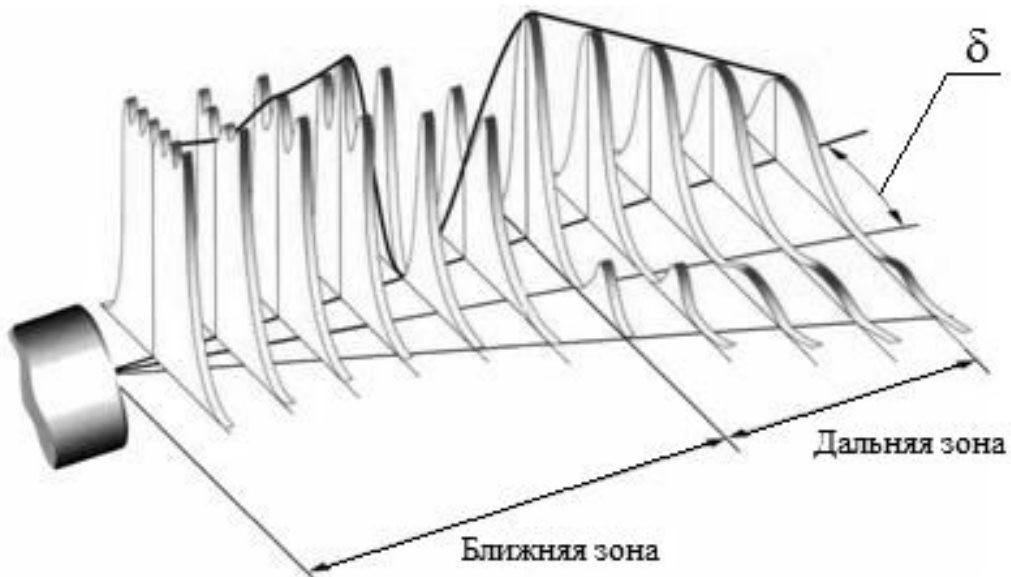


Рисунок 2.5 – Ближняя и дальняя зоны звукового поля [85]

В виду того, что D обычно значительно больше λ , уравнение (2.22) можно упростить и привести к виду [88]

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (2.23)$$

При разработке конструкции ультразвуковой ванны для диспергирующего смешения растворов ПКМ и определении ее конструктивных параметров целесообразно ввести такой показатель, как эффективный объем ванны $V_{эф}$.

Вблизи поверхности плоского высокочастотного излучателя ультразвуковое поле сосредоточено в цилиндрическом объеме диаметром D и длиной N (рисунок 2.6). Интервал от излучателя до N , как упоминалось ранее, называют ближней зоной или зоной Френеля.

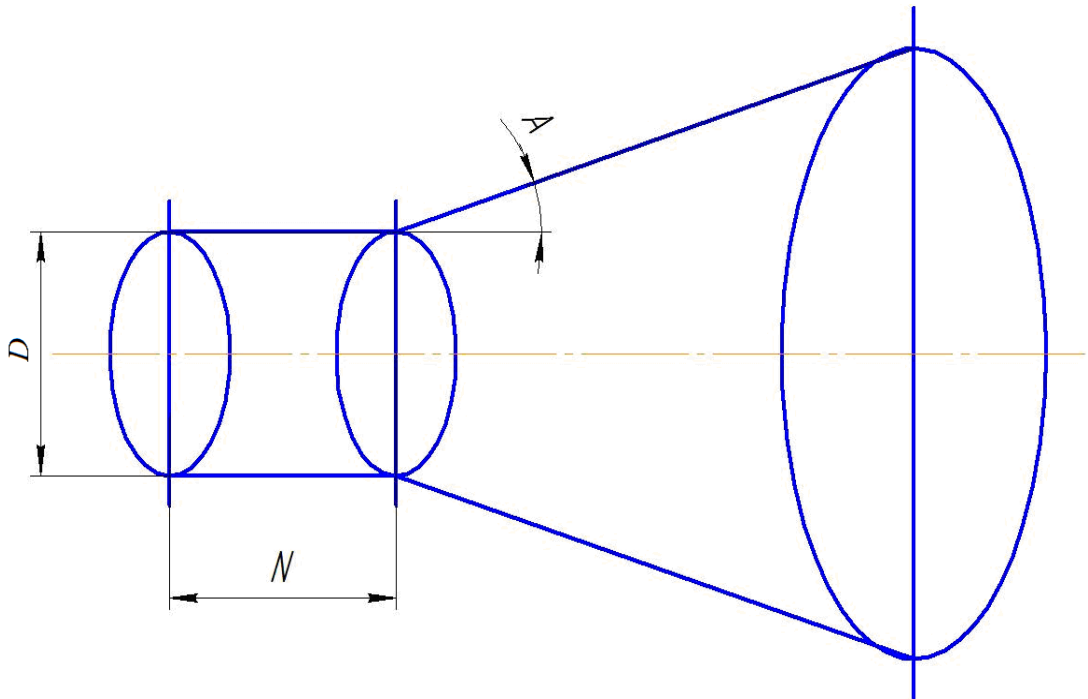


Рисунок 2.6 – Идеализированное поле плоского акустического излучателя [84]

За пределами N ультразвуковое поле конусообразно расширяется. Эту область называют дальней зоной или зоной Фраунгофера. В этой зоне амплитуда звукового давления падает пропорционально расстоянию от излучателя. Объем ближней зоны (зоны Френеля), в которой обеспечивается эффективное дисперги-

рующее смешение растворов ПКМ, примем за эффективный объем ультразвуковой ванны и его можно определить по формуле

$$V_{эф} = V_{б.з.} = \pi \frac{D^2 N}{4} \quad (2.24)$$

Подставив в формулу (2.24) выражение (2.23) получили

$$V_{эф} = \pi \frac{D^4}{16\lambda} \quad (2.25)$$

Используя формулу расчета объема параллелепипеда, получили формулу для расчета допускаемого уровня раствора ПКМ в ультразвуковой ванне

$$H_{дон} = \frac{\pi D^4}{16\lambda LB}, \quad (2.26)$$

Таким образом, рассчитав по диаметру излучателя D и длине волны λ эффективный объем ультразвуковой ванны $V_{эф}$, зная ее длину и ширину, можно рассчитать допускаемый уровень раствора ПКМ в ультразвуковой ванне $H_{дон}$.

Выводы

1 Основными переменными параметрами, определяющими процесс диспергирования раствора ПКМ, являются амплитуда звукового давления и время УЗО. Получена формула (2.19) для расчета амплитуды звукового давления по мощности УЗО.

2 Определены условия эффективного диспергирования раствора ПКМ для восстановления корпусных деталей автотракторной техники: амплитуда звукового давления при УЗО должна удовлетворять условиям (2.15) или (2.21), максимально допускаемый уровень раствора ПКМ в ультразвуковой ванне – условию (2.26).

2.3 Дегазация растворов ПКМ при ультразвуковой обработке

К основным дефектам полимерного покрытия следует отнести наличие пор [ГОСТ 9.407-84], являющихся инициаторами процесса разрушения покрытия. Поры возникают из-за выделения пузырьков газа из жидкого полимера в процессе его полимеризации и определение условий, обеспечивающих снижение пористости покрытия, является важной технологической задачей.

Цель настоящих исследований – определить параметры эффективной дегазации растворов ПКМ при ультразвуковом диспергировании.

Дегазация – процесс при котором происходит уменьшение содержания газа в жидкости под воздействием ультразвуковых колебаний, который находится в ней в растворенном состоянии и в виде пузырьков. Механизм ультразвуковой дегазации предполагает наличие в жидкости зародышей в виде стабильных пузырьков газа, которые имеют особые свойства, обеспечивающие им возможность длительного существования даже при высоком гидростатическом давлении. В жидкой среде содержащей твердые несмачиваемые примеси, газовая фаза находится также в микроскопических неровностях их поверхностей [60]. Следовательно, в растворе полимерного композиционного материала, наполненного дисперсными частицами металла, газовая фаза будет также иметь место на микро – или нанонеровностях поверхности частиц наполнителя.

При интенсивности звука выше порога кавитации в жидкости формируются новые "осколочные" зародыши, которые появляются при захлопывании пузырьков, поэтому результирующее число пузырьков – зародышей резко увеличивается. Процесс ультразвуковой дегазации (УЗД) включает две стадии. На начальной стадии дегазации газовые пузырьки колеблются в акустическом поле и их размеры увеличиваются вследствие диффузии в них растворенного газа. Помимо диффузии рост размеров пузырьков вызван коалесценцией, т.е. совмещением пар или групп пузырьков под действием сил акустигидродинамического происхождения – это гидродинамические потоки (силы Бернулли) и акустические течения

(силы Бьеркнесса). На второй стадии УЗД пузырьки газа, достигнув определенного размера, устремляются к поверхности жидкости и выделяются в атмосферу (окружающую среду).

Условие всплытия пузырька газа в жидком металле имеет вид [60]

$$P_{H_2} > P_0 + h\rho + \frac{2\sigma}{r}, \quad (2.27)$$

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 (2.27) следует, что чем больше плотность и поверхностное натяжение жидкости, тем больше должно быть давление газа в пузырьке для его всплытия.

Скорость всплытия пузырька на поверхность можно определить по уравнению Стокса

$$g = \frac{2}{9} g \frac{r^2}{\mu} (\rho - \gamma), \quad (2.28)$$

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

Из формулы (2.28) следует, что чем меньше вязкость жидкости, тем больше скорость всплытия пузырька на поверхность.

В соответствии с ТУ 6-06-246-92 раствор эластомера Ф-40 содержит 80 масс.ч. ацетона (остальное смола ФКУ и каучук СКН-40), поэтому динамическая вязкость материала составляет 197 МПа×с, что в 20,3 раза меньше вязкости эпоксидной смолы ЭД-20 (4000 МПа×с), 15,2 раза меньше анаэробного герметика АН-111 (3000 МПа×с) и в 7,1 раза меньше акрилового адгезива АН-103 (1400 МПа×с). Из выводов по формулам (2.27) и (2.28) следует, что в растворе эластомера

Ф-40, в отличие от эпоксидной смолы, анаэробных и акриловых адгезивов, условия для дегазации значительно лучше.

Известны две гипотезы о механизме процесса дегазации: первая – кавитационная, по которой при кавитации образуется большое количество пузырьков, которые вследствие диффузии растворенного в жидкости газа и коалесценции увеличиваются в размере и покидают жидкость; вторая – предполагает наличие в отсутствие кавитации в жидкости стабильных пузырьков, которые проходят аналогичные стадии развития. В работе Капустиной приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что дегазация жидкости происходит при малой интенсивности звука без кавитации, и сделан вывод, что центрами дегазации являются стабильные газовые пузырьки [90].

Расчет основных характеристик процесса дегазации: скорости дегазации dC/dt и квазиравновесной концентрации C_p' (постоянная концентрация пузырьков газа, которая устанавливается в жидкости при УЗО через определенный промежуток времени) является очень сложной задачей. Эта задача существенно упрощена Агранатом Б. А., который рассматривает диффузионный механизм дегазации. Истинная дегазация – это выделение растворенного газа и понижение его концентрации в жидкости до значений, меньших равновесного, происходящее за счет диффузии.

Варьирование концентрации газа в жидкой среде под воздействием акустического поля за время облучения определяется выражением

$$C = C_p' + (C_0 - C_p')e^{-\beta t}, \quad (2.29)$$

где C_0 – начальная концентрация; t – время; β – параметр, определяемый акустическими характеристиками (интенсивностью звука I и частотой f звуковых колебаний), $\beta = A(E - E_0)^n$; A и n – коэффициенты, значение которых определяется акустическими условиями; E_0 – минимальное значение объемной плотности энер-

гии E , при которой еще наблюдается дегазация.

Различают два режима ультразвуковой дегазации: докавитационный и при наличии ультразвуковой кавитации.

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

$$\frac{dC}{dt} = V_c = Bf^n e^{-kt}, \quad (2.30)$$

где B , n , k – константы.

Экспериментальные исследования в работе Капустиной О.А. показали, что квазиравновесная концентрация C_p^l практически не зависит от частоты f и интенсивности I УЗ колебаний (таблица 2.1).

Капустиной О.А. экспериментально доказано, что в жидкости независимо от частоты колебаний f и плотности энергии E звукового поля, в соответствующие интервалы времени, устанавливается одно и то же значение квазиравновесной концентрации C_p^l .

Таблица 2.1 – Зависимость квазиравновесной концентрации и времени ее установления от частоты УЗ обработки

№ п/п	Частота УЗ колебаний f , кГц	Квазиравновесная концентрация C_p^l , см ³ /мл	τ_p , мин
1	10	0,0138	-
2	22	0,0145	580
3	80	0,014	-
4	500	0,0135	-
5	1000	0,0142	250

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. Однако при очень высокой интенсивности УЗ излучения может установиться режим колебаний, когда дальнейшее повышение интенсивности будет способствовать уменьшению скорости дегазации. Имеются в виду пульсирующие полости второй группы, начальный размер которых больше резонансного. При расширении они существенно увеличиваются, однако в фазе сжатия полости не успевают захлопнуться и пульсируют около определенного среднего максимального радиуса. Поэтому условие эффективного диспергирования: $2,0P_0 \leq P_A < 10P_0$ актуально и является также условием эффективной дегазации полимерного раствора.

Таким образом концентрация газа C в жидкости зависит от частоты f и интенсивности I УЗ колебаний и времени t УЗО. Чем больше частота f и интенсивность I УЗ колебаний, при одинаковом времени t УЗО, тем меньше концентрация газа C в жидкости. Частота f и интенсивность I УЗ колебаний практически не влияют на значение квазиравновесной концентрации C_p^l , но определяют скорость изменения квазиравновесной концентрации V_c . В соответствии с формулой (2.30) с повышением частоты f скорость V_c увеличивается.

Из экспериментов, проводимых при различных температурах, следует, что чем выше температура жидкости, тем ниже значение квазиравновесной концентрации, устанавливающейся под действием звука, рисунок 2.7 [90].

При захлопывании полостей третьей группы в микрообъемах возникают высокие давления до 100 МПа, а температура повышается до 1000°C. Поэтому при УЗО раствора эластомера Ф-40 следует ожидать повышения его температуры и уменьшения значения квазиравновесной концентрации C_p^l , т.е. снижения концентрации пузырьков газа в растворе по сравнению со стандартной температурой.

Степень воздействия акустических колебаний в жидкости на установившееся значение концентрации предложено оценивать параметром $\gamma = (C_p - C_p^i) / C_p$, где C_p – равновесная концентрация в отсутствии звука. При статическом давлении 10^6 Па (1 атм) и температуре 20°C значение γ составляет 0,3 (30%). С падением статического давления параметр γ увеличивается и при давлении $0,5 \cdot 10^5$ Па (0,5 атм) достигает 0,7 (70%) [90].

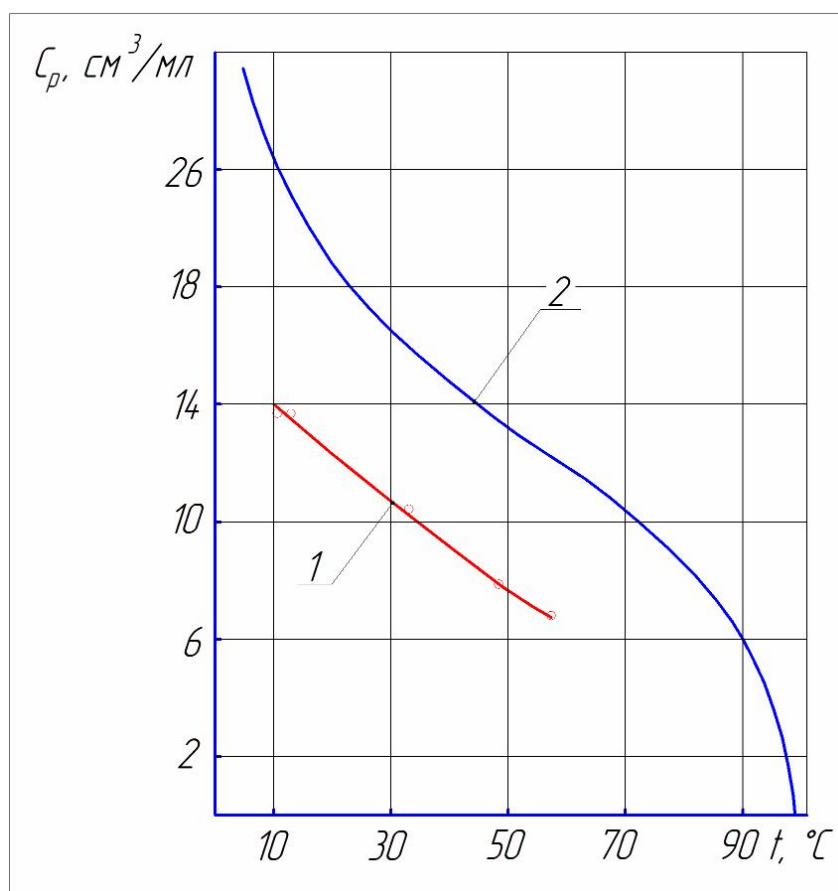


Рисунок 2.7 – Зависимость равновесной концентрации воздуха в воде от температуры при статическом давлении 1 атм [90]

Снижение гидростатического давления приводит к уменьшению значения квазиравновесной концентрации C_p^i , т.е. к снижению концентрации газа в растворе. Однако, чтобы обеспечить снижение гидростатического давления необходимо вакуумное оборудование, что усложняет технологию и оборудование УЗО. Сле-

дует также учитывать то, что со снижением гидростатического давления, уменьшается критерий эрозионной активности χ , т.е. снижается эффективность диспергирования наполнителей в растворе ПКМ. Поэтому предпочтительней вести УЗО раствора ПКМ при атмосферном давлении.

Выводы

1. В полимерных растворах с меньшей вязкостью больше скорость всплытия пузырьков газа на поверхность и более благоприятные условия для дегазации.

2. Чем больше частота f и интенсивность I УЗ колебаний, тем больше скорость дегазации V_c и меньше концентрация газа C в жидкости. На значение квазиравновесной концентрации C_p^l в конкретном полимерном растворе частота f и интенсивность I УЗО не влияют.

3. 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 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Общая методика исследований

Для решения задач исследований, сформулированных в первой главе диссертации, разработана общая схема исследований (рисунок 3.1).

Объектами исследований служили:

- растворы эластомера Ф-40 и полимерных композиций различных составов на его основе;
- плёнки эластомера Ф-40 и полимерной композиции на его основе;
- покрытия из композиции на основе эластомера Ф-40;
- подшипниковые узлы с посадками, восстановленными эластомером Ф-40 и полимерной композицией на его основе.

Эластомер Ф-40 (ТУ 6-06-246-92) представляет собой раствор композиции каучука и модифицированной фенольной смолы в органическом растворителе. Материал разработан и выпускается ОАО "НИИ пластических масс им. Г. С. Петрова" (г. Москва). Эластомер Ф-40 поставляется готовым к использованию в виде раствора в полиэтиленовых воздухонепроницаемых канистрах различного объема.

Состав эластомера Ф-40:

- 1) смола ФКУ (феноло-формальдегидная смола на основе замещенного фенола винилацетиленовой структуры) – 8 масс.%;
- 2) каучук синтетический бутадиен-нитрильный марки СКН-40С – 12 масс.%;
- 3) ацетон технический, ГОСТ 2768-84 – 80 масс.%.

Эластомер Ф-40 – прозрачная жидкость коричневого цвета без механических включений, характеризующаяся следующими показателями:

- массовая доля сухого остатка – 20%;
- прочность связи со сталью при сдвиге при 200С не менее – 5,0 МПа.

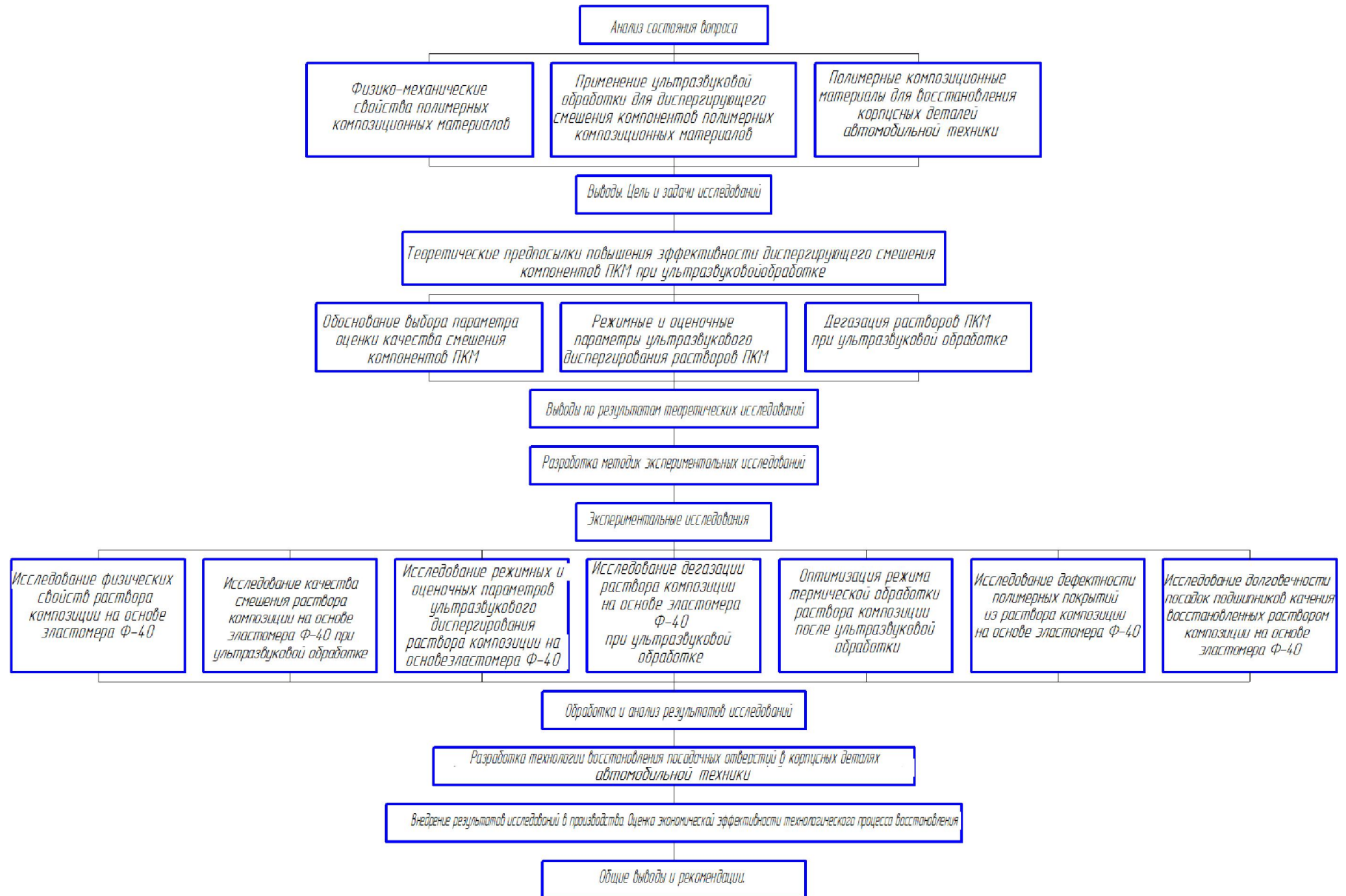


Рисунок 3.1 – Общая схема исследований

В качестве наполнителей использовали дисперсные металлические порошки: алюминиевую пудру ПАП-1 и бронзовый порошок БПП-1.

Пудру алюминиевую (ГОСТ 5495-95) изготавливают истиранием первичного алюминия марки не ниже А5 по ГОСТ 11069 или его отходов, по химическому составу не уступающих алюминию марки А5 [91]. Получают пудру пяти марок: ПАП-1, ПАП-2, ПАГ-1, ПАГ-2, ПАГ-3 (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Характеристика алюминиевой пудры [91]

Марка	Кроющая способность на воде, см ² /г, не менее	Гранулометрический состав: остаток на ситах, %, не более			Химический состав, %							Всплываемость, %, не менее
		+ 008	+ 0056	+ 0045	Al активный, не менее	Примеси, не более						
						Fe	Si	Cu	Mn	влаги	жировых добавок	
ПАП – 1	7000	1,0	–	–	–	0,5	0,4	0,05	0,01	0,2	3,8	80
ПАП – 2	10000	–	0,3	0,5	–	0,5	0,4	0,05	0,01	0,2	3,8	80
ПАГ – 1	6000	1,5	–	–	90	–	–	–	–	–	2,4	–
ПАГ – 2	8000	–	0,7	–	88	–	–	–	–	–	3,0	–
ПАГ – 3	10000	–	–	0,5	86	–	–	–	–	–	3,2	–

Алюминиевая пудра ПАП-1 (ГОСТ 5494-95) имеется в широкой продаже. Бронзовую пудру готовят с использованием в качестве исходного сырья марок бронз, близких по составу к получаемой продукции или специально приготовленных сплавов. Пудры получают фрезерованием заготовок сплавов, размолотом крупки в шаровой мельнице, полировкой частиц во вращающемся барабане. Частицы получаемых пудр имеют лепесткообразную форму. Состав пудр, %: 72 – 92 Cu, 1,2 Al, <1,0 Fe, примесей не более 0,8, цинк – остальное (таблица 3.2).

Бронзовый порошок БПП-1 (ТУ 48-21-150-72) имеется в широкой продаже. Поставляется в полиэтиленовых пакетах в количестве 10 и 50 г (таблица 3.2).

Для измерения валов и наружных колец подшипников использовали рычажную скобу (ГОСТ 11098-75), с ценой деления 0,002 мм. Размер внутренних колец подшипников и посадочных отверстий под подшипники измеряли индикатором.

торным нутромером НИ-100 (ГОСТ 868-72) с индикаторной головкой I-МИГ (ГОСТ 9696-82), которая имеет цену деления 0,001 мм.

Обеспечение зазора в неподвижных соединениях подшипников до восстановления осуществляли механической обработкой отверстия под подшипник.

Таблица 3.2 – Характеристика бронзовой пудры [92]

Марка	Массовая доля компонентов*, %		Остаток на сите с сеткой, не более		Площадь покрытия, см ² /г, не менее	Насыпная масса после утряски, г/см ²
БПП-1	83 – 87	0,8	2,0	–	1200	1,8 – 2,6
БПП-2	83 – 87	1,0	–	0,5	-	-
БПП-3	72 – 76	0,8	2,0	–	1200	1,8 – 2,2
БПП-4	88 – 92	0,8	2,0	–	1200	1,8 – 2,2

*До 1,2 % Al; остальное – цинк; содержание жиров не более 0,5 %.

При проведении экспериментальных исследований применяли оборудование и приборы, которые выпускаются промышленностью, а также специально разработанные и изготовленные стенды, установки и приспособления.

Исследования проводили в соответствии с частными методиками, приведенными ниже.

3.2 Методика исследования физических свойств растворов композиций на основе эластомера Ф-40

В диссертации исследовали 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., алюминиевый порошок ПАП-1 – 16 масс.ч., бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 масс.ч.;

- состав №3: эластомер Ф-40 100 масс.ч., алюминиевый порошок ПАП-1 – 25

масс.ч., бронзовый порошок БПП-1 – 2,6 масс.ч.

Исследования плотности вышеуказанных составов ПКМ проводили по известной методике [93]. Сущность метода заключалась в погружении ареометра АОН-1 по ГОСТ 18481-81 отградуированного по нижнему мениску (рисунок 3.2) в испытуемый состав, снятии показаний по шкале ареометра при температуре определения и пересчете результатов на плотность соответствующей температуре 20°C. Диапазон используемого при определении плотности исследуемых составов ареометра АОН-1 составляет 700-1840 кг/м³.



Рисунок 3.2 – Ареометр АОН-1

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

рукции, разработанный и изготовленный на кафедре "Транспортные средства и техносферная безопасность" ЛГТУ. Принципиальная схема пьезометра показана на рисунке 3.3, на рисунке 3.4 – фото пьезометра.

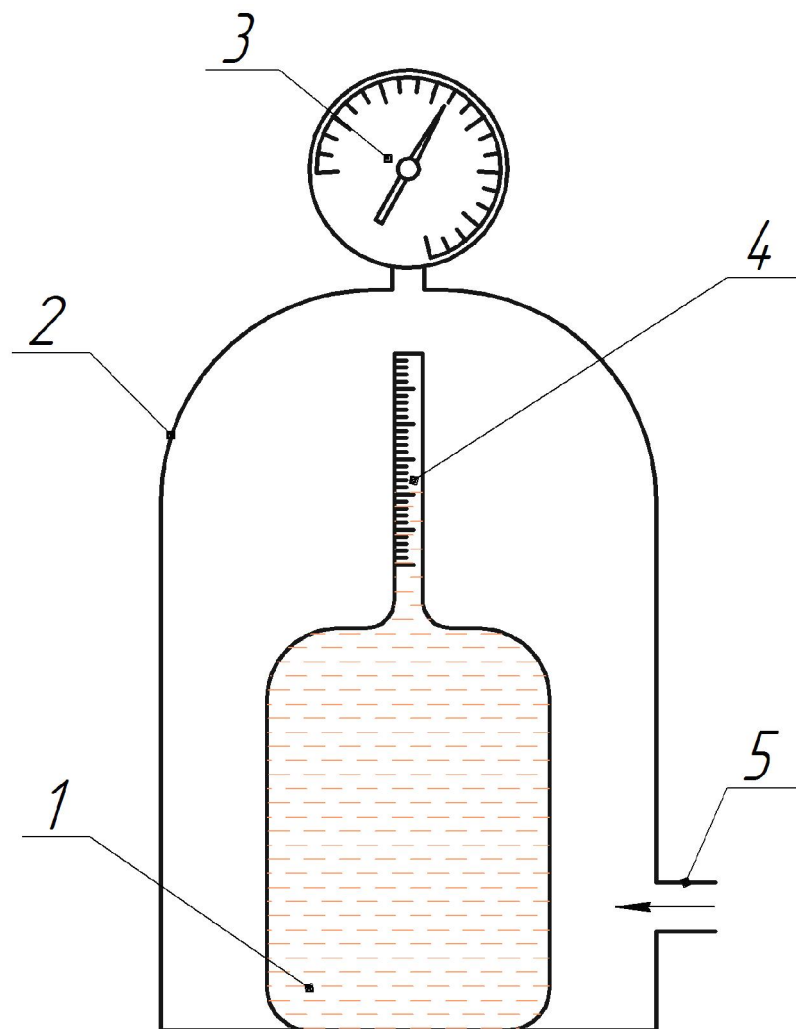


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема пьезометра

Стеклянный сосуд 1, наполненный раствором ПКМ, помещали в сосуд 2 и по штуцеру 5 нагнетали воздух поршневым компрессором марки FIAC FX 224 ГОСТ 20073-81 [94]. При этом последний создавал избыточное давление внутри сосуда 2 и через открытую горловину 4 сосуда 1 воздействовал на исследуемый раствор ПКМ. Сосуд 1, подвергаясь одинаковому давлению как снаружи, так и изнутри, практически не менял своего объема. Раствор ПКМ при этом сжимался,

и уровень его в горловине 4 понижался. Проходное сечение горловины 4 выполнено малых размеров, а на наружной поверхности нанесена разметка, что позволяет фиксировать любые изменения объема исследуемого раствора ПКМ. Давление, при котором изменялся объем раствора, фиксировали манометром 3 марки МТ-100 по ГОСТ 2405-88 [95].



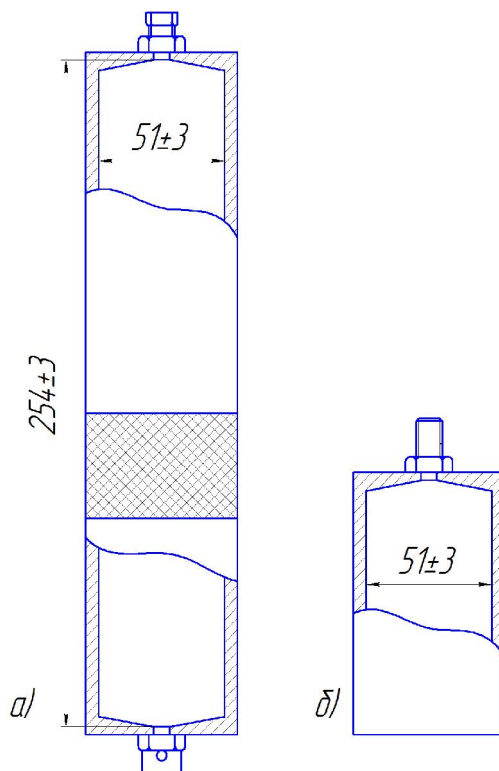
Рисунок 3.4 – Пьезометр

Значения коэффициента адиабатической сжимаемости β_{ad} рассчитали по формуле [86]

$$\beta_{ad} = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P}, \quad (3.1)$$

где V – начальный объем жидкости; ΔV – изменение объема жидкости при изменении давления ΔP .

Давление насыщенных паров (ДНП) исследуемых составов ПКМ определяли по ГОСТ 1756-2000. Первоначально жидкостную камеру аппарата (рисунок 3.5, б) наполняли пробой испытуемого материала, охлажденного до температуры $37,8^\circ\text{C}$, после чего ее подсоединяли к воздушной камере (рисунок 3.5, а).



а) – воздушная камера; б) – жидкостная камера

Рисунок 3.5 – Бомба для определения давления пара

Затем аппарат погружали в водяную баню с температурой $(37,8 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ и периодически встряхивали до тех пор, пока не установится постоянное давление, которое фиксировал манометр типа Бурдона модель 212.20 ГОСТ 14254-96, присоединенный к аппарату. Полученное на манометре показание, соответствующим образом скорректированное, принимали за давление насыщенных паров составов ПКМ по Рейду [96].

Скорость распространения звуковых волн в жидкости рассчитывали по формуле (2.17).

3.3 Методика исследования режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования раствора композиции на основе эластомера Ф-40

Значения звукового давления P_A при УЗО раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 (состав №2) рассчитывали по формуле (2.19).

Значения критерия эрозионной активности χ определяли по формуле (2.12).

Качество смешения металлических наполнителей с полимерной матрицей при УЗО оценивали вязкостью раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40.

Ультразвуковую обработку состава №2 проводили в ультразвуковой ванне "GRAD 0,5 HOME STYLE" (рисунок 3.6).

В таблице 3.3 показаны технические характеристики ультразвуковой ванны "GRAD 0,5 HOME STYLE".

Таблица 3.3 – Технические характеристики ультразвуковой ванны "GRAD 0,5 HOME STYLE"

Объем, л	Мощность, Вт		Размеры, мм		Вес, кг
	Потребляемая	Генератора	Габаритные размеры	Емкость	
0,5	55	55	160×90×200	145×85×55	1,7

Компоненты взвешивали на аналитических весах марки ВЛА-200М с ценой деления 0.0001 г. Затем отобранные компоненты загружали в емкость ультразвуковой ванны. Продолжительность УЗО раствора ПКМ составляла от 2 до 22 мин, с интервалом 4 мин. По истечении каждого интервала озвучивания обработку раствора ПКМ прекращали и определяли вязкость последнего. Вязкость измеряли

вискозиметром типа ВПЖ-2 в соответствии с ГОСТ 18249-72 (рисунок 3.7).



Рисунок 3.6 – Ультразвуковая ванна "GRAD 0,5 HOME STYLE"

Для измерения надевали резиновую трубку на трубку отводную 3. Затем, перекрыв колено 2 пальцем и перевернув вискозиметр, колено 1 опускали в сосуд с исследуемым раствором ПКМ и с помощью резиновой груши засасывали его до метки M_2 , обращая внимание, за отсутствием в жидкости пузырьков воздуха. При достижении уровнем полимерной композиции метки M_2 , из сосуда вынимали вискозиметр и быстро переворачивали в вертикальное положение. Убрав избыток жидкости с внешней стороны конца колена 1, присоединяли к нему резиновую трубку. После вискозиметр помещали в термостат так, чтобы уровень жидкости был выше расширения 4. Выдержав в термостате около 15 мин засасывали

жидкость в колено 1 примерно до 1/3 высоты расширения 4, после чего соединяли колено 1 с атмосферой и измеряли время движения мениска раствора от метки M_1 до M_2 .

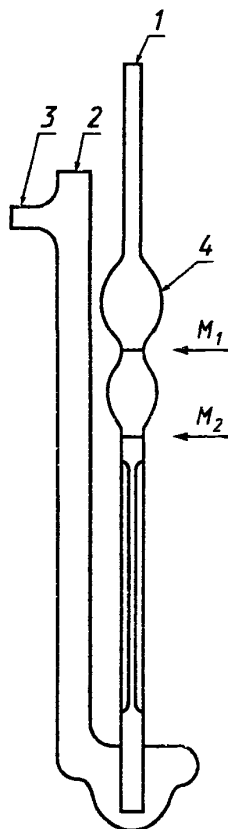


Рисунок 3.7 – Вискозиметр типа ВПЖ-2

Динамическую вязкость раствора ПКМ вычисляли по формуле

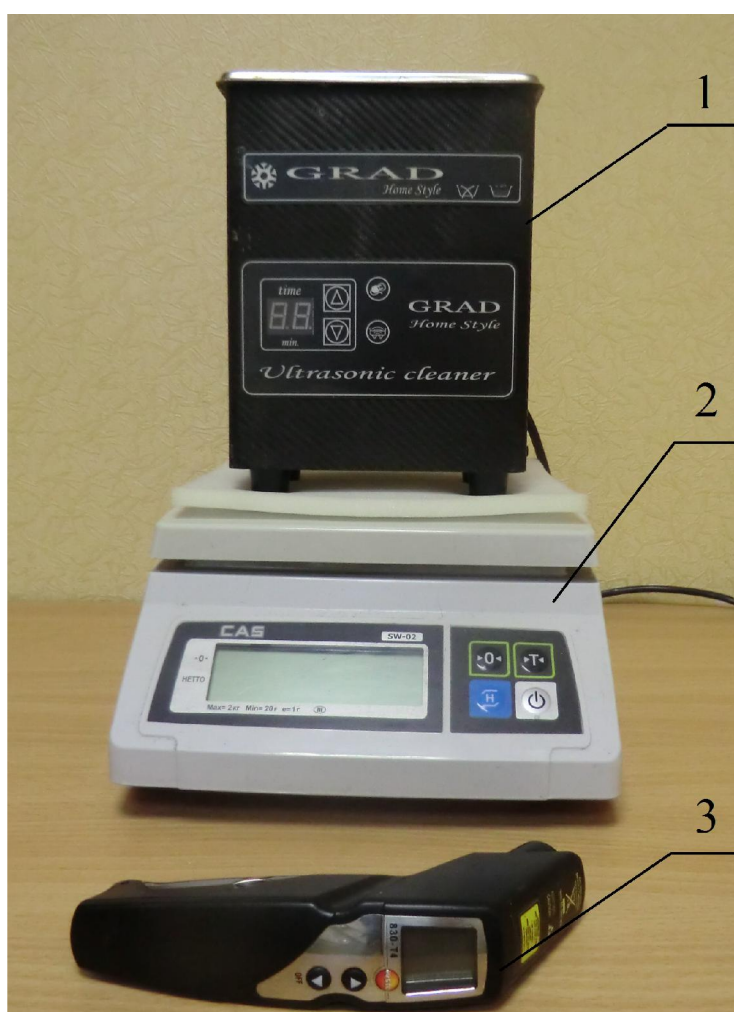
$$\eta = K \cdot \rho \cdot \tau, \quad (3.2)$$

где K – постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$; ρ – плотность раствора полимера, $\text{г}/\text{см}^3$;
 τ – время истечения раствора полимера, с.

За оптимальную продолжительность озвучивания исследуемого состава приняли минимальное время обработки при котором значения вязкости раствора ПКМ стабилизировались.

3.4 Методика исследования дегазации раствора композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке

Для исследования процесса дегазации раствора полимерного композиционного материала на основе эластомера Ф-40 использовали лабораторную установку, которая включала в себя: ультразвуковую ванну "GRAD 0,5 HOME STYLE" – 1, весы лабораторные ВК 3000.1 – 2, инфракрасный пирометр Testo 830-T4 (рисунок 3.8).



- 1 – ультразвуковая ванна; 2 – весы лабораторные ВК 3000.1;
3 – инфракрасный пирометр Testo 830-T4

Рисунок 3.8 – Лабораторная установка для исследования дегазации раствора полимерной композиции

Контроль остаточной массы раствора полимерной композиции осуществляли с помощью весов лабораторных ВК 3000.1 с ценой деления 0,1 г.

Температуру раствора ПКМ фиксировали инфракрасным пирометром Testo 830-T4 в течение всего периода диспергирующего смешения с интервалом времени в 2 мин.

В таблице 3.4 представлены технические характеристики весов ВК 3000.1, в таблице 3.5 – инфракрасного пирометра Testo 830-T4. Между ультразвуковой установкой и весовой платформой помещали поролон.

Таблица 3.4 – Технические характеристики весов ВК 3000.1 [97]

НПВ, г	НМПВ, г	d, г	e, г	Интервалы взвешивания	СКО, г	Пределы допускаемой погрешности, г	
						Первичной	Периодической
3000	5	0,1	0,1	От 5 г до 500 г вкл.	0,05	± 0,05	± 0,1
				Св. 500 г до 2 кг вкл.		± 0,1	± 0,2
				Св. 2 кг до 3 кг вкл.		± 0,15	± 0,3

Таблица 3.5 – Технические характеристики инфракрасного пирометра Testo 830-T4 [98]

Параметры	Testo 830-T4
Тип К (NiCr-Ni)	
Диапазон измерений	-50 ... +500 °С
Погрешность	±0,5 °С + 0,5 % от изм. знач.
Разрешение	0,1 °С
Частота измерений	1,75 с.
Инфракрасное измерение	
Диапазон измерений	-30 ... +400 °С

Продолжение таблицы 3.5

Погрешность	±1,5 °С (-20 ... 0 °С) ±2 °С (-30 ... -20,1 °С) ±1 °С или ±1 % от изм. знач. (в ост. диапазоне)
Разрешение	0,1 °С
Частота измерений	0,5 с.
Общие технические данные	
Корпус	ABS
Коэффициент излучения	настраиваемый (от 0,2 до 1,0)
Расстояние до точки замера	30:1 (обычно на расстоянии 0,7 м от объекта измерения) 24 мм @ 700 мм (90%)
Целеуказание	2-х точечный лазерный указатель
Спектральный диапазон	8 ... 14 μm
Тип батареи	9 В блочная батарейка
Ресурс батареи	15 ч
Размеры	190 × 75 × 38 мм
Рабочая температура	-20 ... +50 °С
Температура хранения	-40 ... +70 °С
Вес	200 г

3.5 Методика исследования когезионной прочности пленок композиции на основе эластомера Ф-40

Когезионную прочность пленок композита на основе эластомера Ф-40 оценивали прочностью при одноосном растяжении σ_p [99].

Образцами являлись пленки прямоугольной формы $60 \times 15 \times 0,15$ мм. Расчетная длина образца была равна 30 мм.

С целью получения пленок полимерной композиции была изготовлена специальная форма-оснастка (рисунок 3.9), состоящая из опорной пластины 1 размерами $200 \times 160 \times 4$ мм и рамки-трафарета 2. В качестве материала для опорной пластины 1 использовали Фторопласт-4 ГОСТ 14906-77. Рамку-трафарет изготовили из Стали 3 ГОСТ 380-94 с размерами $180 \times 140 \times 0,8$ по наружному контуру. Внутри рамки предусмотрено три окна для пленок размерами 60×15 мм.

Все детали формы-оснастки подвергали очистке и двукратному обезжириванию ацетоном с последующим просушиванием в течение 10 мин. Предварительно установили опорную пластину 1 на выставленную поверочную плиту ГОСТ 10905-86, затем на неё устанавливали рамку-трафарет 2, которую в свою очередь заполняли, нанося волосяной кистью №5 послойно композицию на основе эластомера Ф-40. Заполнив рамку, поверхность покрытия формовали фторопластовой пластиной, для обеспечения равномерности полимерной пленки. Образцы подвергали термической обработке по режимам, указанным в таблице 3.6. После термической обработки образцы выдерживали в течение 16 ч при стандартной атмосфере 23°C [100]. Затем с помощью лезвия по внутреннему контуру рамки-трафарета отсекали границы пленок по длине и ширине. Предельные отклонения размеров образцов по длине и ширине не превышали $\pm 0,1$ мм.

Испытания образцов выполняли с использованием разрывной машины ИР 5082-50 (рисунок 3.10).

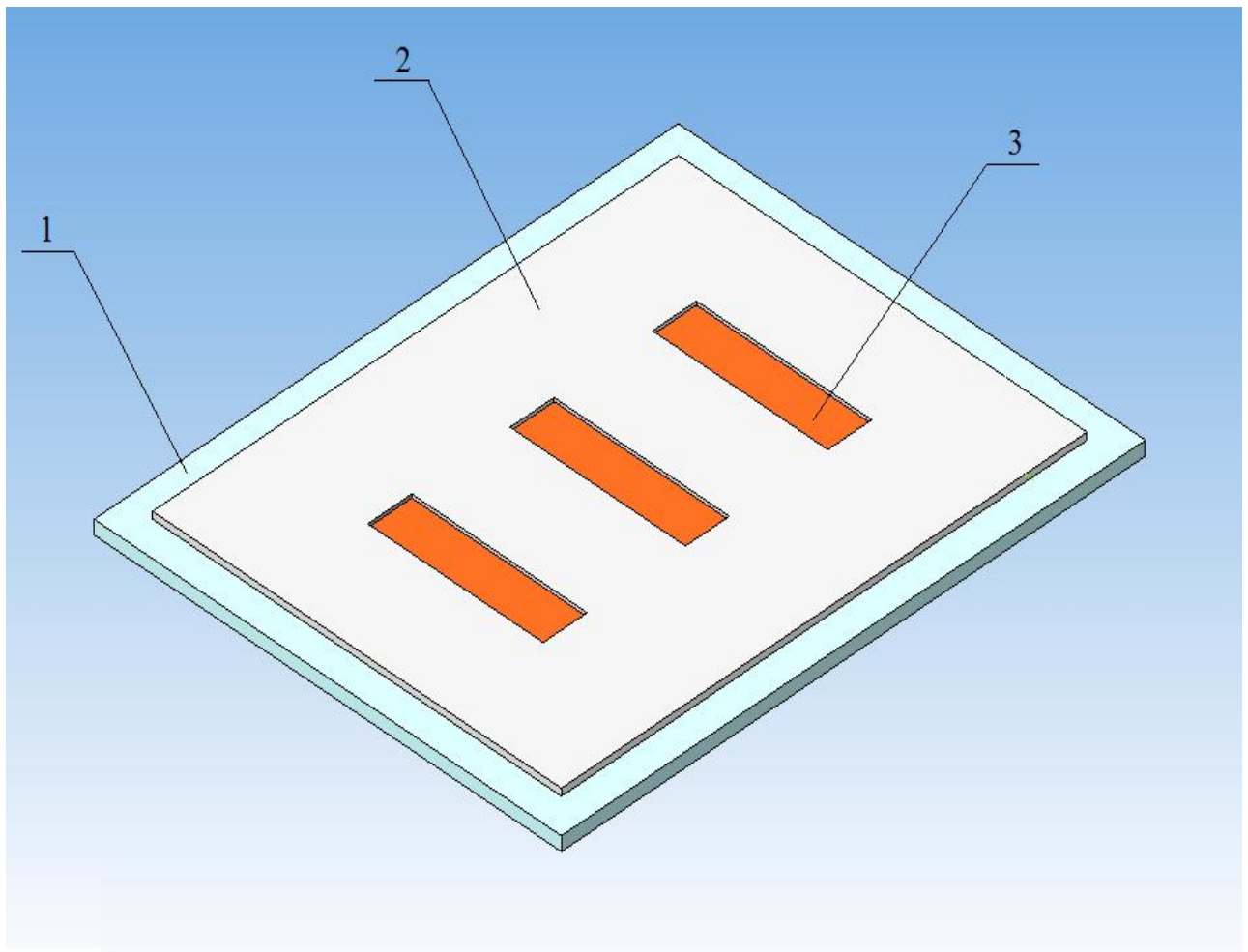
При испытаниях скорость нагружения была постоянной и составляла 50 мм/мин.

В высокоэластических полимерах скорость распространения волн составляет 30...50 м/с и около 1000 м/с в стеклообразных полимерах [101], в этой связи была принята скорость нагружения которая обеспечивала равномерное распределение напряжений по образцу.

Прочность при разрыве пленок ε_p определяли по формуле [102]

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_H}, \quad (3.3)$$

где F_p – растягивающая нагрузка в момент разрыва пленки, Н; A_H – начальное поперечное сечение образца, мм.



1 – опорная пластина; 2 – рамка-трафарет; 3 – пленка

Рисунок 3.9 – Форма-оснастка для получения пленок

Для определения оптимального режима термической обработки материала был реализован многофакторный эксперимент по симметричному композиционному плану B_2 [103..105].

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.



Рисунок 3.10 – Исследование когезионной прочности пленок композиции на основе эластомера Ф-40

В таблице 3.6 представлены уровни и интервалы варьирования факторов.

Таблица 3.6 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервал варьирования фактора ΔX_i
		нижний $X_{ин}$	нулевой X_{i0}	верхний $X_{ив}$	
Температура, °С	x_1	100	120	140	20
Время, ч	x_2	2	2,5	3	0,5

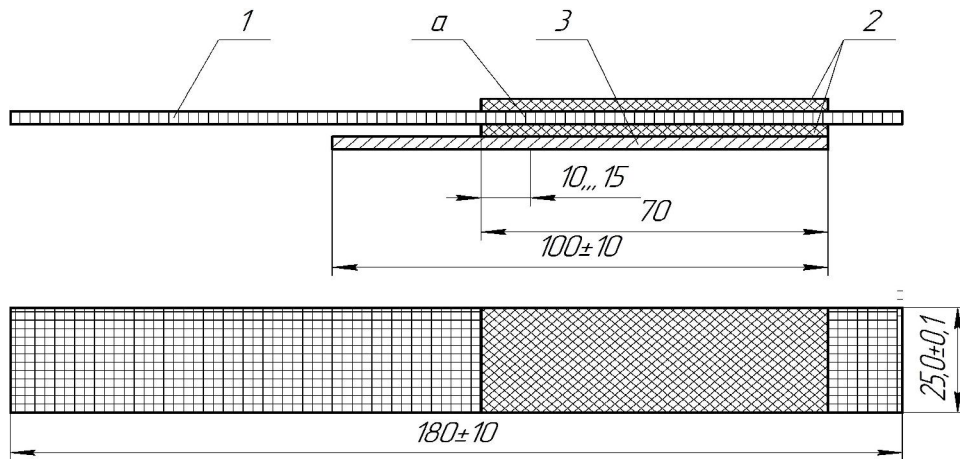
3.6 Методика исследования адгезионных свойств покрытий композиции на основе эластомера Ф-40

Исследование адгезионных свойств покрытий из композиции на основе эластомера Ф-40 проводили по методу определения прочности связи герметика с металлом при отслаивании [106].

В качестве образцов при определении показателя прочности, использовали металлические пластины с размерами 100×25×3 мм, изготовленные из стали 45, с шероховатостью поверхности R_a 0,63 с покрытием из композиции на основе эластомера Ф-40 между слоями которого размещена металлическая сетка (рисунок 3.11.).

На предварительно обезжиренную и просушенную в течение 10 минут поверхность металлической пластины 3 наносили послойно кистью №5 покрытие 2 из ПКМ на основе эластомера Ф-40 толщиной 2,5 мм. Каждый слой покрытия просушивали в течение 0,25 ч. Затем на покрытие накладывали металлическую сетку 1 ГОСТ 3826-82, таким образом, чтобы с двух сторон пластины остались излишки сетки: с одной стороны 15 мм, с другой 40 мм. После на сетку 1 наноси-

ли очередной слой полимерной композиции 2 до момента прекращения визуальной фиксации фактуры сетки.



1 – сетка металлическая; 2 – покрытие эластомера Ф-40С;
3 – металлическая пластина; а – место подреза

Рисунок 3.11 – Образец для исследования адгезионных свойств покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40

Далее проводили термическую обработку образцов в течение 2,5 ч при температуре 120⁰С. После термической обработки образцы кондиционировали в течение 16 ч при температуре 23⁰С [100].

За результат испытания приняли среднее арифметическое показаний всех параллельных опытов (повторность опытов пятикратная).

Показатель прочности связи герметика с металлом при отслаивании каждого образца F в Н/м вычисляли по формуле [106]

$$F = \frac{\bar{P}}{b}, \quad (3.4)$$

где \bar{P} – среднее значение силы, вызвавшей отслаивание образца, Н; b – ширина образца, мм.

3.7 Методика исследования дефектности полимерных покрытий из раствора эластомера Ф-40 и композиции на основе

В качестве образцов служили пленки эластомера Ф-40 и композиции на его основе. В соответствии с ГОСТ 9407-84 дефектность образцов оценивали площадью разрушенного покрытия, размерами (диаметр пузырьков) и количеством пузырьков на единицу площади [107].

Для определения площади разрушенного покрытия на поверхность пленки накладывали пластину из прозрачного материала с сеткой со стороной квадрата 5 мм. Площадь разрушенного покрытия в процентах определяли по значению частотного показателя разрушения C используя формулу

$$C = \frac{n_1}{n} \times 100, \quad (3.5)$$

где n_1 – количество квадратов, в которых наблюдается разрушение покрытия;

n – общее количество квадратов на прозрачной пластине или проволочной сетке.

Измерение размера пор (пузырьков) проводили микроскопом МПБ-2, обеспечивающим 24-х кратное увеличение

3.8 Методика исследования долговечности посадок подшипников качения восстановленных раствором композиции на основе эластомера Ф-40

В качестве объектов исследований использовали подшипниковые узлы с посадками, восстановленными композитом на основе эластомера Ф-40. Покрытия на посадочные места подшипников наносили из растворов ПКМ на основе эластомера Ф-40, изготовленных ручным смешением и УЗО.

Проведение испытаний на долговечность осуществляли на специальном

стенде оригинальной конструкции, в основе которого был использован электро-механический вибратор марки ИВ-107А, обеспечивающий циклическое нагружение восстановленных посадок подшипников типоразмера 209 (рисунок 3.13).



Рисунок 3.12 – Стенд для исследования долговечности при циклическом нагружении посадок подшипников на базе электро-механического вибратора ИВ-107А

Взамен подшипниковых щитов, входящих в конструкцию вибратора, использовали щиты оригинальной конструкции (рисунок 3.14), в которые запрессованы специально изготовленные чугунные кольца из материала СЧ-20.

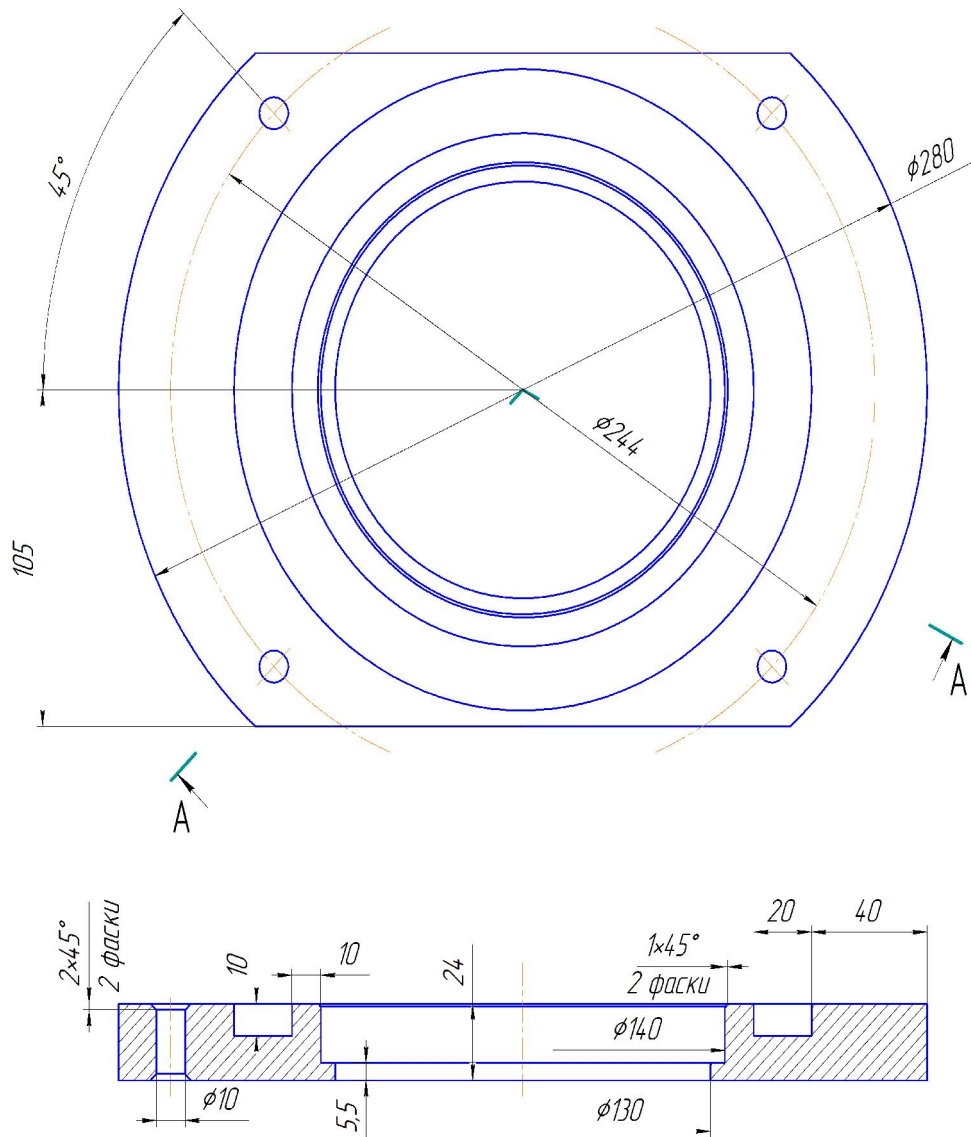


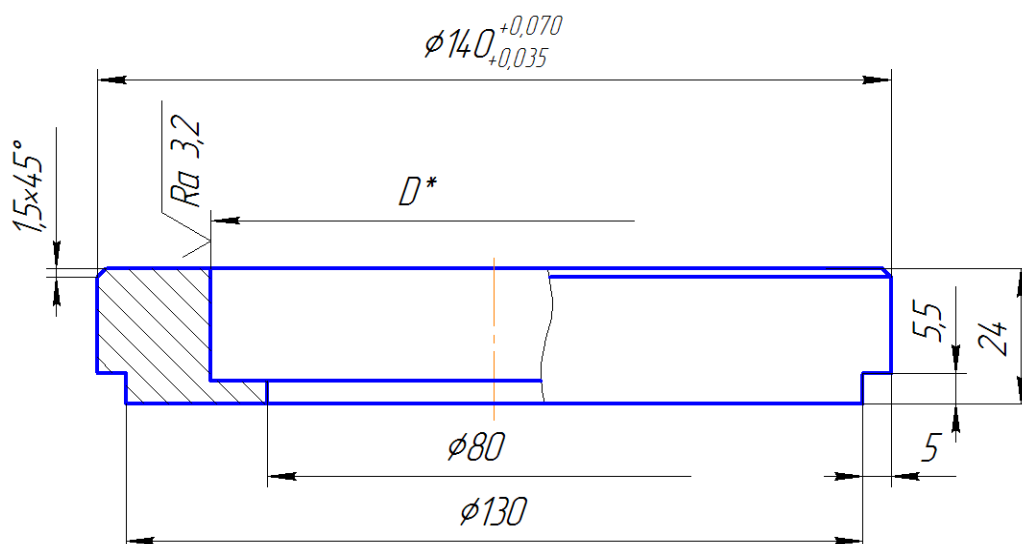
Рисунок 3.13 – Подшипниковый щит вибратора

Изменение зазоров в восстанавливаемом соединении подшипников обеспечивали растачиванием диаметра посадочной поверхности чугунного кольца D* (рисунок 3.14).

Посадочное отверстие под подшипник в щите зачищали до металлического блеска шлифовальной шкуркой Э5М1А №16. Затем обработанную поверхность обезжировали ацетоном с последующим просушиванием в течение 10 мин.

Далее на поверхность отверстия кистью №4 наносили послойно покрытие из раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 необходимой толщины. Затем

подшипниковые щиты с полимерным покрытием подвергали термической обработке на оптимальном режиме в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3. После термической обработки покрытия кондиционировали в течение 16 ч при стандартной температуре.



D* – диаметр сопрягаемой поверхности в зависимости от зазора
в восстанавливаемом соединении

Рисунок 3.14 – Кольцо чугунное

Сборку подшипниковых узлов осуществляли запрессовкой вала ротора с подшипниками 209 в щиты с покрытием ПКМ на основе эластомера Ф-40 .

Испытания проводили при циклической радиальной нагрузке на подшипниковые узлы $P = 20$ кН (знакопеременный симметричный цикл), которую задавали изменением положения дебалансов. Частота вращения ротора вибратора составляла 3000 мин^{-1} . За счет использования счетчика, который соединяли с валом стенда фиксировали количество циклов нагружения.

Критерием долговечности было принято время наработки подшипникового соединения до начала сдвига наружного кольца подшипника в посадочном отверстии щита, что фиксировали смещением рисок, отмеченных краской на торцах де-

талей неподвижного соединения. Если в течение 330 ч работы стенда ($5,94 \cdot 10^7$ циклов нагружения) сдвига наружного кольца подшипника в посадочном отверстии щита замечено не было, испытания прекращали и данную толщину полимерного покрытия принимали за максимально допустимую при восстановлении.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Исследование физических свойств растворов композиций на основе эластомера Ф-40

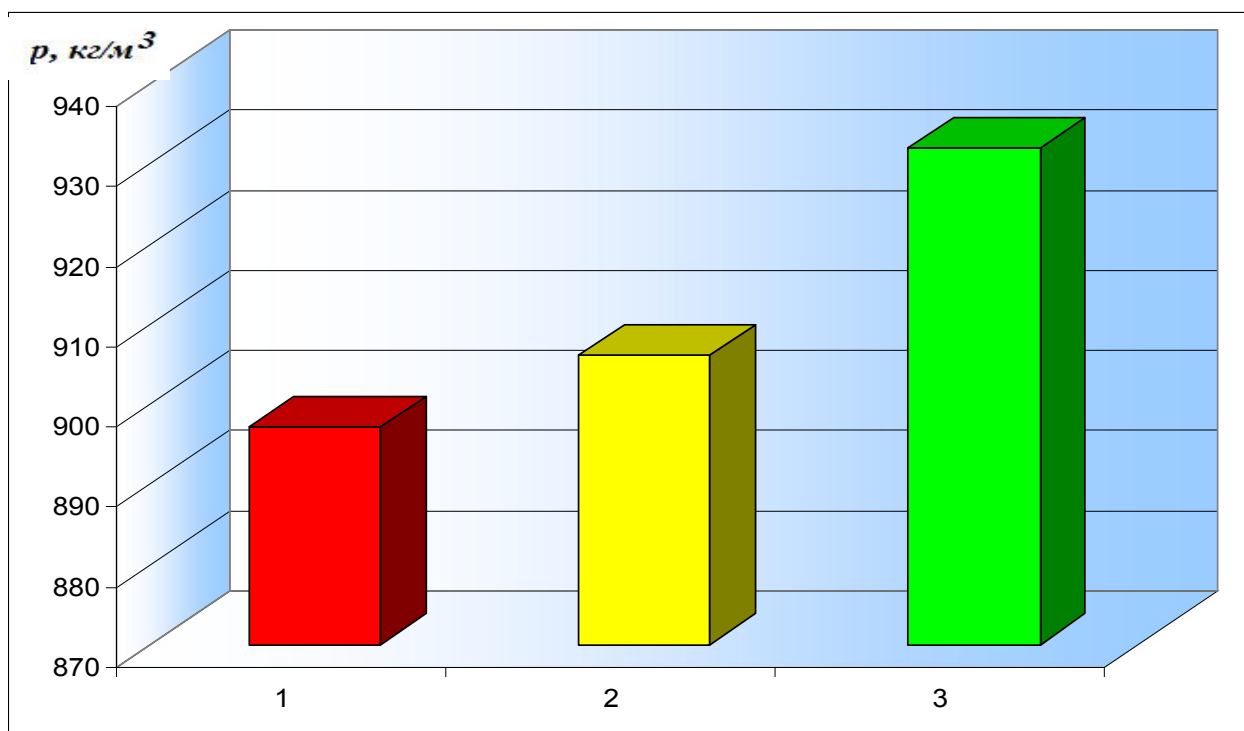
В настоящей работе исследовали физические свойства модификаций композиции на основе эластомера Ф-40:

- 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., алюминиевый порошок ПАП-1 – 16 масс.ч., бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 масс.ч.;
- состав №3: эластомер Ф-40 100 масс.ч., алюминиевый порошок ПАП-1 – 25 масс.ч., бронзовый порошок БПП-1 – 2,6 масс.ч.

4.1.1 Исследование плотности растворов композиций на основе эластомера Ф-40

Исследования показали, что с увеличением концентрации металлических наполнителей плотность раствора ПКМ увеличивается (рисунок 4.1). 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 (5,6 масс.ч. наполнителей на 100 масс.ч. раствора эластомера). В составе №2 содержание наполнителей в 3,18 раза выше, чем в составе №1 (17,8 масс.ч. наполнителей на 100 масс.ч. раствора эластомера), и соответственно плотность больше $\rho = 906,15 \text{ кг/м}^3$. Состав №3 имеет наибольшую долю металлических наполнителей в полимерной матрице (27,6 масс.ч. наполнителей на 100 масс.ч. раствора эластомера), что в

4,93 раза выше, чем в составе №1 и в 1,55 раза выше, чем в составе №2. Поэтому плотность состава №3 максимальная $\rho = 931,95 \text{ кг/м}^3$.



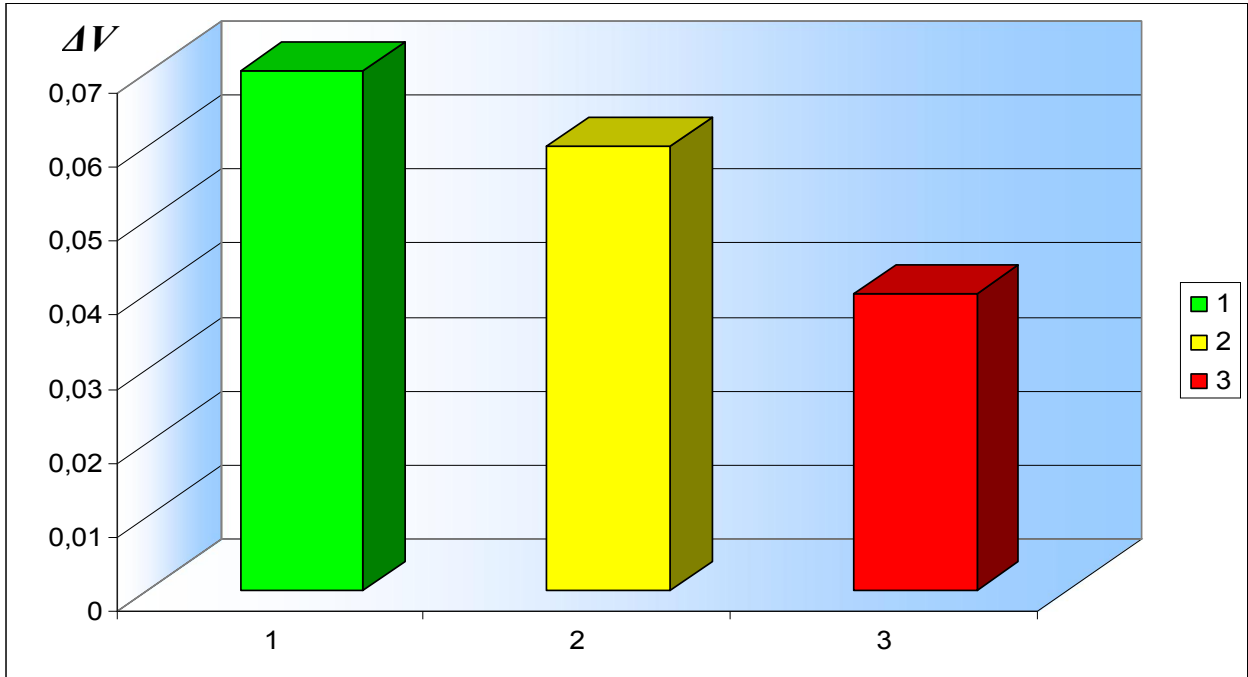
1 – состав №1; 2 – состав №2; 3 – состав №3

Рисунок 4.1 – Плотность растворов модификаций ПКМ на основе эластомера Ф-40

4.1.2 Исследование сжимаемости раствора

На следующем этапе экспериментальных исследований изучали адиабатическую сжимаемость растворов модификаций ПКМ на основе эластомера Ф-40. Адиабатическая сжимаемость раствора ПКМ с увеличением концентрации металлических наполнителей снижается до 1,75 раза, от 0,07 до 0,04 (рисунок 4.2). Максимальное изменение объема жидкости $\Delta V = 0,07$ при повышении давления наблюдается в модификации эластомера Ф-40 с составом №1, т.к. доля жидкости (ацетона) в нем на единицу объема наибольшая. В составе №2 содержание наполнителей в 3,18 раза выше, чем в составе №1, и соответственно уменьшается изме-

нение объема жидкости до $\Delta V = 0,06$. Состав №3 имеет наибольшую концентрацию металлических наполнителей, в 4,93 раза выше, чем в составе №1 и в 1,55 раза выше, чем в составе №2 и, соответственно наименьшую долю ацетона на единицу объема, поэтому изменение объема жидкости минимальное $\Delta V = 0,04$.



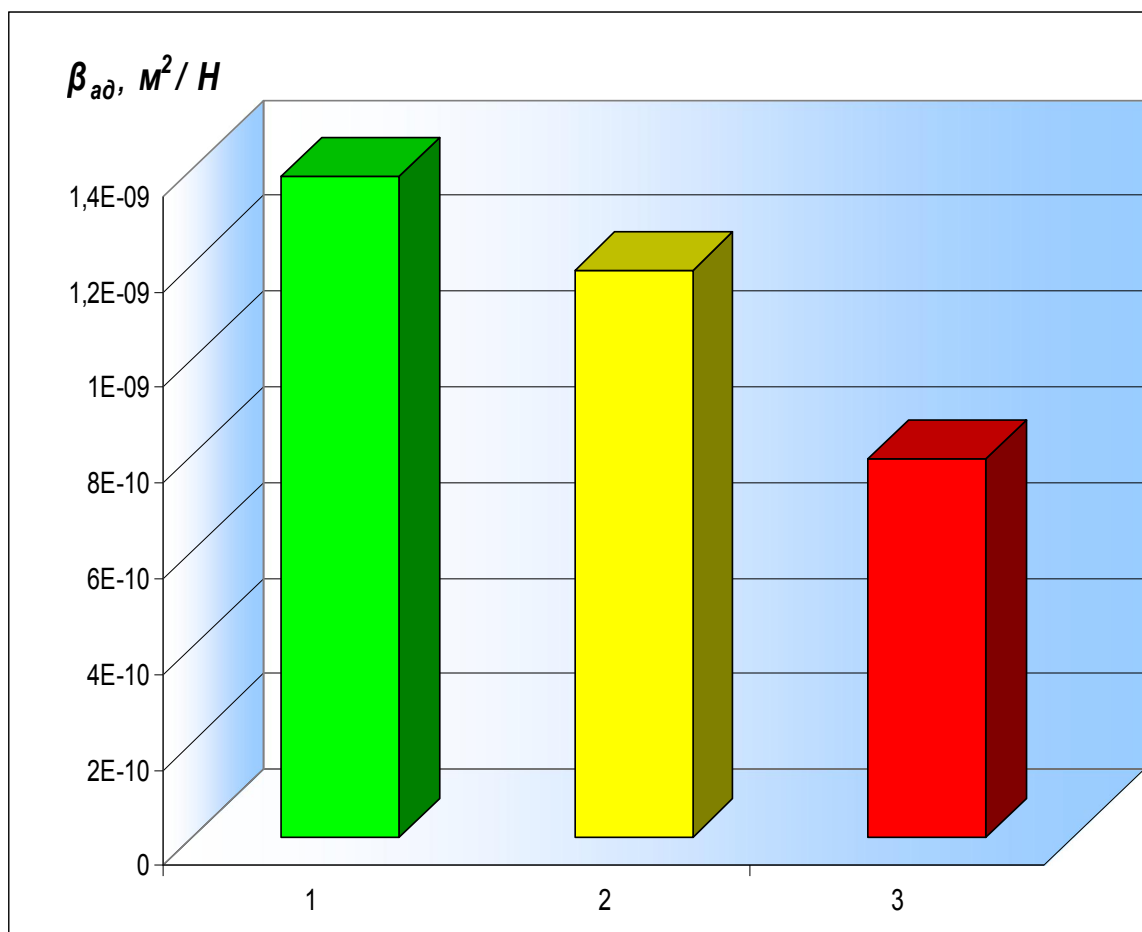
1 – состав №1; 2 – состав №2; 3 – состав №3

Рисунок 4.2 – Адиабатическая сжимаемость растворов модификаций ПКМ на основе эластомера Ф-40

Значения коэффициента адиабатической сжимаемости рассчитали по формуле (3.1). Из формулы (3.1) следует, что чем больше значения ΔV , тем больше коэффициент адиабатической сжимаемости $\beta_{ад}$. Поэтому рисунок 4.3 подобен рисунку 4.2. Коэффициент адиабатической сжимаемости с увеличением концентрации металлических наполнителей уменьшается до 1,75 раза, от $1,38 \cdot 10^{-9}$ до $7,902 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}$ (рисунок 4.3).

На рисунке 4.4 представлены значения скорости распространения звуковых

волн С в растворах исследуемых составов ПКМ на основе эластомера Ф-40



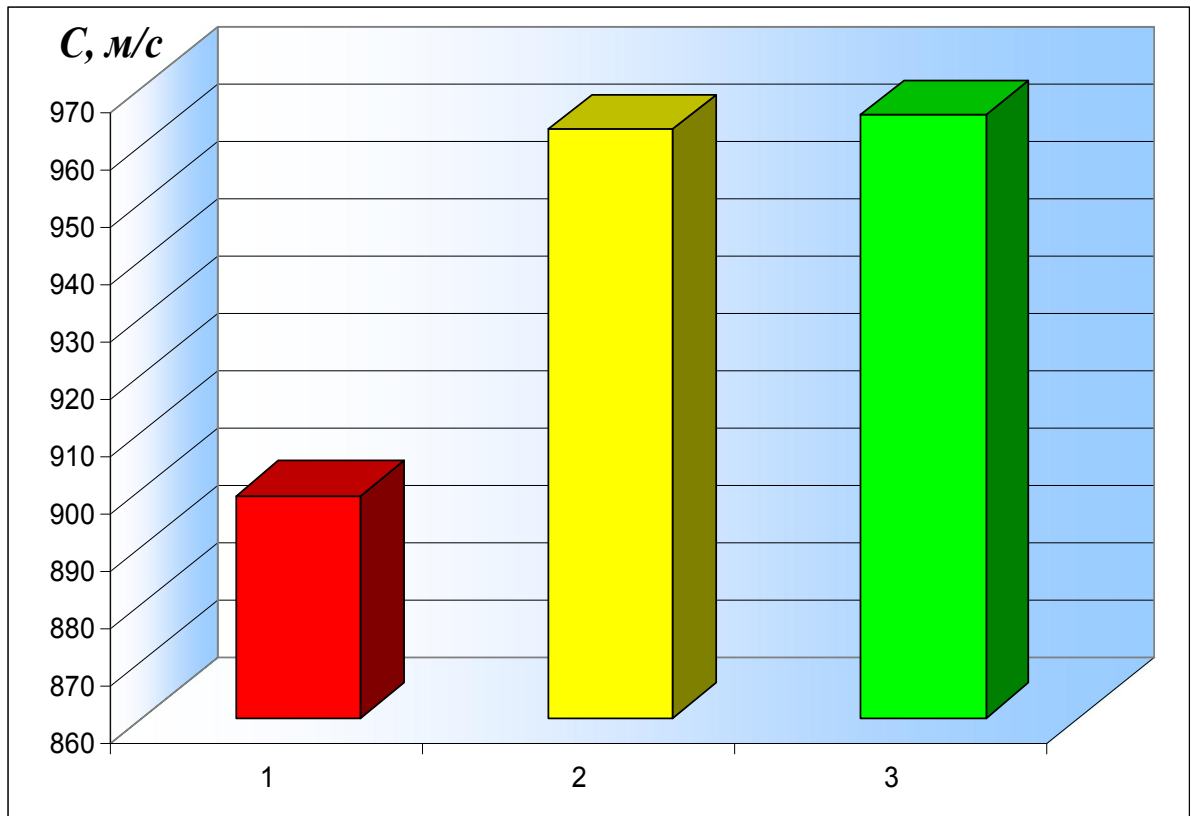
1 – состав №1; 2 – состав №2; 3 – состав №3

Рисунок 4.3 – Коэффициент адиабатической сжимаемости растворов модификаций ПКМ на основе эластомера Ф-40

В составе №1 скорость звука минимальная $C = 899$ м/с. Это объясняется минимальным содержанием металлических наполнителей и максимальной концентрацией жидкости (ацетона) в композиции, а также следует из формулы (2.17): чем меньше значения коэффициента адиабатической сжимаемости $\beta_{ад}$, тем выше скорость звука C в растворе ПКМ. Поэтому в составе №2 скорость звука выше на 64 м/с ($C = 963$ м/с), по сравнению с составом №1.

В составе №3 скорость звука максимальная $C = 965$ м/с. Увеличение состав-

ляет 2 и 66 м/с по сравнению с составами №1 и №2 соответственно.



1 – состав №1; 2 – состав №2; 3 – состав №3

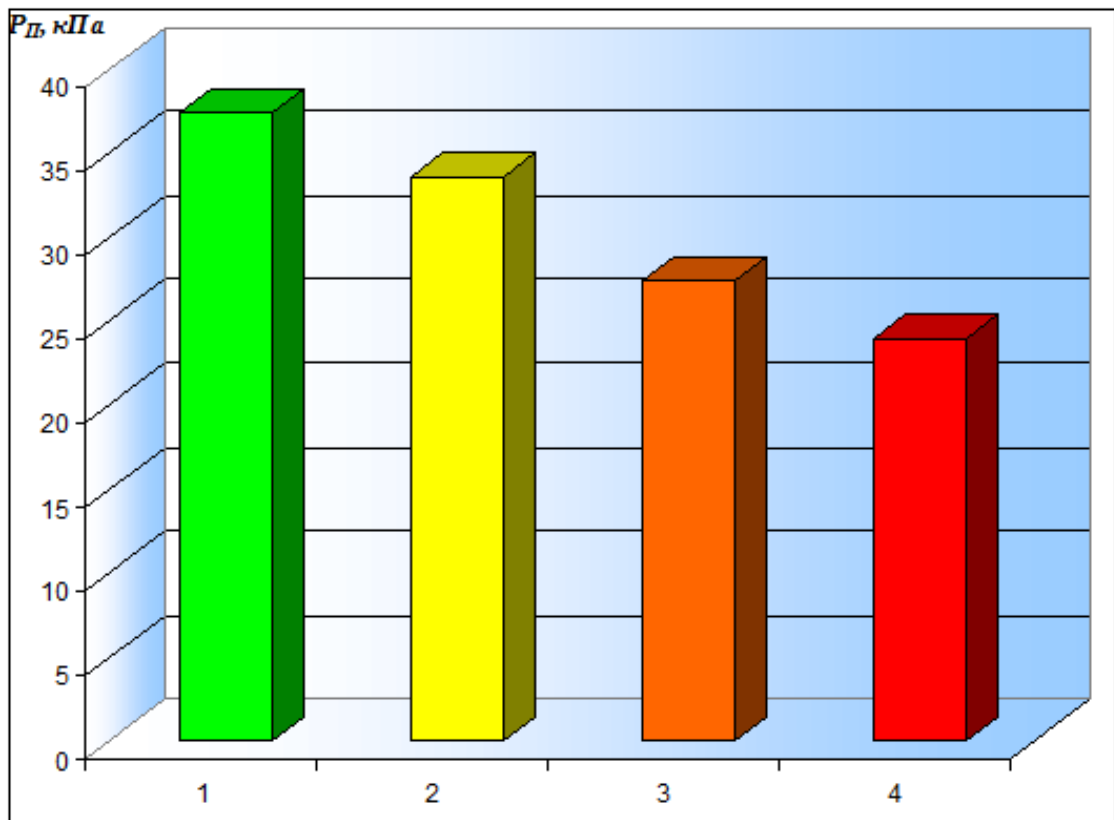
Рисунок 4.4 – Значения скорости звука C в растворах модификаций ПКМ на основе эластомера Ф-40

4.1.3 Исследование давления насыщенного пара раствора эластомера Ф-40 и его модификаций

На следующем этапе экспериментальных исследований изучали давление насыщенного пара $P_{\text{п}}$ раствора эластомера Ф-40 и его модификаций. На рисунке 4.5 представлены результаты экспериментальных исследований по определению давления насыщенного пара в растворе эластомера Ф-40 и его модификаций.

Как следует из рисунка 4.5, максимальное давление насыщенного пара имеет место у раствора эластомера Ф-40, $P_{\text{п}} = 37,4$ кПа. В наполненных растворах

эластомера Ф-40 давление насыщенного пара уменьшается. В составе №1 давление насыщенного пара $P_{\text{П}} = 33,6$ кПа, что в 1,11 раза ниже, чем у раствора эластомера Ф-40. В составе №2 давление насыщенного пара $P_{\text{П}} = 27,4$ кПа, что в 1,36 раза ниже, чем у раствора эластомера Ф-40 и 1,23 раза ниже состава №1. Минимальное давление насыщенного пара имеет место в составе №3, $P_{\text{П}} = 23,9$ кПа, что в 1,56 раза ниже, чем у раствора эластомера Ф-40, 1,41 раза ниже состава №1 и 1,15 раза ниже чем, у состава №2 [109].



1 – раствор эластомера Ф-40; 2 – состав №1; 3 – состав №2; 4 – состав №3

Рисунок 4.5 – Давление насыщенного пара $P_{\text{П}}$ раствора эластомера Ф-40 и его модификаций

Снижение давления насыщенного пара в растворах ПКМ на основе эластомера можно объяснить тем, что при растворении в жидкости какого-либо вещества давление насыщенного пара этой жидкости понижается [110].

Согласно первого закона Рауля: относительное понижение давления насыщенного пара растворителя над раствором равно молярной доле растворенного вещества [111]

$$N_2 = \frac{p_0 - p}{p_0}, \quad (4.1)$$

где N_2 – молярная доля растворенного вещества; p_0 и p – давление насыщенного пара растворителя над чистым растворителем и раствором соответственно.

Поэтому с увеличением содержания металлических частиц наполнителей в растворе эластомера Ф-40, увеличивается их молярная доля, содержание ацетона в единице объема раствора ПКМ уменьшается, а давление насыщенного пара раствора ПКМ снижается.

В соответствии с формулами (2.19) с уменьшением коэффициента адиабатической сжимаемости β_{ad} , и (2.16) с увеличением скорости звука C амплитуда звукового давления P_A повышается. При фиксированном гидростатическом давлении P_0 , в соответствии с формулой (2.12), повышение амплитуды звукового давления P_A увеличивает критерий эрозионной активности χ , т.е. повышается эффективность диспергирования. Однако следует, помнить, что наилучшие деформационно-прочностные и адгезионные свойства ПКМ формируются в первую очередь за счет оптимального состава компонентов ПКМ, а ультразвуковое диспергирование улучшает вышеуказанные свойства ПКМ по сравнению с ручным смешением. Поэтому в дальнейших экспериментальных исследованиях режимных параметров УЗО, процесса дегазации и др. исследовали ПКМ с оптимальным составом (состав №2), указанным в патенте №2537864 [91].

Выводы

1 Исследованы физические свойства растворов ПКМ на основе эластомера Ф-40. С повышением концентрации дисперсных частиц металличе-

ских 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.

2 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 следует, помнить, 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 в дальнейших экспериментальных исследованиях режимных параметров УЗО, процесса дегазации и др. следует исследовать ПКМ с оптимальным составом компонентов [91].

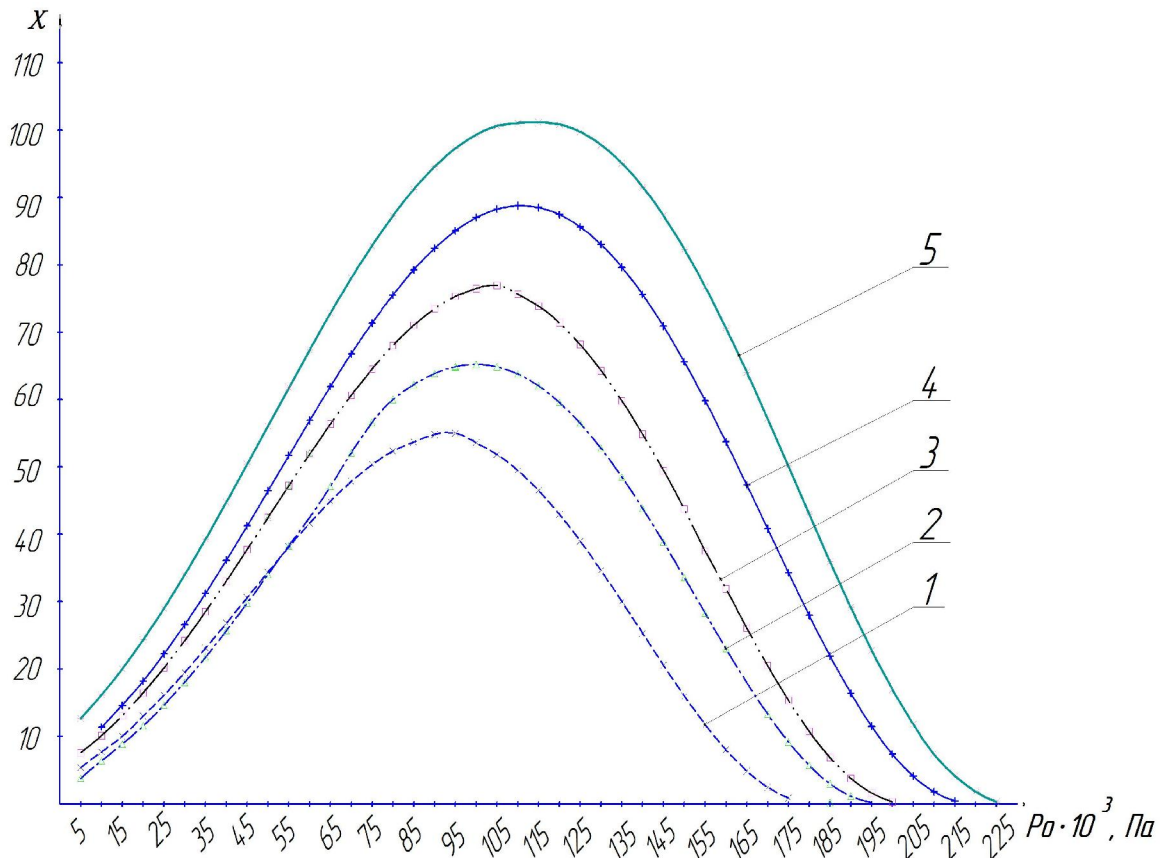
4.2 Исследование режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования раствора композиции на основе эластомера Ф-40

Исследование физических свойств раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 позволило рассчитать по формуле (2.19.) значения звукового давления P_A , а затем по формуле (2.12) значения критерия эрозионной активности χ . На рисунке 4.6. показаны зависимости критерия эрозионной активности χ от гидростатического давления P_0 .

Зависимости при фиксированной мощности W ультразвуковой обработки раствора ПКМ имеют экстремум в виде максимума. При минимальной мощности $W = 40$ Вт зависимость 1 имеет экстремум в виде максимума критерия эро-

зионной активности $\chi = 55,054$ при значении гидростатического давления $P_0 = 95000$ Па.

С увеличением мощности до $W = 50$ Вт зависимость 3 имеет экстремум в виде максимума критерия эрозионной активности $\chi = 76,948$ при значении гидростатического давления $P_0 = 105000$ Па. Критерий эрозионной активности χ по сравнению с мощностью УЗО $W = 40$ Вт увеличился в 1,4 раза.



1 – при мощности озвучивания $W = 40$ Вт; 2 – $W = 44,78$ Вт;

3 – $W = 50$ Вт; 4 – $W = 55$ Вт; 5 – $W = 60$ Вт

Рисунок 4.6 – Зависимость критерия эрозионной активности χ от гидростатического давления P_0

При мощности $W = 55$ Вт зависимость 4 имеет экстремум в виде максимума критерия эрозионной активности $\chi = 88,764$ при значении гидростатического давления $P_0 = 110000$ Па. Критерий эрозионной активности χ по сравнению с мощно-

стью УЗО $W = 40$ Вт увеличился в 1,61 раза, мощностью $W = 50$ Вт – 1,15 раза.

При максимальной мощности $W = 60$ Вт зависимость 5 имеет экстремум в виде максимума критерия эрозионной активности $\chi = 101,148$ при значении гидростатического давления $P_0 = 115000$ Па. Критерий эрозионной активности χ при максимальной мощности УЗО имеет максимальное значение и, по сравнению с мощностью УЗО $W = 40$ Вт, увеличился в 1,84 раза, мощностью $W = 50$ Вт – 1,31 раза, мощностью $W = 55$ Вт – 1,14 раза.

Как следует из рисунка 4.6, максимумы критерия 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 разделе 2.2 упоминалось, что в техническом плане гораздо проще варьировать амплитудой звукового давления, чем гидростатическим давлением. Для этого достаточно оснастить ультразвуковую ванну регулятором мощности, тогда как в последнем случае необходимы вакуумная камера или камера с компрессором, что усложняет и удорожает технологию УЗО. Поэтому с точки зрения экономической эффективности далее исследовали влияние мощности УЗО на критерий эрозионной активности растворов ПКМ при гидростатическом давлении равном атмосферному, $P_0 = 100000$ Па. Из зависимости 4 следует, что 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.

Отсюда следует важный вывод: для раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 с плотностью $\rho = 906,15$ кг/м³ и коэффициентом адиабатической сжимаемости жидкости $\beta_{ad} = 1,185 \cdot 10^{-9}$ м²/Н, при гидростатическом давлении равном атмосферному $P_0 = 100000$ Па, минимальной допускаемой мощностью при которой будет обеспечиваться эффективное диспергирование материала является мощность УЗО $W = 45$ Вт.

На рисунке 4.7 представлена зависимость звукового давления P_A от мощности УЗО W .

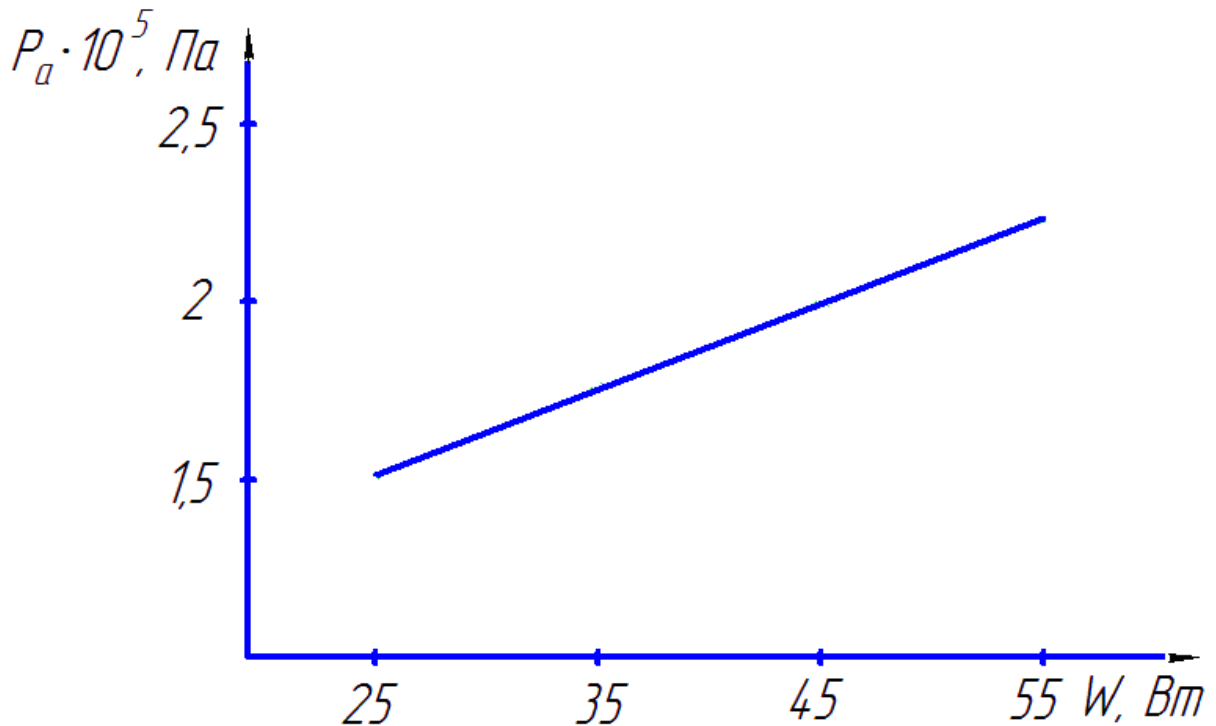


Рисунок 4.7 – Зависимость звукового давления P_A от мощности ультразвуковой обработки W

Зависимость носит линейный характер. Значения звукового давления $P_A \geq 45 \text{ Вт}$ входят в интервал значений по условию (2.15), обеспечивающему эффективное диспергирование раствора ПКМ.

На рисунке 4.8 представлена зависимость критерия эрозионной активности χ от мощности УЗО W . Как следует из рисунка 4.8, чем больше мощность ультразвуковой обработки W , тем выше эффективность диспергирования раствора ПКМ. Необходимо отметить, что эта зависимость справедлива только при соблюдении условия (2.15). В противном случае будут образовываться полости 1 или 2 группы, и эффективность диспергирования будет низкой [60]. С учетом того, что максимальная мощность ультразвуковой ванны "GRAD 0,5 HOME STYLE" составляет $W = 55 \text{ Вт}$, это значение мощности приняли в качестве рекомендуемой

при УЗО раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40.

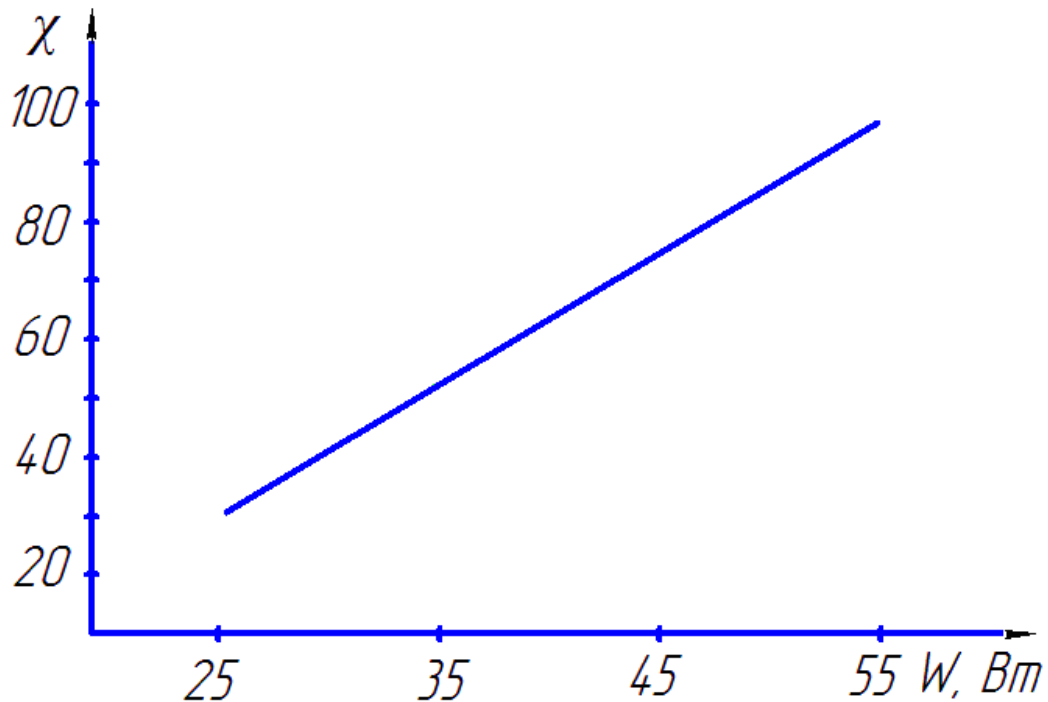


Рисунок 4.8 – Зависимость критерия эрозионной активности χ раствора ПКМ на основе Ф-40 от мощности ультразвукового излучения W

Исследование качества смешения раствора композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке для различной длительности ультразвукового диспергирования проводили методом капиллярной вискозиметрии по ГОСТ 18249-72 [112].

Эксперимент показал, что вязкость раствора ПКМ с увеличением времени УЗО повышается от 0,22 до 0,6 $Па \cdot с$ (рисунок 4.9).

Максимального значения вязкости $\eta = 0,6 \text{ Па} \cdot \text{с}$ 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. Качество смешения, т.е. равномерность распределения наполнителя в полимерной матрице, в работе [54] оценивают по вязкости ПКМ.

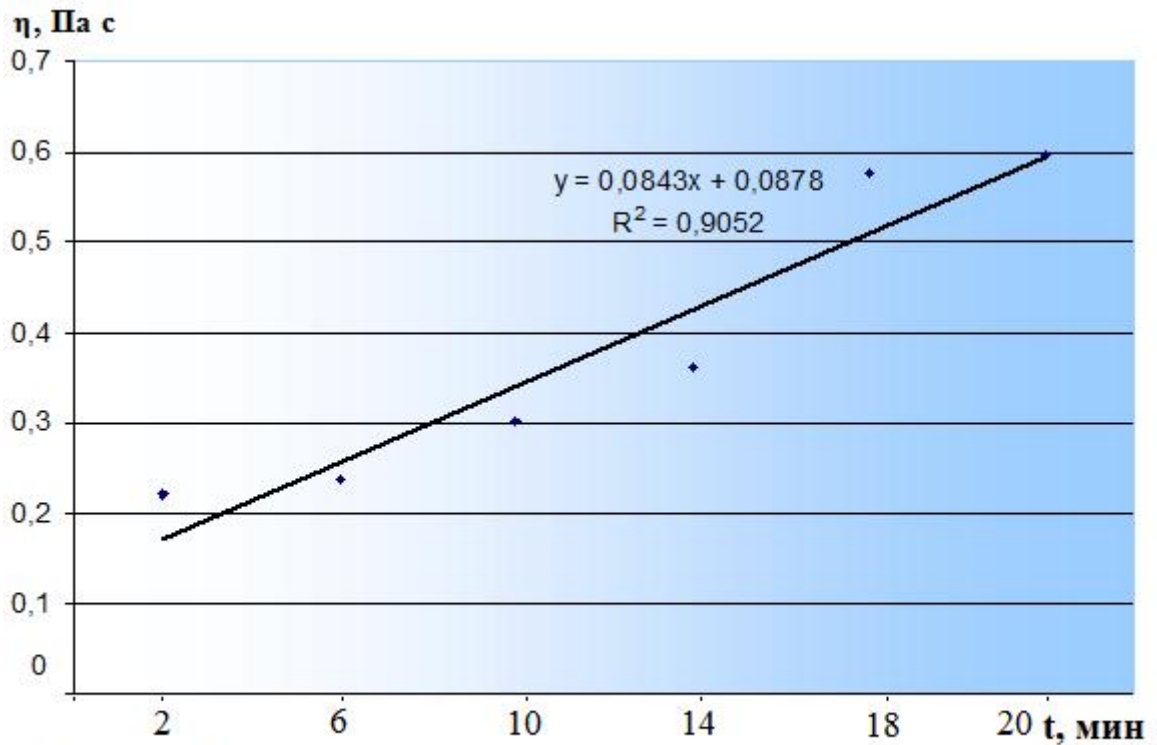


Рисунок 4.9 - Зависимость вязкости η раствора композиции на основе эластомера Ф-40 от времени ультразвуковой обработки t

Чем выше вязкость, тем соответственно более равномерно распределен наполнитель по объему полимерной матрицы. На рисунке 4.10 представлена зависимость вязкости раствора полимерного композита на основе эластомера Ф-40 от его уровня в ультразвуковой ванне, которая представлена в долях от фокуса преобразователя N . С увеличением уровня раствора полимерного композиционного материала на основе эластомера Ф-40 в ультразвуковой ванне вязкость композиции 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.

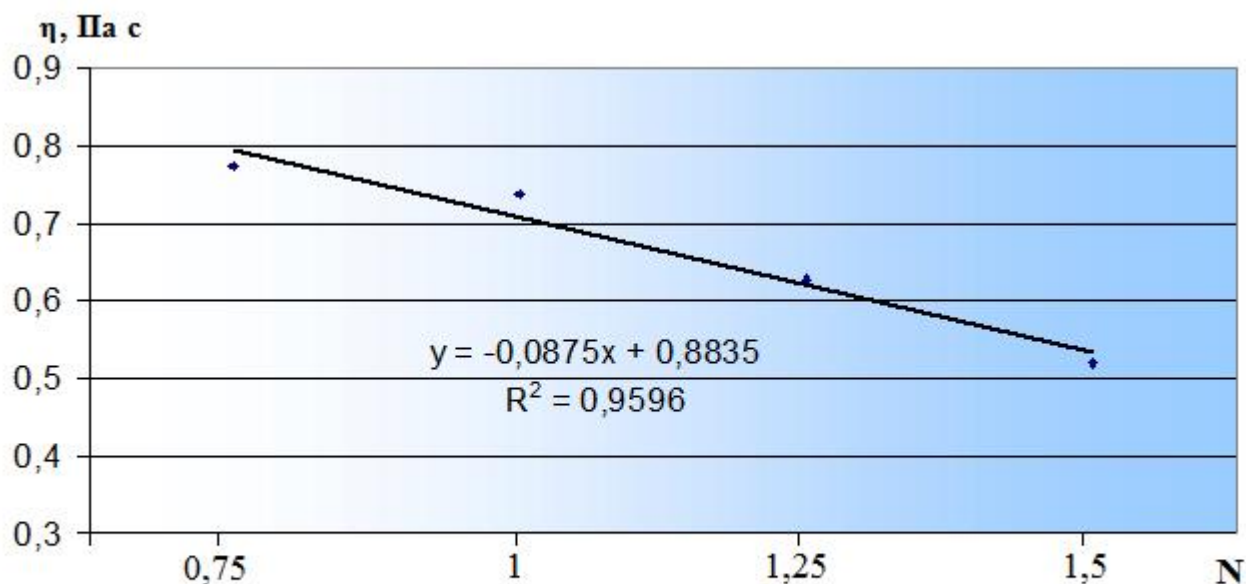


Рисунок 4.10 - Зависимость вязкости η от уровня раствора ПКМ в ультразвуковой ванне в долях фокуса преобразователя N

Выводы

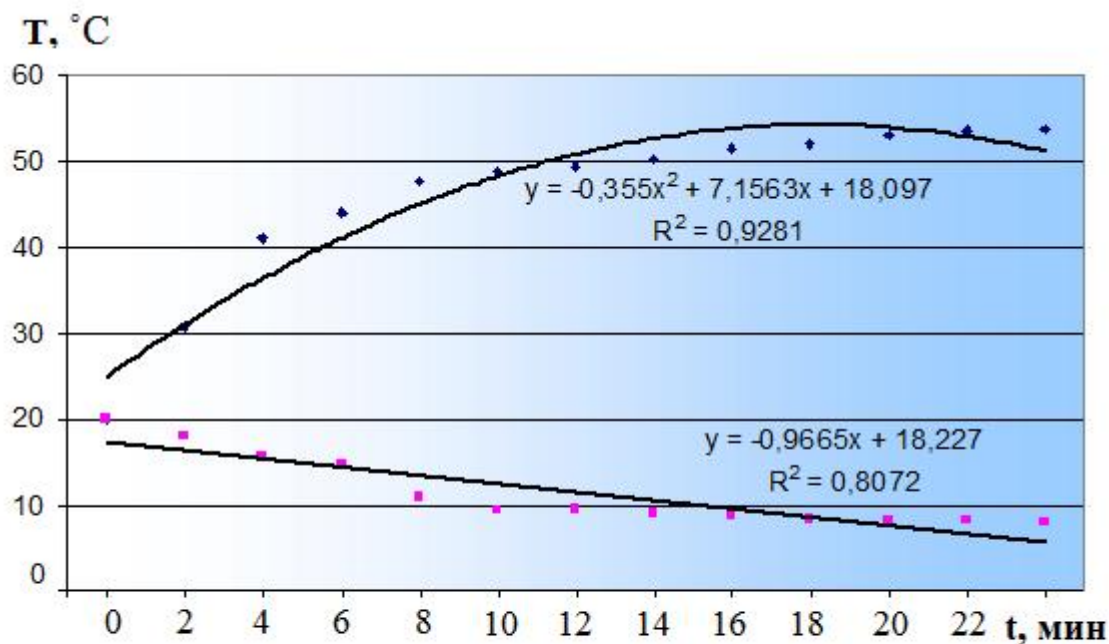
1. Экспериментально подтверждена корректность условий (2.15) и (2.22), обеспечивающих эффективное ультразвуковое диспергирование растворов ПКМ на основе эластомеров.

2. Определены технологические параметры эффективного ультразвукового диспергирования раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40: мощность УЗО $W = 55$ Вт; время УЗО $t = 20$ мин (0,33 ч); уровень раствора ПКМ в ультразвуковой ванне $h \leq 14$ мм.

4.4 Исследование дегазации раствора композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке

На рисунке 4.11 показана зависимость температуры T раствора полимерной

композиции эластомера Ф-40 от времени смешения t .



1 - ручное механическое смешение; 2 - УЗ обработка

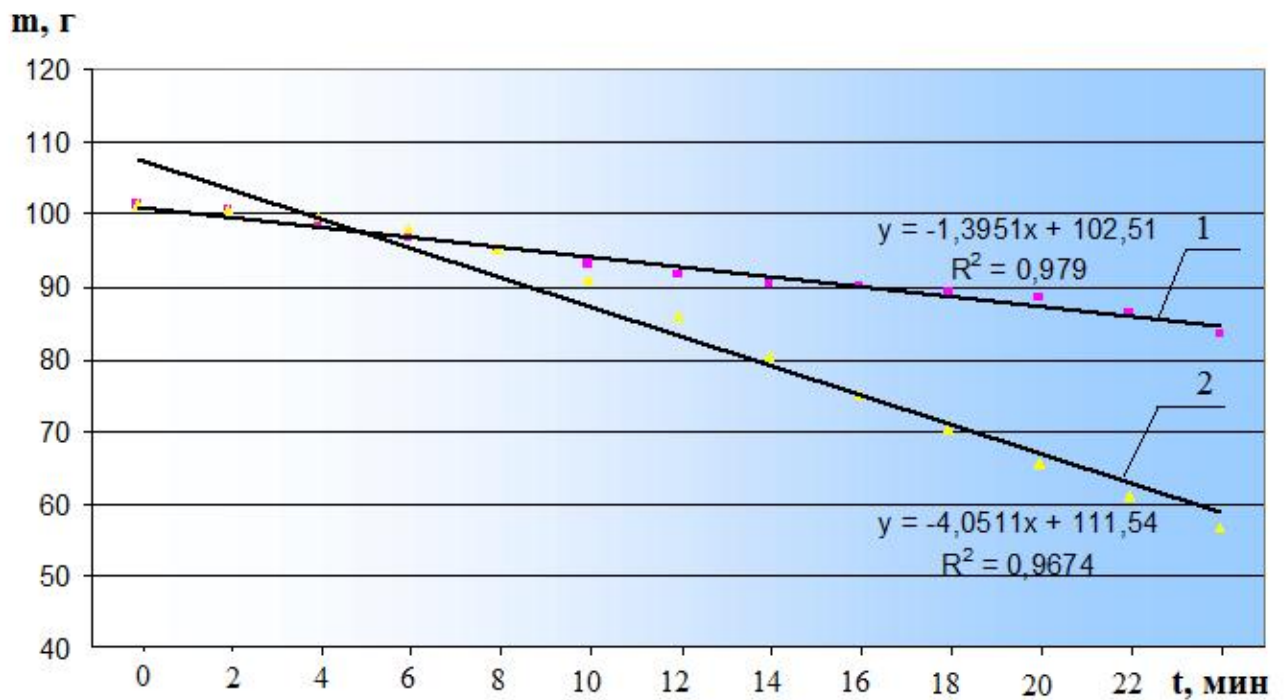
Рисунок 4.11 - Зависимость температуры раствора полимерной композиции эластомера Ф-40 T от времени смешения t

Как следует из рисунка 4.11 при ручном механическом смешении температура раствора полимерной композиции эластомера Ф-40 с течением времени снижается. В первые 8 мин интенсивность снижения температуры раствора наиболее высокая, снижение происходит по нелинейной зависимости. Температура раствора снижается от 20 до 9,1⁰С. Затем интенсивность снижения температуры раствора стабилизируется. Снижение в течение 16 мин происходит по линейной зависимости от 9,1 до 8⁰С. Понижение температуры раствора полимерной композиции эластомера Ф-40 при ручном смешении обусловлено, по всей видимости, испарением ацетона и возникшим в этой связи холодильным эффектом.

Совершенно противоположная картина наблюдается при ультразвуковой обработке раствора полимерной композиции эластомера Ф-40. Как и предполагалось в разделе 2.3, при УЗО температура раствора эластомера Ф-40 повышается.

Наиболее интенсивный рост температуры от 20 до 48,8⁰С наблюдается в первые 10 мин УЗО. Повышение температуры происходит по нелинейной зависимости. Затем интенсивность повышения температуры раствора стабилизируется. Повышение в течение 14 мин происходит по линейной зависимости от 48,8 до 53,8⁰С. Повышение температуры раствора полимерной композиции эластомера Ф-40 при УЗО обусловлено причинами, описанными в разделе 2.3 настоящей работы. При УЗО раствора ПКМ, благодаря кавитации, повышается его температура и уменьшается значение квазиравновесной концентрации C_p^l , т.е. снижается концентрации пузырьков газа в растворе по сравнению со стандартной температурой.

На рисунке 4.12 показаны зависимости остаточной массы m раствора полимерной композиции эластомера Ф-40 от времени смешения t .



1 - ручное механическое смешение; 2 - УЗ обработка

Рисунок 4.12 - Зависимость остаточной массы m раствора полимерной композиции эластомера Ф-40 от времени смешения t

Чем большее количество ацетона испарилось, тем меньше остаточная масса раствора полимерной композиции.

Если в первые 4...6 мин смешения, испарение ацетона происходит примерно одинаково, то в последующие 18...20 мин разница существенная. Остаточная масса раствора полимерной композиции 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 полимерной композиции эластомера Ф-40, что подтверждает корректность теоретических положений [113].

Выводы

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

2. 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.

4.5 Оптимизация режима термической обработки пленок композиции на основе эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки

В патенте №2537864 [91] исследована прочность пленок эластомера Ф-40 и композиции на его основе с оптимальным составом №2 (рисунок 4.13). Введение дисперсных металлических частиц бронзового порошка БПП-1 и алюминиевой пудры ПАП-1 увеличило прочность пленок до 12,22 МПа, что на 27,5 % превы-

шает прочность пленок, выполненных прототипом (9,58 МПа). Исследования в разделе 4.4 показали, что количество испарившегося ацетона при УЗО в 2,5 раза больше, чем при ручном смешении раствора ПКМ эластомера Ф-40, что должно снизить пористость и повысить качество его полимерных покрытий. Очевидно, что такое значительное уменьшение количества остаточного растворителя в полимерных покрытиях потребует меньших энергозатрат при термической обработке последних.

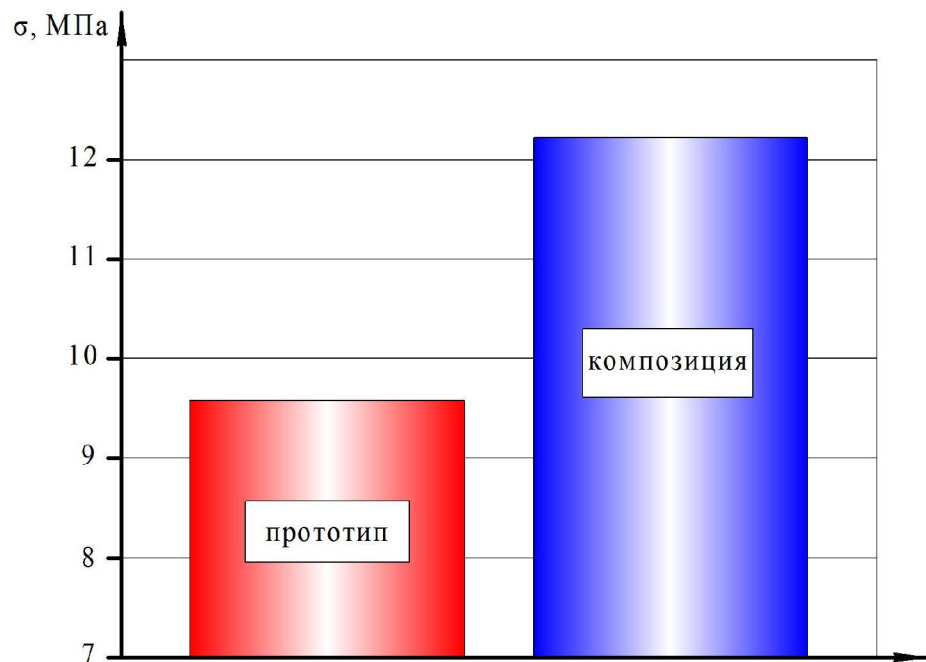


Рисунок 4.13 – Прочность пленок σ прототипа (эластомер Ф-40) и композиции на его основе [91]

Цель настоящих исследований заключалась в исследовании влияния температуры и времени отверждения на прочность пленок полимерной композиции на основе эластомера Ф-40 и определении оптимального режима термической обработки материала. Для этого был реализован многофакторный эксперимент по симметричному композиционному плану B_2 [114].

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.

В таблице 4.1 представлены уровни и интервалы варьирования факторов.

Таблица 4.1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервал варьирования фактора ΔX_i
		нижний $X_{ин}$	нулевой X_{i0}	верхний $X_{ив}$	
Температура, °С	x_1	100	120	140	20
Время, ч	x_2	2	2,5	3	0,5

В таблице 4.2 представлена матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 4.2 – Матрица плана B_2 и результаты активного эксперимента

№п/п	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{y}_g
1	-1	-1	11,06	11,052	10,833	10,98
2	+1	-1	11,9	11,776	11,857	11,846
3	-1	+1	11,24	11,086	11,144	11,156
4	+1	+1	12,65	12,593	12,466	12,57
5	-1	0	11,8	11,845	11,546	11,733
6	+1	0	12,88	13,007	12,926	12,94
7	0	-1	13,94	13,8	13,835	13,856
8	0	+1	14,29	14,421	14,41	14,373

Регрессионный анализ результатов активного эксперимента по плану B_2

осуществляли в соответствии с методикой [103].

Так как в ходе эксперимента реализованы равночисленные опыты проверку однородности дисперсий выполняли по критерию Кохрена.

Расчет дисперсий среднего значения

$$S_1^2 = \frac{(11,06 - 10,98)^2 + (11,05 - 10,98)^2 + (10,83 - 10,98)^2}{3 - 1} = 0,0166$$

$$S_2^2 = \frac{(11,9 - 11,846)^2 + (11,78 - 11,846)^2 + (11,86 - 11,846)^2}{3 - 1} = 0,004$$

$$S_3^2 = \frac{(11,24 - 11,156)^2 + (11,09 - 11,156)^2 + (11,14 - 11,156)^2}{3 - 1} = 0,0061$$

$$S_4^2 = \frac{(12,65 - 12,57)^2 + (12,59 - 12,57)^2 + (12,47 - 12,57)^2}{3 - 1} = 0,0096$$

$$S_5^2 = \frac{(11,8 - 11,733)^2 + (11,85 - 11,733)^2 + (11,55 - 11,733)^2}{3 - 1} = 0,0269$$

$$S_6^2 = \frac{(12,88 - 12,94)^2 + (13,01 - 12,94)^2 + (12,93 - 12,94)^2}{3 - 1} = 0,0041$$

$$S_7^2 = \frac{(13,94 - 13,856)^2 + (13,8 - 13,856)^2 + (13,83 - 13,856)^2}{3 - 1} = 0,0053$$

$$S_8^2 = \frac{(14,29 - 14,373)^2 + (14,42 - 14,373)^2 + (14,41 - 14,373)^2}{3 - 1} = 0,0053$$

$$\sum S_g^2 = 0,004 + 2,4013 + 0,0061 + 0,0096 + 0,0269 + 0,0041 + 0,0053 + 0,0053 = 0,08$$

Коэффициент Кохрена, определенный расчетным путем

$$G_p = \frac{0,0269}{0,08} = 0,3363$$

Количество степеней свободы в числителе $\nu_1 = 3 - 1 = 2$, знаменателе $\nu_2 = N = 8$, где N - количество опытов в матрице.

Уровень значимости принят $P = 0,05$. Коэффициент Кохрена, определенный по таблице составляет $\sigma_T = 0,5157$.

$$\sigma_p = 0,3363 < \sigma_T = 0,5157.$$

Гипотеза об однородности и дисперсии принимается, так как экспериментальные данные не отвергают гипотезу ($\sigma_p < \sigma_T$).

Дисперсия воспроизводимости эксперимента

$$S_e^2 = \frac{0,08}{8} = 0,01$$

Расчет оценок коэффициентов регрессии

Значения вспомогательных коэффициентов

$$k_1(n) = 1,25; k_2(n) = 0,75; k_3(n) = 0,16667; k_4(n) = 0,25; k_5(n) = 0,5; k_6(n) = 0,25; k_7(n) = 0,75.$$

Значения коэффициентов регрессии

$$b_0 = 1,25(10,98 + 11,846 + 11,156 + 12,57 + 11,733 + 12,94 + 13,856 + 14,373) - 0,75(71,255 + 74,78) = +14,81$$

$$b_1 = 0,16667(-10,98 + 11,846 - 11,156 + 12,57 - 11,733 + 12,94) = +0,58$$

$$b_2 = 0,16667(-10,98 - 11,846 + 11,156 + 12,57 - 13,856 + 14,373) = +0,236$$

$$b_{12} = 0,25(10,98 - 11,846 - 11,156 + 12,57) = -0,136$$

$$b_{11} = 0,5 \cdot 71,255 + 0,25(71,255 + 74,78) - 0,75 \cdot 64,34 = -2,476$$

$$b_{22} = 0,5 \cdot 74,78 + 0,25 \cdot (71,255 + 74,78) - 0,75 \cdot 64,34 = -0,698$$

$$b_0 = 14,81; b_1 = 0,58; b_2 = 0,236; b_{12} = -0,136; b_{11} = -2,476; b_{22} = -0,698$$

Расчет дисперсий оценок коэффициентов регрессии

$$S_{b_0}^2 = 1,25 \cdot \frac{0,01}{3} = 0,0042;$$

$$S_{b_1}^2 = S_{b_2}^2 = 0,16667 \cdot \frac{0,01}{3} = 0,0005;$$

$$S_{b_{12}}^2 = k_4 \cdot \frac{S_e^2}{m};$$

$$S_{b_{12}}^2 = 0,25 \cdot \frac{0,01}{3} = 0,0008;$$

$$S_{b_{11}}^2 = S_{b_{22}}^2 = 0,75 \cdot \frac{0,01}{3} = 0,0025;$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии

Для уровня значимости $P = 0,05$ и числа степеней свободы $\nu = 16$, критерий Стьюдента составляет $t_T = 2,12$.

После расчета значений доверительных интервалов получены следующие соотношения

$$\Delta b_0 = 0,0042 < b_0 = 14,81;$$

$$\Delta b_1 = \Delta b_2 = 0,0005 < b_1 = 0,58 \text{ и } < b_2 = 0,236;$$

$$\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 0,0008 < b_{11} = -2,476 \text{ и } < b_{22} = -0,698;$$

$$\Delta b_{12} = 0,0025 < b_{12} = 0,136.$$

Так как абсолютные значения коэффициентов регрессии превышают значения соответствующих доверительных интервалов, все коэффициенты регрессии признаны значимыми.

Уравнение регрессии в кодированных значениях

$$Y = 14,81 + 0,58 x_1 + 0,236 x_2 + 0,136 x_1 x_2 - 2,476 x_1^2 - 0,698 x_2^2$$

После раскодирования уравнения регрессии получено уравнение регрессии в натуральных единицах

$$Y = -92,356 - 0,00619 x_1 + 12,8 x_2 + 0,0136 x_1 x_2 - 0,00619 x_1^2 - 2,792 x_2^2$$

Расчетные значения отклика в точках плана

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 &= 10,956; \hat{y}_2 = 11,844; \hat{y}_3 = 11,156; \hat{y}_4 = 12,588; \\ \hat{y}_5 &= 11,754; \hat{y}_6 = 12,914; \hat{y}_7 = 13,876; \hat{y}_8 = 14,348. \end{aligned}$$

Выборочная дисперсия S^2 , интегрально оценивающая рассеивание \hat{Y}_g , по отношению к \bar{Y}_g

$$S^2 = \frac{(10,957 - 10,98)^2 + (12,592 - 12,57)^2 + (11,755 - 11,733)^2 + (12,917 - 12,94)^2 + (13,878 - 13,856)^2 + (14,351 - 14,373)^2}{8 - 6} = 0,0005$$

Проверка адекватности уравнения регрессии проведена по критерию Фишера.

Условие адекватности имеет вид $F_p < F_T$.

Табличное значение F - критерия для уровня значимости $P = 0,05$; числа степеней свободы: числителя $\nu_1 = 4$, знаменателя $\nu_2 = 16$, составляет $F_T = 3,01$.

Расчетное значение F - критерия

$$F_p = \frac{2 \cdot 0,0005}{0,01} = 0,1$$

Так как расчетное значение критерия Фишера не превышает табличного значения регрессионная модель является адекватной.

Модель является работоспособной, если коэффициент детерминации модели $R^2 > 0,75$

$$R^2 = \frac{3 \cdot ((10,98 - 12,43)^2 + (11,846 - 12,43)^2 + (11,156 - 12,43)^2 + (12,57 - 12,43)^2 + (11,733 - 12,43)^2 + (12,94 - 12,43)^2 + (13,856 - 12,43)^2 + (14,373 - 12,43)^2) + (8 - 6) \cdot 0,0005}{3 \cdot ((10,98 - 12,43)^2 + (11,846 - 12,43)^2 + (11,156 - 12,43)^2 + (12,57 - 12,43)^2 + (11,733 - 12,43)^2 + (12,94 - 12,43)^2 + (13,856 - 12,43)^2 + (14,373 - 12,43)^2) + 8(3 - 1) \cdot 0,01} = 0,995$$

Так как коэффициент детерминации превышает значение 0,75 регрессионная модель является работоспособной.

На рисунке 4.14 показана поверхность отклика регрессионной модели.

Проведено каноническое преобразование регрессионной модели [114].

Координаты экстремума функции отклика определены взятием из системы уравнений частных производных по каждому фактору, с последующим приравнением их к нулю

$$Y = 12,88 + 0,505X_1 + 0,205X_2 + 0,12X_1X_2 - 2,155X_1^2 - 0,605X_2^2$$

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 0,58 + 0,136 \cdot x_2 - 2 \cdot 2,155 \cdot x_1 = 0 \\ \frac{dy}{dx_2} = 0,236 + 0,136 \cdot x_1 - 2 \cdot 0,698 \cdot x_2 = 0 \end{cases}$$

После решения системы уравнений определены координаты экстремума $x_{1s} = 0,122$, $x_{2s} = 0,181$ в кодированных единицах и $x_{1s} = 122,45$ °C, $x_{2s} = 2,5905$ ч. в натуральных единицах.

Значение отклика в точке экстремума составляет $y_s = 14,87 \text{ МПа}$.

Угол поворота новых осей относительно старых

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{0,136}{-2,476 + 0,698} = -0,08$$

$$\alpha = -2,25^\circ$$

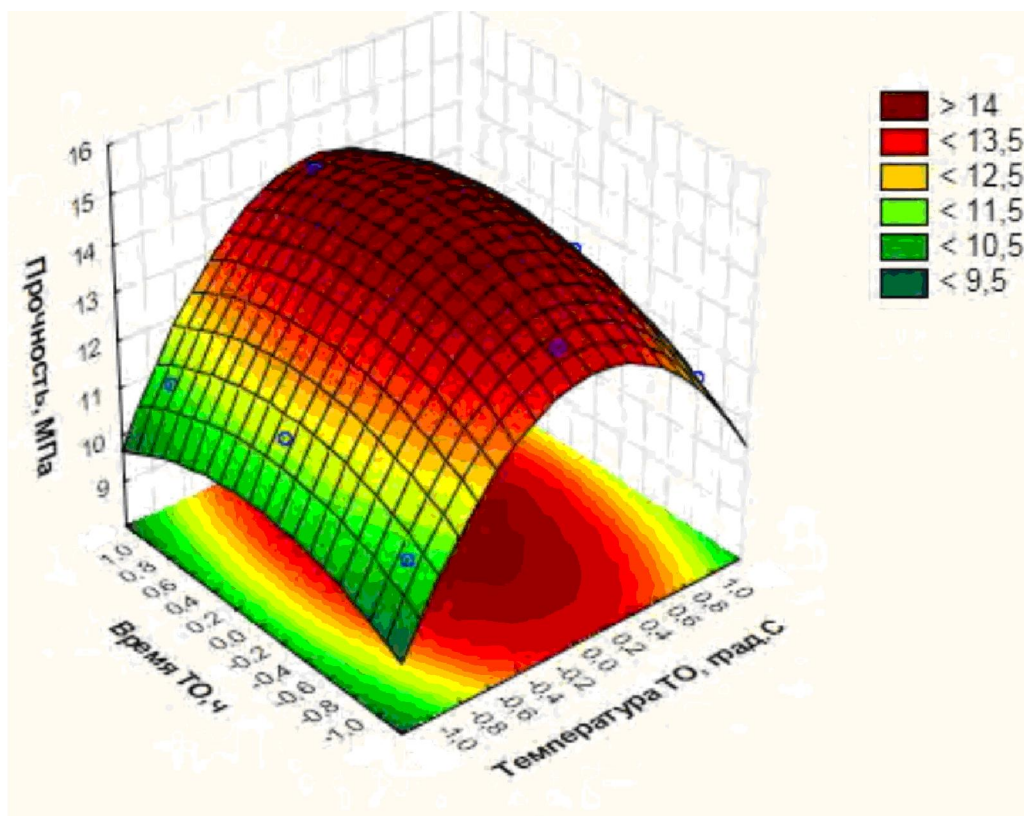


Рисунок 4.14 – Зависимость прочности пленок композиции на основе эластомера Ф-40 от температуры и времени термической обработки

Угол поворота отрицателен, поэтому поворот старых осей относительно новых осуществляем по часовой стрелке.

Коэффициенты регрессии в канонической форме B_{11} и B_{22}

$$f(B) = B^2 + 3,174B + 1,733 = 0,$$

$$B_{11} = -1,587 + \sqrt{1,587^2 - 1,733} = -2,47 ; B_{22} = -1,587 - \sqrt{1,587^2 - 1,733} = -0,7$$

$$B_{11} = - 2,47, B_{22} = - 0,7.$$

Корректность вычислений оценили, сравнивая суммы коэффициентов при квадратичных членах

$$-2,47 - 0,7 = -3,17,$$

$$-2,476 - 0,698 = -3,174$$

$$B_{11} + B_{22} = - 3,17 \approx b_{11} + b_{22} = - 3,174$$

Суммы коэффициентов при квадратичных членах равны.

В результате получения коэффициентов B_{11} и B_{22} уравнение регрессии в канонической форме (в кодированных значениях) получило вид

$$y - 14,87 = -2,47 \cdot x_1^2 - 0,7x_2^2.$$

Придавая различные значения критерию оптимизации в каноническом уравнении, получили уравнения кривых равного значения критерия оптимизации, по которым строили двумерное сечение поверхности отклика (рисунок 4.15) [115].

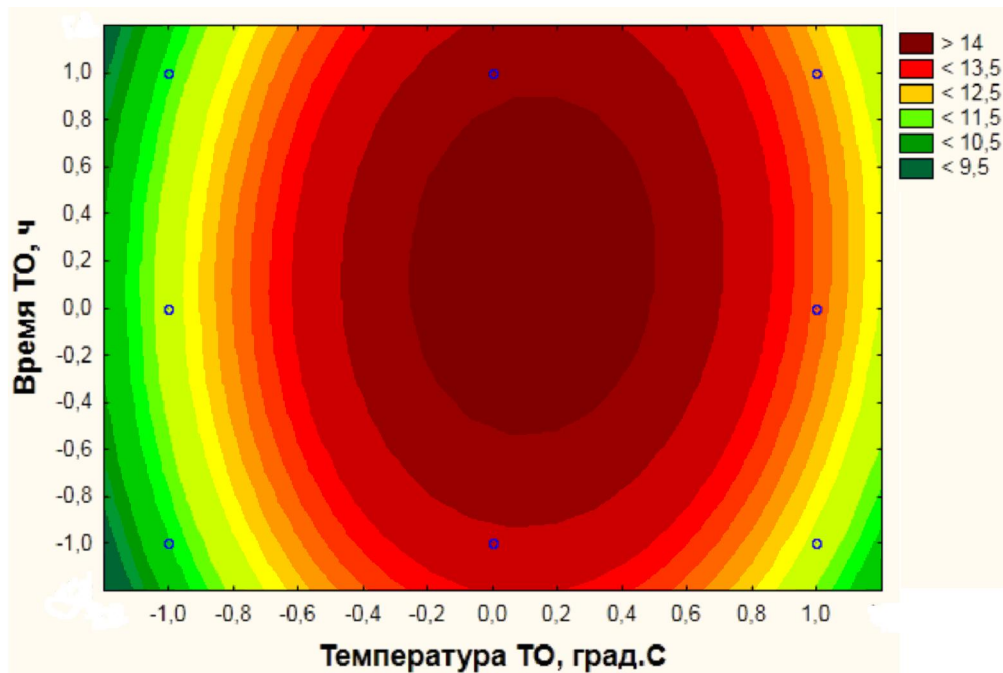


Рисунок 4.15 – Двумерное сечение поверхности отклика

Выводы

1. Получена регрессионная модель зависимости прочности пленок композиции на основе эластомера Ф-40 от температуры и времени термической обработки.

2. Оптимизирован режим термической обработки пленок композиции на основе эластомера Ф-40. Пленки композиции, термообработанные при температуре $T=120^{\circ}\text{C}$, продолжительностью $t = 2,5$ ч обладают наибольшей прочностью 14,87 МПа.

4.6 Исследования адгезионных свойств покрытий композиции на основе эластомера Ф-40

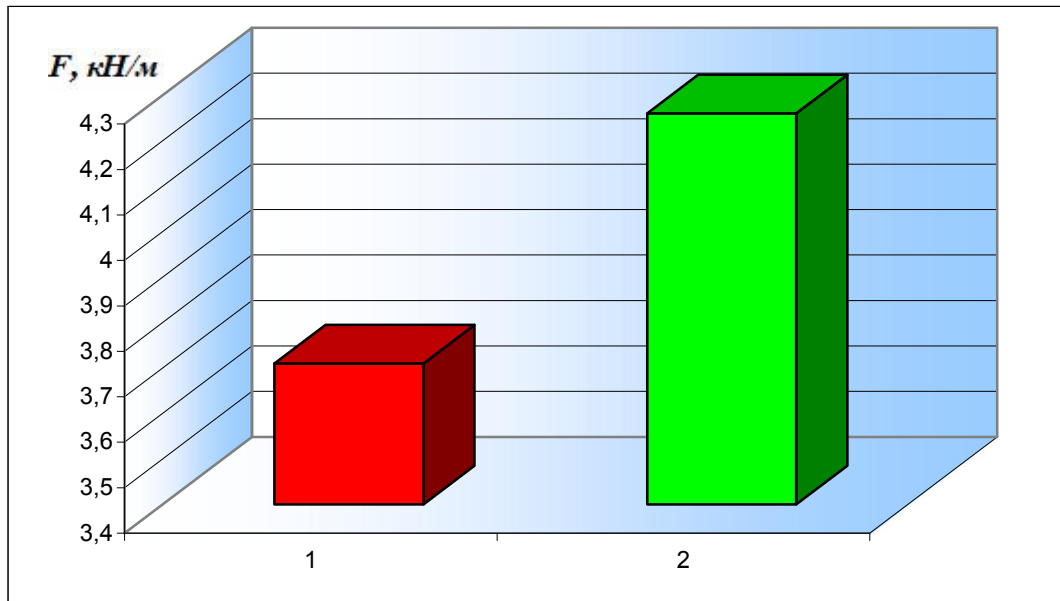
Важной характеристикой, которая в значительной степени определяет работоспособность покрытий полимерных композиционных материалов при восстановлении посадочных отверстий корпусных деталей, является адгезия. На рисунке 4.16 показаны результаты исследования адгезионных свойств покрытий композиции на основе эластомера Ф-40 с ручным механическим смешением и после ультразвуковой обработки.

Как следует из рисунка 4.16 адгезионная прочность композиции на основе эластомера Ф-40 приготовленной ручным механическим смешением составляет $F = 3,71$ кН/м, адгезионная прочность композиции эластомера Ф-40 после УЗ обработки составляет $F = 4,26$ кН/м. Композиция эластомера Ф-40 подверженная ультразвуковому воздействию имеет более высокие адгезионные показатели. Адгезионная прочность композиции эластомера Ф-40 после УЗ обработки на 15% превышает аналогичный показатель композиции приготовленной ручным механическим смешением.

Вывод

При использовании ультразвуковой обработки адгезионные свойства полимерной композиции на основе эластомера Ф-40 повышаются в 1,15 раза по

сравнению с материалом приготовленным вручную механическим способом.



1 – ручное механическое смешение; 2 – УЗ обработка

Рисунок 4.16 – Адгезионная прочность полимерной композиции эластомера Ф-40

4.7 Исследование дефектности полимерных покрытий из раствора эластомера Ф-40 и композиции на его основе

Дефектность полимерного покрытия существенным образом влияет на его ресурс в процессе эксплуатации. Наличие пор, микротрещины при статическом и динамическом нагружении покрытия могут выступать источником роста трещин и вызывать последующее разрушение. Поры, которые образуются в ходе испарения паров ацетона при отверждении покрытия являются главным дефектом полимерных покрытий из эластомера Ф-40. Для снижения пористости применяют послойное нанесение покрытия с просушиванием каждого слоя в течение 10 мин при нормальной температуре. Однако при термической обработке покрытия конвекционным способом не удастся полностью избежать пористости. Введение дисперсных металлических наполнителей в раствор эластомера Ф-40С способствует уменьшению размера пор до 2,5 раз, снижает концентрация пор на 24 %, площадь

разрушенного покрытия уменьшается до 2,25 раза (рисунки 4.16 и 4.17) [116]. В разделе 4.4 установлено, что количество испарившегося ацетона при УЗО в 2,5 раза больше, чем при ручном смешении раствора полимерной композиции эластомера Ф-40, что должно снизить пористость и повысить качество его полимерных покрытий.

Цель настоящих экспериментальных исследований – оценка влияния способа смешения (ручное смешение и УЗО) на дефектность покрытий из не наполненного эластомера Ф-40 и ПКМ на его основе.

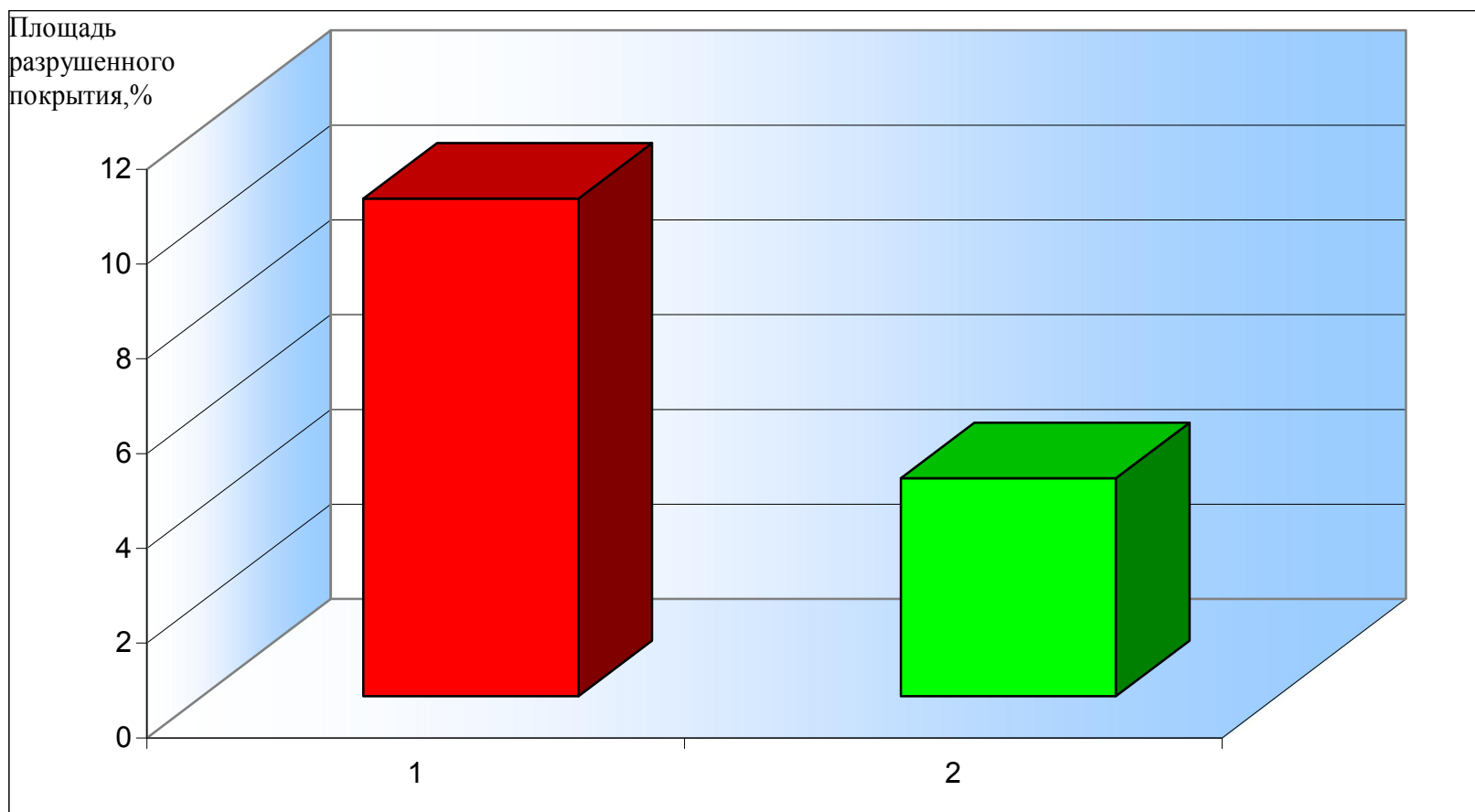
На рисунке 4.19 и 4.20 показаны пленки из эластомера Ф-40 без и после ультразвуковой обработки и пленки из композиции эластомера Ф-40 без и после ультразвуковой обработки. Как видно из рисунков дефектность полимерных покрытий после УЗО снизилась.

На рисунках 4.21 и 4.22 представлены результаты обработки экспериментальных данных. Площадь разрушенного покрытия снизилась с 6,1% в полимерных покрытиях эластомера Ф-40 без УЗО до 4,76% в покрытиях после УЗО материала (рисунок 4.21). Показатель дефектности снизился до 1,28 раза.

Спомощью микроскопа МПБ-2, обеспечивающим 24-х кратное увеличение, удалось установить, что средний диаметр пор в покрытиях эластомера Ф-40 без УЗО составляет $d = 0,4...0,5$ мм, а в покрытиях после УЗО – $0,3...0,4$ мм. Размер пор уменьшился до 1,6 раз.

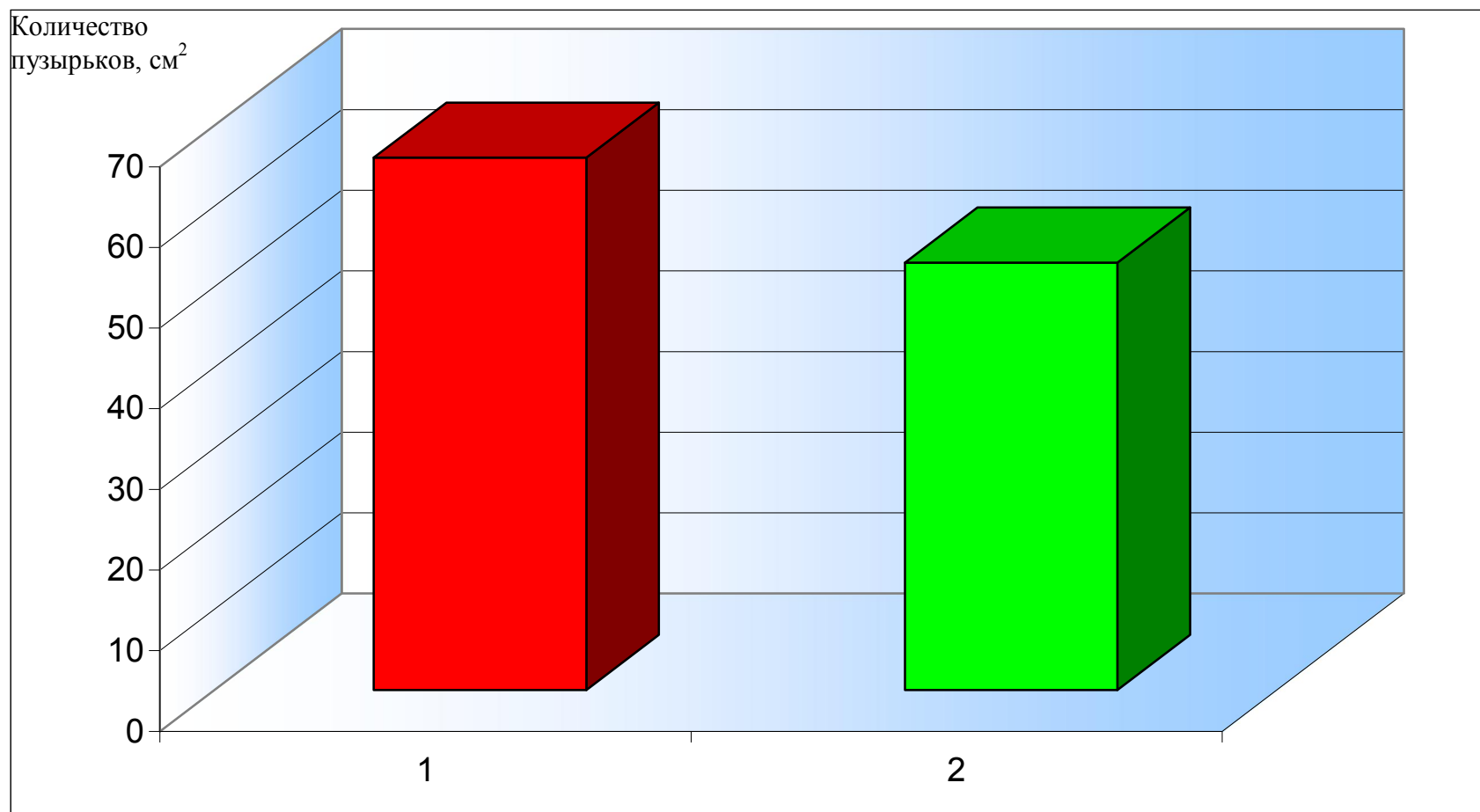
Помимо уменьшения размеров пор, концентрация пор (количество пузырьков на 1 см^2) в покрытиях после УЗО снизилась (рисунок 4.22). В покрытии эластомера Ф-40 без УЗО количество пузырьков на 1 см^2 составляет 69, в покрытиях после УЗО аналогичный показатель снизился до 53. Концентрация пор в покрытии при использовании УЗО уменьшилась на 30 %.

В полимерных покрытиях композиции, полученных после ручного смешения, площадь разрушенного покрытия составила 4,04%, а в покрытиях после УЗО – 2,96% (рисунок 4.22). Показатель дефектности снизился до 1,36 раза.



1 – материал без наполнителя; 2 – материал с наполнителем

Рисунок 4.17 – Площадь разрушенного покрытия в полимерных покрытиях эластомера Ф-40С и композиции на его основе [79]



1 – материал без наполнителя; 2 – материал с наполнителем

Рисунок 4.18 – Количество пузырьков на единицу площади в полимерных покрытиях эластомера Ф-40С и композиции на его основе [79]



а)

б)

Рисунок 4.19 – Пленки из эластомера Ф-40 без УЗО а), после УЗО б)

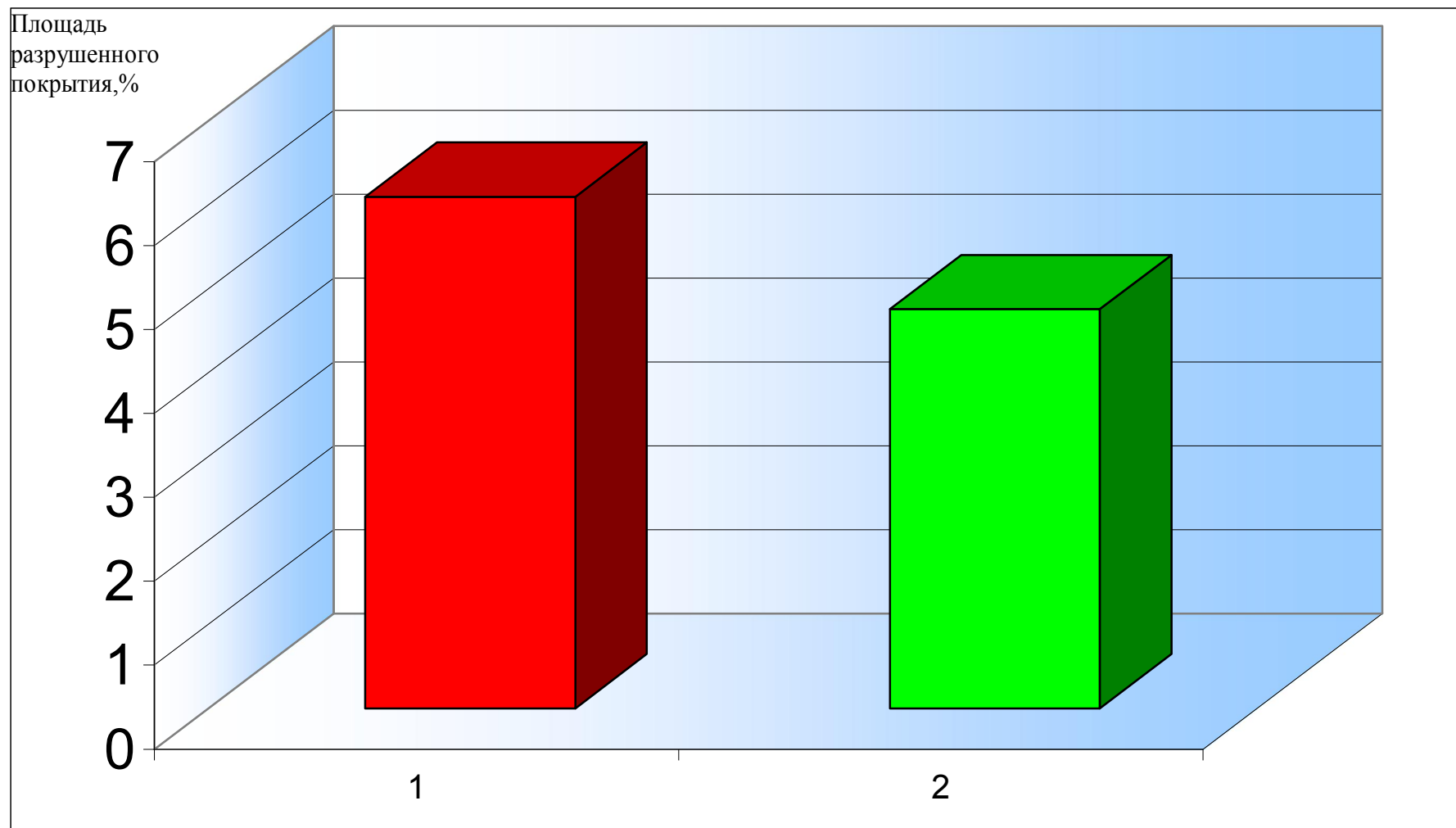
Средний диаметр пор в покрытиях композиции, полученных после ручного смешения, составил $d = 0,2...0,3$ мм, а в покрытиях после УЗО – $0,15...0,25$ мм. Размер пор уменьшился до 2 раз.

Помимо уменьшения размеров пор, концентрация пор (количество пу-

зырьков на 1 см^2) в композиции снизилась (рисунок 4.24). В покрытиях композиции эластомера Ф-40, полученных после ручного смешения, количество пузырьков на 1 см^2 составило 45, в покрытиях после УЗО аналогичный показатель – 33. Концентрация пор в покрытии после УЗО снизилась на 36 %.

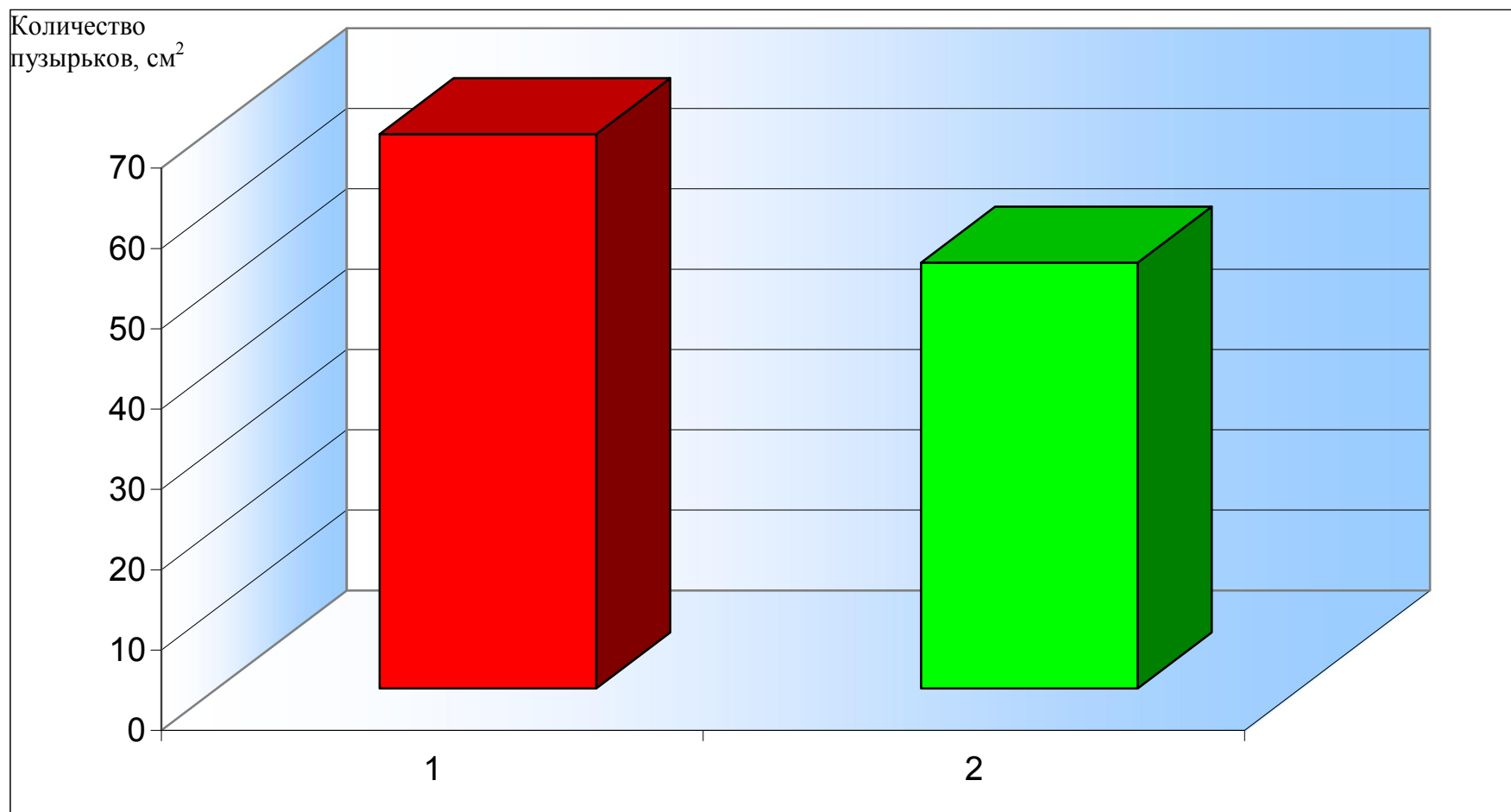


Рисунок 4.20 – Пленки из композиции эластомера Ф-40 без УЗО а), после УЗО б)



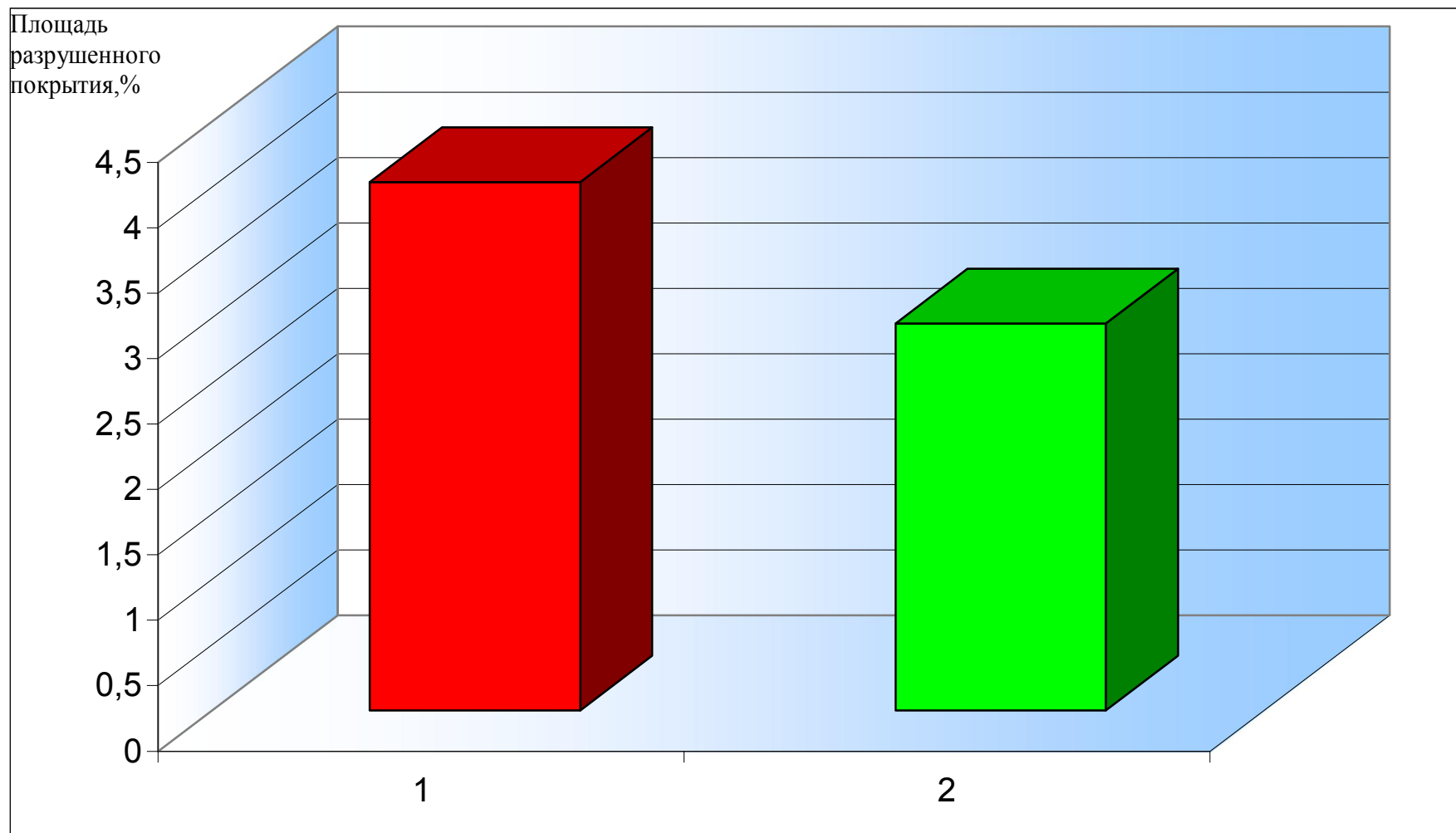
1 – при ручном смешении; 2 – после УЗО

Рисунок 4.21 – Площадь разрушенного покрытия в покрытиях эластомера Ф-40



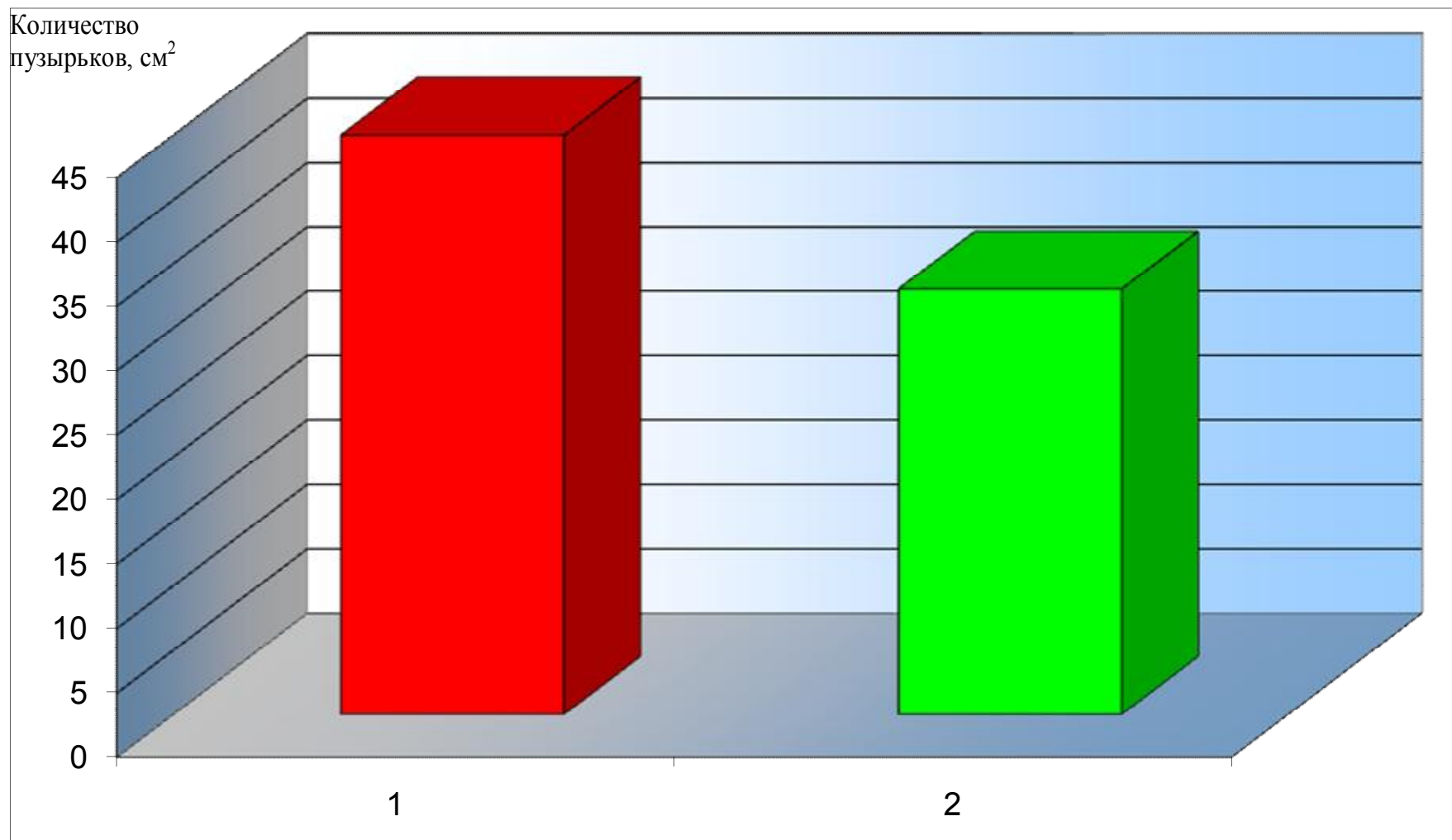
1 – при ручном смешении; 2 – после УЗО

Рисунок 4.22 – Количество пузырьков на единицу площади в покрытиях эластомера Ф-40



1 – при ручном смешении; 2 – после УЗО

Рисунок 4.23 – Площадь разрушенного покрытия в покрытиях композиции эластомера Ф-40



1 – при ручном смешении; 2 – после УЗО

Рисунок 4.24 – Количество пузырьков на единицу площади в покрытиях композиции эластомера Ф-40

Вывод

Ультразвуковая обработка раствора ПКМ на основе эластомера Ф-40 по сравнению с ручным смешением способствует повышению качества полимерных покрытий: размер пор снижается до 2 раз, концентрация пор снижается до 30 %, площадь разрушенного покрытия сокращается до 1,36 раза.

4.8 Исследование долговечности посадок подшипников качения восстановленных раствором композиции на основе эластомера Ф-40

На заключительном этапе проводили эксперимент с целью сравнительного исследования долговечности и определения максимальной допустимой толщины покрытия ПКМ на основе эластомера Ф-40, полученных ручным смешением и УЗО, для восстановления изношенных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях.

Долговечность посадок подшипников, восстановленных полимерными покрытиями снижается с увеличением толщины последних. Зависимости, построенные в полулогарифмических координатах, имеют нелинейный характер (рисунок 4.25 и 4.26). Такие зависимости называют кривыми Веллера. Стрелки у точек указывают на отсутствие регистрации факта проворота кольца подшипника во время испытаний. За базу испытаний на долговечность приняли $N=5,94 \times 10^7$ циклов нагружения, что соответствует 330 ч работы станда.

Стендовые испытания при циклическом нагружении покрытий ПКМ на основе эластомера Ф-40, полученных ручным смешением, показали, что при толщине покрытия $h = 0,2$ мм долговечность соединения наименьшая и составляет 11 ч. Объяснение носит вероятностный характер. С ростом толщины покрытия, увеличивается объем полимерного материала и вероятность возникновения дефектов возрастает (поры, микротрещины и т.д.), которые снижают ресурс покрытия. При толщине покрытия $h = 0,15$ мм долговечность повышается, по сравнению с $h = 0,2$ мм в 4,14 раза и составляет 46 ч.

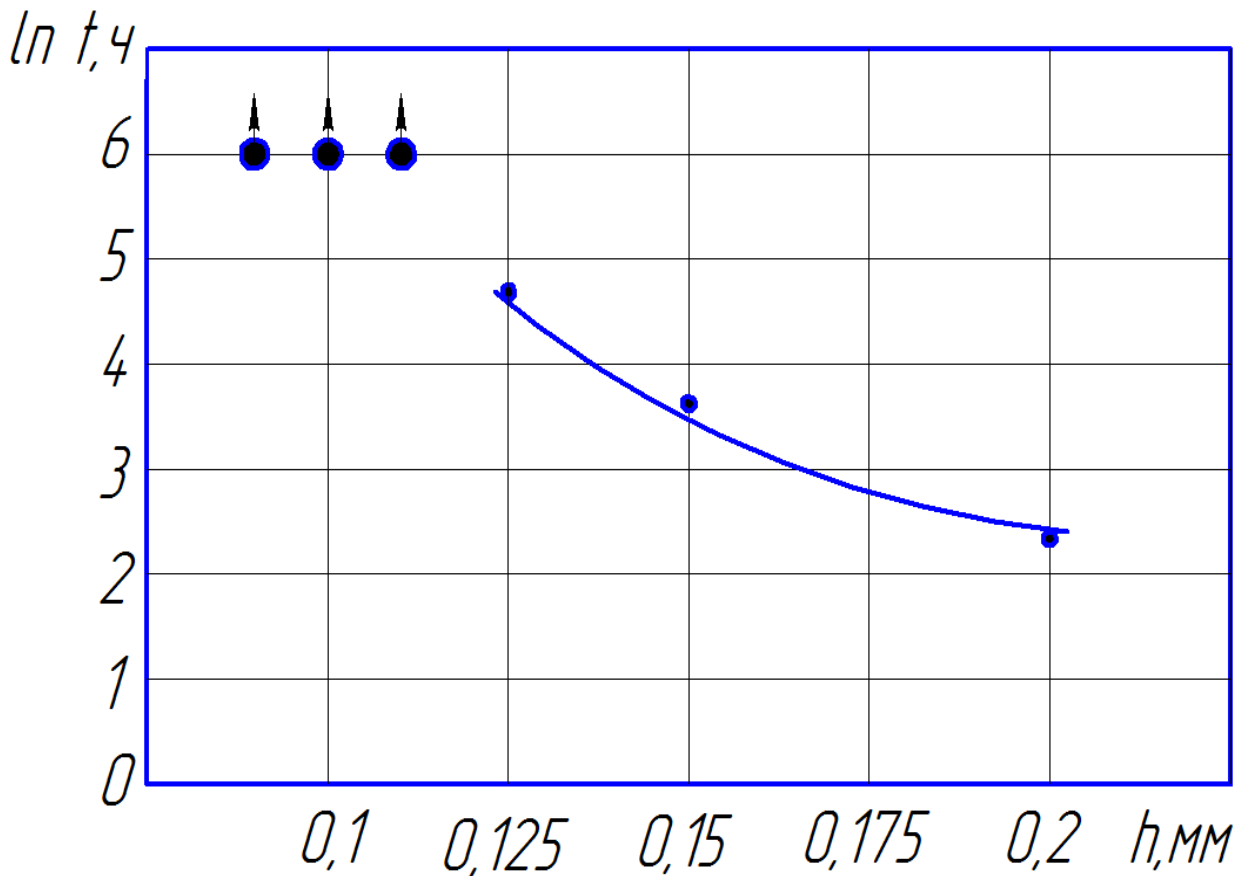


Рисунок 4.25 – Зависимость ресурса t посадок подшипников 209, восстановленных ПКМ на основе эластомера Ф-40 (ручное смешение), от толщины полимерного покрытия h при радиальной нагрузке 20 кН

Существенный рост долговечности имеет место при толщине покрытия $h = 0,125$ мм – 110 ч. Это в 2,42 раза больше, чем при толщине покрытия $h = 0,15$ мм и в 10 раз больше, чем при толщине покрытия $h = 0,2$ мм.

При толщине покрытия $h = 0,115$ мм сдвиг наружного кольца подшипника в течение 330 ч работы стенда зафиксировать не удалось.

Поэтому максимальной допустимой толщиной покрытия ПКМ на основе эластомера Ф-40 (ручное смешение) для восстановления корпусных деталей, при циклической радиальной нагрузке $P = 20$ кН является 0,115 мм.

На рисунке 4.26 представлена зависимость ресурса t посадок подшипников 209, восстановленных ПКМ на основе эластомера Ф-40 (УЗО), от толщины полимерного покрытия при радиальной нагрузке 20 кН.

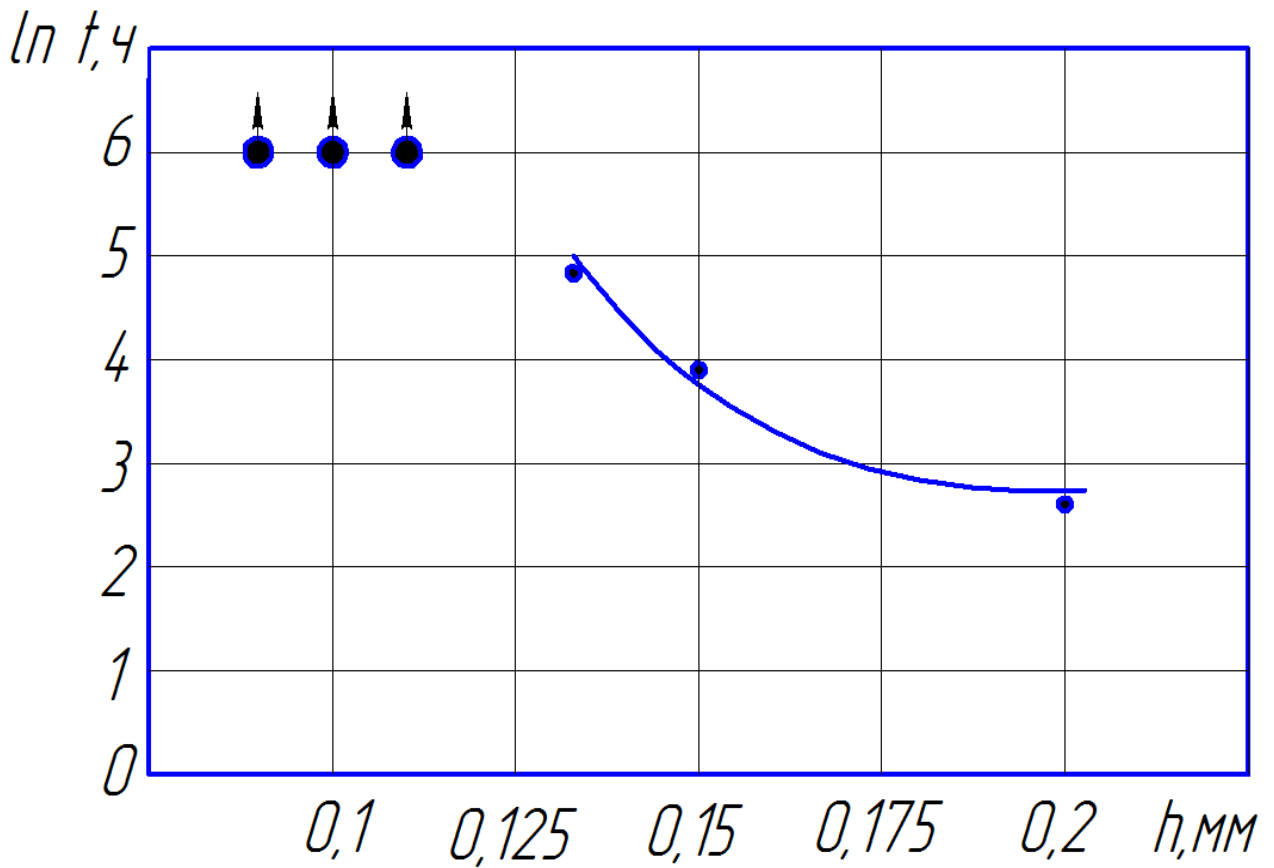


Рисунок 4.26 – Зависимость ресурса t посадок подшипников 209, восстановленных ПКМ на основе эластомера Ф-40 (УЗО), от толщины полимерного покрытия h при радиальной нагрузке 20 кН

При толщине покрытия $h = 0,2$ мм долговечность соединения наименьшая и составляет 16 ч. Объяснение, как упоминалось выше, носит вероятностный характер. По сравнению с ручным смешением ресурс соединения после УЗО увеличился в 1,45 раза.

При толщине покрытия $h = 0,15$ мм долговечность повышается, по сравнению с $h = 0,2$ мм в 3,07 раза и составляет 49 ч.

Существенный рост долговечности имеет место при толщине покрытия $h = 0,135$ мм – 111 ч. Это в 2,26 раза больше, чем при толщине покрытия $h = 0,15$ мм и 6,93 раза больше, чем при толщине покрытия $h = 0,2$ мм.

При толщине покрытия $h = 0,125$ мм сдвиг наружного кольца подшипника в течение 330 ч работы стенда зафиксировать не удалось.

Поэтому максимальной допустимой толщиной покрытия ПКМ на основе эластомера Ф-40 (УЗО) для восстановления корпусных деталей, при циклической радиальной нагрузке $P = 20$ кН является 0,125 мм.

Выводы

1 Подшипниковые посадки в корпусных деталях, восстановленные ПКМ на основе эластомера Ф-40 после УЗО, имеют более высокий, до 1,45 раза ресурс, по сравнению с аналогичными посадками, восстановленными ПКМ, полученными ручным смешением.

2 Полимерным композитом на основе эластомера Ф-40 после УЗО рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия под подшипники в корпусных деталях с диаметральной износом до 0,25 мм.

5 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

5.1 Технологические рекомендации

В результате обобщения материалов теоретических и экспериментальных исследований разработана технология восстановления подшипниковых отверстий корпусных деталей композицией на основе эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки (приложение В).

Технология восстановления содержит следующие операции:

- 1) очистка посадочных отверстий под подшипники в корпусной детали;
- 2) измерение посадочных отверстий для определения износа;
- 3) обезжиривание посадочных отверстий;
- 4) приготовление композиции на основе эластомера Ф-40 с использованием ультразвуковой обработки;
- 5) нанесение композиции на основе эластомера Ф-40 на посадочные отверстия в корпусной детали;
- 6) термическая обработка нанесенных полимерных покрытий;
- 7) калибрование отверстий с полимерным покрытием;
- 8) контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали.

Технология восстановления подшипниковых отверстий корпусных деталей композицией на основе эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки внедрена в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области. Для оценки надежности восстановленных корпусных деталей с марта 2015 по ноябрь 2016 г. в хозяйстве проводили эксплуатационные испытания автотракторной техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных неподвижных соединений подшипников не наблюдалось (приложение Г).

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО ЛГТУ при изучении специальных дисциплин профессионального цикла.

**5.2 Расчет экономической эффективности технологии
восстановления корпусных деталей композицией на основе
эластомера Ф-40 после ультразвуковой обработки в ЗАО
«Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области**

Себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности под-
шипниковых отверстий эластомером Ф-40 [117...120]

$$C_{\Pi} = 3\Pi + C_M + \Pi_P + C_{ОПУ} + C_{ЭЛ} + A_{ОБ}, \quad (5.1)$$

где 3Π – затраты на зарплату рабочих ремонтного персонала, руб/дм²;

C_M – цена материалов для восстановления изношенной площади под-
шипникового гнезда в 1 дм², руб/дм²;

Π_P – прочие расходы на производство продукции, руб.;

$C_{ОПУ}$ – накладные расходы на организацию и управление производст-
вом, руб.;

$C_{ЭЛ}$ – затраты на электроэнергию, руб.;

$A_{ОБ}$ – амортизационные отчисления на оборудование, руб.

Затраты на заработную плату рабочих ремонтного персонала

$$3\Pi = 3\Pi_o + 3\Pi_d + H_{CC}, \quad (5.2)$$

где $3\Pi_o$ – затраты на основную заработную плату рабочих ремонтного
персонала, руб.;

$3\Pi_d$ – затраты на дополнительную заработную плату рабочих ремонт-
ного персонала, руб.;

H_{CC} – затраты на начисления социального страхования, руб.

Основная заработная плата рабочих ремонтного персонала рассчитана
по формуле

$$ЗП_0 = T_{об} \cdot C_ч, \quad (5.3)$$

где $T_{об}$ – общие затраты труда на восстановление 1 дм^2 изношенной поверхности, ч;

$C_ч$ – часовой тариф, руб / ч.

Трудоемкость восстановления 1 дм^2 изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусных деталей $T_{об}$, равную норме на выполнение всех работ по восстановлению, зафиксировали методом хронометража (таблица 5.1). Расчет выполняли для корпусных деталей с диаметральным износом отверстий в $0,25 \text{ мм}$.

Для операций технологического процесса восстановления принят четвертый разряд слесаря со сдельной оплатой труда и часовым тарифом в $109,42 \text{ руб/ч}$ (данные ЗАО «Агрофирма «Русь»)

$$ЗП_0 = 109,42 \cdot 0,18 = 19,7 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Дополнительная заработная плата

$$ЗП_д = ЗП_0 \cdot K_{д.п.}, \quad (5.4)$$

где $K_{д.п.}$ – коэффициент дополнительной оплаты, составляющий 10% от затрат на основную зарплату рабочих ремперсонала (данные ЗАО «Агрофирма «Русь»)

$$ЗП_д = 19,7 \cdot 0,1 = 1,97 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Начисления на социальное страхование определяли по формуле

$$H_{CC} = (3\Pi_o + 3\Pi_d) \cdot K_{CC} / 100, \quad (5.5)$$

где K_{CC} - коэффициент начислений социального страхования, составляющий 30,2% от суммы затрат на основную и дополнительную зарплаты ремонтного персонала.

$$H_{CC} = (19,7 + 1,97) \cdot 0,302 = 6,54 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Таблица 5.1 – Норма времени на восстановление 1 дм² изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусных деталей композицией на основе эластомера Ф-40

№ п/п	Наименование операции	Норма времени, мин/дм ²
1	Обезжиривание поверхности	0,30
2	Приготовление композиции	2,0
3	УЗО композиции	22,0
4	Нанесение покрытия из эластомера на посадочные отверстия	0,5
5	Загрузка в сушильный шкаф	0,20
6	Выгрузка из сушильного шкафа	0,20
7	Калибрование отверстий с полимерным покрытием	0,30
8	Контроль	0,25
	Итого:	25,75 (0,43 ч/дм ²)

Заработная плата рабочих при восстановлении 1 дм² изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусных деталей

$$3\Pi = 19,7 + 1,97 + 6,54 = 28,21 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Цена материалов для восстановления площади в 1дм^2 изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусных деталей

$$C_M = H_M \cdot C_M, \quad (5.6)$$

где H_M – норма расхода материалов на восстановление площади в 1дм^2 изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусных деталей, $\text{кг} / \text{дм}^2$;

C_M – цена единицы ремонтных материалов, $\text{руб} / \text{кг}$;

Цена материалов для восстановления подшипниковых гнезд корпусных деталей показана в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Стоимость материалов для восстановления 1дм^2 подшипниковых отверстий корпусных деталей

№ п/п	Наименование материала	Цена руб/кг	Расход, кг/дм ²	Стоимость руб/дм ²
1	Эластомер Ф-40	1168	0,0012	1,4
2	Ацетон технический	162	0,015	2,43
3	Бронзовый порошок	800	0,00001	0,008
4	Алюминиевый порошок	90	0,0002	0,018
	Всего			3,856

$$C_M = 1,4 + 2,43 + 0,008 + 0,018 = 3,86 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Прочие расходы включают расходы на производство единицы i - го вида продукции и составляют 5 % от заработной платы

$$П_p = 0,05 \cdot ЗП \quad (5.7)$$

$$П_p = 0,05 \cdot 28,21 = 1,41 \text{ руб}$$

Затраты на организацию и управление производством включают командировочные расходы, затраты на амортизацию, электричество, оплату связи, коммунальные и другие платежи

$$C_{опу} = ЗП_o \cdot K_{опу} \quad (5.8)$$

где $K_{опу}$ - коэффициент, учитывающий затраты на организацию и управление производством, $K_{опу} = 2$.

$$C_{опу} = 19,7 \cdot 2 = 39,4 \text{ руб}$$

Затраты на электроэнергию составят:

$$C_{эл} = (W_{y1} T_{оп1} + W_{y2} T_{оп2}) K_{п} Ц_{э}, \quad (5.9)$$

где W_{y1} и W_{y2} – установленная мощность потребления электроэнергии ультразвуковой ванной и сушильным шкафом, кВт;

$T_{оп1}$ и $T_{оп2}$ – время на проведение операций ультразвукового диспергирования и термической обработки, включающее основное и вспомогательное время, а также время обслуживания рабочего места и на личные потребности, ч;

$K_{п}$ – коэффициент потерь в сети, $K_{п} = 1,05$;

$Ц_{э}$ – стоимость электроэнергии за 1 кВт/ч, р.; $Ц_{э} = 5,03$ р.

$$C_{\text{ЭЛ}} = (0,055 \cdot 0,42 + 2 \cdot 2,71) \cdot 1,05 \cdot 5,03 = 28,75 \text{ руб},$$

Амортизационные отчисления на оборудование из расчета на ремонт одной единицы техники составят:

$$A_{\text{Об}} = \frac{0,1 \cdot (C_{\text{Н1}} T_{\text{ОСН1}} + C_{\text{Н2}} T_{\text{ОСН2}} + C_{\text{Н3}} T_{\text{ОСН3}})}{P\Phi_{\text{ВР}}}, \quad (5.10)$$

где $C_{\text{Н1}}$, $C_{\text{Н2}}$, $C_{\text{Н3}}$ – цена новых соответственно УЗ ванны, сушильного шкафа и весов лабораторных, р.;

$T_{\text{ОСН1}}$, $T_{\text{ОСН2}}$, $T_{\text{ОСН3}}$ – основное время выполнения операций, соответственно УЗ, термической обработки и взвешивания, ч;

$P\Phi_{\text{ВР}}$ – расчетный фонд времени, ч.

$$A_{\text{Об}} = \frac{0,1 \cdot (5900 \cdot 0,37 + 43188 \cdot 2,5 + 7780 \cdot 0,01)}{1971} = 5,59 \text{ руб}$$

Полная себестоимость восстановления площади 1 дм² подшипниковых отверстий корпусных деталей композицией на основе эластомера Ф-40

$$C_{\text{П}} = 28,21 + 3,86 + 1,41 + 39,4 + 28,75 + 5,59 = 107,22 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Годовые затраты на восстановление изношенных подшипниковых отверстий корпусных деталей автомобилей и тракторов композицией эластомера Ф-40

$$Z_{\text{Н}} = N \cdot C_{\text{П}}, \quad (5.11)$$

где N – годовая программа восстановления поверхности посадочных отвер-

ствий в корпусных деталях, дм^2 .

По данным ЗАО «Агрофирма «Русь» в 2015 г. корпусные детали не восстанавливались, а заменялись на новые. По результатам выбраковки корпусных деталей общая площадь изношенной поверхности, подлежащей восстановлению составила $N = 1007,23 \text{дм}^2$.

Годовой объем затрат при восстановлении изношенных подшипниковых отверстий корпусных деталей по разработанной в диссертации новой технологии составит

$$Z_H = 1007,23 \cdot 107,22 = 107995,2 \text{руб.}$$

Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления подшипниковых отверстий корпусных деталей

$$C_{\text{год}} = Z_2 - Z_1, \quad (5.12)$$

где Z_2 – годовой объем затрат на приобретение новых деталей, руб.;

Z_1 – годовые затраты на восстановление корпусных деталей по новой технологии, $Z_1 = 109103,15 \text{руб.}$

В ЗАО «Агрофирма «Русь» годовой объем затрат на приобретение новых деталей в 2015 г. составил $Z_2 \approx 468175 \text{руб.}$

Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления композицией на основе эластомера Ф-40

$$C_{\text{год}} = 468175 - 107995,2 = 360179,8 \approx 360 \text{тыс.руб.}$$

Заключение

- 1) Получена формула (2.19) 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 условиям (2.15) или (2.21), максимально допустимый уровень раствора ПКМ в ультразвуковой ванне – условию (2.26).
- 2) При УЗО раствора ПКМ, благодаря кавитации, повышается его температура и уменьшается значение квазиравновесной концентрации C_p^l , т.е. снижается концентрации 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 (2.15) и (2.22), 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Черноиванов, В.И.** К вопросу восстановления посадочных мест автотракторных корпусных деталей / В.И. Черноиванов // Тр. ГОСНИТИ.- 1976. Т. 49. – С. 45 – 57.
- 2 **Батищев, А. Н.** Пособие гальваника – ремонтника / Батищев А.Н.; – М.: Колос, 1980. – 240 с.
- 3 **Голубев, И. Г.** Исследование долговечности неподвижных соединений, восстановленных железнением при ремонте сельскохозяйственной техники: дис ... канд. техн. наук / Голубев И.Г. – М., 1981, – 135 с.
- 4 **Поляченко, А. В.** Увеличение долговечности восстанавливаемых деталей контактной приваркой износостойких покрытий в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий: автореф. дис...докт. техн. наук / Поляченко А.В. – М., 1984. – 44 с.
- 5 **Черноиванов, В. И.** Совершенствование технологии и повышение качества восстанавливаемых деталей сельскохозяйственной техники: автореф. дис... докт. техн. наук / Черноиванов В.И. – М., 1984. – 53 с.
- 6 **Бурумкулов, Ф. Х.** Совершенствование методов и средств оценки работоспособности и долговечности восстанавливаемых соединений и деталей машин (на примере автотракторных двигателей): автореф. дис...докт. техн. наук. / Бурумкулов Ф.Х. – М., 1986. – 38 с.
- 7 **Бугаев, В. Н.** Восстановление деталей и повышение ресурса топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей: автореф. дис...докт.техн. наук. / Бугаев В.Н. – М., 1987. – 32с.
- 8 **Авдеев, М. В.** Повышение эффективности восстановления деталей сельскохозяйственной техники: автореф. дис...докт. техн. наук. / Авдеев М.В. – Челябинск, 1987. – 46 с.

- 9 **Курчаткин, В. В.** Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис ... докт. техн. наук. / Курчаткин В.В. – М., 1989, – 407 с.
- 10 **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники плазменной наплавкой: автореф. дис...докт. техн. наук. / Сидоров А.И. – М., 1989. – 34 с.
- 11 **Мошенский, Ю. А.** Технологические основы повышения надежности автотракторных валов при восстановлении их наплавкой и термической обработкой: автореф. дис...докт. техн. наук. / Мошенский Ю.А. – Пушкин, 1990. – 43 с.
- 12 **Черновол, М.И.** Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями: автореф. дис...докт. техн. наук. / Черновол М.И. – М., 1992. – 35 с.
- 13 **Мельниченко, И. М.** Восстановление и повышение долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов и покрытий / Дис. ...докт. техн. наук. - Гомель, 1991. – 370 с.
- 14 **Котин, А. В.** Восстановление точности размерных цепей сборочных единиц применение не жестких компенсаторов износа / Дис. ...докт. техн. наук. – Саранск, 1998. - 358 с.
- 15 **Ли, Р. И.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис ... докт. техн. наук. / Ли Р. И. – М., 2001, – 340 с.
- 16 **Зазуля, А. Н.** Справочник инженера по техническому сервису машин и оборудования в АПК: / под редакцией д.с.-х. наук, профессора С. М. Бунина – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 604 с.
- 17 **Башкирцев, В. Н.** Восстановление деталей машин и оборудования адгезивами: дис ... докт. техн. наук. / Башкирцев В. Н. – М., 2004, – 397 с.
- 18 **Гаджиев, А. А.** Технологическое обеспечение долговечности подшипни-

ковых узлов машин применением полимерных материалов: автореф. дис... докт. техн. наук. / Гаджиев А. А. – М., 2005. – 35 с.

19 **Кузнецов, Ю. А.** Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования АПК микродуговым оксидированием: автореф. дис... докт. техн. наук. / Кузнецов Ю. А. – М., 2006. – 35 с.

20 **Казанцев, С. П.** Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: автореф. дис... докт. техн. наук. / Казанцев С. П. – М., 2006. – 32 с.

21 **Фархшатов, М. Н.** Ресурсосберегающие технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники и оборудования электроконтактной приваркой коррозионностойких и износостойких материалов: автореф. дис... докт. техн. наук. / Фархшатов М. Н. – Саранск., 2007. – 32 с.

22 **Гвоздев, А. А.** Технология повышения долговечности узлов трения при ремонте сельскохозяйственной техники с использованием модифицированных полимерных композиций: дис ... докт. техн. наук. / Гвоздев А. А. – М., 2011, – 377 с.

23 **Кононенко А. С.** Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков: дис ... докт. техн. наук. / Кононенко А. С. – М., 2012, – 405 с.

24 **Ли, Р. И.** Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники и оборудования перерабатывающих предприятий: учеб. пособие для вузов / Ли Р. И.; М-во сель. хоз-ва РФ, Мичуринск. гос. аграрн. ун-т – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2008. – 322 с.

25 **Рассказов, М. Я.** Современные тенденции организации ремонта сельскохозяйственной техники. / Болотин М.В. – М.: Росинформагротех, 2001. – 105 с.

26 **Черноиванов, В. И.** Состояние и основные направления развития техни-

ческого сервиса на селе / Черноиванов В. И. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. – № 6, – С. 2 – 5.

27 **Черноиванов, В. И.** Техническое обслуживание, ремонт и обновление сельскохозяйственной техники в современных условиях / Черноиванов В. И. и др.; – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 148 с.

28 **Ивченко, Д. И.** Восстановление корпусных деталей анаэробными полимерными композициями: На примере картеров коробок передач автомобилей семейства ГАЗ: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03/ Ивченко Дмитрий Иванович. – М., 2001. – 198 с.

29 **Воловик, Е. Л.** Справочник по восстановлению деталей / Воловик Е. Л.; - М.: Колос, 1981. – 350 с.

30 **Поляченко, А. В.** Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной приваркой присадочных материалов / Поляченко А. В., Рогинский Л.Б. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин. - М., 1988. – 35 с.

31 **Ворошилов, И. А.** Исследование и оптимизация процесса плазменной металлизации при восстановлении внутренних цилиндрических поверхностей автомобильных корпусных деталей: автореф. дис. ...канд. техн. наук / Ворошилов И. А. – М., 1973. – 25 с.

32 **Авдеев, М. В.** Технология ремонта машин и оборудования / Авдеев М. В., Воловик Е. Л., Ульман И. Е.; – М.: Агропромиздат, 1986. – 247 с.

33 Технологические рекомендации по применению методов восстановления деталей машин. – М.: ГОСНИТИ, 1976. – 181 с.

34 **Черноиванов, В. И.** Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: Учебное пособие / Черноиванов В. И., Бледных В. В., Северный А. Э.; – Москва – Челябинск, ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. – 992 с.

35 **Спицын, И. А.** Совершенствование технологии восстановления посадочных отверстий корпусных деталей электролитическим железнением в услови-

- ях сельскохозяйственных ремонтных предприятий: дис. ... канд. техн. наук / Спицын И. А. – М., 1983. – 190 с.
- 36 **Грибиниченко, В. Н.** Восстановление ступиц колес автомобилей и прицепов / Грибиниченко, В.Н. и др. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин. – М., 1988. – 88 с.
- 37 **Тельнов, Н. Ф.** Ремонт машин / Тельнова Н. Ф.; - М.: ВО «Агропромиздат», 1992. – 560 с.
- 38 **Крупецкий, В. А.** Восстановление посадочных отверстий установкой колец / Крупецкий В. А. // Техника в сельском хозяйстве. - 1981, - № 9. – С. 56 – 57.
- 39 **Новиков, А. Н.** Восстановление посадочных мест под подшипники крупногабаритных деталей цинк - никелевым сплавом / Новиков А. Н. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин. - М., 1988. – 95 с.
- 40 **Дмитриев, А. Д.** Исследование работоспособности неподвижных соединений, восстановленных при помощи эпоксидных смол, модифицированных алифатической смолой ТЭГ-1: дис. ... канд. техн. наук / Дмитриев А. Д. – М., 1970. – 137 с.
- 41 **Аскинази, Б. М.** Повышение эффективности восстановления деталей электромеханической обработкой с добавочным металлом / Аскинази Б. М., Шеголев Е. А., Минибаев Г. Г. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин.; - М., 1988. – 76 с.
- 42 Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Надежность и ремонт машин»: Изд-во ОрелГАУ, 2004. – 168 с.
- 43 Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Надежность и ремонт машин»: Изд-во ОрелГАУ, 2005. – 446 с.
- 44 Надежность и ремонт машин / Курчаткин В. В., Тельнов Н. Ф., Ачкасов К. А., Батищев А. Н. и др.; Под ред. В. В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000, – 776 с.

- 45 Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение XXI – век»: Изд-во ОрелГАУ, С – ПГАУ, С – Петербург, 2005. – 419 с.
- 46 **Батищев, А. Н.** Монтаж, эксплуатация и ремонт технологического оборудования / Батищев А. Н. , Голубев И. Г., Курчаткин В.В.; – М.: Колос, 2007. – 424 с.
- 47 **Ли, Р. И.** Технологии восстановления деталей металлургических машин и оборудования: учеб. пособие для вузов / Ли Р. И., Жильцов А. П.; М-во образования и науки РФ, Липецк. гос. техн. ун-т – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2007. – 315 с.
- 48 **Гаджиев, А. А.** Технологическое обеспечение долговечности подшипниковых узлов машин применением полимерных материалов: дис..докт. техн. наук: 05. 20. 03: / Гаджиев А. А. – М., 2006. - 359 с.
- 49 **Пахомов, С. И.** Поливинилхлоридные композиции: Учебное пособие / Пахомов С.И., Трифонова И.П. Бурмистров В.А.; – М.: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2010. - 104 с.
- 50 **Баурова, Н.И.** Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с
- 51 **Бочаров, А. В.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками: дис. ... канд. техн. Наук: 05.20.03: / Бочаров А. В. – Мичуринск, 2009. – 150 с.
- 52 **Клинков, А.С.** Проектирование смесителей периодического действия при получении композитов заданного качества из отходов термопластов / А.С. Клинков, М.В. Соколов, В.Г. Однолько, П.С. Беляев. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 196 с.
- 53 **Тренисова, А.Л.** Получение композиционных материалов на основе эпоксидного олигомера и нанонаполнителей : автореф. дис. ... канд. техн. наук :

05.17.06 / Тренисова Анастасия Львовна. – М., 2006. – 18 с.

54 **Ахматова, О.В.** Композиционные материалы на основе модифицированного эпоксидного олигомера и нанонаполнителей: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.17.06 / Ахматова Оксана Владимировна. – М., 2011. - 18 с.

55 **Гаджиев, А. А.** Исследование возможности повышения ресурса неподвижных сопряжений, восстановленных полимерными материалами, при ремонте сельскохозяйственной техники: дис. ... канд. техн. Наук: 05.20.03 / Гаджиев А. А. – М., 1978. – 154 с.

56 **Кононенко, А.С.** Герметизация неподвижных фланцевых соединений анаэробными герметиками при ремонте сельскохозяйственной техники : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03: / Кононенко А.С. - М., 2001. – 156 с.

57 **Голых, Р.Н.** Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных сред / Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Барсуков Р.В., Шалунов А.В. // ООО «Центр ультразвуковых технологий». – 2011. – с. 321.

58 Новый справочник химика и технолога [Электронный ресурс]. – М.: электронная версия 2.1. Т. 2 : Аналитическая химия. Ч. 2 / под общ. ред. И. П. Калинин, 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

59 **Бараш, Ю. С.** Силы Ван-дер-Ваальса. – Москва: Наука, 1988. – 344 с.

60 **Агранат, Б.А.** Основы физики и техники ультразвука : учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат [и др.]. – М. : Высш. шк., 1987. – 352 с.

61 **Кирсанов, Ф. А.** Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях трансмиссии сельскохозяйственной техники эластомером Ф-40С: дис. ... канд. техн. Наук: 05.20.03: / Кирсанов Ф. А. – Мичуринск, 2015. – 182 с.

62 **Винников, И. З.** Сверловщик / Винников И. З., Френкель М. И., – М.: Высш. школа, 1971. – 288 с.

63 **Вермель, В. Д.** Применение наномодифицированной клеевой композиции для повышения прочности и долговечности элементов конструкций из композиционных материалов / В. Д. Вермель, А. М. Доценко, С. А. Титов // Извест-

тия самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т.14 – С. 56–57.

64 **Лакно, А. В.** Восстановление деталей машин из полимерных материалов / Лакно А. В., Рылякин Е. Г. // Молодой ученый. – 2014. – №8. – С.196 – 199.

65 Ремонт машин / Под ред. Тельнова Н. Ф. – М.: Агропромиздат, 1992, 560с.

66 Технология ремонта машин и оборудования. Под общ. ред. И. С. Левитского. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Колос», 1975.

67 **Андриевский, Р.А.** Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2007 – 179 с.

68 **Арзамасов, Б.Н.** и др. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1986 г. – 384 с.

69 **Геллер, Ю.А.** Материаловедение. – М.: Metallurgy, 1989. – 456 с.

70 **Головин, Ю.И.** Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.

71 **Гусев, А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

72 **Дальский, А.М.** Технология конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.

73 **Котин, А. В.** Восстановление точности размерных цепей сборочных единиц применение не жестких компенсаторов износа / дис. ...докт. техн. наук: 05.20.03: / Котин А.В. – Саранск, 1998. - 358 с.

74 **Бутин, А.В.** Композиция для склеивания металлических изделий: Патент на изобретение РФ № 2526991. Заявл. 05.02.2013 / Ли Р. И., Бутин А.В., Рожнов А. Б., Сафонов В. Н. // Опубл. 27.08.2014. – Бюл. № 24.

75 **Бутин, А. В.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимер-полимерными композициями: дис. ... канд. техн. Наук: 05.20.03: / Бутин А. В. – Мичуринск, 2012. – 127 с.

- 76 **Ли, Р. И.** Неразрушающий контроль качества неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники, восстановленных анаэробными герметиками: дис. ... канд. техн. наук / Ли Р. И. – М., 1990. – 220 с.
- 77 **Беркович, М. С.** Исследование и повышение долговечности подшипниковых узлов тракторных трансмиссий: дис...канд. техн. наук. / Беркович М.С. – М., 1972, – 130 с.
- 78 **Ли, Р. И.** Методические указания к лабораторной работе «Восстановление деталей полимерными материалами при ремонте машин и оборудования» / Ли Р. И., Кондрашин С. И. – Мичуринск. : Изд-во Мич. гос. агр-го ун-та, 2007. – 24 с.
- 79 **Машин, Д. В.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники композицией на основе эластомера Ф-40: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Машин Д. В. – Мичуринск, 2013. – 149 с.
- 80 **Агранат, Б.А.** Ультразвуковая технология: учебное пособие / Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский, Н.Н. Хавский. – Москва: издательство «Металлургия», 1974. – 503 с.
- 81 **Кербер, М.Л.** Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: уч. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Голловкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – СПб: Профессия, 2008 – 560 с.
- 82 **Богданов, В.В.** Эффективные малообъемные смесители / В. В. Богданов, Е. И. Христофоров, Б. А. Клоцунг. – Ленинград : Химия, Ленинградское отделение, 1989. – 224 с.
- 83 **Богданов, В.В.** Смешение полимеров / Богданов В. В., Торнер Р. В., Красовский В. Н., Регер Э. О. – Ленинград : Химия, 1979. – 193 с.
- 84 **Дьяченко, Д.И.** О возможности получения порошков сверхвысокой дисперсности в кавитирующей среде / Д.И. Дьяченко // Вестник ВолГУ. – 2012. – №6. – 56 с.
- 85 **Голямина, И.П.** Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И. П. Голямина.

– М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

86 **Акопян, В.Б.** Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В.Б. Акопян, Ю.А. Ершов. – Москва: издательство «МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2005. – 224 с.

87 **Колесников, А.А.** Выявление оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия для диспергирования растворов полимерных композиционных материалов / Ли Р. И., Колесников А.А. // Наука в центральной России. – М.: Изд-во ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии, 2013. – №4 – С. 16 – 20.

88 **Колесников, А.А.** Ультразвуковое диспергирование дисперсных металлических наполнителей в растворах полимерных композиционных материалов. / А.А. Колесников // XVII международная научно-практическая конференция: Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: – Тамбов.: Изд-во ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии, 2013. – С. 18 – 21.

89 **Крауткремер, Й.** Ультразвуковой контроль материалов: справочник / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – Москва: издательство «Металлургия», 1991. – 673 с.

90 **Капустина, О.А.** Физические основы ультразвуковой технологии / О.А. Капустина: в 3-х т./Л.Д.Розенберг [и др.]. – М.: Наука, 1970. – Т.3. – 689 с.

91 Композиция для покрытия металлических изделий: Патент на изобретение №2537864 РФ Заявл. 29.05.2009 / Ли Р.И., Колесников А.А., Бутин А.В., Мироненко А.В., Машин Д.В., Сафонов В.Н. // Дата публикации заявки: 04.02.2014, Бюл. №22, Опубликовано 10.01.2015, Бюл. №1.

92 Металлические порошки и порошковые материалы: справочник / Б. Н. Бабич, Е. В. Вершинина, В. А. Глебов и др. / Под ред. Ю. В. Левинского. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 520с.

- 93 ГОСТ 3900–1985. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности. – Взамен ГОСТ 3900–47; введ. 2006-02-01. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 141 с.
- 94 ГОСТ 20073-81. Компрессоры воздушные поршневые стационарные общего назначения. – Взамен ГОСТ 20073 – 74; введ. 1981-04-13. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 28 с.
- 95 ГОСТ 2405–1988. Манометры. Вакуумметры. Мановакуумметры. Напомеры. Тягомеры. Тягонапомеры. Нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров. – Взамен ГОСТ 2405–80; введ. 1989-07-01. – М.: ИПК изд-во стандартов, 1989. – 33 с.
- 96 ГОСТ 1756–2000. Нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров. – Взамен ГОСТ 1756–52; введ. 2000-11-03. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 47 с.
- 97 Весы лабораторные ВК. Модификации ВК 150.1, ВК 300, ВК 300. Руководство по эксплуатации. РЭ ВК, 2008. – 52 листа.
- 98 Пирометр Testo 830-T4. Руководство пользователя. – 9 листов.
- 99 **Ли, Р. И.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качества сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис ... докт. техн. наук. / Ли Р. И. – М., 2001, – 340 с.
- 100 **ГОСТ 12423-66.** Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 6 с.
- 101 **Аскадский, А. А.** Деформация полимеров / Аскадский А.А.; - М.: Химия, 1973. – 448 с.
- 102 **ГОСТ 14236-81.** Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.
- 103 **Крассовский, Г. И.** Планирование эксперимента / Крассовский Г.И., Филаретов Г.Ф. ; - Мн.: Изд-во БГУ им. Ленина, 1982. – 302 с.
- 104 **Хайлис, Г. А.** Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Хайлис Г. А., Коваль М. М.; – М.: Колос, 1994. – 169 с.

- 105 **Аугамбаев, М. И.** Основы планирования научно-исследовательского эксперимента / Аугамбаев М., Иванов А.З., Терехов Ю.И.; - Ташкент. Укитувчи, 1993. – 336 с.
- 106 **ГОСТ 21981-76.** Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании (проб). – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
- 107 **ГОСТ 9.407-84.** Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 8 с.
- 108 Вибраторы электромеханические общего назначения ИВ-98Б, ИВ-98Н, ИВ-99Б, ИВ-99Н, ИВ-99Б-П, ИВ-105-2.2, ИВ-107А, ИВ-107Н, ИВ-107А-П, ИВ-107А-1.5: Руководство по эксплуатации 2-1.003 РЭ. – Ярославль, 2003 г.
- 109 **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.
- 110 **Стромберг, А. Г.** Физическая химия / Семченко Д. П.; – М.: Высшая школа, 1999. – 527 с.
- 111 **Даниэльс, Ф.** Физическая химия / Олберти Р. – М.: Мир, 1978. – 645 с.
- 112 **ГОСТ 18249-72.** Пластмассы. Метод определения вязкости разбавленных растворов полимеров. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 6 с.
- 113 **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 международная научно-практическая конференция: Информационные технологии и инновации на транспорте: – Орел.: Изд-во ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2016. – С. 258 –264.
- 114 **Ли, Р. И.** Исследование машин и оборудования металлургического производства. Учебное пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – 305 с.
- 115 **Колесников, А.А.** Оптимизация режима термической обработки поса-

дочных 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.

116 **Колесников, А.А.** Повышение качества покрытий полимерной композиции на основе эластомера Ф-40 при ультразвуковой обработке / Р.И. Ли, А.А. Колесников //: – Тамбов.: Изд-во ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии, 2013. – С. 18 – 21.

117 **Шпилько, А. В.** Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / Шпилько А.В., Драгайцев В.И., Тулапин П.Ф. и др.; – М.: Издательство журнала «Аграрная наука», 1998. – 127 с.

118 **Сергеев, И. В.** Экономика предприятия / Сергеев И. В.; – М.: Финансы и статистика, 2000. – 297 с.


119 **Конкин, Ю. А.** Экономическое обоснование внедрения мероприятий научно-технического прогресса в АПК / Конкин Ю. А., Пацкалев А. Ф., Осипов В. И. и др.; – М.: МИИСП, 1992. – 47с.

120 **Кравченко, И. Н.** Техничко – экономическое обоснование инженерных решений по эксплуатации и ремонту машин / Кравченко И. Н., Шилина Н. В., Попова Л. Н., Карцев С. В., Пучин Е. А., Карев А. М.; - МИздательство УМЦ «Триада», 2006. – 144с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А (справочное)



 **ФОНД СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ**
малых форм предприятий в научно-технической сфере

ДИПЛОМ

Победитель программы “Участник молодежного
научно-инновационного конкурса” (“УМНИК”)

КОЛЕСНИКОВ

АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

*Председатель
Наблюдательного совета*

*Генеральный директор
Фонда содействия развитию
малых форм предприятий
в научно-технической сфере*



И.М. Бортник

С.Г. Поляков

Приложение Б (справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2537864

**КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ИЗДЕЛИЙ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Липецкий государственный технический университет" (ЛГТУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013104578

Приоритет изобретения 04 февраля 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 13 ноября 2014 г.

Срок действия патента истекает 04 февраля 2033 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Курий



**Приложение В
(рекомендуемое)**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

восстановления посадочных отверстий корпусных деталей композицией на основе эластомера Ф–40 после ультразвуковой обработки

№ п/п	Содержание операции	Оборудование, приспособления, инструмент, материалы	Технические условия
1	Очистить посадочные места подшипников в отверстиях корпусной детали от следов коррозии	Верстак слесарный ОРГ 1468А, тиски, шкурка шлифовальная Э5М1А №16	Обработать поверхности до металлического блеска
2	Измерить посадочные отверстия для определения износа	Нутромер индикаторный	Диаметральный износ не должен превышать допустимого значения 0,25 мм
3	Обезжирить посадочные места подшипников в отверстиях корпусной детали	Стол с вытяжным шкафом ОП-2038, технический ацетон, тампон ватный, обернутый марлей	Выдержать на воздухе в течение 10 мин.
4	Приготовить композицию	Эластомер лак Ф-40 (ТУ 6-06-246-92), алюминиевая пудра ПАП-1 (ГОСТ 5494-95), бронзовый порошок БПП-1 (ТУ 48-21-150-72), весы ВК 3000.1	Состав композиции: эластомер Ф-40С – 100 масс.-ч.; алюминиевый порошок ПАП-1 – 16 масс.-ч.; бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 масс.-ч.
5	Провести УЗ обработку композиции	Ванна ультразвуковая "GRAD 0,5 HOME STYLE"	Время УЗО t = 20 мин (0,33 ч), уровень раствора ПКМ в ультразвуковой ванне h ≤ 14 мм
6	Нанести послойно композицию на посадочные места подшипников в отверстиях корпусной детали	Кисть волосяная №6...8	Каждый слой покрытия сушить в течение 10 мин
7	Провести термическую обработку нанесенных полимерных покрытий	Шкаф сушильный СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3 или сушильная камера	Термическую обработку проводить при температуре 120°С в течение 2,5 ч
8	Провести калибровку отверстия с полимерным покрытием	Устройство для калибрования, монтажная труба, электрогидравлический пресс	–
9	Провести контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали	Лупа 8-10 кратного увеличения	Визуальный осмотр

Приложение Г (справочное)



А К Т

на проведение производственных испытаний

10 марта 2015 г.

с. Слободка, Лебедянский район Липецкая область

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ЗАО «Агрофирма «Русь» гл. инженер Жигалев И.И., зав. ЦРМ Поляков А.В. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО ЛГТУ д. т. н., профессор Ли Р. И., аспирант Колесников А.А., аспирант Киба М.Р. с другой, составили настоящий акт о том, что на предприятии ЗАО «Агрофирма «Русь» проведена производственная проверка технологии восстановления посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях автомобилей КАМАЗ-5320, ГАЗ-3307, УАЗ-315195 и тракторов К-700, МТЗ-80, ДТ-75М полимерной композицией на основе эластомера Ф-40.

Восстановлены посадочные отверстия под подшипники качения в следующих корпусных деталях: картер КП автомобиля КАМАЗ-5320 (14.1701015) – 1 шт.; картер раздаточной коробки автомобиля КАМАЗ (65111-1800020) – 1 шт.; картер КП автомобиля ГАЗ-3307 (53-12-1701015-01) – 2 шт., картер КП автомобиля УАЗ-315195 (3160-1701015) – 1 шт.; картер КП трактора К-700 (700.17.01.) – 2 шт.; картер КП трактора МТЗ - 80 (50-1701025А) – 2 шт.; картер КП трактора ДТ-75 (77.38.021-1А) – 1 шт.; В результате собраны одна опытная КП автомобиля КАМАЗ-5320, одна опытная раздаточная КП автомобиля КАМАЗ-5320, две опытных КП автомобиля ГАЗ-3307, одна опытная КП автомобиля УАЗ-315195, две опытных КП трактора К-700, две опытных КП трактора МТЗ-80, одна опытная КП трактора ДТ-75.

Наблюдения за опытными узлами будут осуществляться специалистами ЗАО «Агрофирма «Русь» и аспирантами ФГБОУ ВО ЛГТУ.

Гл. инженер

Жигалев И.И.

Зав. ЦРМ

Поляков А.В.

Д. т. н., профессор

Ли Р.И.

Аспирант

Колесников А.А.

Аспирант

Киба М.Р.

Продолжение приложения Г


 Директор ЗАО «Агрофирма «Русь»
 Голиков В.А.
 « » 2016 г.

АКТ
эксплуатационных испытаний

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ЗАО «Агрофирма «Русь» гл. инженер Жигалев И.И., зав. ЦРМ Поляков А.В. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО ЛГТУ д. т. н., профессор Ли Р. И., аспирант Колесников А.А., аспирант Киба М.Р. с другой, составили настоящий акт об эксплуатационных испытаниях опытных агрегатов трансмиссии автомобилей и тракторов, у которых посадочные отверстия под подшипники качения восстановлены композицией на основе эластомера Ф- 40.

Таблица – Опытные агрегаты трансмиссии с восстановленными отверстиями под подшипники качения

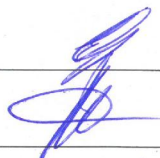
Хоз. номер автомобиля, трактора	Марка автомобиля, трактора	Наработка объекта за период испытаний, мото-ч	Наименование узла
27	КАМАЗ-5320	58200 км	Коробка передач
31	КАМАЗ-5320	56954 км	Раздаточная коробка
39	ГАЗ-3307	67601 км	Коробка передач
44	ГАЗ-3307	68450 км	Коробка передач
56	УАЗ-315195	49886 км	Коробка передач
14	К-700	954	Коробка передач
15	К-700	913	Коробка передач
7	МТЗ-80	1270	Коробка передач
11	МТЗ-80	1149	Коробка передач
24	ДТ-75	370	Коробка передач

Время (календарная продолжительность) эксплуатации с марта 2015 г. по ноябрь 2016 г.

За период эксплуатации отказов и простоев по причине недостаточной долговечности испытываемых соединений не наблюдалось.

Посадки подшипников качения, восстановленные композицией на основе эластомера Ф-40, находятся в работоспособном состоянии и пригодны для дальнейшей эксплуатации.

Гл. инженер



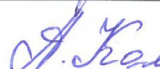
Жигалев И.И.

Зав. ЦРМ



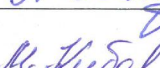
Поляков А.В.

Д. т. н., профессор



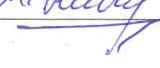
Ли Р.И.

Аспирант



Колесников А.А.

Аспирант



Киба М.Р.

Продолжение приложения Г



«УТВЕРЖДАЮ»
 Директор ЗАО «Агрофирма «Русь»
 Голиков В.А.
 2016 г.

Акт внедрения (реализации) результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ЗАО «Агрофирма «Русь» гл. инженер Жигалев И.И., зав. ЦРМ Поляков А.В. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО ЛГТУ д. т. н., профессор Ли Р. И., аспирант Колесников А.А., аспирант Киба М.Р. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты научной работы по теме «Исследование долговечности и разработка технологии восстановления корпусных деталей автотракторной техники полимерной композицией на основе эластомера Ф-40» внедрены (реализованы) на предприятии.

Технические преимущества разработки: повышение долговечности посадок подшипников качения, снижение себестоимости ремонта корпусных деталей автотракторной техники.

Экономия материальных ресурсов: экономия запасных частей.

Практическое использование результатов НИР: внедрена технология восстановления посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях автотракторной техники композицией на основе эластомера Ф-40.

Результаты исследований используются на предприятии ЗАО «Агрофирма «Русь».

Годовой экономический эффект от использования результатов НИР составляет 360 000 (триста шестьдесят тысяч) рублей.

Гл. инженер

Жигалев И.И.

Зав. ЦРМ

Поляков А.В.

Д. т. н., профессор

Ли Р.И.

Аспирант

Колесников А.А.

Аспирант

Киба М.Р.