

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



МЕЛЬНИКОВ АНТОН ЮРЬЕВИЧ

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

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Липецк – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 5 |
| 1 Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований..... | 10 |
| 1.1 Способы восстановления корпусных деталей автомобилей | 10 |
| 1.2 Классификация наноразмерных наполнителей для полимерных материалов . | 26 |
| 1.3 Методы усталостных испытаний материалов..... | 39 |
| 1.4 Выводы. Цель и задачи исследований..... | 50 |
| 2 Теоретические предпосылки повышения эффективности эластомерных нанокompозитов, наполненных углеродными нанотрубками (УНТ)..... | 53 |
| 2.1 Механические свойства и фрактальный анализ эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ..... | 53 |
| 2.1.1 Усиление, прочность и деформация эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ..... | 53 |
| 2.1.2 Выносливость эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ..... | 58 |
| 2.1.3 Фрактальный анализ структуры нанокompозита | 63 |
| 2.2 Ультразвуковое диспергирование растворов полимерных нанокompозитов ... | 72 |
| 2.3 Метод усталостных испытаний | 73 |
| 3 Методика экспериментальных исследований..... | 78 |
| 3.1 Общая методика исследований..... | 78 |
| 3.2 Методика исследования механических свойств эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе | 80 |
| 3.2.1 Методика исследования деформационно-прочностных свойств пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С..... | 80 |
| 3.2.2 Методика исследования адгезии покрытий нанокompозита на основе эластомера Ф-40С..... | 84 |
| 3.2.3 Методика исследования модуля упругости эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе | 85 |
| 3.3 Методика исследования тепло-физических свойств эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе..... | 87 |

| | |
|--|-----|
| 3.3.1 Методика исследования теплопроводности нанокompозита на основе эластомера Ф-40С..... | 87 |
| 3.3.2 Методика исследования термостойкости эластомера Ф-40С и нанокompозита на его основе | 90 |
| 3.4 Методика исследование ультразвукового диспергирования нанокompозита на основе эластомера Ф-40С | 92 |
| 3.4.1 Методика определение времени ультразвукового диспергирования раствора эластомерного нанокompозита..... | 92 |
| 3.4.2 Методика исследования дегазации раствора полимерного нанокompозита на основе эластомера Ф-40С при ультразвуковой обработке | 95 |
| 3.4.3 Методика исследования структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после ручного смешения и УЗО..... | 96 |
| 3.4.4 Методика исследования дефектности покрытий нанокompозита на основе эластомера Ф-40С | 97 |
| 3.5 Методика исследования долговечности посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокompозитом на его основе | 98 |
| 4 Результаты экспериментальных исследований и их анализ..... | 101 |
| 4.1 Механические свойства эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе | 101 |
| 4.1.1 Деформационно-прочностные свойства эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе..... | 101 |
| 4.1.2 Адгезионные свойства эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе | 106 |
| 4.1.3 Модуль упругости эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе | 107 |
| 4.1.4 Оптимизация термической обработки нанокompозита на основе эластомера Ф-40С..... | 110 |
| 4.2 Тепло-физические свойства эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе | 115 |
| 4.2.1 Теплопроводность эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе | 115 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.2 Термостойкость эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе в условиях ОДКВ | 117 |
| 4.3 Исследование ультразвукового диспергирования нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С | 120 |
| 4.3.1 Определение времени ультразвукового диспергирования раствора эластомерного нанокомпозита | 120 |
| 4.3.2 Исследование дегазации раствора эластомерного нанокомпозита | 122 |
| 4.3.3 Исследование структуры и элементного состава эластомерных нанокомпозитов после ручного смешения и УЗО | 123 |
| 4.3.4 Дефектность и деформационно-прочностные свойства покрытий после ультразвукового диспергирования | 126 |
| 4.4 Исследования долговечности посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокомпозитом на его основе | 132 |
| 5 Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка ... | 135 |
| 5.1 Технологические рекомендации | 135 |
| 5.2 Расчет экономической эффективности технологии восстановления корпусных деталей нанокомпозитом на основе эластомера Ф-40С в ООО «Сосновка-Зернопродукт» с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовская область | 137 |
| Заключение | 139 |
| Библиографический список | 142 |
| Приложения | 159 |

ВВЕДЕНИЕ

Современные мировые политические и экономические реалии ставят перед отечественным сельскохозяйственным производством важные задачи: добиться реальной замены импортных товаров сельскохозяйственного назначения отечественными, с целью достижения продовольственного суверенитета России. Для снижения себестоимости сельскохозяйственной продукции и, соответственно повышения ее конкурентоспособности, необходимо сокращать затраты на технический сервис сельхозтехники и технологического оборудования.

При восстановлении изношенных деталей существенно снижаются расходы на ремонт техники и повышается ее надежность.

В сравнении с изготовлением новой детали, при восстановлении расход металла сокращается от 20 до 30 раз. Исключение металлургического цикла производства позволяет сэкономить в процессе восстановления 1 т изношенных, стальных деталей до 180 кВт/ч электроэнергии, 0,8 т угля, 0,5 т известняка, 175 м³ природного газа [1].

Наибольшего экономического и технического эффекта удается достичь, когда восстанавливают корпусные детали сельскохозяйственной техники. Причина заключается в наиболее высокой материалоемкости и цене новых корпусных деталей и относительно не больших затратах при восстановлении.

Современные технологии восстановления отличаются от традиционных тем, что позволяют устранять повышенные износы и увеличивать при этом послеремонтный срок службы детали, что способствует повышению надежности машины [2...29].

«Основным дефектом, приводящим к выбраковке корпусных деталей, является износ подшипниковых посадочных отверстий из-за фреттинг-коррозии» [30...34].

Корпусные детали представляют собой базисные, наиболее материалоемкие и дорогие детали. Долговечность корпусных деталей определяет ресурс агрегатов и надежность автомобиля в целом. Поэтому восстановление и упрочнение

изношенных корпусных деталей позволяет значительно снизить затраты на ремонт и повысить надежность автомобильной техники. Для восстановления изношенных посадочных отверстий используют различные способы восстановления: нанесение гальванических покрытий, электроконтактную приварку стальной ленты, электроискровое наращивание, различные способы наплавки и др. Эти способы имеют общие недостатки: сложность технологии и технологического оборудования, значительное энергопотребление, необходимость механической обработки отверстий после наращивания [35].

Технология восстановления корпусных деталей полимерным материалом отличается простотой, низким энергопотреблением и расходом ремонтных материалов, исключает фреттинг-коррозию отверстий после восстановления, многократно увеличивает ресурс подшипниковых узлов [9, 13...18, 22, 35].

Эффективность восстановления корпусных деталей существенно повышается при использовании полимерных нанокомпозитов. Наполнение полимера наночастицами приводит к изменению его структуры, кардинальному улучшению его потребительских свойств [9, 13...15]. Необходима разработка перспективных полимерных нанокомпозитов, создающих базу для высокоэффективных технологий восстановления, обеспечивающих увеличение послеремонтного ресурса корпусных деталей, повышение надежности и снижение затрат при ремонте техники.

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

Вопросам восстановления изношенных деталей техники полимерными материалами и композитами на их основе посвящены труды Астанина В. К., Бауровой Н. И., Зорина В. А., Котина А. В., Кононенко А. С., Курчаткина В. В., Ли Р. И., Родионова Ю. В. и многих других отечественных ученых [36...43].

В настоящее время потребителю предлагается очень большой спектр наноразмерных частиц в качестве наполнителя: органоглины, дисперсные органические и неорганические наночастицы, и углеродные нанотрубки (УНТ). В тоже время отсутствует информация об эластомерных нанокомпозитах, которые наполнены углеродными нанотрубками, и используются для восстановления корпусных деталей техники.

Необходима разработка эластомерного композита, наполненного углеродными нанотрубками.

Известные методы усталостных испытаний имеют общий недостаток: большая трудоемкость, а результаты испытаний пригодны только для образцов узкого диапазона типоразмеров [44].

Необходимо разработать новый метод ускоренных усталостных испытаний, позволяющий оперативно получить достоверную информацию о выносливости полимерных посадок, обеспечить пригодность использования результатов испытаний применительно к любым типоразмерам подшипников качения.

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

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании повышения механических свойств эластомера после наполнения углеродными нанотрубками, результатах фрактального анализа структуры нового нанокомпозита, разработке нового метода усталостных испытаний полимерных материалов.

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

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

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

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

Новый эластомерный нанокompозит и технология восстановления внедрены в ООО «Сосновка-Зернопродукт» (с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовской области).

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

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международных научно-практических конференциях: ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов), 2017 г.; ЛГТУ (г. Липецк), 2018...2022 гг.; Саратовский гос. агр-й ун-т (г. Саратов), 2019 г.; Елецкий гос. ун-т (г. Елец), 2020 г.; Юго-Зап. гос. ун-т, (г. Курск), 2021 г.; Орловский гос. ун-т (г. Орел), 2021 г.;

Орловский гос. агр-й ун-т (г. Орел), 2022 г.; заседании кафедры «Транспортные средства и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО ЛГТУ в 2023 г.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 33 печатных работах, в том числе 3 публикации в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 8 публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки, и 3 патента на изобретение РФ (приложения А...В).

Диссертационная работа содержит: введение, пять глав, заключение, библиографический список и приложения. Объем работы 175 страниц машинописного текста. Диссертация включает 72 рисунка, 17 таблиц, 8 приложений и библиографический список из 167 наименований.

На защиту выносятся:

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

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Способы восстановления корпусных деталей автомобилей

На сегодняшний день при ремонте посадочных отверстий в корпусных деталях техники используется значительное множество способов восстановления (рисунок 1.1) [21].

Установка дополнительной детали – является широко известным и используемым способом восстановления отверстий в корпусных деталях. В качестве деталей используют втулки или кольца. Предварительно выполняют растачивание изношенных отверстий. В отверстие запрессовывают дополнительную деталь с последующей мехобработкой под номинальный размер [37...4039].

Недостатки: сложное технологическое оборудование, высокая трудоемкость и себестоимость, расточка отверстий и большие натяги при запрессовке приводят к снижению прочности и жесткости корпусных деталей.

Сварочно-наплавочные способы получили широкое распространение при восстановлении любых типов деталей. Если деталь имеет сложную конструктивную форму или ограничен доступ в зону наплавки используют ручную наплавку. К недостаткам ручной дуговой наплавки можно отнести: зависимость итоговое качество шва от мастерства сварщика; вредность процесса для окружающей среды; существенно меньшее КПД, чем у автоматизированных методов, как следствие – производительность сравнительно низкая; при постоянном токе часто возникает магнитное дутье, негативно влияющее на струю (отклоняющее ее).

Для восстановления деталей с небольшим износом в ЧИМЭХ разработан способ вибродуговой наплавки. В процесс наплавки происходит периодическое прерывание электрической дуги, что приводит к мелкокапельному переносу металла с электрода в сварочную ванну, которая не значительно нагревает деталь,

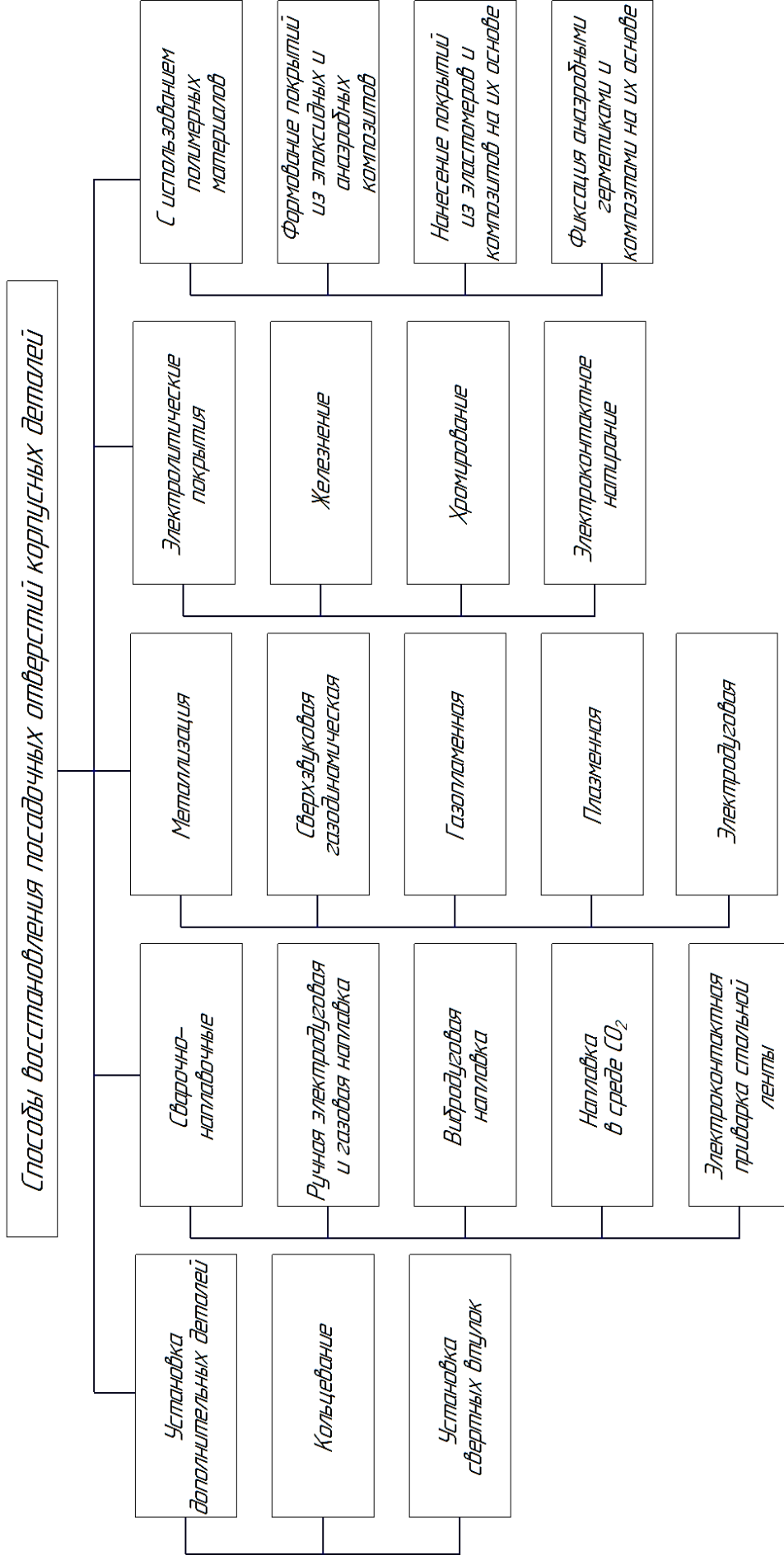


Рисунок 1.1 – Способы восстановления посадочных отверстий корпусных деталей [21]

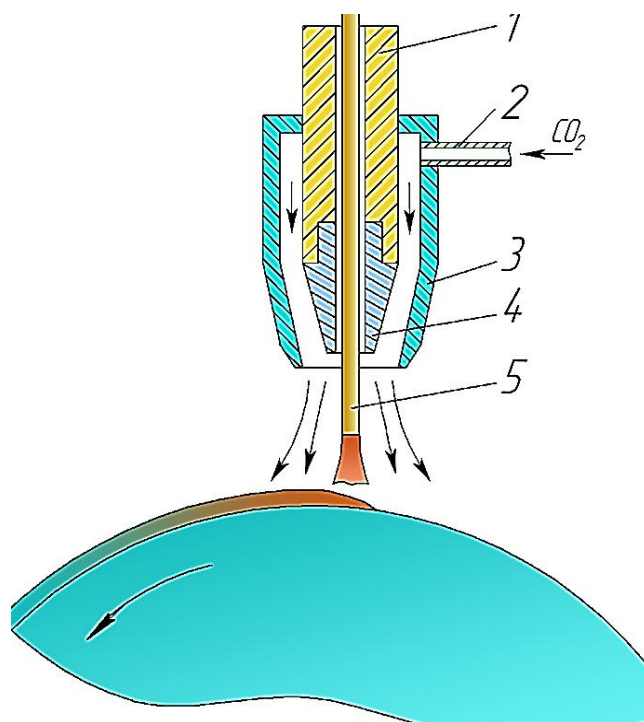
хорошо сплавляет электродный металл с основным, не вызывает выгорания легирующих элементов, в сравнении с другими способами наплавки.

Вибродуговая наплавка имеет следующие преимущества: в процессе наплавки происходит незначительные нагрев и деформации детали, отсутствие необходимости проведения термической обработки вследствие получения твердой поверхности, несложное и распространённое оборудование, высокая скорость наплавки и равномерные металлические покрытия.

Недостатки: неоднородность по твердости и структуре покрытия, снижение усталостной прочности деталей до 60 %.

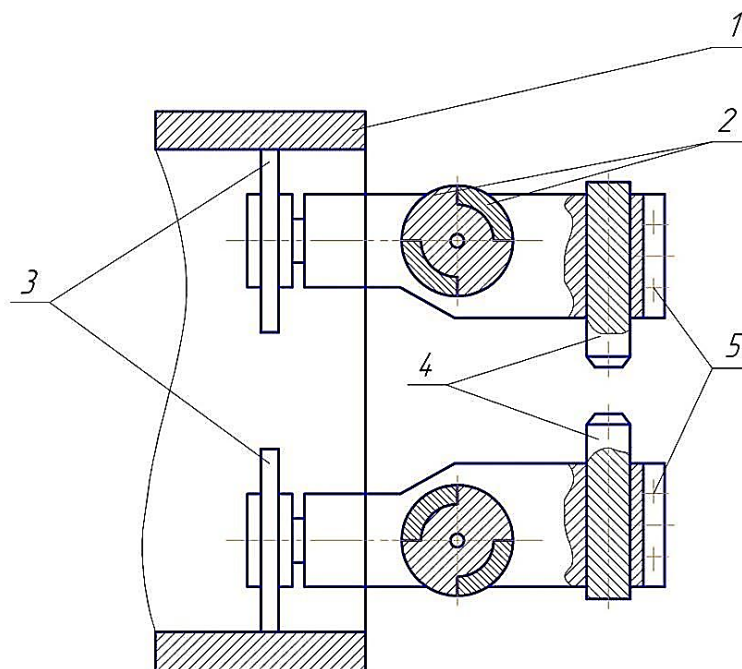
В настоящее время наибольшее распространение получила наплавка в среде углекислого газа (рисунок 1.2). Этот способ наплавки отличается высокой производительностью превышающей газовую сварку в 3...4 раза, прочностью сварного шва, небольшой зоной термического влияния, что позволяет восстанавливать малогабаритные детали без нарушения их геометрии. К недостаткам данного способа наплавки следует отнести выгорание легирующих элементов и склонность наплавленного покрытия к возникновению трещин. Углекислый газ при высокой температуре наплавки разлагается на оксид углерода и атомарный кислород, что приводит в результате к вышеуказанным отрицательным явлениям [31, 40...42].

Износ посадочных отверстий устраняют с помощью электроконтактной приварки стальной ленты (рисунок 1.3). «...Ленту приваривают на изношенную поверхность используя медные роликовые электроды, через которые протекает большой сварочный ток в пределах от 16,1 до 18,1 кА. Из-за отсутствия напряжений, после охлаждения сварной шов не имеет трещин. Твердость покрытия достигает 60...65 HRC. Производительность способа, по сравнению с наплавкой, в 2...3 раза выше, а потребление металла в 3...4 раза меньше. Недостатки способа это низкий ресурс электродов и сложное технологическое оборудование» [45...47].



1 – мундштук; 2 – трубка для углекислого газа; 3 – сопло;
4 – наконечник; 5 – электродная проволока

Рисунок 1.2 – «Принципиальная схема автоматизированной наплавки в среде защитного газа CO_2 » [43]



1 – деталь (корпус коробки передач); 2 – сектора; 3 – роликовые электроды;
4 – электроды для сварки плоских поверхностей; 5 – болты

Рисунок 1.3 – «Электроконтактная приварка ленты к изношенному отверстию роликовыми электродами» [43]

Электродуговая и газотермическая металлизация имеют высокую производительность, обеспечивают нанесение покрытий толщиной более 10 мм. При наращивании деталь нагревается не значительно, поэтому в металле нет структурных изменений. Покрытия отличаются высокой твердостью и износостойкостью. Недостатки: пористость и хрупкость покрытия, ее низкая адгезия к подложке [48].

При плазменной металлизации плазменная струя плавит присадочный материал и распыляет частицы расплавленного металла на изношенную поверхность детали теми же газами, используемыми при плазмообразовании и защите.

Температура плазменной струи составляет 10000...30000 °С, что позволяет плавить и напылять практически все тугоплавкие материалы. Процесс отличается высокой производительностью, а покрытия равномерностью.

К недостаткам следует отнести: низкую сцепляемость покрытия с подложкой, и высокая пористость, достигающую 20 %; высокие значения уровня шума (100...130 дБ); высокую стоимость оборудования и его низкую мобильность.

В настоящее время все большее широкое распространение получает способ газодинамического нанесения покрытий, который реализуется в установках марки «Димет» (рисунок 1.4).

Отличие этого способа от традиционных электродуговой и газотермической металлизации заключается в том, что транспортирующий газ и напыляемые частицы обладают сверхзвуковой скоростью.

Процесс содержит следующие этапы: нагревание транспортирующего газа (воздух) и его подача в сверхзвуковое сопло для создания в нем сверхзвукового газового потока, подача в него частиц порошка и ускорение этих частиц до сверхзвуковой скорости в направлении восстанавливаемой поверхности детали.

При столкновении частиц с поверхностью подложки они внедряются в нее, сцепляются с ней с образованием сплошного покрытия (рисунок 1.5). Примечательно то, что температура частиц присадочного материала при наращивании поверхности существенно меньше температуры их плавления.

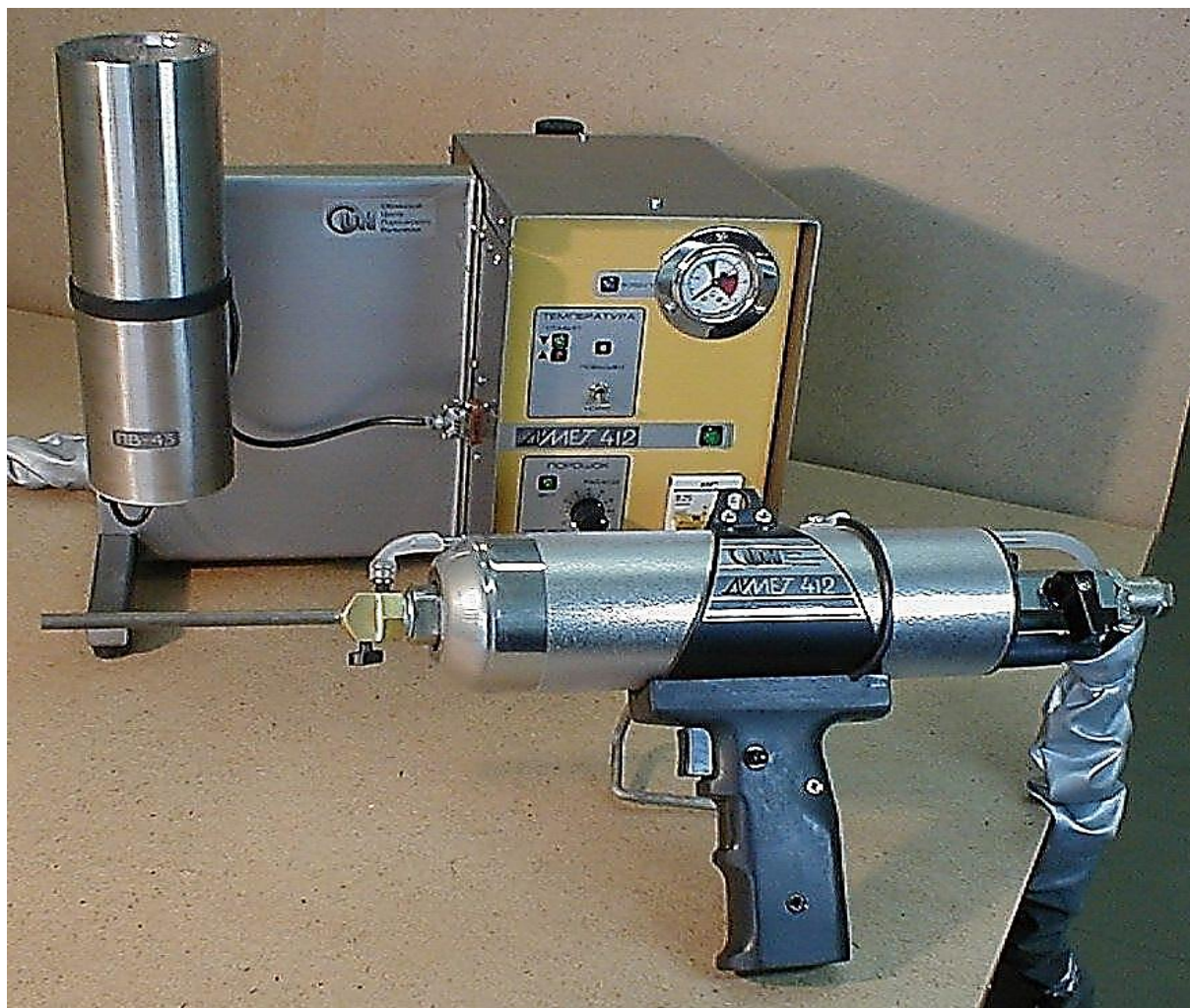


Рисунок 1.4 – Установка газодинамического напыления «Димет-412»

Достоинства: высокая производительность, пониженная до 7 % пористость покрытий. Недостатки – низкая износостойкость покрытий.

Гальванические способы для восстановления деталей выгодно отличаются отсутствием изменений в структуре металла детали, обеспечивают возможность получения покрытий в большом диапазоне толщин от 0,1 до 1 мм, высокой точности, исключаяющей в ряде случаев необходимость механической обработки. Процессы легко поддаются механизации и автоматизации [49].

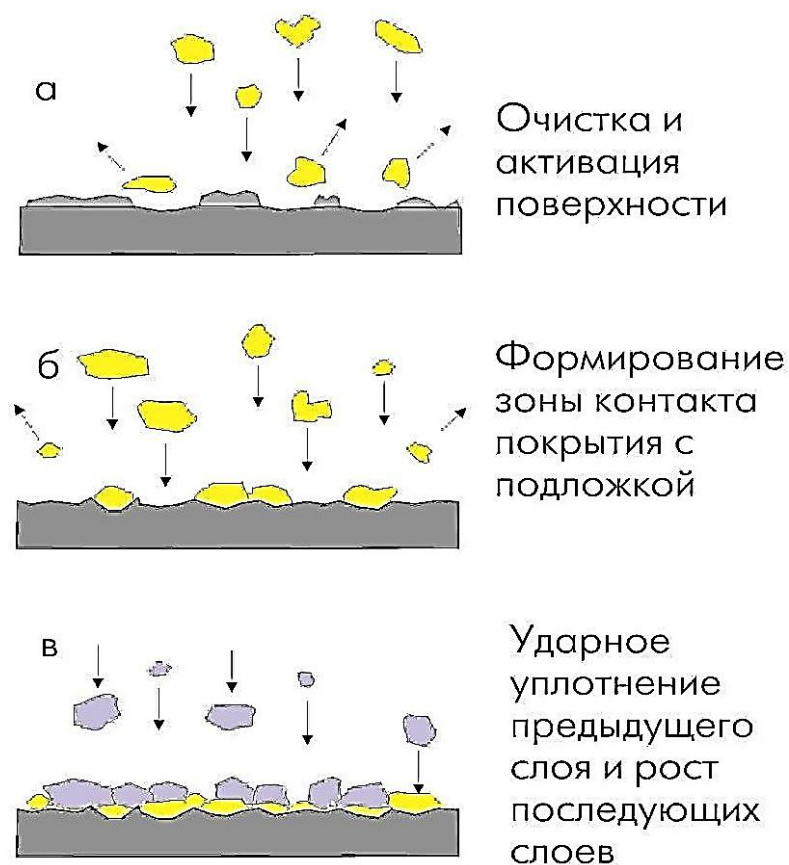


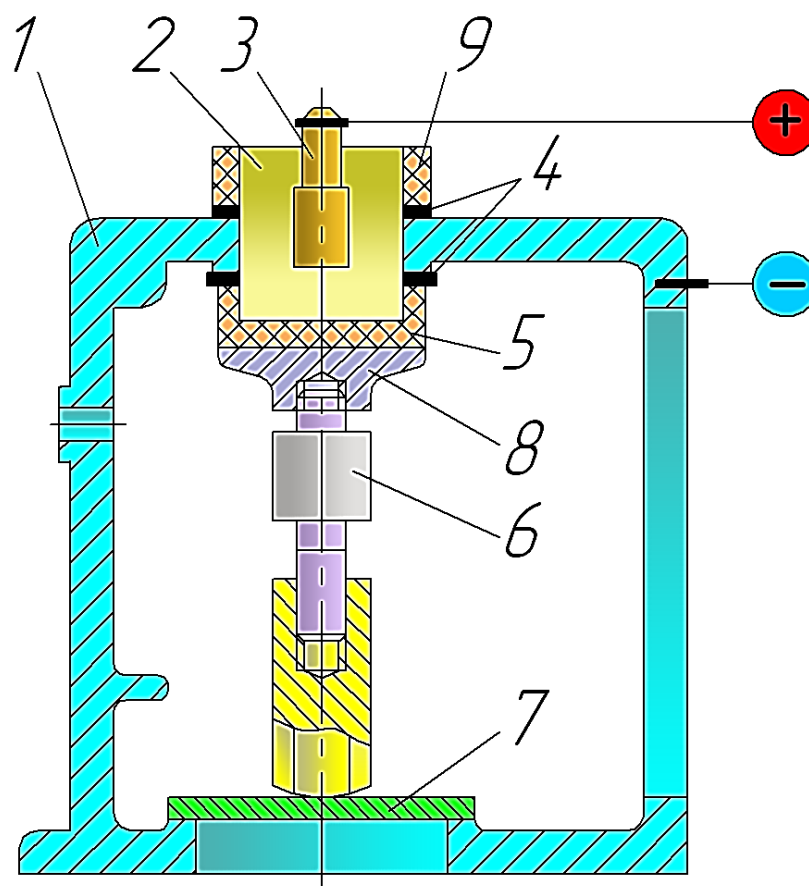
Рисунок 1.5 – Этапы формирования газодинамического покрытия

При восстановлении корпусных деталей возникает проблема изоляции мест, которые не подлежат наращиванию. В этой связи посадочные отверстия в корпусной детали восстанавливают местным железнением, т.е. с образованием местной гальванической ванны (рисунок 1.6). Отверстие снизу герметизируют с помощью специального поджимного приспособления и заполняют его электролитом. Затем в отверстие устанавливают анод 3 из малоуглеродистой стали. Корпусная деталь является катодом. Скоростью осаждения 0,3 мм/ч. После наращивания образуется качественное гладкое покрытие толщиной до 0,7 мм, а его твердость достигает 4000...4500 МПа.

Способ железнения имеет недостатки. Вследствие наводороживания металлического осадка ухудшаются механические свойства нанесенного покрытия.

При хромировании деталей получают декоративные и антикоррозионные покрытия.

Покрытия отличаются высокой микротвердостью 400...1200 МН/м², что в 1,5...2 раза превышает аналогичный параметр после закалки ТВЧ, высокой химической, термической и коррозионной стойкостью и сцепляемостью хромового покрытия с подложкой.



1 – деталь (корпус коробки передач); 2 – электролит; 3 – анод;
4 – резиновые прокладки; 5 – стакан; 6 – раздвижная распорка; 7 – опорная плита;
8 – подставка; 9 – кольцо

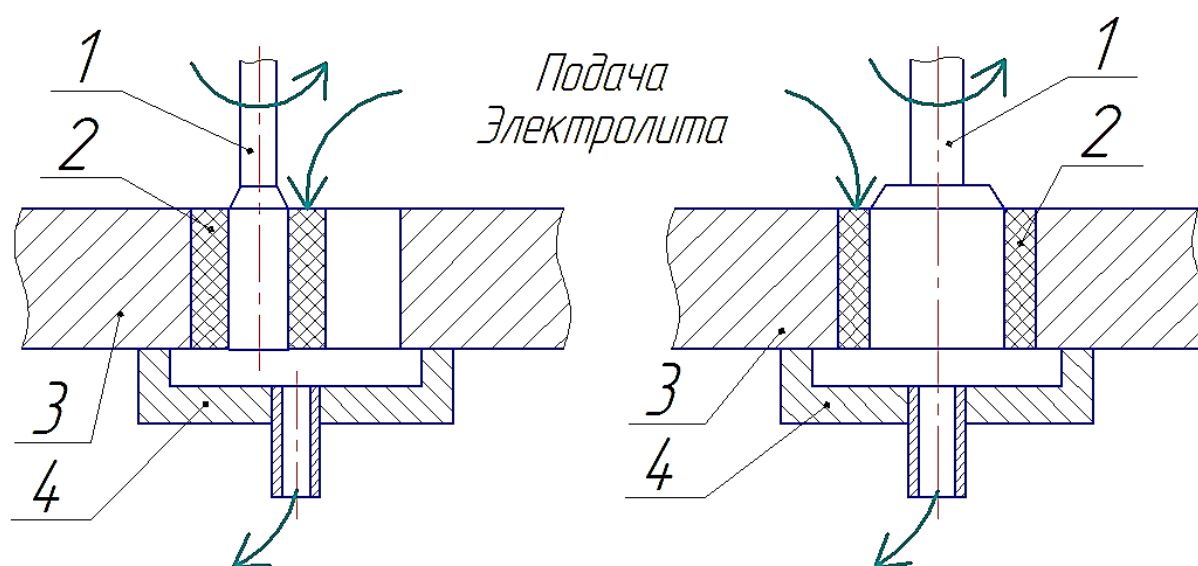
Рисунок 1.6 – Восстановление отверстий местным осталиванием [48]

Недостатки хромирования: не высокий выход металла по току – 8...42 %, значительная себестоимость технологии, существенное количество токсичных выбросов.

Электролитическим натиранием можно получать высококачественные покрытия. Технология реализуется в следующей последовательности: предварительная механическая обработка, обезжиривание, промывка в горячей и

холодной воде, травление, промывка в воде и нанесение покрытия. Обезжиривание и травление выполняют также натиранием, с использованием специальных тамподержателей и растворов. Для повышения сцепляемости покрытия с подложкой первоначально выдерживают плотность по току в пределах 30...40 А/дм², с последующим постепенным повышением до номинального значения.

Принципиальная схема гальванического наращивания анодными головками и электронатиранием показана на рисунке 1.7.



1 – анодная головка; 2 – тампон; 3 – деталь; 4 – сборник электролита

Рисунок 1.7 – Принципиальная схема гальванического наращивания анодными головками и электронатиранием [50]

Анализируя, рассмотренные выше способы наращивания, следует отметить ряд общих недостатков: покрытия не имеют полной стойкости к фреттинг-коррозии, сложность технологии и оборудования, требуется механическая обработка и высококвалифицированный персонал, высокая себестоимость [1, 2, 51...53].

Способы восстановления корпусных деталей полимерными материалами не имеют описанных выше недостатков. По причине простоты технологии восстановления полимерными материалами отличает низкая себестоимость и

высокая эффективность применения.

После восстановления полностью исключается фреттинг-коррозия посадочных мест подшипников, снижаются контактные напряжения, а ресурс подшипниковых узлов увеличивается многократно.

«Посадочные места подшипников качения восстанавливают с помощью эпоксидных смол, анаэробных герметиков, эластомеров и композитов на их основе» [69].

Способ восстановления отверстий нанесением и калиброванием эпоксидного композита разработали Б. А. Лангерт с сотрудниками [55]. Этим способом устраняют износы до 0,2 мм.

Изношенная поверхность подвергается механической зачистке и обезжириванию, после чего на нее наносят слой эпоксидного композита. После частичного отверждения состава покрытие калибруют под заданный размер. Покрытие отверждают при нормальных условиях в течение 72 ч или при повышенных температурах 100 и 180 °С в течение 1 или 0,5 ч, соответственно.

К недостаткам способа следует отнести повышенную шероховатость покрытия, погрешности в форме отверстия (неравномерность нанесенного слоя композиции), несоответствие полученного размера требуемому.

Композиты готовят непосредственно перед началом использования и в течение 20...25 мин материал необходимо нанести на изношенную поверхность отверстия. Механические свойства эпоксидных композитов требуют определенной точности дозировки компонентов.

Технологию невозможно автоматизировать и для ее реализации требуются гидравлический пресс, специальные калибры и приспособления для фиксации деталей в заданном положении. Особенностью эпоксидной смолы является ее стеклообразное состояние при комнатной температуре, что является причиной низкой выносливости материала при циклических нагрузках.

Этими недостатками объясняется то, что в настоящее время восстановление посадочных отверстий эпоксидными композитами и размерным калиброванием при ремонте техники не применяется.

Анаэробные герметики «...отличаются высокой адгезией к металлам, стойкостью к воде, маслу, топливам, органическим растворителям, кислотам, щелочам и другим химическим веществам. Рабочие температуры анаэробных герметиков колеблются в диапазоне от -60 до +150 °С» [8, 54, 56...58].

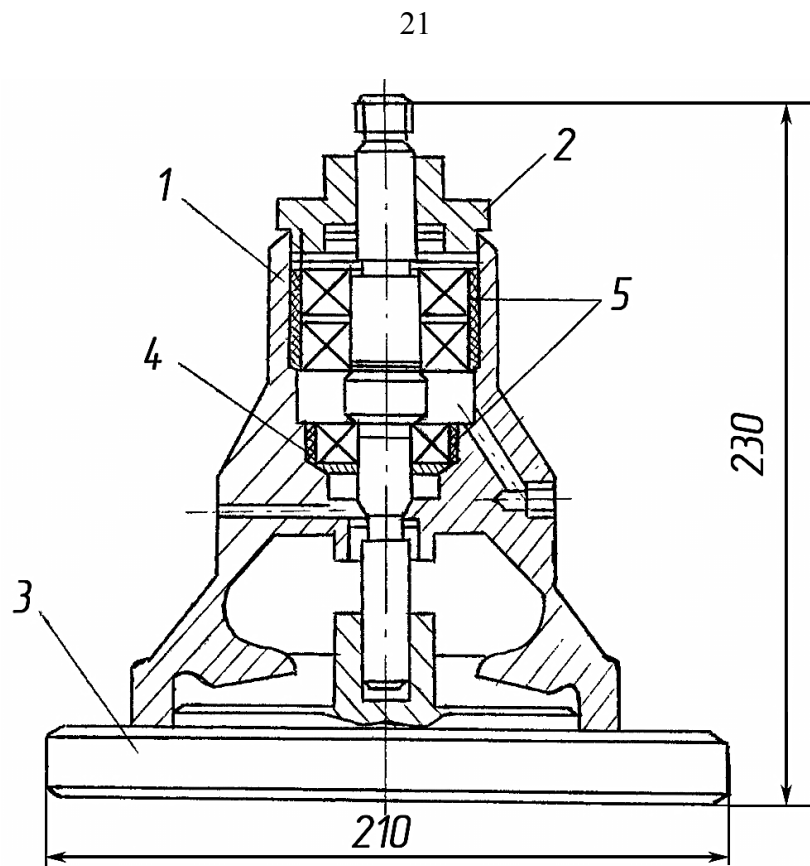
Материалы исключают фреттинг-коррозию сопрягаемых поверхностей деталей соединения, а кольцо подшипника деформируется таким образом, что снижаются контактные напряжения между телами качения и беговой дорожкой кольца. По этой причине ресурс подшипниковых узлов повышается многократно.

Технология восстановления анаэробным герметиком включает зачистку посадочных мест от коррозии, обезжиривание растворителем, нанесение адгезива, сборку деталей соединения и его отверждение. При износе более 0,05 мм используют центрирующие приспособления [74, 81]. Из рисунка 1.8 очевидна сложность конструкции приспособления и процесса центрирования деталей. Следует отметить высокую цену анаэробных герметиков, превышающую в 17...23 раза цену эластомеров.

Введение наполнителей снижает себестоимость восстановления, а также придает композиту особые потребительские свойства (повышенная в сравнении с полимерной матрицей теплопроводность, термостойкость, прочность и др.). Поэтому в последнее время для ремонтного производства исследованы и разработаны ряд анаэробных композитов.

В МГУ им. Огарева профессором Котиным А. В. с сотрудниками исследован и разработан анаэробный микрокомпозит на основе Анатерм-6В: «...Состав композита (масс. ч.): герметик Анатерм-6В – 100; тальк – 20; бронзовая пудра – 2» [13]. Для обеспечения номинальных размеров отверстия в корпусной детали, после нанесения композита на изношенную поверхность и определенной выдержки, проводят калибрование отверстия с полимерным композитным покрытием.

К недостаткам этого способа восстановления следует отнести сравнительно сложную конструкцию приспособления, которая пригодна для использования только для конкретного типа корпусной детали.



1 – корпус водяного насоса; 2 – крышка приспособления;
 3 – корпус приспособления; 4,5 – адгезив

Рисунок 1.8 – «Центрирование вала с подшипниками в корпусе водяного насоса при склеивании» [73, 80]

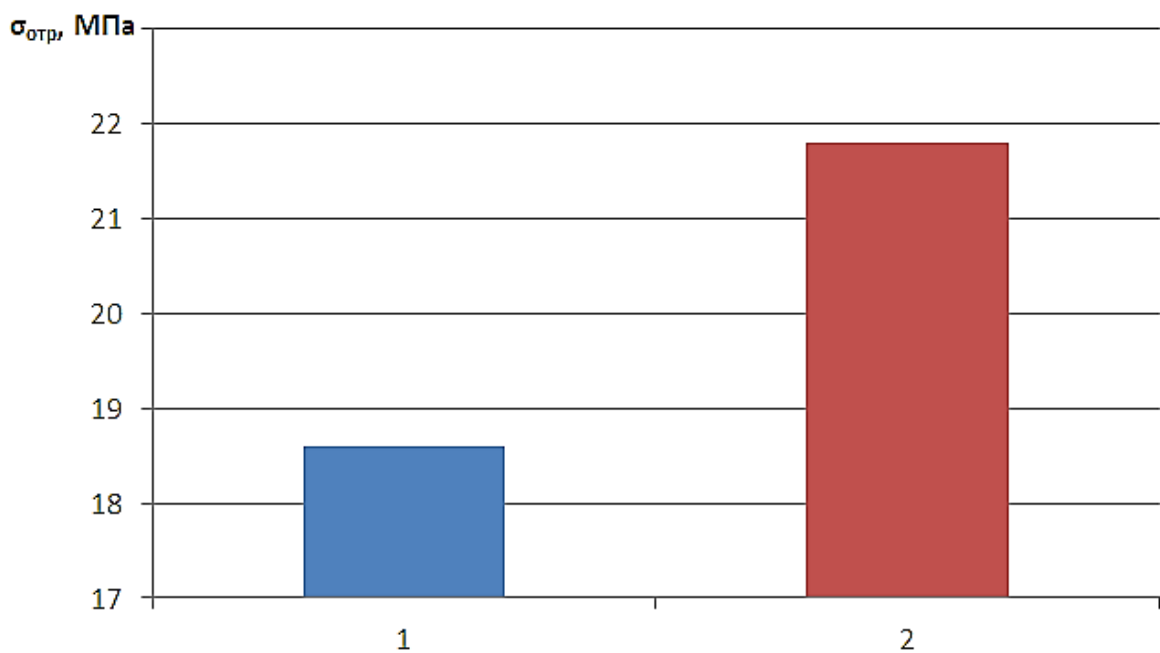


Рисунок 1.9 – Прочность клеевого соединения, выполненного анаэробным герметиком АН-111 (1) и композитом на его основе (2) [13]

Малюгиным В. А. разработан анаэробный нанокомпозит, наполненный наночастицами алюминия и меди. После всестороннего исследования механических свойств предложен нанокомпозит следующего состава (масс. ч.): «...анаэробный герметик АН-111 – 100; наночастицы алюминия – 1,0; наночастицы меди – 0,25. В сравнении с матрицей прочность соединений увеличилась в 1,28 раза, деформации в 1,15 раза, удельная работа разрушения в 1,27 раза (рисунки 1.10...1.12), теплопроводность в 5,26 раза (рисунок 1.13)» [69].

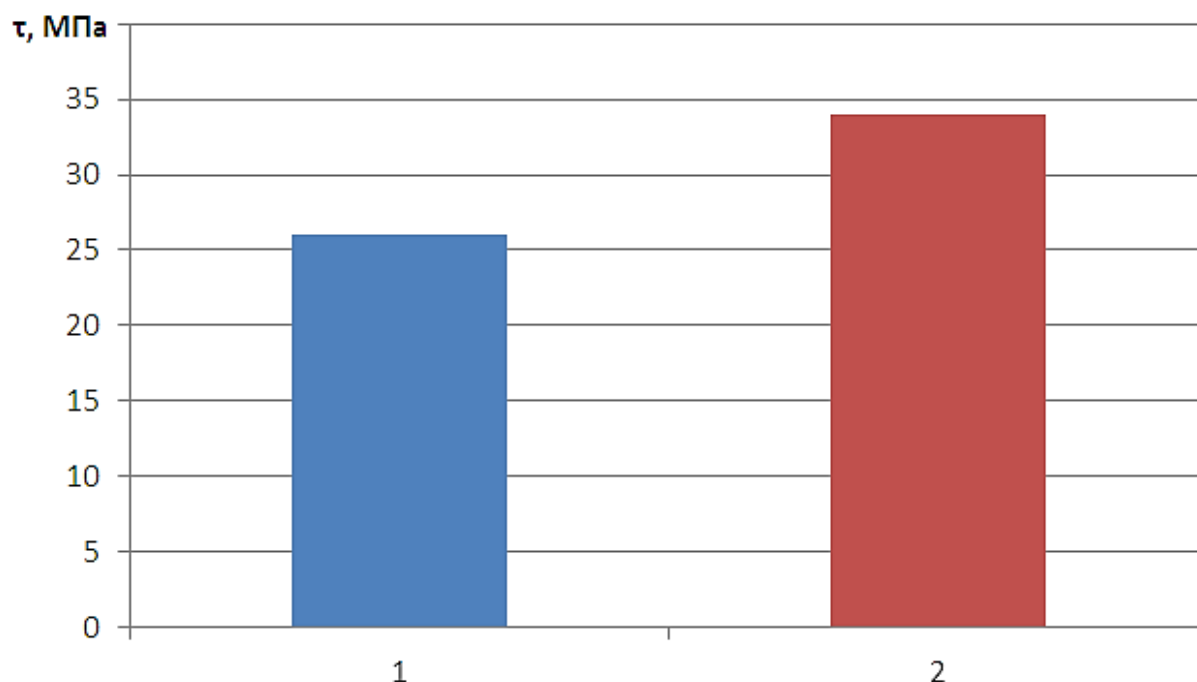


Рисунок 1.10 – «Прочность при аксиальном сдвиге τ клеевых соединений выполненных герметиком АН-111(1) и нанокомпозитом на его основе (2)» [69]

Недостатки: выбор технологических баз и центрирование сопрягаемых деталей при склеивании в корпусах агрегатов трансмиссии автомобилей и тракторов.

Способы восстановления отверстий эластомерами лишены вышеуказанных недостатков. Повышенная эластичность эластомеров приводит, в сравнении с анаэробными герметиками, к большей деформации колец подшипника, снижению контактных напряжений и увеличению до 8 раз ресурса подшипников на полимерной посадке [8, 14].

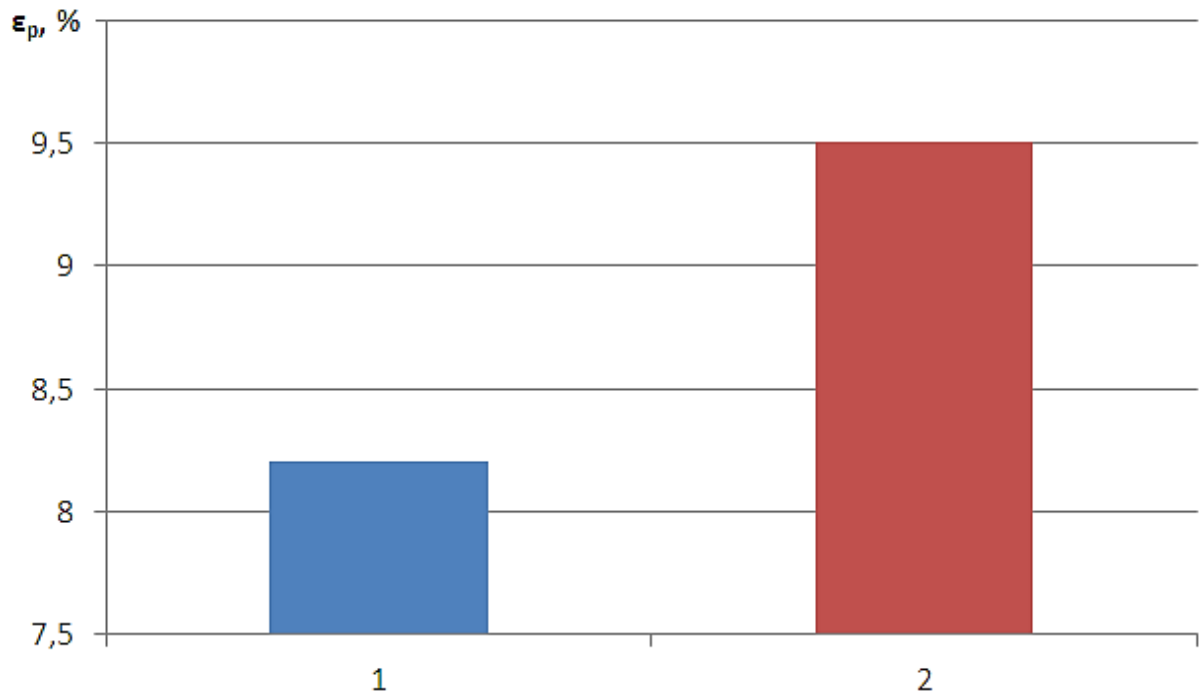


Рисунок 1.11 – «Относительное удлинение ϵ_p клеевого шва герметика АН-111 (1) и нанокompозита на его основе (2)» [69]

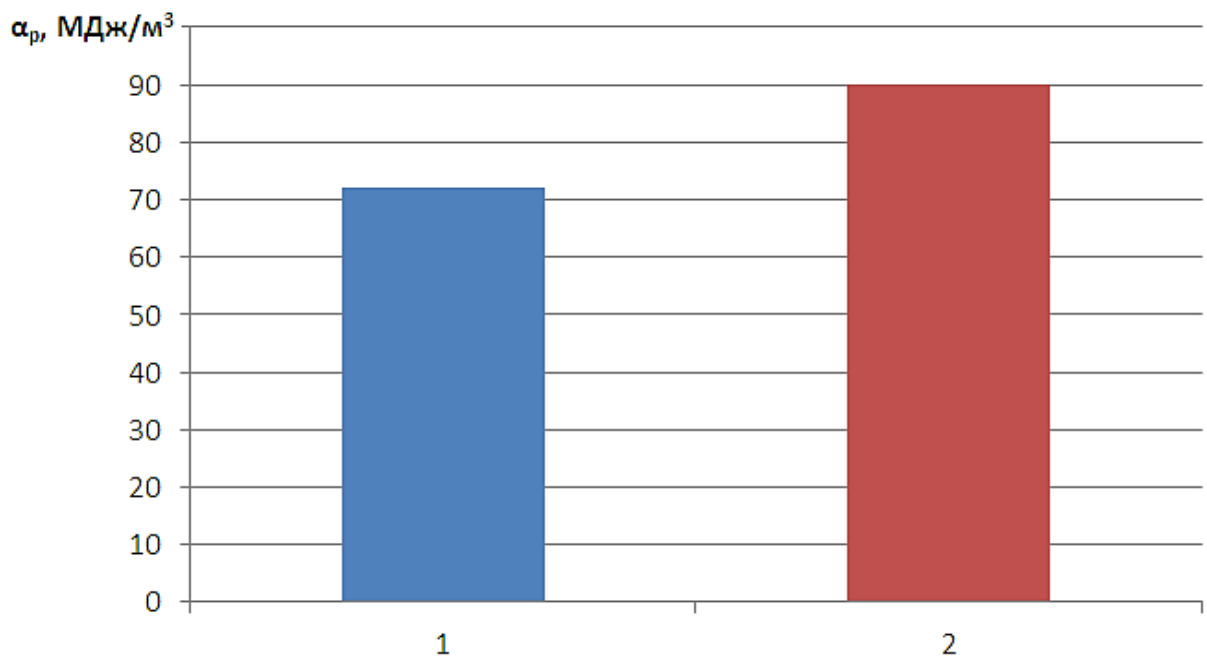


Рисунок 1.12 – «Удельная работа разрушения α_p клеевых соединений выполненных герметиком АН-111 (1) и нанокompозитом на его основе (2)» [69]

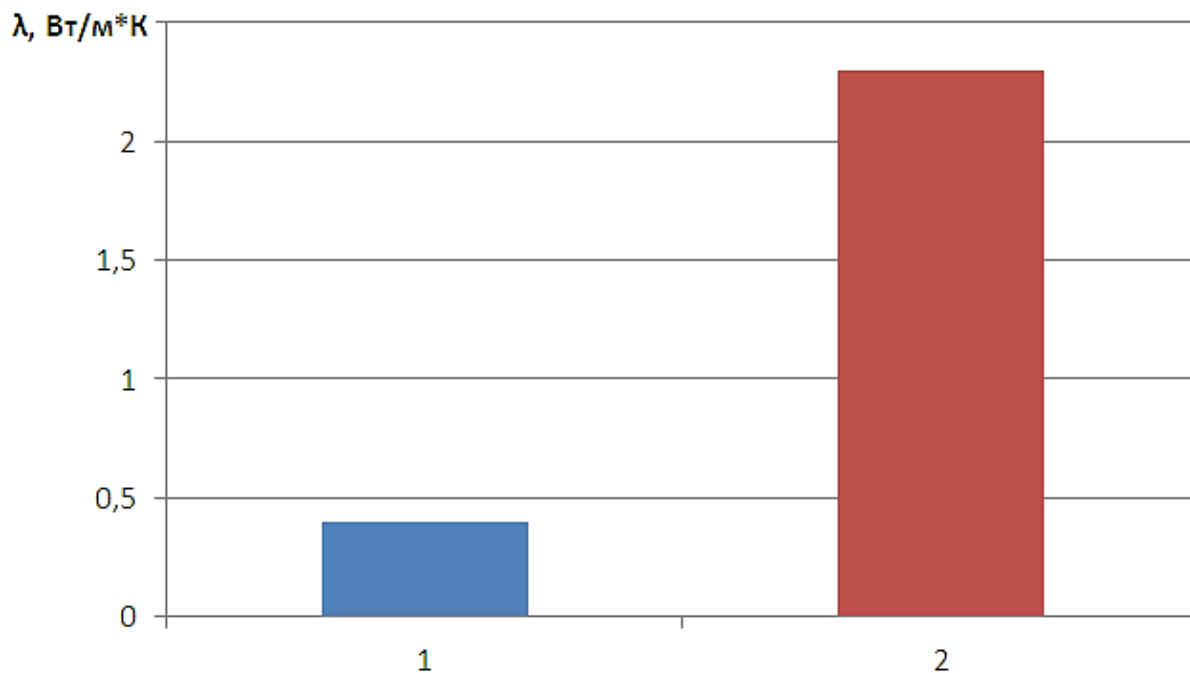


Рисунок 1.13 – «Теплопроводность герметика АН-111 (1) и нанокompозита на его основе (2)» [69]

При этом предельную толщину эластомерного покрытия ограничивает податливость восстановленной опоры при ее радиальном нагружении. Возникновение перекоса осей деталей сокращает их долговечность [91...92]. Предельная толщина покрытия эластомера Ф-40С при восстановлении посадочных отверстий ограничена значением 0,1 мм [93].

Чтобы увеличить предельную толщину покрытия и увеличить тем самым компенсируемый износ, повысить жесткость полимерной посадки, Машинным Д. В. предложено наполнять эластомер Ф-40С металлическими частицами алюминиевого и бронзового порошков «...Состав (масс. ч.): Ф-40С – 100; алюминиевая пудра ПАП-1 – 16; бронзовый порошок БПП-1 – 1,8» [66]. Модуль упругости материала, в сравнении с аналогичным параметром эластомера Ф-40С, увеличился на 11 % (1111,1 МПа).

Увеличение модуля упругости эластомерного композита повысило его теплостойкость в сравнении с полимерной матрицей.

Наполнение эластомера Ф-40С микроразмерными металлическими порошками алюминия и меди значительно повысило теплопроводность материала

[63, 66,69 89, 90]. Машиним Д. В. установлено, что коэффициент теплопроводности микрокомпозита, в сравнении с аналогичным параметром полимерной матрицы, увеличился от $0,27 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ до $19,97 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$, т.е. в 73,96 раза (рисунок 1.14) [6669].

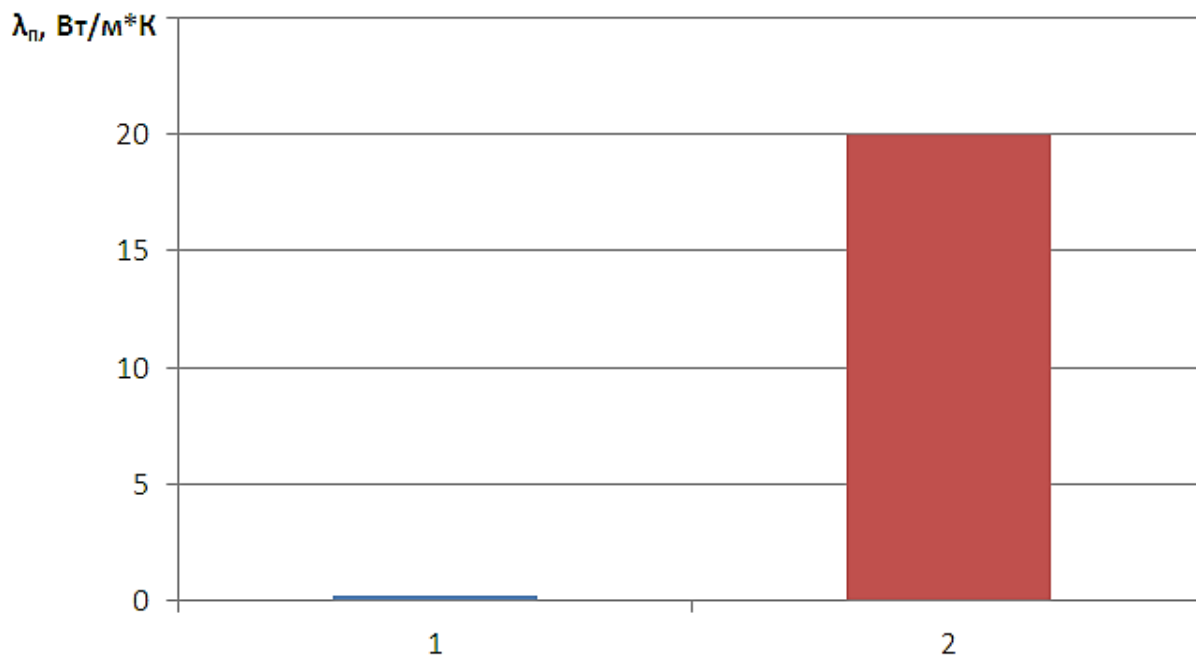


Рисунок 1.14 – «Теплопроводность герметика АН-111 (1) и нанокompозита на его основе (2)» [6669]

Актуальным вопросом является разработка полимерных нанокompозитов. Благодаря высокой удельной поверхности наночастиц, улучшение механических и теплофизических свойств наблюдается на малой концентрации наполнителя (до 5 %) [59, 69]. Благодаря эффекту синергизма нанокompозиты приобретают, в сравнении с полимерной матрицей, уникальные свойства, отличные от микрокомпозитов.

1.2 Классификация наноразмерных наполнителей для полимерных материалов

Для наполнения полимерных материалов, в настоящее время, наиболее широко используют три вида наноразмерных частиц: дисперсные наночастицы, органоглины и углеродные нанотрубки (рисунок 1.15).

В работе Микитаева упоминается «...органоглина является идеальным усиливающим наполнителем. Отдельные пластинки глины имеют большое отношение размера сторон и нанометровый масштаб толщины сравним с масштабом структуры полимерной цепи.» [57, 70]

Исследовательской группой концерна "Toyota" разработан нанокомпозит нейлон-6/органоглина. Композит при содержании органоглины менее 4,5 масс. % имел удвоение модуля упругости и прочности [71, 72].

Органоглины, при определенных условиях, способны к расслоению и диспергированию на множество отдельных пластинок толщиной в 1 нм [73]. Этому свойству лишены многие минеральные наполнители (тальк, слюда и др.), которые используют для производства пластмасс.

В то время как дисперсные наночастицы, хоть и имеют различную форму, грубо можно отнести их к сферам, органоглины имеют форму пластинок-чешуек.

Явление «интеркаляция» заключается в проникновении небольших количеств полимера в межпластинные зазоры в силикате. Это приводит к разделению этих пластинок, изменению их толщины до размера $\sim 2\text{...}3$ нм. Эсфолиация (расслоение) имеет место когда межпластинное расстояние или интервал d_{001} составляет 8...10 нм. Структура нанокомпозита при хорошем расслоении и диспергировании состоит из отдельных пластинок органоглины, которые однородно распределены по объему полимерной матрицы.

В настоящее время органоглина используется в качестве наполнителя для различных полимеров: «...полиэтилены [74, 75], полипропилен [76], полибутилентерефталат [77, 78], полиэтилентерефталат [79], полиамиды [73, 80],

поликарбонат [81, 82], полиимиды [83...89], термотропный жидкокристаллический полиэфир [90], а также эпоксидный полимер [91, 92] и каучуки» [93, 94].

В работе Тренисовой А. Л. [95] исследована композиция на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и модифицированного монтмориллонита. Глину необходимо предварительно обработать полярным модификатором и использовать ультразвук для размешивания композита. Введение 5 % масс. Cloisite 30В приводит к существенному повышению ударной вязкости композита. После обработки в ультразвуковом поле изменяется структура наполнителя, что проявляется в разрушении агрегатов частиц глины, уменьшении размеров, увеличении их количества и удельной поверхности. Это вызывает увеличение степени взаимодействия олигомера и частиц. В результате резко увеличивается ударная вязкость композитов (таблица 1.1). Изменение механических свойств нанокompозита обусловлено тем, что в нем образуется структурный каркас из частиц глины.

Таблица 1.1 – Ударная вязкость КС композиций на основе смолы ЭД-20, содержащих 1 масс. ч. наполнителей, полученных механическим смешением и путем обработки ультразвуком

| Композиция | КС до УЗО, кДж/м ² | КС после УЗО, кДж/м ² |
|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Ненаполненная | 3,3 | 3,3 |
| Cloisite 20A | 3,3 | 4,7 |
| Cloisite 30B | 3,4 | 9,7 |
| Cloisite Na ⁺ | 3,5 | 7,2 |

В работе [80] получена: «...зависимость модуля упругости E_k от содержания монтмориллонита φ_n для нанокompозита на основе полиимида (рисунок 1,16). Видно, что наблюдается резкий рост E_k при увеличении φ_n до 3 масс. %, а затем происходит спад и до $\varphi_n = 10$ масс. % величина E_k не меняется.

Значения прочности σ_p и деформации до разрушения ε_p для нанокompозитов на основе полиимида приведены в таблице 1.2» [80].

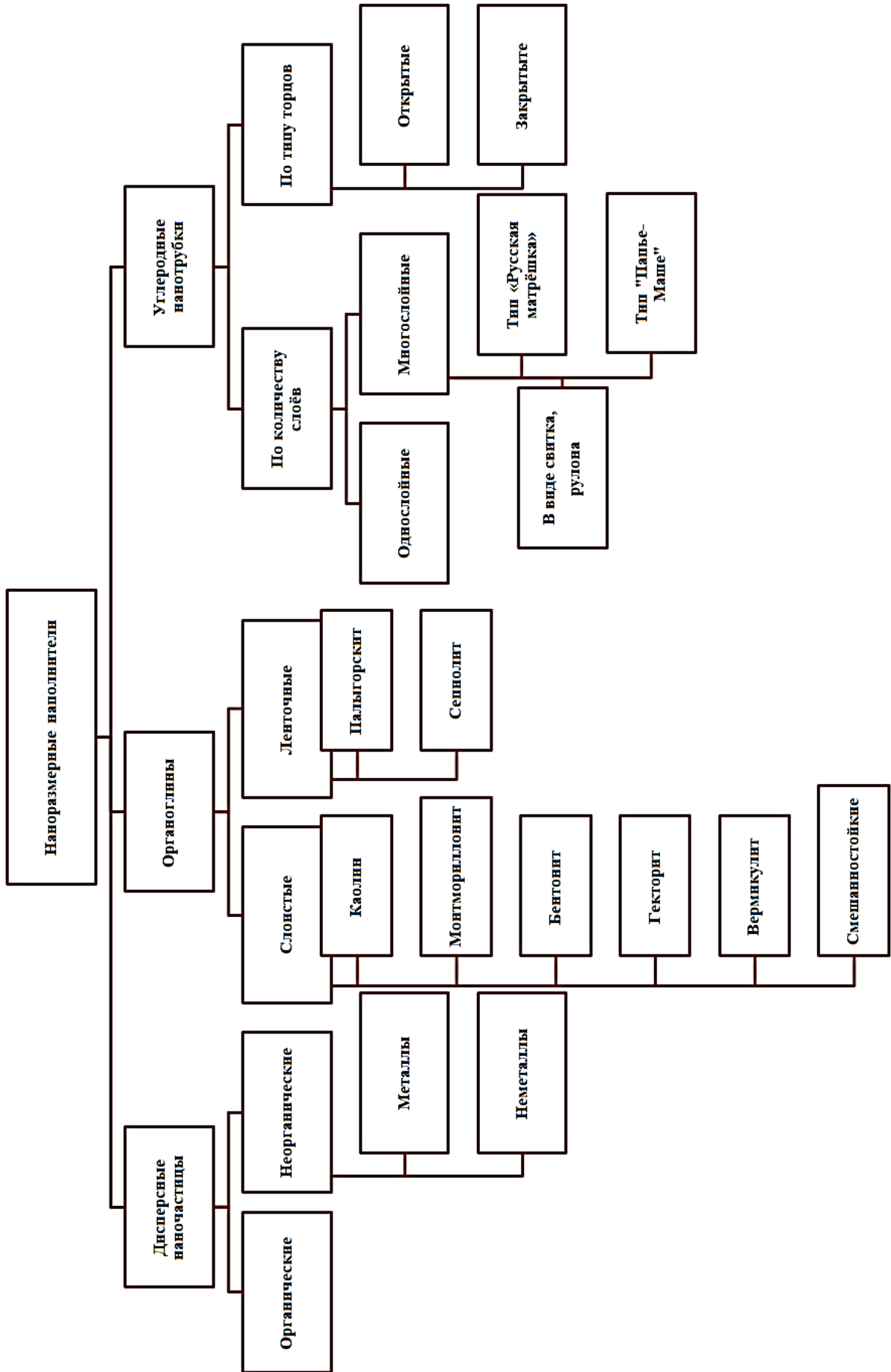


Рисунок 1.15 – Классификация наноразмерных наполнителей для полимерных материалов

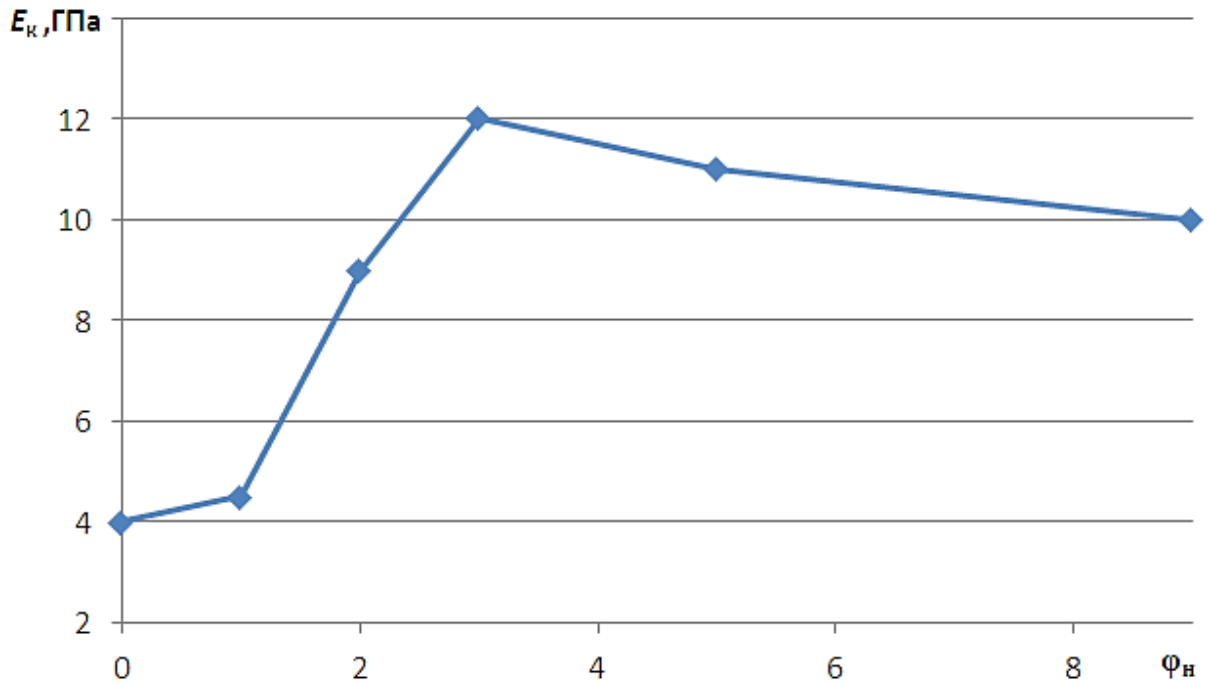


Рисунок 1.16 – «Зависимости модуля упругости E_k от содержания монтмориллонита φ_n для нанокompозита на основе полиимида» [96]

Таблица 1.2 – Механические свойства нанокompозитов на основе полиимида [96]

| Содержание монтмориллонита φ_n , масс. % | Прочность при растяжении σ_p , МПа | Деформация при разрушении ε_p , % |
|--|---|---|
| 0 | 78,0 | 15 |
| 1 | 90,4 | 25 |
| 5 | 105,4 | 30 |
| 10 | 65,0 | 10 |

Анализ данных таблицы 1.2 показал, что прочность и пластичность нанокompозитов при содержании наполнителя до $\varphi_n = 5$ масс. % увеличивается. С дальнейшим увеличением содержания наполнителя до $\varphi_n = 10$ масс. % механические свойства снижаются.

Внедрение органоглин повышает потребительские свойства полимеров, но для восстановления посадок подшипников органоглины не пригодны, поскольку, при вводе их в полимер не повышается такие теплофизические свойства как

теплопроводность и теплостойкость, и такие механические свойства как выносливость. В тоже время выносливость является важным показателем для восстановления посадок подшипников качения, поскольку это обеспечивает ресурс не только посадки, но и всего подшипникового узла в целом.

В последние годы большее распространение получило применение полимерных композитов, наполненных дисперсными частицами. Наполнение дисперсными частицами приводит к повышению прочности и теплопроводности, снижению себестоимости восстановления. Тем не менее, это приводит к увеличению модуля упругости, что не позволяет снизить контактные напряжения в подшипниках на полимерной посадке. При изготовлении композитов требуется обеспечить равномерное распределение частиц наполнителя в объеме матрицы из полимера. Следует отметить склонность дисперсных частиц к образованию агрегатов.

Самой распространённой органической дисперсной частицей, используемой для наполнения полимерных материалов, является тальк. На практике было показано [17], что при введении талька в полипропилен улучшаются такие показатели как текучесть, формуемость, снижается усадка изделий при формовании, повышается качество их поверхностей.

Дисперсные неорганические частицы бывают металлические и неметаллические. Примером неметаллических дисперсных наночастиц является оксид алюминия – бёмит.

В своей работе Кононенко приводит результаты проведенных исследований: «...получены наноконпозиции на основе анаэробных и силиконовых герметиков, оптимальные герметизирующие свойства которых достигаются при концентрации бёмита (наночастицы оксида алюминия) 10 %, наночастиц серебра – 2 % и углеродных нанотрубок – 1 %. Максимальное влияние на изменение герметизирующей способности оказывают углеродные нанотрубки, минимальное – бёмит. Установлено, что герметизирующая способность наноконпозиций выше, чем у ненаполненных составов до 33 %.» [22]

Однако отсутствуют сведения, о применении вышеуказанных нанокompозитов для восстановления посадок подшипников.

Металлические дисперсные наноразмерные наполнители придают полимерным материалам повышенные механические и тепло-физические свойства.

В работе Малюгина В. А. получен анаэробный нанокompозит. В сравнении с ненаполненным материалом введение дисперсных наночастиц: «...алюминия и меди в герметик АН-111 повышает прочность клеевых соединений нанокompозита в 1,28 (рисунок 1.10), деформацию в 1,15 (рисунок 1.11), удельную работу разрушения в 1,27 раза» [69] (рисунок 1.12).

Благодаря наночастицам алюминиевого и медного порошков значения коэффициента теплопроводности нанокompозита, по сравнению с ненаполненным полимером, возрастают до 5,26 раза, что создает условия для повышения теплоотвода и увеличения соответственно ресурса подшипниковых узлов (рисунок 1.13).

В работе Киба М. Р. [97] получена композиция (масс. ч.): эластомер Ф-40 – 100; нанопорошок алюминия – 1,9; нанопорошок меди – 1,7. Автор отмечает, что металлические наночастицы в : «...полимерной матрице образуют сетчатые образования с наночастицами в полимерных цепях. Это является причиной снижения молекулярной подвижности цепей и повышения теплостойкости нанокompозита. Наиболее высокую теплопроводность среди металлов имеют медь и алюминий» [97].

Результатом наполнения эластомера является увеличение теплостойкости в 1,23 раза, до 123 °С, коэффициента теплопроводности в 38,9 раза, до $\lambda_k = 21,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ (рисунок 1.17). Таким образом наночастицы меди и алюминия в структуре нанокompозита привели к повышению его теплостойкости и теплопроводности.

Введение медных и алюминиевых наночастиц привело к повышению модуля упругости, прочности и выносливость материала. Прочность плёнок состава $\sigma = 16,11$ МПа, в сравнении с ненаполненным эластомером, увеличилась на 23 %, модуль упругости в 1,65 раза (рисунок 1.18). Выносливость материала

характеризуется его удельной работой разрушения. Наноккомпозит отличается от матрицы более высокой удельной работой разрушения 12,9 МДж/м³.

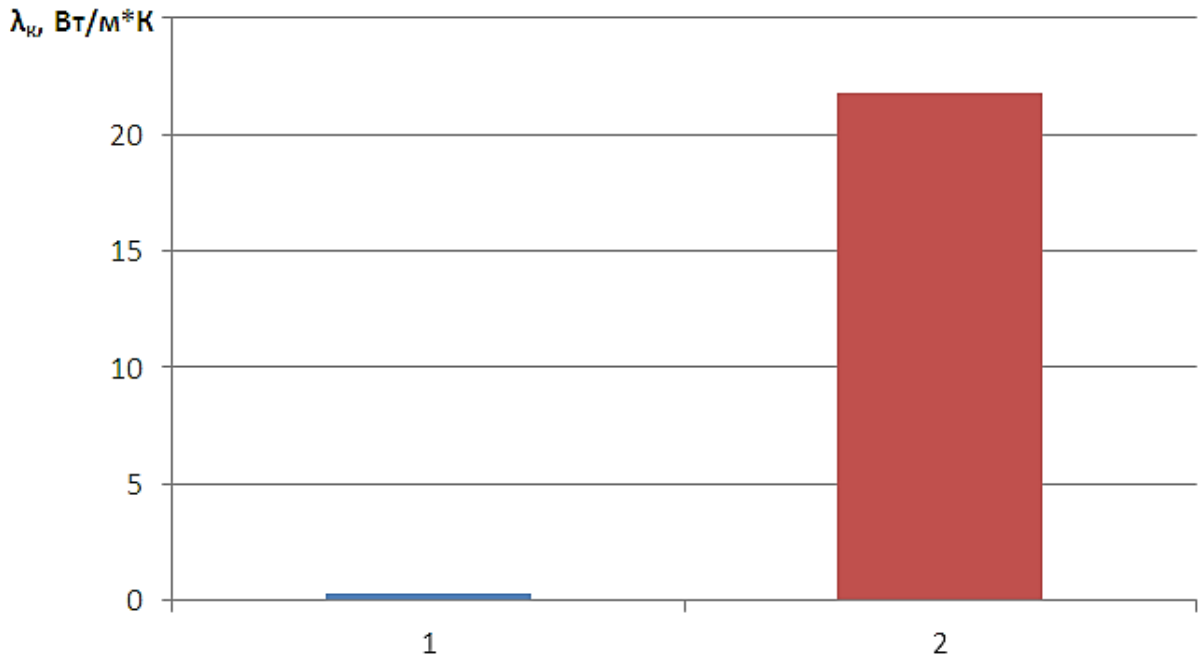


Рисунок 1.17 – Коэффициент теплопроводности эластомера Ф-40 (1) и наноккомпозита на его основе (2) [97]

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время все больше внимания уделяется одной из наиболее перспективных областей нанотехнологий – синтезу углеродных наноматериалов (УНМ). Это фуллереноподобные структуры, в виде новой, аллотропной формы углерода, представляющих замкнутые, каркасные, макромолекулярные системы. Особое внимание уделяют углеродным нанотрубкам (УНТ) или нанотубуленам, имеющим диаметр от 1 до 50 нм и длину до нескольких микрометров, относящихся к новому классу квазиодномерных нанобъектов [98].

УНТ имеют упорядоченную структуру нанофрагментов, что обуславливает их уникальные свойства: хорошую электропроводность, адсорбционную способность, возможность холодной эмиссии электронов и аккумуляции газов, диамагнитные характеристики, термическую и химическую стойкость, высокую прочность и деформацию [98].

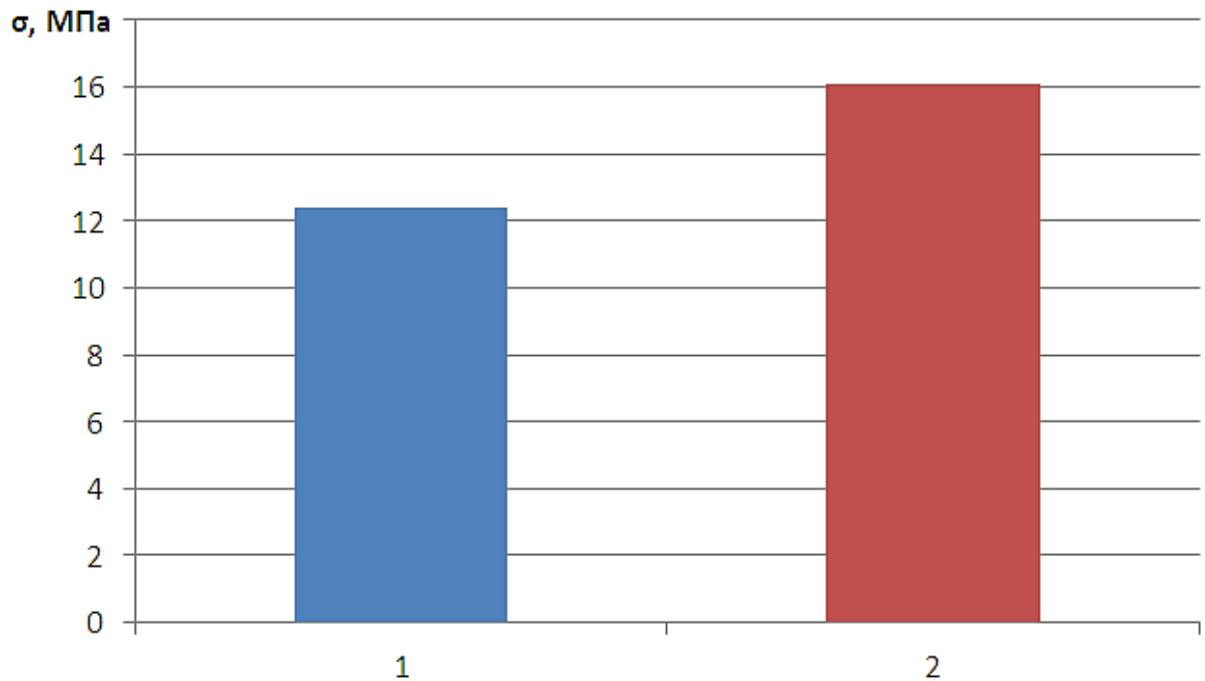


Рисунок 1.18 – «Прочность σ_p при одноосном растяжении пленок эластомера Ф-40 (1) и нанокompозита на его основе (2)» [97]

В работах [99...109] экспериментально исследован модуль упругости различных УНТ (таблица 1.3).

Из таблицы 1.3 следует, что нанотрубки это материалы с уникальной жесткостью – значение модуля Юнга составляет в среднем ≈ 1 ТПа. Исключение составляют МУНТ, синтезированные CVD-методом. Это трубки имеющие существенные структурные дефекты и значительный диаметральный размер от 50 до 100 нм.

Механические свойства различных материалов, включая УНТ, приведены в таблице 1.4.

Из таблиц 1.3 – 1.4 видно, что МУНТ уступают ОУНТ по ряду механических характеристик, поэтому для наполнения полимерных материалов, предпочтение отдается ОУНТ.

Таблица 1.3 – Экспериментальные значения модуля упругости УНТ [98]

| № | Модуль упругости, ТПа | Объект | Способ определения |
|----|-----------------------|---|---|
| 1 | $1,3 \pm 0,45$ | Однослойные УНТ (ОУНТ) | Частота колебаний |
| 2 | $0,81 \pm 0,41$ | Многослойные УНТ, синтезированные электродуговым методом | Упругая деформация |
| 3 | 0,027 | Многослойные УНТ, синтезированные методом CVD | Упругая деформация |
| 4 | $1,8 \pm 0,9$ | Многослойные УНТ (МУНТ) | Тепловые колебания |
| 5 | $1,28 \pm 0,59$ | Многослойные УНТ диаметром 26...76 нм | Частота колебаний |
| 6 | 1...1,2 | Многослойные УНТ | - |
| 7 | $0,45 \pm 0,23$ | Жгуты длиной 2 мм и диаметром 10 мкм, содержащие УНТ с внутренним диаметром 12 нм и внешним диаметром 30 нм | Прямое измерение |
| 8 | 3,5 | Многослойные УНТ диаметром 10...100 нм | Обработка результатов измерений изгибной деформации |
| 9 | 0,01 | Однослойные УНТ, выращенные методом CVD | - |
| 10 | $1,23 \pm 0,09$ | Многослойные УНТ с внутренним диаметром 3,2 нм и внешним диаметром 14,3 нм, выращенные методом CVD | - |

Таблица 1.4 – Механические свойства материалов

| Характеристика | Гра- фит | Углеродные волокна | МУНТ | ОУНТ | Сталь |
|-----------------------------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-------|
| Прочность на растяжение, ГПа | 100 | 3...7 | 300...600 | 300...1500 | 0,4 |
| Модуль упругости, ГПа | 1000 | 200...800 | 500... 1000 | 1000...5000 | 2000 |
| Удельная прочность, ГПа | 50 | 2...4 | 200...300 | 150...750 | 0,05 |
| Удельный модуль упругости, ГПа | 500 | 100...400 | 250...500 | 500...2500 | 26 |
| Предельное растяжение, % | 10 | 1...3 | 20...40 | 20...40 | 26 |

В исследованиях последних лет [110] выявлены новые свойства УНТ. Установлено, что установленные вертикально УНТ испытывают осевую эйлеровскую деформацию, которая значительно уменьшает их высоту и при этом материал обретает необычные свойства. Поведение вертикально-ориентированного слоя нанотрубок подобно пенообразному материалу, который при нагружении обратимым образом многократно меняет свою плотность. Пленку «леса» из УНТ многократно вертикально сжимали до толщины около 15 % от исходной рисунок 1.19.

Введение УНТ в количестве 3...10 масс. % в ароматический полиамид фенилон С-2 улучшает эксплуатационные свойства материала:

- повышение термостойкости на 150...187 К;
- уменьшение температурного коэффициента линейного расширения до 1,2 раза;
- увеличение предела текучести при сжатии в 1,2 и модуля упругости в 1,5 раза;

– повышение износостойкости от 1,2 до 3 раз в зависимости от содержания УНТ.

Эпоксидные смолы наиболее предпочтительны в качестве связующего для большинства волокнистых наполнителей.

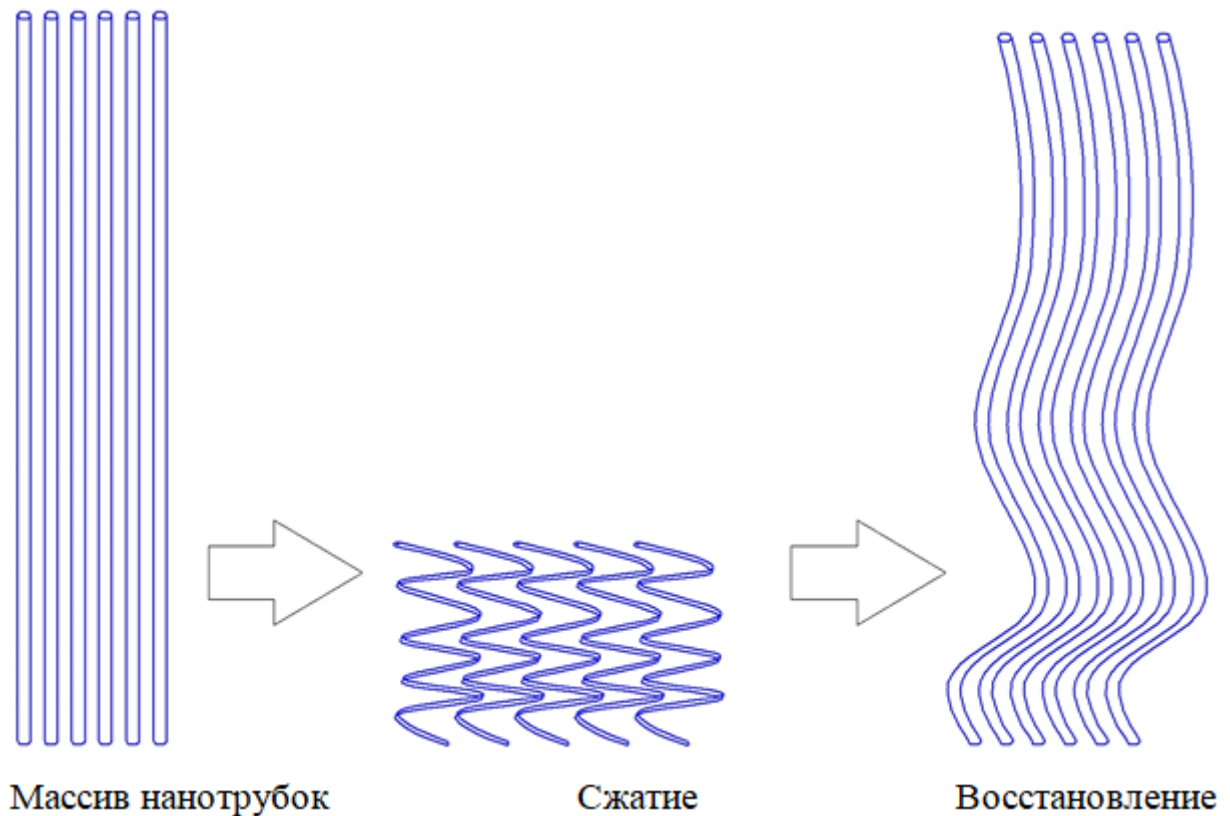


Рисунок 1.19 – Иллюстрация характера вертикального сжатия массива УНТ [98]

Достоинства эпоксидных смол:

- хорошая адгезия большинству наполнителей и армирующих компонентов;
- большой ассортимент эпоксидных смол и отверждающих компонентов, что обеспечивает возможность получения материалов с самыми различными свойствами;
- при реакции отверждения не выделяется вода или летучие вещества, небольшая усадка смол;
- высокая химическая стойкость и хорошие электроизоляционные свойства смол после отверждения.

Однако при наполнении смол УНТ их однородному распределению в матрице препятствует склонность к образованию агрегатов в менее плотной эпоксидной матрице.

Преодолеть вышеуказанные проблемы позволяет ультразвуковое смешение и диспергирование растворов полимерных композитов.

В работе Тренисовой А. Л. [95] исследована композиция на основе смолы ЭД-20 и УНТ. Введение 5 % масс. углеродных нанотрубок приводит к существенному повышению ударной вязкости композита и равномерному распределению наполнителя по объему олигомера. Дальнейшее усиление показателей наблюдается при применении УЗО (таблица 1.5).

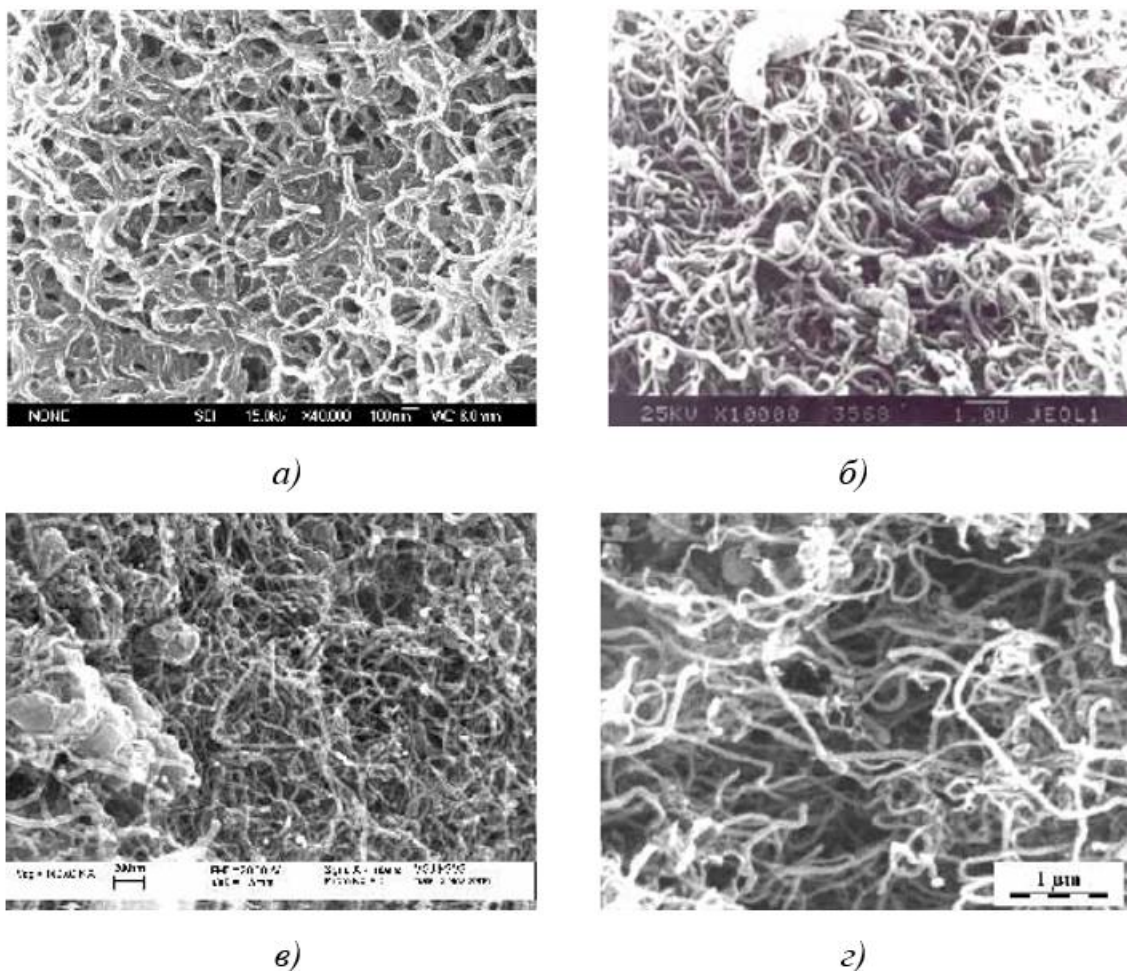
Таблица 1.5 – Ударная вязкость КС композиций на основе смолы ЭД-20, содержащих 1 масс. ч. наполнителей, полученных механическим смешением и путем обработки ультразвуком

| Композиция | КС до УЗО, кДж/м ² | КС после УЗО, кДж/м ² |
|---------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Ненаполненная | 3,3 | 3,3 |
| УНТ | 3,9 | 6,8 |

В настоящее время наноматериал, реализуемый под торговой маркой "Таунит", проходит стадию исследования на предмет использования в различных областях в более чем 170 научных организациях и предприятиях РФ и за рубежом (рисунок 1.20).

В литературе отсутствуют сведения об использовании УНТ для наполнения полимерных материалов, предназначенных для восстановления посадок подшипников качения. Углеродные нанотрубки обладают уникальными свойствами: большая жесткость и прочность, высокие упругие свойства, химическая и термическая стабильность. Теплопроводность УНТ составляет $\lambda_k = 6600 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$, что в более чем в 16 раз превышает аналогичный параметр у алюминиевых и медных наночастиц. Благодаря этим уникальным свойствам следует ожидать повышения деформационно-прочностных и адгезионных свойств,

теплопроводности и термостойкости эластомеров после наполнения УНТ. Поэтому исследования эластомерных нанокомпозитов, наполненных УНТ, актуальны.



a) – Interactiv Corporation (Япония); *б)* – Институт макромолекулярной химии АН Чехии (Чехия); *в)* – CarlZeiss (Германия); *г)* – Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН

Рисунок 1.20 – СЭМ-микрофотографии УНМ "Таунит" [98]

Благодаря высокой удельной поверхности и химической активности наночастицы быстро образуют агрегаты, что существенно ухудшает механические свойства нанокомпозита. Поэтому, как было указано выше, необходимо исследовать вопрос ультразвукового диспергирования эластомерных нанокомпозитов, наполненных УНТ.

1.3 Методы усталостных испытаний материалов

Основной причиной снижения ресурса подшипниковых узлов является износ посадочных мест подшипников из-за фреттинг-коррозии. Восстановление посадочных мест полимерами устраняет фреттинг-коррозию, значительно повышает ресурс подшипниковых узлов и снижает затраты на ремонт техники [44, 111...118]. Долговечность восстановленной посадки в этом случае определяется ресурсом полимерного слоя между сопрягаемыми поверхностями деталей подшипникового узла. Поэтому исследование стойкости полимера к циклическим нагрузкам (выносливости) является актуальной задачей при разработке новых полимерных материалов. Исследование выносливости конструкционных материалов осуществляют при усталостных стендовых испытаниях, которые проводят по различным методикам. Известные методы усталостных испытаний имеют общий недостаток: результаты испытаний пригодны для использования в ограниченном диапазоне типоразмеров образцов (масштабный фактор) [44].

Щетинин М. В. в своей работе провел теоретические исследования и предложил исследования выносливости полимерных материалов проводить с использованием оригинального критерия подобия. Автор рассмотрел физическое моделирование выносливости полимерных посадок подшипников качения, подвергающихся циклическому нагружению [60]. Используя вторую теорему подобия и теорию размерности, автор получил критерий подобия π_1 , который связывает параметры полимерного слоя, амплитуду напряжений и долговечность восстановленной полимерной посадки [44].

$$\pi_1 = \frac{K(hS)^2}{\sigma_a}, \quad (1.1)$$

где h – толщина полимерного слоя, м;

S – площадь полимерного слоя, м²;

K – величина, постоянная для данного полимерного материала.

$$K = \frac{\rho \Delta F}{M}, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность полимерного материала, кг/м³;

M – молярная масса полимерного материала, кг/моль.

Предложена методика усталостных стендовых испытаний, которая предусматривает: испытание по методике Шубина А. Г. при циклическом нагружении долговечности подшипника определенного типоразмера с полимерной посадкой, построение кривой Веллера и определение максимально допустимой толщины полимерного слоя $[h]$, обеспечивающей работоспособность материала до окончания базы испытаний, составляющей 330 ч наработки вибростенда или $5,94 \times 10^7$ циклов циклической радиальной нагрузки [44, 65, 69, 119, 120]. Далее, используя величину $[h]$ и формулу (1.1) рассчитывают критерий подобия π_1 . По первой теореме подобия: «...у подобных явлений определенные сочетания параметров, которые называют критериями подобия, имеют одинаковое значение» [112]. Вследствие этого свойства, по полученному значению критерия подобия π_1 , может быть определена максимально допустимая толщина полимерного слоя $[h]$ для подшипника любого типоразмера [44].

Метод А. Г. Шубина

Метод Шубина А. Г. предусматривает исследование долговечности полимерных материалов и композитов на их основе. Проводят усталостные испытания подшипников с полимерной посадкой и по результатам определяют максимальную допустимую толщину полимерной посадки после восстановления.

Циклическое нагружение подшипников с полимерной посадкой создают с помощью вибростенда, в основе которого лежит электромеханический вибратор, который является ассинхронным короткозамкнутым электродвигателем. Симметричный, знакопеременный цикл нагружения создается дебалансами, установленными в концевых частях вала-ротора электродвигателя.

В работах проф. Курчаткина В. В. и его учеников установлено, что при увеличении толщины полимерной посадки ее ресурс снижается. В качестве базы

усталостных испытаний принята продолжительность $N_G = 5,94 \times 10^7$ циклов или соответственно 330 ч наработки вибростенда. Восстановленные полимерные посадки испытывают до наступления усталостного разрушения материала, о чем свидетельствует сдвиг наружного кольца подшипника относительно втулки [14, 27, 44].

Усталостные испытания начинают с максимальной толщины полимерной посадки подшипника при которой ее долговечность наименьшая. После разрушения посадки, испытывают полимерную посадку меньшей толщины, и так до тех пор, пока посадка не сохранит работоспособность до конца базы испытаний.

«На рисунке 1.21 показана долговечность посадок из эластомера Ф-40С подшипников 209 при различной толщине полимерного покрытия» [66].

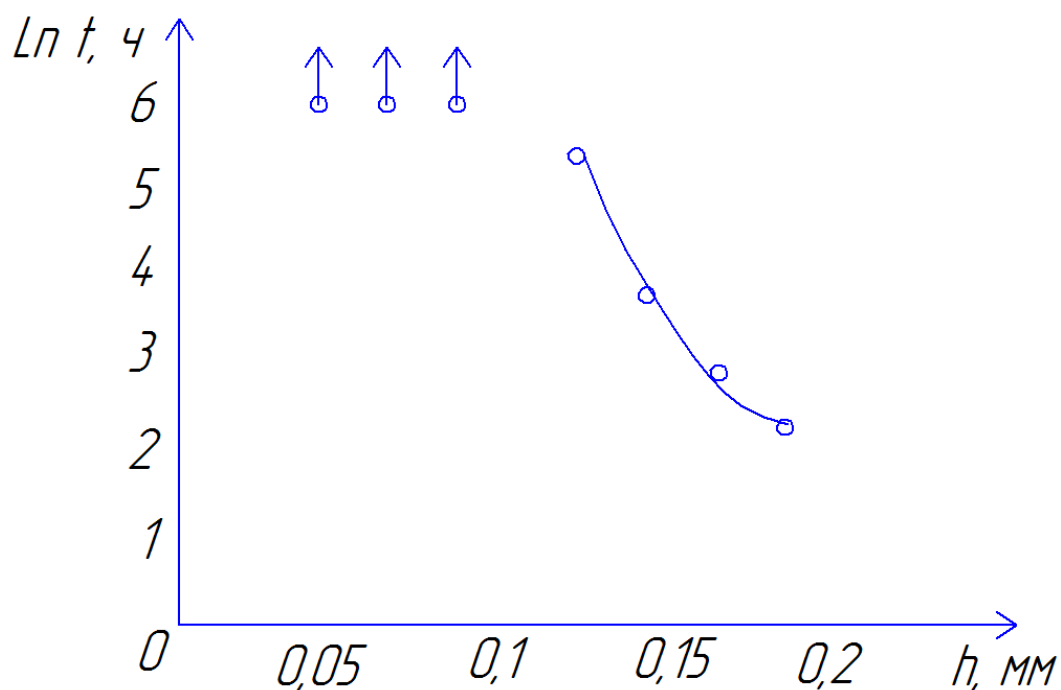


Рисунок 1.21 – Долговечность t посадок из эластомера Ф-40С подшипников 209 при различной толщине полимерного покрытия h [14, 66]

Точка на кривой означает разрушение полимерной посадки. Точка со стрелкой свидетельствует о том, что материал работоспособен и проворот кольца подшипника во время испытаний отсутствовал. Из графика видно, что ветвь разрушений имеет нелинейный характер – типичная кривая Веллера.

В работах профессоров В. В. Курчаткина, Р. И. Ли и их учеников проведены многочисленные исследования долговечности полимерных материалов, которые подтверждают типичный характер кривой Веллера [8, 14, 65].

Достоинства метода Шубина А. Г.:

1). Объективная оценка т.е. условия нагружения подшипниковых узлов с полимерными посадками соответствуют режимам разгона и торможения подшипниковых узлов трансмиссии грузовых автомобилей [119].

2). Возможность давать рекомендации по восстанавливаемому износу посадок подшипников.

Недостатки метода:

1). Большая трудоёмкость метода, т. к. испытания одного образца проводятся в течение $5,94 \times 10^7$ циклов (330 ч).

2). Результаты испытаний применимы для ограниченного диаметра типоразмеров подшипников.

Основным недостатком метода является значительные трудозатраты и продолжительность испытаний. Чтобы построить кривую усталости Веллера следует испытывать подшипниковые узлы на протяжении 3...5 месяцев.

Требуется разработка нового метода ускоренных усталостных испытаний, предусматривающего использование того же испытательного оборудования, и получение в более короткие сроки достоверной информации о выносливости полимерных посадок под действием циклических нагрузок [44].

Метод Локати

Метод Локати используют при испытаниях образцов подвергающихся изгибу, растяжению-сжатию и кручению; симметричным и несимметричным циклам нагружения; с концентраторами напряжений и без; при нормальных условиях без воздействия агрессивных сред.

Испытания проводят до полного разрушения образца и (или) возникновении микро- или макротрещин в материале.

В большинстве случаев метод Локати используют образцов и деталей из материалов с наличием физического предела выносливости. На графике это

выразится в виде правой части ветви кривой выносливости переходящей в прямую, параллельную оси абсцисс. Если материал не имеет предела выносливости, вводят условный предел выносливости и режим нагрузок подбирают так, чтобы полученные оценки были близки к нему при соблюдении базы испытаний [44, 121].

Предел выносливости определяют при испытании одного...трех образцов с определением среднего значения предела выносливости, ступенчато увеличивая нагрузку [44].

В основе метода лежит гипотеза Пальмгрена-Майнера, в соответствии с которой накопление усталостных повреждений в материале носит линейный характер, со степенью повреждения материала, при определенных уровнях напряжений, пропорциональной отношению циклов нагружения n_i к долговечности N_i [44].

Условие разрушения имеет вид

$$\sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1.3)$$

где k – число уровней напряжений, которые воспринимал образец в ходе испытаний.

Метод Локати является методом ускоренных испытаний на выносливость. Используя результаты испытания образцов рассчитывают сумму относительных долговечностей $\sum \frac{n_i}{N_i}$. Здесь долговечность N определяется из семейства предполагаемых кривых усталости a , b и v (рисунок 1.22). Чтобы построить условные (предполагаемые) кривые выносливости a , b , v в координатах $\sigma_R - N$ или $\sigma_R - \text{Lg } N$ реализуют испытания, соблюдая следующую последовательность [44].

Проводят испытания, в которых 95 % образцов разрушилось и строят кривую a . При этом пределом выносливости является величина σ_R^a . Результаты испытаний, в которых 50 % образцов разрушилось, используют для построения кривой b . При этом пределом выносливости является величина σ_R^b [44].

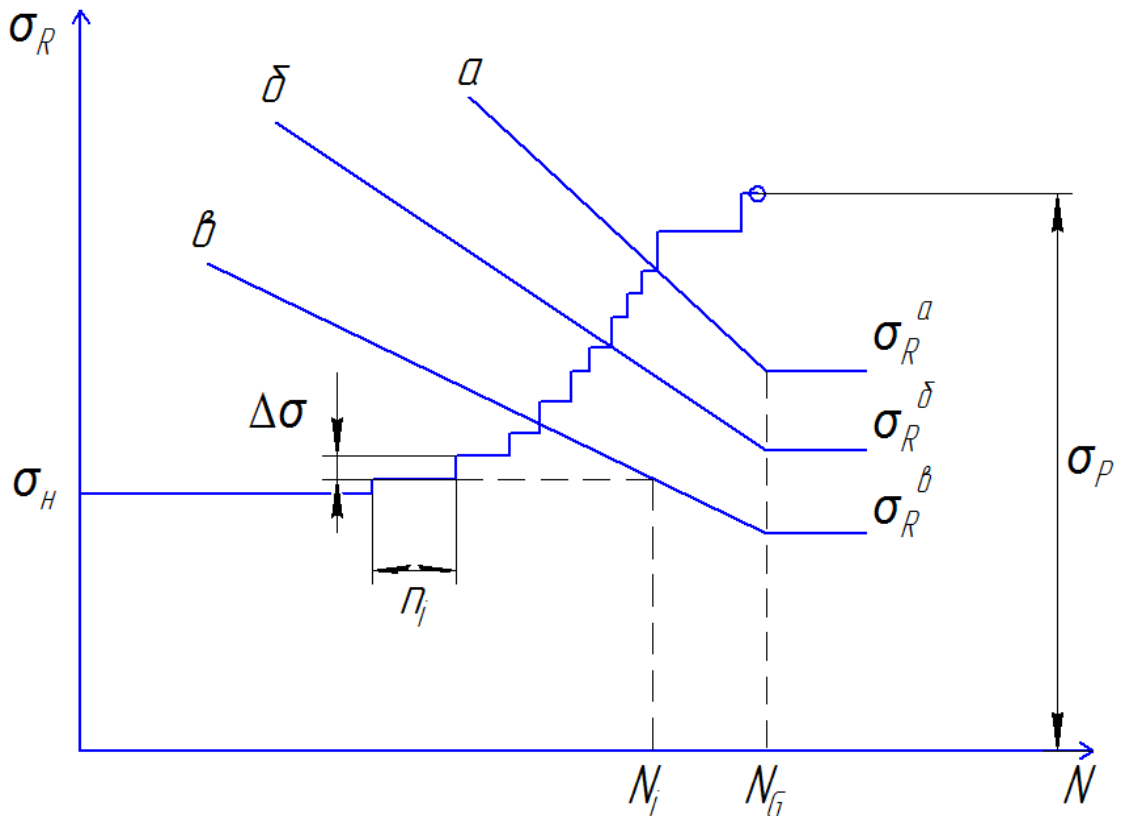


Рисунок 1.22 – Семейство предполагаемых кривых усталости метода Локати

Результаты испытаний, в которых 5 % образцов разрушилось, используют для построения кривой *в*. При этом пределом выносливости является величина σ_R^B [121]. Далее составляют программу испытания образца таким образом, чтобы график ступенчатого увеличения нагрузки совпадал с этими условными кривыми усталости. После проведения испытаний и разрушения образца экспериментальные данные обрабатывают по формуле (1.3) для каждой из трех условных кривых усталости. По результатам строят график в координатах $\sum \frac{n_i}{N_i} - \sigma_R$ (рисунок 1.23) [44].

Отмечают единицу на оси ординат и из нее проводят прямую до пересечения с кривой, проецируют точку пересечения на ось абсцисс и получают значение предела выносливости $\sigma_{R \text{ иск.}}$

Достоинства метода [44]:

1. Достаточная точность при определении предела выносливости, погрешность составляет $\pm 8 \%$.

2. Высокий коэффициент ускорения, при известных предполагаемых кривых усталости a , b и v .

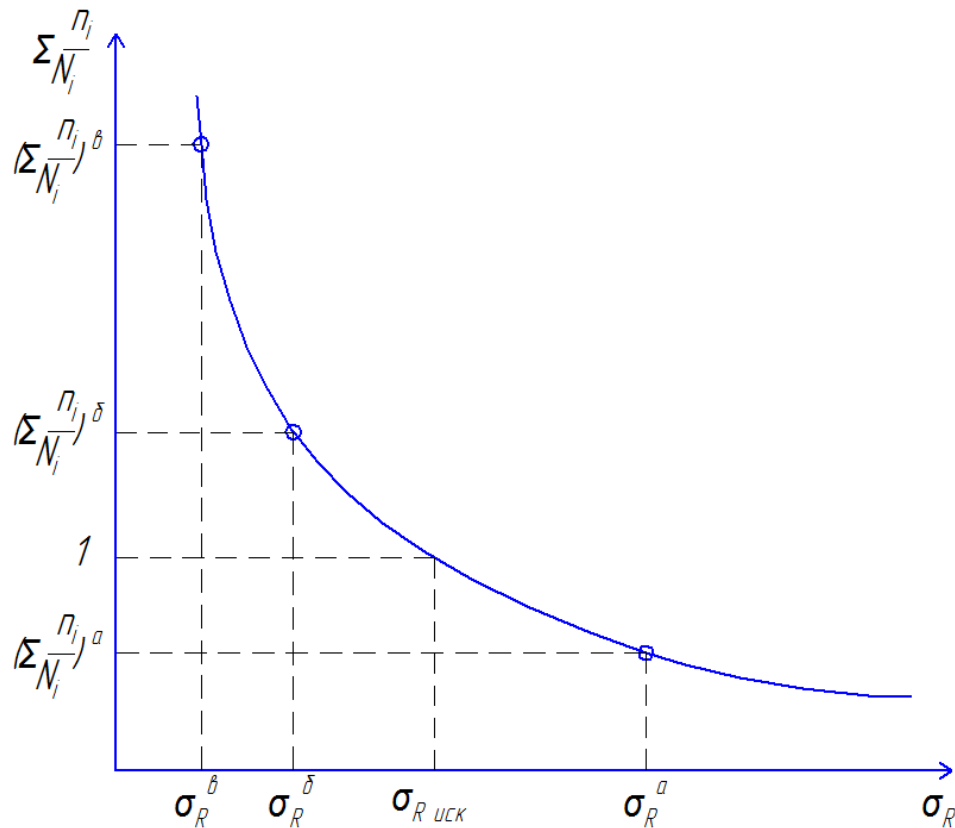


Рисунок 1.23 – График зависимости $\sum \frac{n_i}{N_i}$ от σ_R

Недостатки метода [44]:

1. Не все конструкционные материалы обладают линейным характером накопления усталостных повреждений, т.е. $\sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = a$, $a \neq 1$ ($a = 0,2 \dots 5$).
2. Необходимо большое количество испытаний и образцов, чтобы построить кривые усталости a , b и v , что обуславливает высокую трудоёмкость метода.

С учетом того, что большая часть полимерных материалов не обладает пределом выносливости, использование Локати следует признать нецелесообразным.

Метод одного образца

Метод относится к ускоренным, малообразцовым испытаниям образцов на выносливость. Метод включает многоэтапные испытания. Первый этап заключается в нагружении образца ниже предела выносливости в течение базы испытаний. По завершении этапа увеличивают нагрузку на образец и испытания проводят в течение базы испытаний при более высоком напряжении. Нагрузку увеличивают до разрушения образца. Напряжение, предшествующее напряжению при котором произошло разрушение образца, принимают в качестве предела выносливости.

Образцы, используемые при испытаниях: деталь, соединение, образец круглого или прямоугольного профиля, образец с концентратором напряжений. В зависимости от объекта испытаний принимают следующую базу испытаний: образец материала – 2×10^6 , деталь $10^6 \dots 5 \times 10^6$, сварное соединение $2 \times 10^6 - 10^7$, зубчатые передачи – 3×10^6 [44, 122].

Использование при испытаниях только одного образа является достоинством метода [44].

Недостатки метода: при повторных испытаниях происходит накопление усталости, вследствие чего получают заниженное значение предела выносливости [44].

Метод П. Е. Кравченко

Является методом ускоренных (малообразцовых) испытаний выносливости. Объекты испытаний: деталь, соединение, образец материала. Испытания проводят с использованием двух-трех образцов и соблюдением условия: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_{-1}$.

По оси ординат указывают напряжения, а по оси абсцисс – величину обратную циклам нагружения. После построения кривой усталости экстраполируют ее начало до пересечения с осью ординат (рисунок 1.24). Точка пересечения на оси абсцисс равна нулю ($N = \infty$, а $1/\infty = 0$). Значение напряжения в точке пересечения с осью ординат принимают за предел выносливости $\sigma = \sigma_{-1}$ [44].

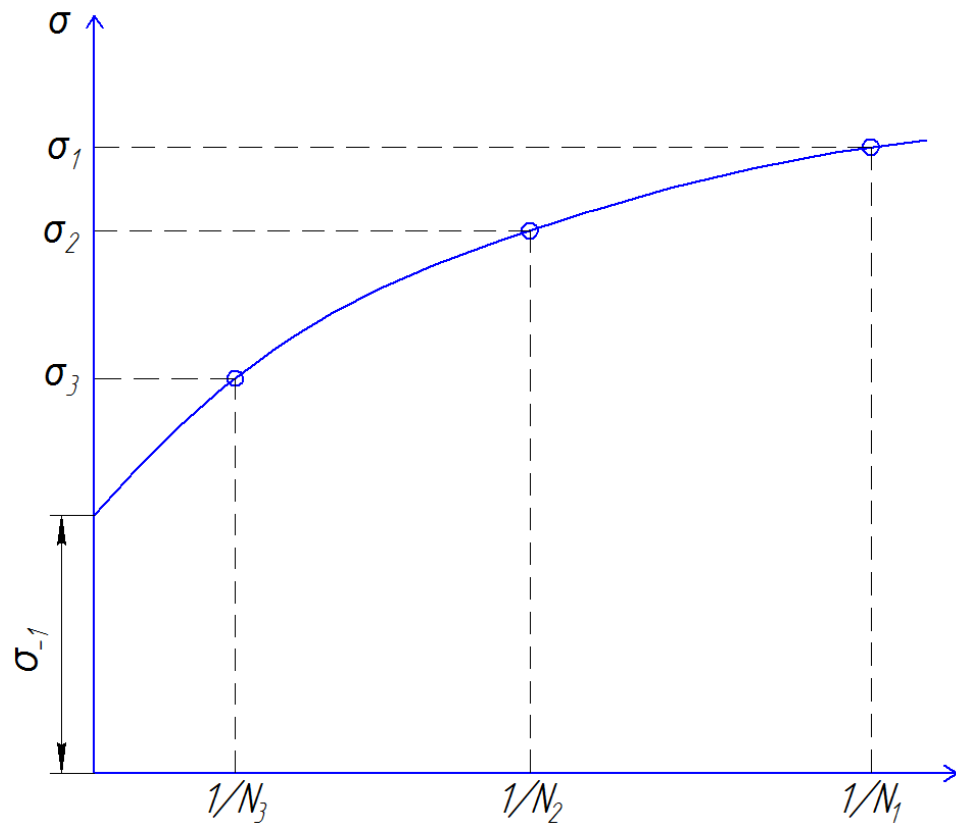


Рисунок 1.24 – График к определению предела выносливости методом Кравченко П. Е. [44]

К достоинствам метода следует отнести: небольшое, потребное количество образцов и ускоренный характер испытаний.

Недостатком метода является – предел выносливости с определенной погрешностью вследствие небольшого объема выборки.

Метод В. И. Кудрявцева

Метод Кудрявцева В. И. является методом ускоренных (малообразцовых) испытаний выносливости. Проводят испытания двух-четырех образцов при нагрузке, создающей напряжение $\sigma = 0,7\sigma_b$ и при близком к нему значению. Строят график, в координатах которого, по оси x откладывают значения σ^2 , а по оси y значения $\sigma^2 \ln N$ (рисунок 1.25). Экстраполируют графическую зависимость до пересечения с осью ординат и определяют значение отрезка A [44].

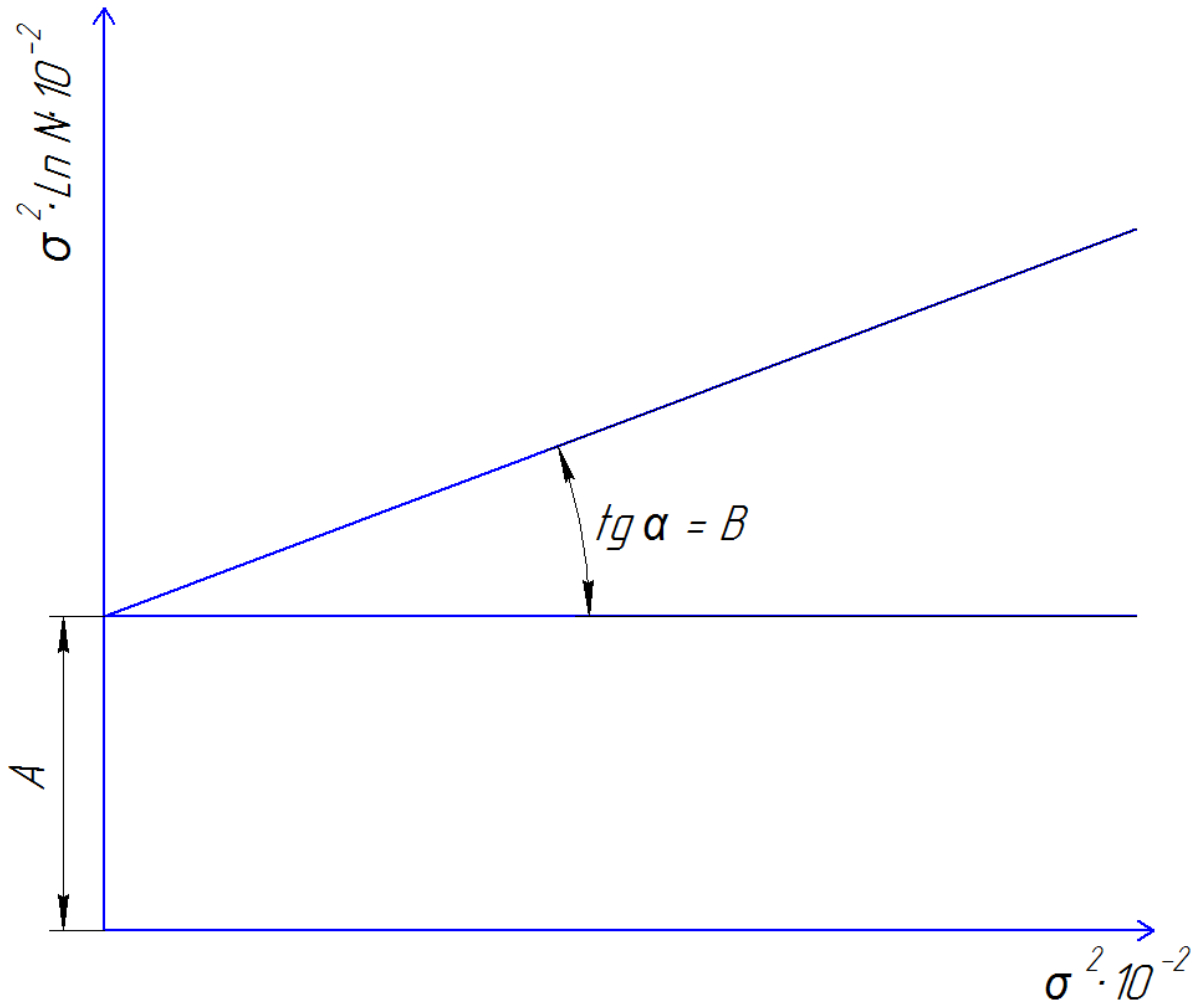


Рисунок 1.25 – График к определению предела выносливости методом Кудрявцева В. И.

Используя график, составляют уравнение [44]

$$\sigma^2 = \frac{A}{\ln N - B}, \quad (1.4)$$

где A – отрезок прямой, отсекаемый линией графика по оси y ;

B – тангенс угла наклона прямой графика к оси x .

Рассчитывают приближенный предел выносливости по формуле

$$\sigma_{-1 \text{ пр}} = \frac{\sigma - 5,4}{0,755}, \quad (1.5)$$

Проводят испытание образцов при $\sigma = \sigma_{-1 \text{ пр}}$ для уточнения предела выносливости.

К достоинствам метода следует отнести: небольшое, потребное количество образцов и ускоренный характер испытаний.

Недостатком метода является – предел выносливости с определенной погрешностью вследствие небольшого объема выборки.

Метод В. Н. Пантелеева

Метод относится к ускоренным (малообразцовым) испытаниям на выносливость. При испытаниях используют 2 образца. Условие нагружения образцов: $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_{-1}$. После разрушения образцов определяют их долговечность N_1 и N_2 .

Приближенное значение предела выносливости при плоском изгибе рассчитывают по формуле [44]

$$\sigma_{-1 \text{ пр}} = \frac{(N_2 - N_1)\sigma_1\sigma_2}{N_2\sigma_1 - N_1\sigma_2}.$$

Проводят испытание образцов при $\sigma = \sigma_{-1 \text{ пр}}$ для уточнения предела выносливости.

К достоинствам метода следует отнести: небольшое, потребное количество образцов и ускоренный характер испытаний.

Недостатком метода является погрешность при определении предела выносливости вследствие небольшого объема выборки.

Метод Д. И. Гольцева

Метод аналогичен методу В. Н. Пантелеева. При испытаниях используют 2 образца. Условие нагружения образцов: $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_{-1}$. После разрушения образцов определяют их долговечность N_1 и N_2 .

Приближенное значение предела выносливости определяют по формуле [44]

$$\sigma_{-1 \text{ пр}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 N_1 - \sigma_2^2 N_2}{N_1 - N_2}}.$$

Проводят испытание образцов при $\sigma = \sigma_{-1 \text{ пр}}$ для уточнения предела выносливости.

К достоинствам метода следует отнести: небольшое, требуемое количество образцов и ускоренный характер испытаний.

Недостатком метода является – предел выносливости с определенной погрешностью вследствие небольшого объема выборки.

Ресурс полимерной посадки подшипникового узла после восстановления в значительной мере определяется долговечностью полимера. В этой связи особую актуальность приобретает вопрос исследования на усталость новых полимерных нанокompозитов при циклическом нагружении. К общему недостатку известных методов усталостных испытаний следует отнести то, что последние отличаются большой трудоемкостью и продолжительностью, а результаты испытаний имеют ограниченную пригодность, т.е. они могут использоваться для образцов узкого диапазона типоразмеров (влияние масштабного фактора).

Требуется разработка нового метода ускоренных усталостных испытаний, предусматривающего использование того же испытательного оборудования, и получение в более короткие сроки достоверной информации о выносливости полимерных посадок под действием циклических нагрузок, обеспечение пригодности использования результатов испытаний применительно к любым типоразмерам подшипников качения [44].

1.4 Выводы. Цель и задачи исследований

Корпусные детали представляют собой базисные, наиболее материалоемкие и дорогие детали. Долговечность корпусных деталей определяет ресурс агрегатов и надежность автомобиля в целом [35].

Анализ способов восстановления корпусных деталей показал, что наиболее высокий эффект достигается при электроконтактной приварке стальной ленты. Это обусловлено минимальным термическим воздействием, повышением долговечности. Однако этот способ отличается энергоёмкостью, потребностью в сложном технологическом оборудовании, не обеспечивается фреттингостокость посадочных мест подшипников.

При износах корпусных деталей автотракторной техники до 0,3 мм наиболее технологичным является восстановлением технологиями с применением полимерных материалов.

В настоящее время потребителю предлагается очень большой спектр наноразмерных частиц в качестве наполнителя: органоглины, дисперсные органические и неорганические наночастицы, и углеродные нанотрубки. УНТ обладают большой жесткостью и прочностью, высокими упругими свойствами, химической и термической стабильностью, хорошей электро- и теплопроводностью. В настоящее время отсутствует информация об эластомерных нанокompозитах, наполненных углеродными нанотрубками, и и используемых при восстановлении корпусных деталей [35].

Необходимо разработать эластомерный нанокompозит, наполненный углеродными нанотрубками.

Известные методы усталостных испытаний имеют общий недостаток: большая трудоемкость и продолжительность, а их результаты пригодны только для образцов узкого диапазона типоразмеров.

Необходимо разработать новый метод ускоренных усталостных испытаний, позволяющий оперативно получить достоверную информацию о выносливости полимерных посадок, обеспечить пригодность использования результатов испытаний применительно к любым типоразмерам подшипников качения.

Целью настоящей работы является повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей автотракторной техники эластомером Ф-40С, наполненным углеродными нанотрубками, за счет повышения качества полимерных покрытий, увеличения их механических и

теплофизических свойств, обеспечения высокой долговечности восстановленных посадок подшипников.

Задачи исследований в диссертационной работе:

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

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ, НАПОЛНЕННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ (УНТ)

2.1 Механические свойства и фрактальный анализ эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ

2.1.1 Усиление, прочность и деформация эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ

Повышение механических свойств нанокompозитов, наполненных УНТ, обусловлено двумя причинами [123]. Первая причина заключается в интенсивном взаимодействии наночастиц с полимерной матрицей, что приводит к образованию в растворе полимера существенно большего количества центров кристаллизации. В итоге формируется материал, имеющий более высокую степень кристалличности и соответственно более высокую прочность. Второй причиной является вытянутая форма нанотрубок, благодаря которой в процессе отверждения полимера, в нем возникают ассиметричные поля напряжений (рисунок 2.1).

Последние являются причиной образования в структуре полимерной матрицы групп макромолекул определенной ориентации.

В работе Гуняева Г. М. усиление композитов, наполненных волокнистыми частицами объясняется увеличением сопротивляемости матрицы деформации при ее нагружении. Степень увеличения прочности не столь значительна, но композиты проявляют важное эксплуатационное свойство – способность сохранять работоспособность, в сравнении с матрицей, при повышенных температурах эксплуатации, которые превышают половину абсолютной температуры плавления или фазового превращения [124].

Авторы в работе [125] отмечают особенность физических и механических свойств нанотрубок. В сравнении со сталью, нанотрубки имеют меньшую плотность в пять раз. При этом прочность нанотрубок в десятки раз превышает

аналогичный параметр стали. Они считают, что размещение нанотрубки между соседними волокнами полимера, связывание её с ними углеводородными цепочками может повысить прочность на данном участке материала примерно до прочности нанотрубки (рисунок 2.2).

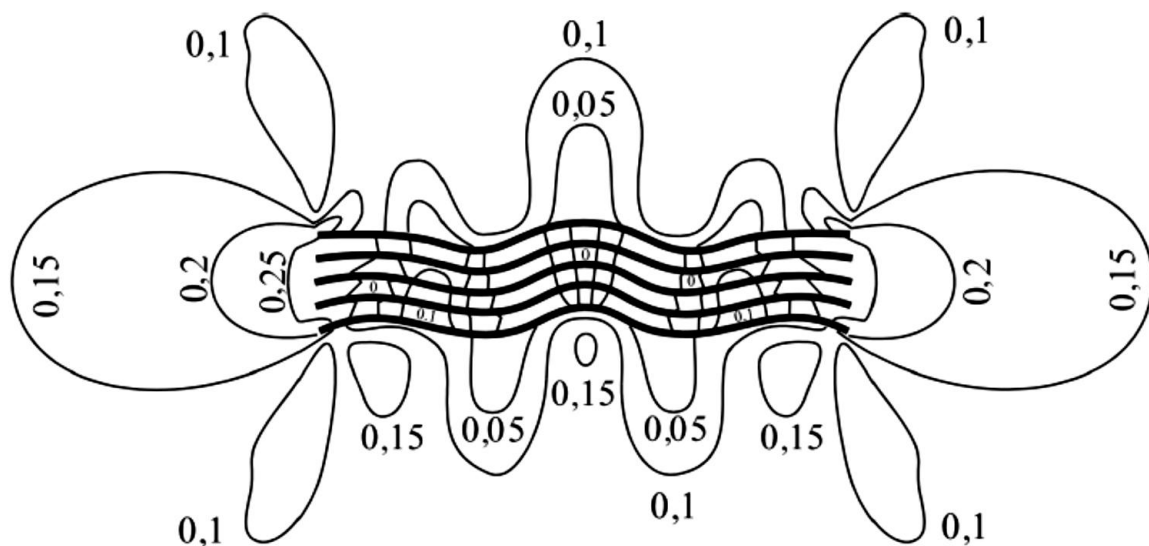


Рисунок 2.1 – Распределение механических напряжений в пространстве вокруг тактоида [123]

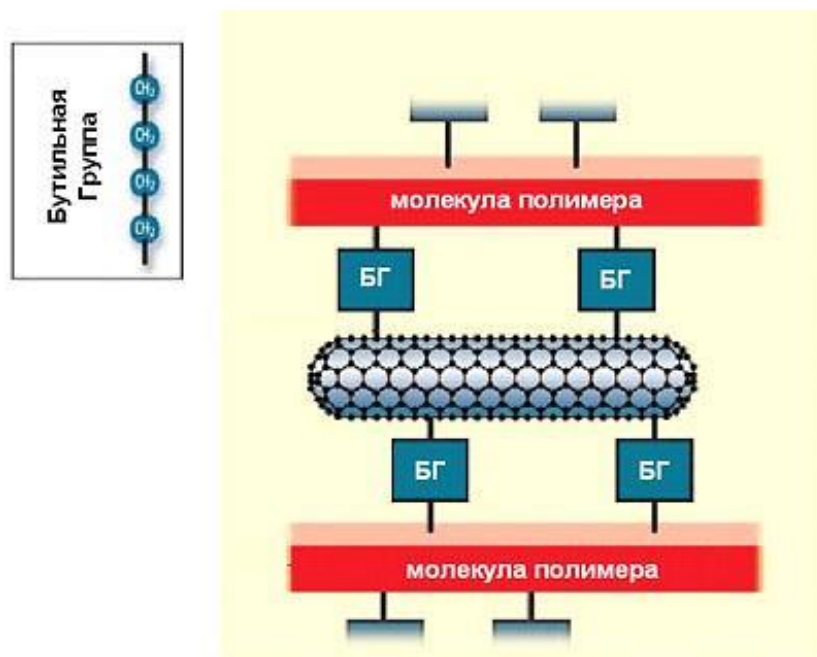


Рисунок 2.2 – Схематическое изображение нанотрубки, встроенной между молекулами полимера, соединённой с ними с помощью бутильных групп [125]

При содержании нанотрубок в 0,6 % прочность, в сравнении с матрицей, увеличивается до четырех раз. Авторы полагают, что при объемном содержании нанотрубок в 10 % прочность полимера, в сравнении с не наполненным полимером, может увеличиться до 20 раз.

В работе [126] показано, что основной причиной усиления полимерных нанокомпозитов, наполненных УНТ, является образование межфазных областей модуль упругости которых меньше аналогичного параметра УНТ, но значительно больше модуля упругости матричного полимера.

Степень усиления нанокомпозита, наполненного УНТ можно определить по формуле [126]

$$\frac{E_k}{E_{\Pi}} = 1 + 11(\varphi_n + \varphi_{\text{мф}})^{1,7}, \quad (2.1)$$

где E_k и E_{Π} – модули упругости композита и полимерной матрицы;

φ_n и $\varphi_{\text{мф}}$ – объемные относительные доли наночастиц наполнителя и межфазных областей, соответственно.

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

$$\frac{E_k}{E_{\Pi}} = 1 + 0,32W^{1/2}l_{\text{ст}}, \quad (2.2)$$

где W – массовое содержание наночастиц наполнителя, %;

$l_{\text{ст}}$ – длина статистического сегмента полимерной матрицы, нм.

С повышением содержания наночастиц наполнителя, включая УНТ, модуль упругости нанокомпозитов увеличивается (рисунок 2.3). Достигнув экстремального значения этот параметр уменьшается, что можно объяснить агрегированием наночастиц наполнителя. Графические зависимости степени усиления E_k/E_{Π} от содержания наполнителя (органоглины и УНТ) W_n практически

совпадают. Имеет место также совпадение вышеупомянутых зависимостей с теоретической зависимостью 4, рассчитанной по формуле (2.2).

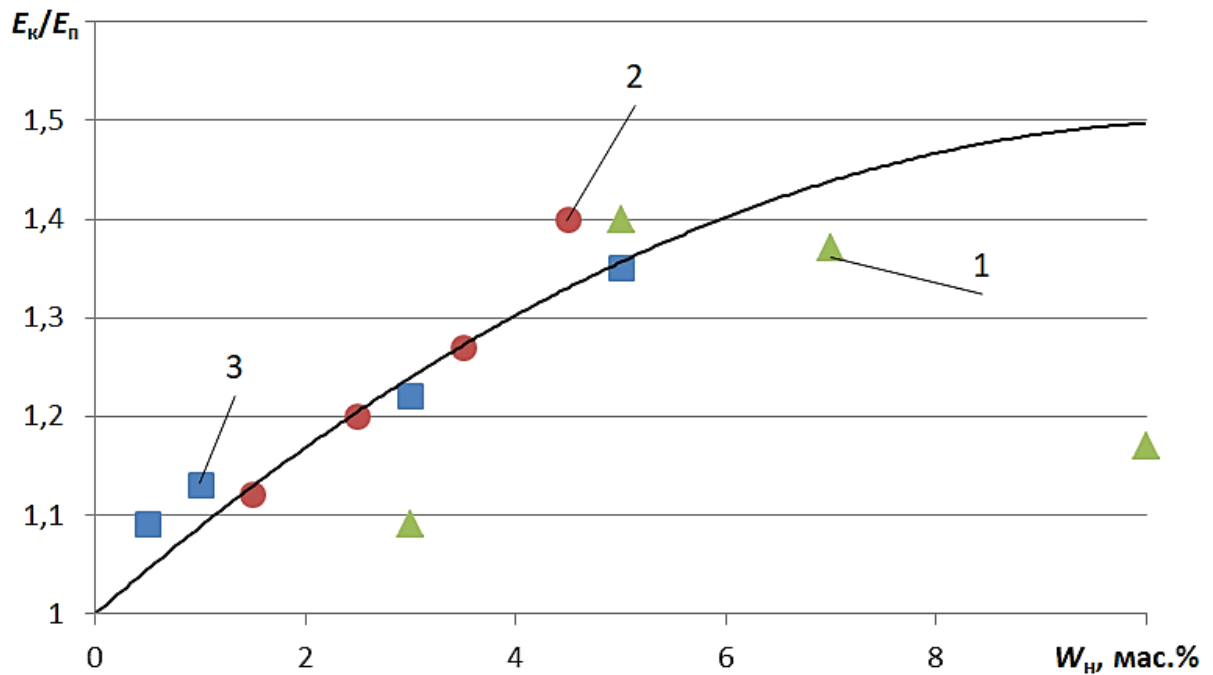


Рисунок 2.3 – «Зависимость степени усиления E_k/E_n от содержания нанонаполнителя W_n для нанокompозитов фенилон/УНТ (1); ПК/ ММТ (2) и ПА-6/ММТ (3); 4 – расчет по формуле (2.1)» [118]

Теоретическую прочность полимера можно приблизительно оценить по зависимости [127]

$$\sigma_T = 0,1E. \quad (2.3)$$

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

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

зафиксировано в нанокompозитах на основе эпоксиполимера и фенилона (рисунок 2.4).

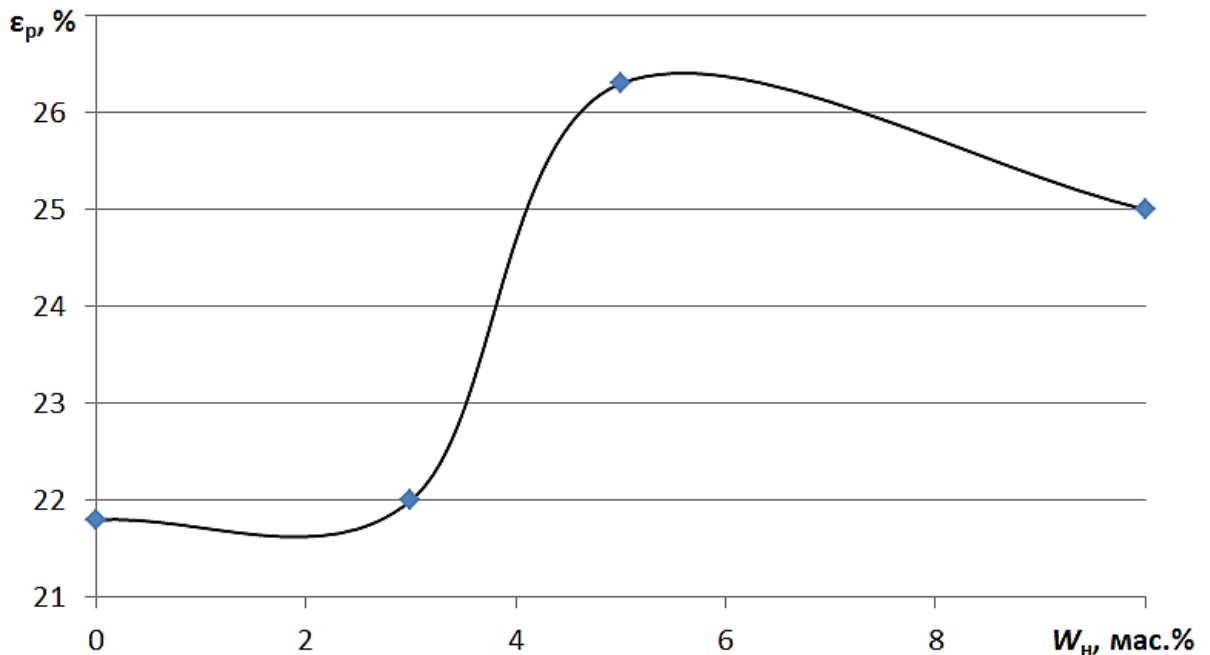


Рисунок 2.4 – Зависимость деформации нанокompозита на основе фенилона от содержания УНТ

В работе Микитаева и Козлова приводится пояснение: «...Отличием УНТ от других нанопополнителей (дисперсных частиц, органоглин) является их гладкая в атомном масштабе поверхность, что приводит к растяжению макромолекул матричного полимера на этой поверхности и образованию плотноупакованного межфазного слоя полимерная матрица-УНТ. Формирование плотноупакованных межфазных слоев приводит к изменению молекулярных и структурных характеристик полимерной матрицы (C_{∞} , d_f , $\varphi_{кл}$, $D_{ц}$), увеличению молекулярной подвижности и деформации нанокompозита» [128].

Как и в случае с модулем упругости и прочностью, по достижении максимального значения деформация уменьшается по причине агрегирования наночастиц.

Выводы

- 1). Наполнение полимеров УНТ приводит к повышению механических свойств нанокompозита: модуля упругости и прочности.
- 2). При наполнении полимеров УНТ образуются плотноупакованные межфазные слои с повышенной молекулярной подвижностью, что приводит к увеличению деформационных свойств нанокompозита.

2.1.2 Выносливость эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ

В виду того, что подшипники качения в узлах трансмиссии и ходовой части автотракторной техники работают в условиях циклического нагружения, основной причиной отказа посадок подшипников, восстановленных полимером, является усталостное разрушение. Начало усталостного разрушения в покрытии из полимерных композитов наблюдается в межфазной области [124]. Разрушение УНТ маловероятно и возможно, если это агрегат из наночастиц.

С ростом содержания волокнистого наполнителя усталостная прочность и соответственно выносливость композита повышается (рисунок 2.5). При оптимальном содержании наполнителя усталостная прочность достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение содержания наполнителя приводит к уменьшению усталостной прочности. Максимальная усталостная прочность композитов при этом на 10-15 % ниже (рисунок 2.5 и таблица 2.1), чем при кратковременных испытаниях [130]. Это объясняется тем, что более плотная упаковка повышает нагруженность полимерной матрицы и это вызывает ее более раннее разрушение. Одной из причин повышения нагруженности матрицы являются начальные термоупругие напряжения в ней, которые увеличиваются с повышением содержания УНТ. Эти напряжения суммируются с напряжениями, возникающими от эксплуатационных нагрузок и существенно повышают напряженность полимерной матрицы.

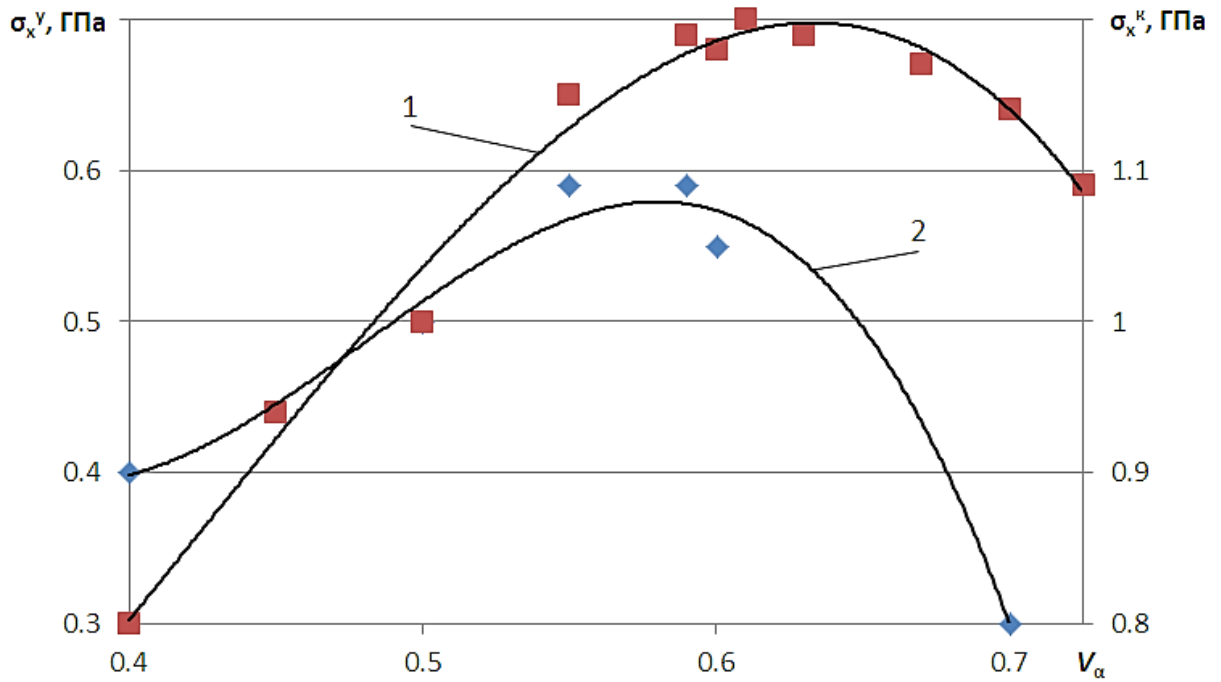


Рисунок 2.5 – Зависимость усталостной (2) и кратковременной (1) прочности при изгибе эпоксикарбофибры от степени наполнения [130]

Таблица 2.1 – Усталостная прочность* при симметричном растяжении - сжатии эпоксистеркловолоконитов** с различным содержанием смолы [130]

| $V_m, \% \text{ (масс.)}$ | $\sigma_{x_N}^{\mp}, \text{ МПа}$ | $\sigma_x^+, \text{ МПа}$ | $\sigma_x^-, \text{ МПа}$ | $\sigma_{x_N}^{\mp} / \sigma_x, \%$ |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 37,0 | 217 | 710 | 503 | 37,0 |
| 32,4 | 252 | 820 | 651 | 39,0 |
| 25,7 | 234 | 946 | 735 | 31,5 |
| 19,9 | 217 | 808 | 731 | 30,0 |

* На базе 10^7 циклов.

** Ориентация слоёв $\pm 5^\circ$.

Усталостная прочность перекрестно-армированных композитов, подверженных циклическому нагружению, зависит от адгезии на границе раздела фаз. Из рисунка 2.6 следует, что усталостная прочность композитов, наполненных высокомодульными углеродными волокнами с активированной поверхностью в

полтора раза выше аналогичного параметра композитов, наполненных необработанными волокнами (53 и 17 МПа соответственно) [131].

Уровень напряжений, возникающих в полимерной матрице композита, зависит от упругих характеристик волокон.

В композитах, на основе одной полимерной матрицы, наполненных волокнами, имеющими различные модули упругости ($E_{a_1} > E_{a_2}$), но с одинаковым объемным содержанием, усталостная прочность будет определяться выражением [124]

$$(\sigma_{x_1})_N = \sigma_{a_1} V_a + \sigma_{m_1} V_m; (\sigma_{x_2})_N = \sigma_{a_2} V_a + \sigma_{m_2} V_m; \quad (2.4)$$

где

$$\sigma_{m_1} = \frac{(\sigma_{x_1})_N - \sigma_{a_1} V_a}{V_m}; \quad \sigma_{m_2} = \frac{(\sigma_{x_2})_N - \sigma_{a_2} V_a}{V_m}.$$

Далее авторы поясняют «...В процессе, усталостных испытаний различных композитов напряжения в матрице, возникающие при достижении предела выносливости материала (на базе 10^7 циклов), близки между собой. Поскольку напряжения в матрице при разрушении композитов одинаковы, то справедливы равенства» [124]

$$\begin{aligned} (\sigma_{x_1})_N - \sigma_{a_1} V_a &= (\sigma_{x_2})_N - \sigma_{a_2} V_a, \\ \Delta\sigma_N &= (\sigma_{x_2})_N - (\sigma_{x_1})_N = \sigma_{a_2} V_a - \sigma_{a_1} V_a = \\ &= \sigma_{a_1} V_a \left(\frac{\sigma_{a_2}}{\sigma_{a_1}} - 1 \right) = (\sigma_{x_1})_N \left(\frac{E_{a_2}}{E_{a_1}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.5)$$

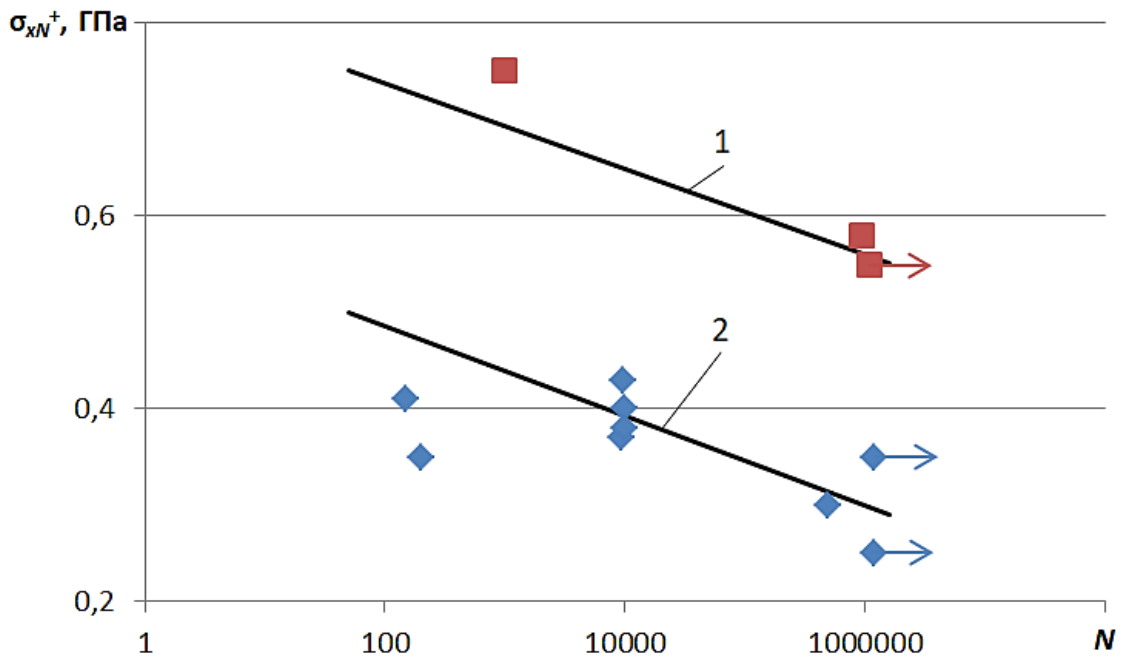
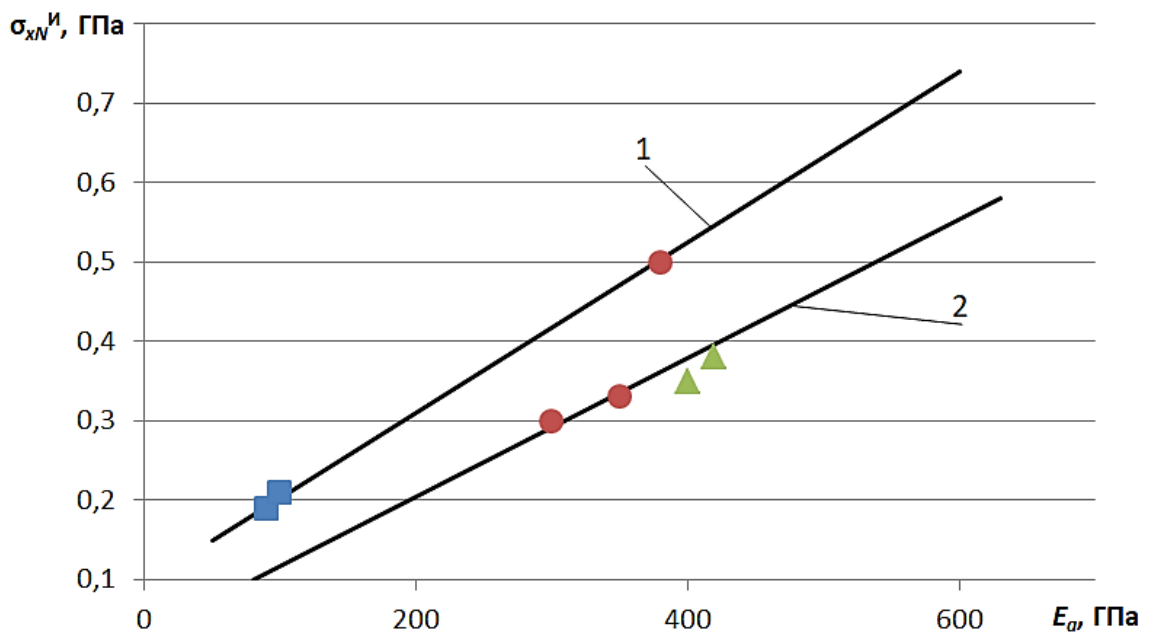


Рисунок 2.6 – Зависимость усталостной прочности при пульсирующем растяжении ортогонально-армированного карбо волокнита на основе углеродных волокон с активированной (1) и неактивированной (2) поверхностью от числа циклов растяжения [124]



$$1 - \varepsilon_m = 0,0125; 2 - \varepsilon_m = 0,025$$

Рисунок 2.7 – Зависимость усталостной прочности при изгибе композитов от модуля упругости армирующих волокон (□ — стеклянные, ○ — углеродные, Δ — борные волокна) [124]

Из зависимости (2.5) следует, что волокна с высоким модулем упругости увеличивают усталостную прочность композита в $\left(\frac{E_{a2}}{E_{a1}} - 1\right)$ раз в результате уменьшения деформации и напряжений в матрице.

При равных напряжениях усталостная прочность и соответственно выносливость будет выше у тех композитов, которые наполнены волокнами с большим модулем упругости (рисунок 2.7).

При повышении модуля упругости композитов за счет наполнения высокомодульными волокнами их усталостная прочность увеличивается по линейному закону за счет уменьшения напряжений в полимерной матрице.

Усталостная прочность также зависит линейно от прочности полимерной матрицы (рисунок 2.8).

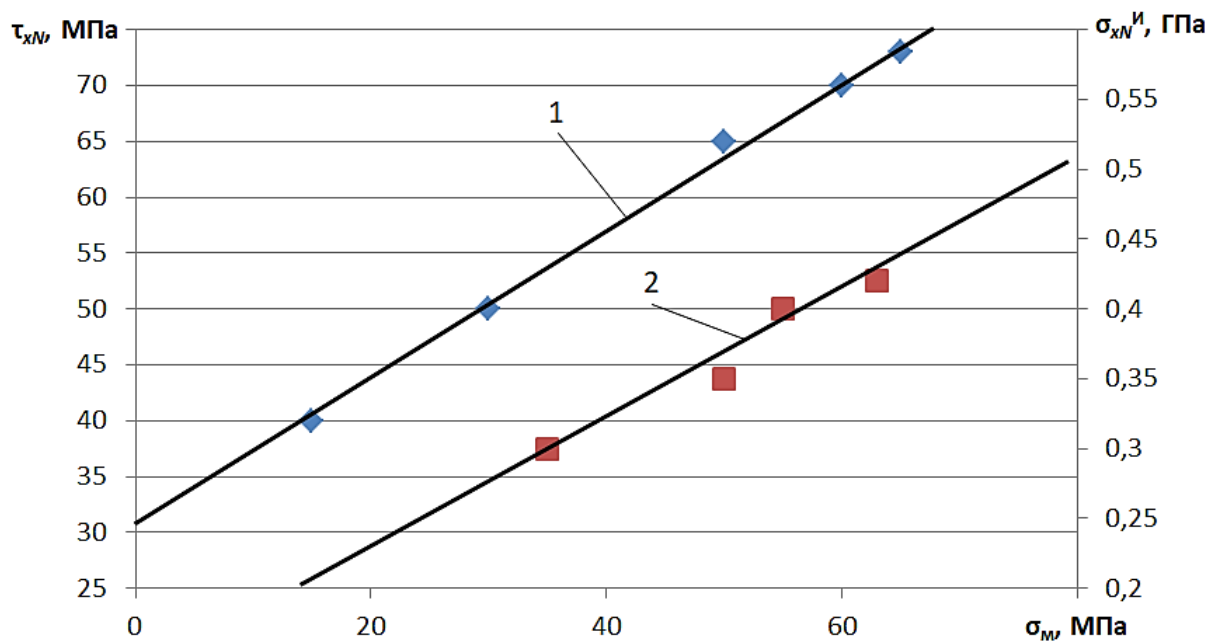


Рисунок 2.8 – Зависимость усталостной прочности (1) и разрушающего напряжения при сдвиге (2) эпоксикарбоволоконитов от прочности матрицы [124]

Подтверждением является аналитическая зависимость: «...между усталостной прочностью композита, наполненного волокнами, и механическими свойствами полимерной матрицы и армирующих волокон

$$\sigma_{x_N} = \sigma_M V_a \frac{E_a}{E_M} \xi. \quad (2.6)$$

Из формулы (2.6) видно, что усталостная прочность композиции прямо пропорциональна прочности матрицы и модулю упругости армирующих волокон. Коэффициент ξ характеризует степень использования прочности матрицы при циклическом нагружении и наряду с природой матрицы учитывает влияние технологии изготовления композита, наличие в нем термических и усадочных напряжений» [124].

2.1.3 Фрактальный анализ структуры нанокompозита

В современной теории усиления полимерных нанокompозитов от наполнения наночастицами используют три вида моделей: традиционная микромеханическая [132...134], перколяционная [135] и фрактальная [136, 137]. В отличие от микромеханической модели, в перколяционной и фрактальной моделях в формулах для расчета модуля упругости композита не учитывается модуль упругости наполнителя. В соответствии с перколяционной и фрактальной моделями, благодаря наночастицам наполнителя, видоизменяется и фиксируется структура полимерной матрицы. Модуль упругости наполнителя в этих моделях не учитывают по причине его многократного отличия от модуля упругости полимерной матрицы. Например, у нанокompозитов на основе полиэтилена низкой плотности, наполненных частицами карбоната кальция (ПЭНП/ CaCO_3) модули упругости наполнителя и полимерной матрицы отличаются более чем на два порядка. По этой причине в деформируемом нанокompозите частица наполнителя практически не деформируется, а деформация материала определяется деформацией полимерной матрицы и межфазных слоев [135].

После преобразования формула (2.2) получила вид

$$l_{\text{ст}} = \frac{\left(\frac{E_{\text{к}}}{E_{\text{н}}} - 1\right)}{0,32\sqrt{W_{\text{с}}}} \quad (2.7)$$

Далее по формуле (2.7) рассчитали величину $l_{\text{ст}}$ при различном содержании наполнителя $W_{\text{с}} = 0,05$ и $W_{\text{с}} = 0,05 \%$.

$$l_{\text{ст}0,05} = \frac{\left(\frac{63}{56,37} - 1\right)}{0,32\sqrt{0,05}} = 1,68 \text{ нм};$$

$$l_{\text{ст}0,1} = \frac{\left(\frac{89,64}{56,37} - 1\right)}{0,32\sqrt{0,1}} = 5,83 \text{ нм};$$

$$l_{\text{ст}0,15} = \frac{\left(\frac{66,41}{56,37} - 1\right)}{0,32\sqrt{0,15}} = 1,45 \text{ нм}.$$

«...В рамках фрактального анализа межфазный слой в наполненном эластомере является результатом взаимодействия двух фрактальных объектов: эластомера и поверхности частицы наполнителя. Толщина межфазного слоя определяется расстоянием взаимопроникновения этих объектов $l_{\text{мф}}$. Так как модуль упругости наполнителя многократно больше аналогичного параметра матрицы, это взаимодействие выражается во внедрении наполнителя в полимерную матрицу на расстояние $l = l_{\text{мф}}$. Толщину межфазного слоя в этом случае можно определить по формуле» [128]

$$l_{\text{мф}} \approx a \left(\frac{r_{\text{н}}}{2a}\right)^{\frac{2(d-d_s)}{d}}, \quad (2.8)$$

где a – нижний линейный масштаб фрактального поведения, который для полимеров принимают равным длине статистического сегмента $l_{\text{ст}}$,

r_H – радиус наночастицы (а точнее, агрегата наночастиц) наполнителя, для УНТ $r_H = 15$ нм;

d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал, $d = 3$;

d_s – фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя, для УНТ $d_s = 2$.

$$l_{\text{мф}0,05} \approx 1,68 \left(\frac{15}{2 \times 1,68} \right)^{\frac{2(3-2)}{3}} = 4,58;$$

$$l_{\text{мф}0,01} \approx 5,83 \left(\frac{15}{2 \times 5,83} \right)^{\frac{2(3-2)}{3}} = 6,9;$$

$$l_{\text{мф}0,15} \approx 1,45 \left(\frac{15}{2 \times 1,45} \right)^{\frac{2(3-2)}{3}} = 4,36.$$

В зависимости от массового содержания W_c УНТ рассчитали соответствующие значения объемной доли наполнителя по формуле

$$\varphi_H = \frac{M_H \rho_{\Pi}}{M_H \rho_{\Pi} + M_{\Pi} \rho_H}, \quad (2.9)$$

где M_H и M_{Π} – массовые доли наполнителя и полимерной матрицы;

ρ_H и ρ_{Π} – плотность наполнителя и полимерной матрицы, г/см³.

$$m_H = 0,05 \text{ масс. ч.}$$

Определим массовые доли наполнителя M_H и матрицы M_{Π} в долях единицы

$$M_H = \frac{m_H}{m_K},$$

$$M_{\Pi} = 1 - M_H,$$

$$M_{\text{H}0,05} = \frac{0,05}{100,05} = 0,0005;$$

$$M_{\text{П}0,05} = 1 - 0,0005 = 0,9995.$$

Определим объемную долю наполнителя

$$\varphi_{\text{H}0,05} = \frac{0,0005 \times 1,87}{0,0005 \times 1,87 + 0,9995 \times 0,06} = 0,015.$$

$$m_{\text{H}} = 0,1 \text{ масс. ч.}$$

Определим массовые доли наполнителя M_{H} и матрицы $M_{\text{П}}$ в долях единицы

$$M_{\text{H}0,1} = \frac{0,01}{100,1} = 0,001;$$

$$M_{\text{П}0,1} = 1 - 0,001 = 0,999.$$

Определим объемную долю наполнителя

$$\varphi_{\text{H}0,1} = \frac{0,001 \times 1,87}{0,001 \times 1,87 + 0,999 \times 0,06} = 0,03.$$

$$m_{\text{H}} = 0,15 \text{ масс. ч.}$$

Определим массовые доли наполнителя M_{H} и матрицы $M_{\text{П}}$ в долях единицы

$$M_{\text{H}0,15} = \frac{0,015}{100,15} = 0,0015;$$

$$M_{\text{П}0,15} = 1 - 0,0015 = 0,9985.$$

Определим объемную долю наполнителя

$$\varphi_{\text{н0,15}} = \frac{0,0015 \times 1,87}{0,0015 \times 1,87 + 0,9985 \times 0,06} = 0,045.$$

Относительную долю межфазных областей в нанокompозите рассчитали по зависимости

$$\varphi_{\text{мф}} = \varphi_{\text{н}} \left(\left(\frac{r_{\text{н}} + l_{\text{мф}}}{r_{\text{н}}} \right)^3 - 1 \right), \quad (2.10)$$

$$\varphi_{\text{мф0,05}} = 0,015 \left(\left(\frac{7,5 + 4,58}{7,5} \right)^3 - 1 \right) = 0,023;$$

$$\varphi_{\text{мф0,1}} = 0,03 \left(\left(\frac{7,5 + 6,9}{7,5} \right)^3 - 1 \right) = 0,08;$$

$$\varphi_{\text{мф0,15}} = 0,045 \left(\left(\frac{7,5 + 4,36}{7,5} \right)^3 - 1 \right) = 0,067.$$

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

$$\begin{cases} \lambda_p = C_{\infty}^{D_{\text{ц}}-1}; \\ C_{\infty}^{D_{\text{ц}}} = \frac{2}{\varphi_{\text{кл}} + \varphi_{\text{н}} + \varphi_{\text{мф}}}; \end{cases} \quad (2.11)$$

где λ_p – предельная степень вытяжки нанокompозита;

$D_{\text{ц}}$ – фрактальная размерность участка полимерной цепи его фиксации (кластерами, физическими зацеплениями, узлами химической сшивки и тп);

C_{∞} – статистическая гибкость полимерной цепи;

$\varphi_{\text{кл}}$ – объёмная доля узлов (кластеров) сетки физических зацеплений (узел сетки – контакт двух сегментов с замороженной молекулярной подвижностью).

Величину $\varphi_{\text{кл}}$ определили из зависимости

$$\varphi_{\text{кл}}^{\text{пр}} = \varphi_{\text{кл}}(1 - \varphi_{\text{н}}) \rightarrow \varphi_{\text{кл}} = \frac{\varphi_{\text{кл}}^{\text{пр}}}{1 - \varphi_{\text{н}}}, \quad (2.12)$$

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

Для расчёта $\varphi_{\text{кл}}^{\text{пр}}$ использовали уравнение [128]

$$T_{\text{с}} = 293 + 535\varphi_{\text{кл}}^{\text{пр}}. \quad (2.13)$$

Это уравнение справедливо для фенилона, который имеет положительную температуру стеклования $T_{\text{с}} = 270 \text{ }^{\circ}\text{C} = 543 \text{ K}$.

В нашем случае температура стеклования каучука имеет отрицательное значение $T_{\text{с}} = -32 \text{ }^{\circ}\text{C} = 241 \text{ K}$.

В случае использования зависимости (2.10) величина $\varphi_{\text{кл}}^{\text{пр}}$ будет иметь отрицательное значение, поэтому предлагается изменить знак в зависимости (2.10) на противоположный с размерностью в градусах Цельсия

$$T_{\text{с}} = 20 - 262\varphi_{\text{кл}}^{\text{пр}},$$

$$\varphi_{\text{кл}}^{\text{пр}} = \frac{-32 - 20}{-262} 0,198.$$

По формуле (2.12) рассчитаем значения $\varphi_{\text{кл}}$

$$\varphi_{\text{кл}0,05} = \frac{0,198}{1 - 0,015} = 0,201;$$

$$\varphi_{\text{кл}0,1} = \frac{0,198}{1 - 0,03} = 0,204;$$

$$\varphi_{\text{кл}0,15} = \frac{0,198}{1 - 0,045} = 0,207.$$

Определим значения $C_{\infty}^{D_{ц}}$ при разном $\varphi_{н}$ по формуле

$$C_{\infty}^{D_{ц}} = \frac{2}{\varphi_{кл} + \varphi_{н} + \varphi_{мф}} \quad (2.14)$$

$$C_{\infty 0,05}^{D_{ц}} = \frac{2}{0,201 + 0,015 + 0,023} = 8,4;$$

$$C_{\infty 0,1}^{D_{ц}} = \frac{2}{0,204 + 0,03 + 0,08} = 6,4;$$

$$C_{\infty 0,15}^{D_{ц}} = \frac{2}{0,207 + 0,045 + 0,067} = 6,3.$$

Преобразовали верхнее уравнение (2.11) к виду

$$C_{\infty} = \frac{C_{\infty}^{D_{ц}}}{\lambda_p}, \quad (2.15)$$

$$C_{\infty 0,05} = \frac{8,4}{2,81} = 2,99;$$

$$C_{\infty 0,1} = \frac{6,4}{3,1} = 2,06;$$

$$C_{\infty 0,15} = \frac{6,3}{3} = 2,09.$$

Затем рассчитали $D_{ц}$

$$D_{ц} = \frac{\ln(\lambda_p C_{\infty})}{\ln C_{\infty}}, \quad (2.16)$$

$$D_{ц 0,05} = \frac{\ln(2,81 \times 2,99)}{\ln 2,99} = 1,9436;$$

$$D_{ц 0,1} = \frac{\ln(3,1 \times 2,06)}{\ln 2,06} = 1,1818;$$

$$D_{ц 0,15} = \frac{\ln(3 \times 2,09)}{\ln 2,09} = 2,49.$$

Далее рассчитали фрактальную размерность структуры нанокompозита

$$C_{\infty} = \frac{2d_f}{d(d-1)(d-d_f)} + \frac{4}{3}, \quad (2.17)$$

После преобразования (2.16) получили

$$d_f = \left(C_{\infty} - \frac{4}{3} \right) \times (9 - 3d_f). \quad (2.18)$$

Для $C_{\infty 0,05} = 2,99$

$$\begin{aligned} d_{f0,05} &= (2,99 - 1,333) \times (9 - 3d_f) = 14,91 - 4,9668d_f, \\ d_{f0,05} &= \frac{14,91}{5,9698} = 2,4976. \end{aligned}$$

Для $C_{\infty 0,1} = 2,06$

$$\begin{aligned} d_{f0,1} &= (2,06 - 1,333) \times (9 - 3d_f) = 6,543 - 2,181d_f, \\ d_{f0,1} &= \frac{6,543}{3,181} = 2,056. \end{aligned}$$

Для $C_{\infty 0,15} = 2,09$

$$\begin{aligned} d_{f0,15} &= (2,06 - 1,333) \times (9 - 3d_f) = 6,8103 - 2,271d_f, \\ d_{f0,15} &= \frac{6,8103}{3,271} = 2,083. \end{aligned}$$

Фактор ориентации нанотрубок η определили из зависимости

$$\varphi_{мф} = 1,09\eta, \quad (2.19)$$

$$\eta_{0,05} = \frac{0,023}{1,09} = 0,021;$$

$$\eta_{0,1} = \frac{0,08}{1,09} = 0,073;$$

$$\eta_{0,15} = \frac{0,067}{1,09} = 0,061.$$

Размерность каркаса нанотрубок D_k определили, используя зависимость

$$\eta = 0,506(D_k - 2), \quad (2.20)$$

$$D_{к0,05} = \frac{0,021}{0,506} + 2 = 2,04;$$

$$D_{к0,1} = \frac{0,073}{0,506} + 2 = 2,14;$$

$$D_{к0,15} = \frac{0,061}{0,506} + 2 = 2,12.$$

В таблице 2.2 представлены результаты фрактального анализа.

Таблица 2.2 – Структурные и молекулярные характеристики структуры эластомерного нанокомпозита

| № | W_c/φ_n | $l_{ст}, \text{нм}$ | $l_{мф}, \text{нм}$ | $\varphi_{мф}$ | $\varphi_{кл}$ | C_∞ | D_ζ | d_f | η | D_k |
|---|-----------------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|------------|-----------|--------|--------|-------|
| 1 | 0,05/0,015 | 1,68 | 4,58 | 0,023 | 0,201 | 2,99 | 1,9436 | 2,4976 | 0,021 | 2,04 |
| 2 | 0,1/0,03 | 5,83 | 6,9 | 0,08 | 0,204 | 2,06 | 1,1818 | 2,056 | 0,073 | 2,14 |
| 3 | 0,15/0,045 | 1,45 | 4,36 | 0,067 | 0,207 | 2,09 | 2,49 | 2,083 | 0,061 | 2,12 |

Чем больше фактор ориентации нанотрубок η , а также размерность каркаса D_k , тем больше ориентация нанотрубок и выше прочность и модуль упругости нанокомпозита.

2.2 Ультразвуковое диспергирование растворов полимерных нанокompозитов

Деформационно-прочностные полимерных композитов существенным образом зависят от качества диспергирования компонентов, наличия агрегатов из частиц наполнителя, характера распределения частиц в объеме полимерной матрицы [66, 114...139]. Эффективность смешения и диспергирования растворов полимерных композитов можно повысить, используя ультразвуковую обработку (УЗО) [129, 140...129].

Колесников А. А. в работе [141] установил основные параметры, определяющие эффективное ультразвуковое диспергирование раствора полимерного композита. К ним следует отнести амплитуду звукового давления и продолжительность ультразвукового озвучивания. Проведены теоретические исследования и предложена формула расчета амплитуды звукового давления P_A [129]

$$P_A = \sqrt{\frac{2W}{S_t}} \sqrt{\frac{\rho}{\beta_{ад}}}, \quad (2.21)$$

где W – мощность УЗО;

S_t – площадь поверхности преобразователя;

ρ и $\beta_{ад}$ – плотность и коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

Автор сформулировал условия эффективного диспергирования раствора полимерного композита [129]:

1) рекомендуемый интервал значений амплитуды звукового давления при УЗО

$$2P_{атм} \leq P_A < 10P_{атм}, \quad (2.22)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление;

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

$$H_{\text{доп}} \leq N, \quad (2.23)$$

где N – естественный фокус преобразователя.

Естественный фокус для дискового излучателя рекомендуется определять по формуле [142]

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (2.24)$$

где D – диаметр излучателя;

λ – длина волны.

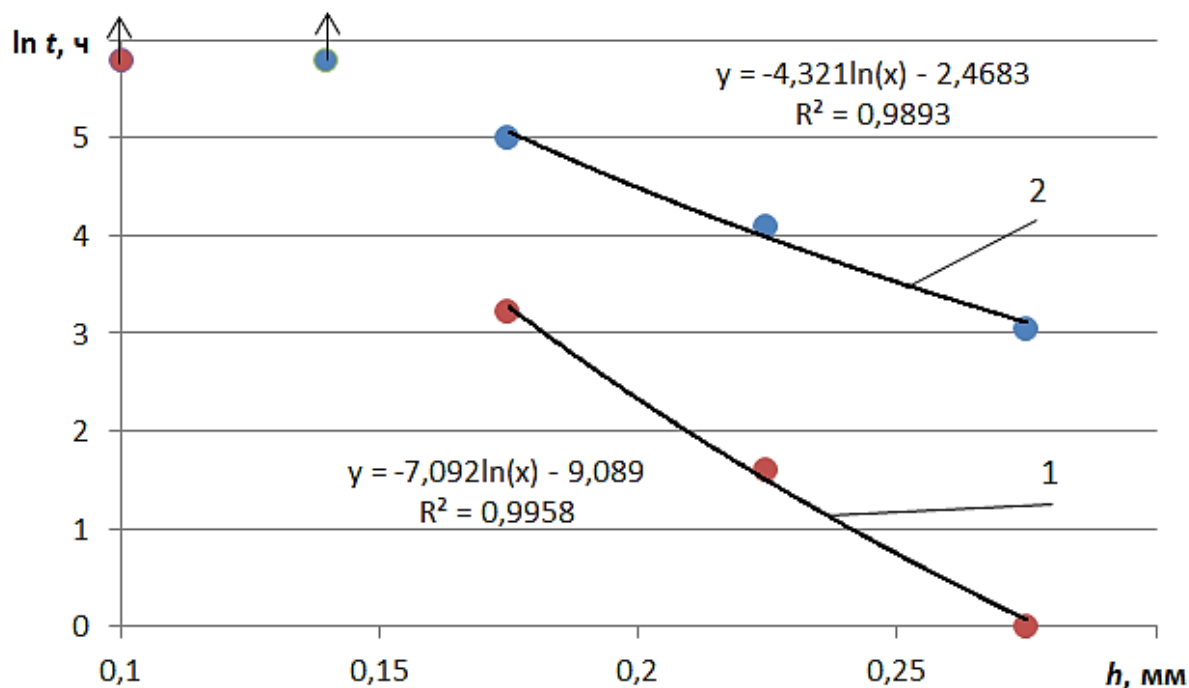
2.3 Метод усталостных испытаний

Из рассмотренных в первой главе способов испытаний наиболее близким техническим решением, по своей сущности и достигаемому техническому результату, является метод Кравченко П. Е. Поэтому новый метод ускоренных испытаний полимерных материалов на выносливость разработали, используя за основу метод Кравченко П. Е.

Предел выносливости и толщина полимерного покрытия имеют сильную взаимосвязь (рисунок 1.21). С уменьшением толщины покрытия, увеличивается его предел выносливости. В этой связи, нами в работе предложено на графике (рисунок 1.24) вместо напряжений цикла указывать значения толщины полимерного покрытия. Экстраполяция зависимости к оси ординат указывает в точке их пересечения значение максимальной допустимой толщины полимерной посадки.

С целью апробации нового метода проведены усталостные испытания посадок эластомера Ф-40С и нанокompозита на его основе, наполненного углеродными

нанотрубками «Таунит-М». Результаты испытаний показаны на рисунке 2.9. Толщина полимерного покрытия при испытаниях колебалась в диапазоне 0,175...0,275 мм. Циклическая радиальная нагрузка на подшипник 209 с полимерной посадкой составляла 20 кН [44].



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

Рисунок 2.9 – График зависимости долговечности посадок подшипника 209 в корпусной детали от толщины полимерного покрытия h при радиальной циклической нагрузке в 20 кН [44]

Толщины покрытий, что находились в работоспособном состоянии по истечении времени базы испытаний, которые составляла $N = 5,94 \times 10^7$ циклов нагружения или в переводе на часы – 330 ч работы стенда, отмечены точками с продолжением в виде стрелок [44].

Усталостные испытания начинали с максимальной толщины полимерной посадки подшипника при которой ее долговечность наименьшая. После разрушения посадки, испытывали полимерную посадку меньшей толщины, и так

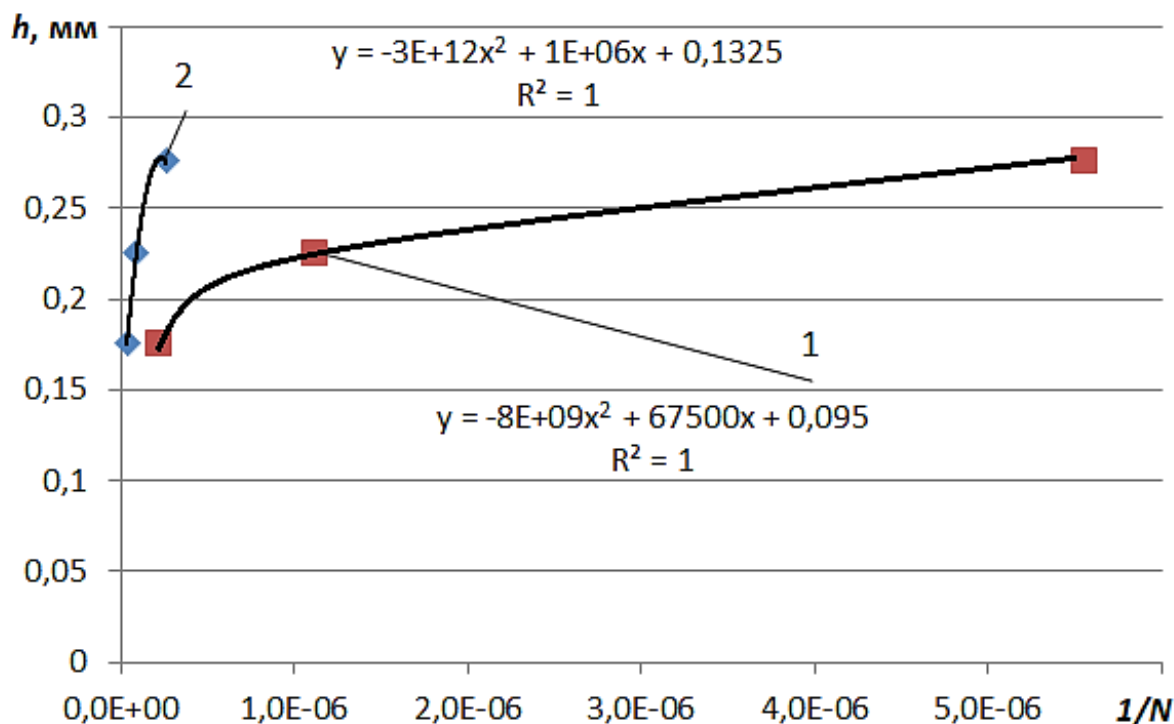
до тех пор, пока посадка не сохраняла работоспособность до конца базы испытаний.

Точка на кривой означает разрушение полимерной посадки. Точка со стрелкой свидетельствует о том, что материал работоспособен и проворот кольца подшипника во время испытаний отсутствовал. Из графика видно, что ветвь разрушений имеет нелинейный характер – типичная кривая Веллера.

Долговечность полимерных посадок с толщиной полимерного покрытия 0,275 мм наименьшая и составила 1 ч работы стенда, долговечность посадки из нанокompозита в 21 раз больше и составила 21 ч. Долговечность полимерных посадок с толщиной полимерного покрытия 0,225 мм составила 5 ч работы стенда, долговечность посадки из нанокompозита в 12 раз больше и составила 60 ч. Долговечность полимерных посадок с толщиной полимерного покрытия 0,175 мм составила 25 ч работы стенда, долговечность посадки из нанокompозита в 6 раз больше и составила 150 ч.

Экстраполируя полученные зависимости, как в методе Кравченко П. Е., к оси ординат получили точки пересечения (рисунок 2.10). Эти точки указали, что максимальная допустимая толщина покрытия эластомера Ф-40С, обеспечивающая работоспособность посадки до конца базы испытаний, составляет $h = 0,095$ мм, а для нанокompозита эта величина увеличилась в 1,4 раза, до значения $h = 0,1325$ мм.

Для проверки объективности и корректности нового метода проведен контрольный эксперимент. Наиболее высокая долговечность отмечена у посадок подшипников из эластомера Ф-40С нанокompозита на его основе, при толщинах полимерных покрытий 0,10 и 0,14 мм, соответственно. У посадок отмечена работоспособность до момента когда стендовые испытания завершились. Поэтому нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия в корпусных деталях с диаметральным износом до 0,28 мм [44].



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

Рисунок 2.10 – График для определения максимально допустимой толщины полимерного покрытия по методу ЛГТУ [44]

Таким образом, предлагается новый метод ускоренных стендовых испытаний на выносливость полимерных материалов. В начале стендовыми испытаниями устанавливают ресурс полимерной посадки под действием радиальной циклической нагрузки для трех различных, заданных толщин полимерных покрытий. По трем опытным точкам строят графическую зависимость толщины покрытия от величины обратной количеству циклов нагружения. Далее экстраполируют графическую зависимость до пересечения ее с осью ординат. Точка пересечения – это максимальная допустимая толщина полимерной посадки, сохраняющая работоспособность до конца базы испытаний. В завершении, с помощью формулы (1.1) рассчитывают критерий подобия π_1 . Использование формулы (1.1) и критерий подобия π_1 обеспечивает расчет максимальной допустимой толщины полимерной посадки для любых типоразмеров подшипников качения [44].

Новый метод ускоренных усталостных испытаний обеспечивает

многократное сокращение объема и продолжительности экспериментальных исследований конструкционных материалов [44].

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Общая методика исследований

Общая схема исследований разработана на основе цели и задач исследований (рисунок 3.1).

Объекты исследований в диссертационной работе:

- растворы нанокомпозитов эластомера Ф-40С, наполненные УНТ;
- пленки и покрытия из эластомерных нанокомпозитов с УНТ на стальной подложке;
- посадки подшипников в корпусных деталях, восстановленные эластомерным нанокомпозитом, наполненным УНТ.

Разработчик лака Ф-40С – ОАО «НИИ пластических масс им. Г. С. Петрова» [144].

Информация разработчика эластомера: «...Компонентный состав лака Ф-40С (ТУ 6-06-246-92):

- 1). каучук синтетический бутадиен-нитрильный марки СКН-40С – 12 масс. %;
- 2). феноло-формальдегидная смола на основе замещенного фенола винилацетиленовой структуры (ФКУ) – 8 масс. %;
- 3). ацетон технический, ГОСТ 2768-84 – 80 масс. % [135].

Характеристики лака Ф-40С:

- прозрачная жидкость коричневого цвета;
- массовая доля сухого остатка – 20 %;
- прочность связи со сталью при сдвиге при 20 °С не менее – 5,0 МПа» [144].

Как наполнитель лака Ф-40С в исследованиях использовали углеродные нанотрубки «Таунит-М» (ТУ 1791-003-36280340-2008).

В таблице 3.1 представлены характеристики наноразмерных УНТ [145].

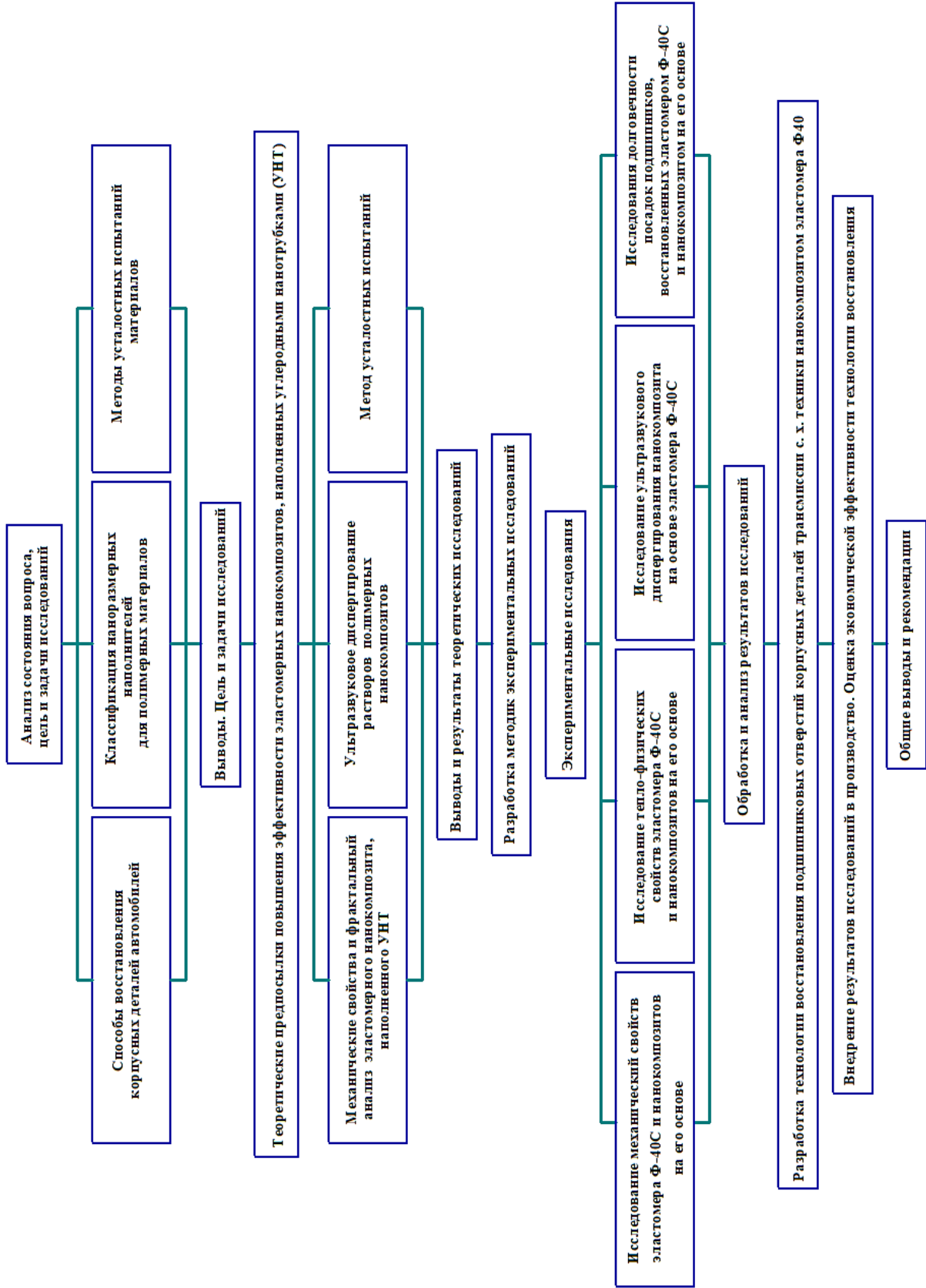


Рисунок 3.1 – «Общая схема исследований» [97]

Для обеспечения зазора в соединении «корпус-подшипник», имитирующего износ, использовали сменные втулки, которые запрессовывали в подшипниковые щиты вибростенда. Подшипниковые отверстия во втулках, после их запрессовки измеряли с индикаторными нутромерами НИ (ГОСТ 868-72) с индикаторной головкой ИЧ-1-0,001 (ТУ 3942-017-74229882-2014 ЧИЗ).

«Наружные размеры образцов измеряли рычажной скобой (ГОСТ 11098-75) с ценой деления 0,002 мм или микрометрами МК (ГОСТ 6507-90)» [144].

Таблица 3.1 – Параметры УНТ

| Характеристика | Таунит | Таунит-М | Таунит-МД |
|---|------------|------------|------------|
| Внешний диаметр, нм | 20-50 | 10-30 | 8-30 |
| Внутренний диаметр, нм | 10-20 | 5-15 | 5-15 |
| Длина, мкм | ≥ 2 | ≥ 2 | ≥ 20 |
| Общее количество примесей, % | | | |
| начальное | ≤ 10 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| после очистки | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 1 |
| Удельная поверхность, м ² /г | ≥ 160 | ≥ 270 | ≥ 270 |
| Насыпная плотность, г/см ³ | 0,3-0,6 | 0,025-0,06 | 0,025-0,06 |

В экспериментальных исследованиях использовали частные методики, описанные ниже.

3.2 Методика исследования механических свойств эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе

3.2.1 Методика исследования деформационно-прочностных свойств пленок нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С

При изучении механических свойств исследовали три состава нанокompозита:

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

Деформационно-прочностные свойства пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С оценивали прочностью пленок при одноосном растяжении σ_p , относительным удлинением ε_p и удельной работой разрушения пленок α_p [35].

Образцы представляли собой полимерные пленки прямоугольной формы размерами: 50×10×0,15 мм. Расчетная длина образца составляла 30 мм [35].

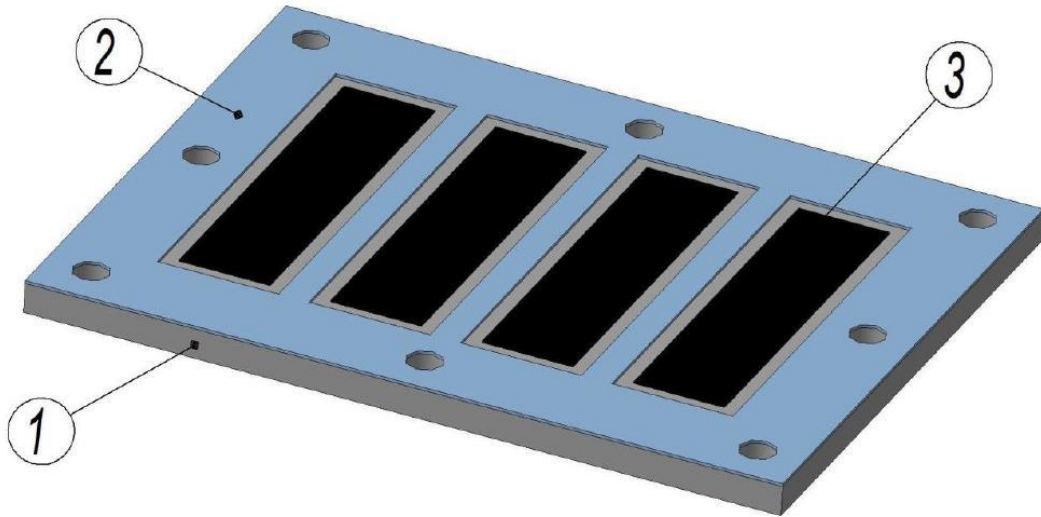
Подложку к формируемым пленкам изготовили в виде опорной пластины из материала Фторопласт-4 (ГОСТ 10007-80) размерами: 200×160×4 мм.

Подложку накрывали рамкой-трафаретом. Окна последней заполняли послойным нанесением покрытия из раствора полимера, используя волосяную кисть № 5. После нанесения покрытия, его формовали с помощью фторопластовой крышки, для придания ему равнотолщинности.

Необходимую форму и геометрические размеры пленки обеспечивали с помощью рамки-трафарета, изготовленной из стали 3 (ГОСТ 380-94) с размерами: 180×140×0,8 мм (рисунок 3.2). Для пленок рамка имеет шесть профрезерованных окон с размерами: 60×15 мм.

Затем образцы подвергали термической обработке, используя шкаф сушильный марки СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3.

Отвержденные образцы вырезали лезвием из рамки-трафарета и проводили их кондиционирование при нормальной температуре в течение 16 ч [148]. Предельные отклонения размеров образца по длине и ширине не превышали $\pm 0,1$ мм [35].



1 – фторопластовая пластина; 2 – рамка-графарет; 3 – пленка

Рисунок 3.2 – Форма-оснастка для получения пленок [74]

Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50 (рисунок 3.3) с постоянной скоростью нагружения 50 мм/мин. Исследования проводили с одновременной записью диаграммы «нагрузка-деформация». Масштабы измерений: нагрузки М:1мм = 1,6 Н; деформации М1:1 [35, 149].



Рисунок 3.3 – «Разрывная машина ИР 5082-50» [97]

Удельную работу разрушения образцов A определили измерением площади ограниченной кривой «нагрузка – деформация» и осью абсцисс на диаграмме. Удельную работу разрушения образцов α_p рассчитали делением величины A на объем полимерной пленки $V = 180 \times 10^9 \text{ м}^3$ [35].

Прочность пленок σ_p определяли используя формулу [150]

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_n}, \quad (3.1)$$

где F_p – разрушающая нагрузка, Н;

A_n – площадь поперечного сечения пленки, мм^2 .

Относительное удлинение пленок ε_p рассчитывали, используя формулу

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta l_0}{l_0}, \quad (3.2)$$

где l_0 – начальная расчетная длина пленки, мм;

Δl_0 – изменение расчетной длины образца в момент разрыва, мм.

Работу деформации, затрачиваемую при растяжении образца до разрушения A , определили измерением площади диаграммы.

Удельную работу деформации до разрушения α_p определяли делением работы деформации A на объем образца, составляющего $V = 180 \times 10^9 \text{ м}^3$ [44].

Для определения оптимального режима термической обработки эластомерного нанокompозита, наполненного УНТ, провели активный эксперимент по плану B_2 [163]. В качестве функции отклика Y выбрали удельную работу разрушения α_p , МДж/м^3 , а независимыми факторами: X_1 – температура, $^\circ\text{C}$; X_2 – время термической обработки, ч [44].

«Регрессионный анализ результатов активного эксперимента проводили по методике» [97, 152].

«Информация о факторах, интервалах варьирования представлена в таблице 3.2.» [97]

Таблица 3.2 – «Уровни и интервалы варьирования факторов» [97]

| Наименование фактора | Кодированное обозначение фактора | Уровни варьирования фактора | | | Интервал варьирования |
|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------|---------|-----------------------|
| | | нижний | нулевой | верхний | |
| Температура, °С | X_1 | 140 | 150 | 160 | 10 |
| Время, ч | X_2 | 2 | 3 | 4 | 1,0 |

3.2.2 Методика исследования адгезии покрытий нанокompозита на основе эластомера Ф-40С

Адгезию полимерных покрытий исследовали по ГОСТ 21981-76 [153]. Оценочным параметром адгезии использовали прочность связи F покрытия с металлической подложкой при отслаивании образцов. Подложка представляла собой пластину из стали 45 размерами: 100×25×3 мм. Первоначально, волосяной кистью № 5, на поверхность пластины наносили послойно покрытие из раствора полимерного материала. Затем на покрытие уложили железную сетку № 7 (ГОСТ 3826-82). В завершении на уложенную сетку послойно нанесли покрытие из раствора полимерного материала (рисунок 3.4) [44].

Образцы подвергали термической обработке по режиму: температура – 150 °С, время – 3 ч с последующим кондиционированием в течение 16 ч при нормальной температуре 23 °С [44, 146].

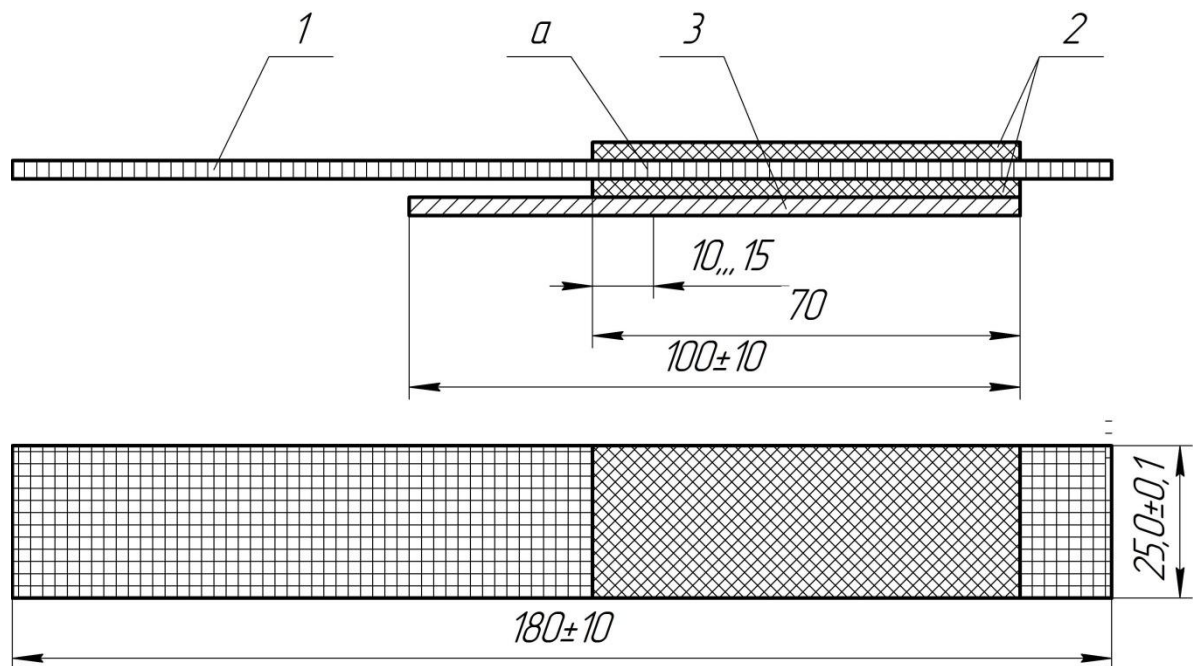
Расчетная длина соединения сетки с пластиной посредством полимерного материала составляла 70 мм. Образцы подвергали термической обработке с последующим кондиционированием. Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50 [44].

Показатель прочности связи полимера с металлом при отслаивании F каждого образца определяли, используя формулу [153]

$$F = \frac{\bar{P}}{b'} \quad (3.3)$$

где \bar{P} – сила отслаивания полимерного покрытия, Н;

b – ширина полимерного покрытия, мм.



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

Рисунок 3.4 – Образец для исследования адгезии полимера к металлической подложке [44]

3.2.3 Методика исследования модуля упругости эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе

Модуль упругости при сжатии пленок полимерного материала определяли по ГОСТ 9550-81 как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительного сжатия. Равномерность нагружения образцов при сжатии обеспечивало специальное приспособление, которое изготовили из

стали 40Х (рисунок 3.5) [44, 154].

Модуль упругости при растяжении E_p рассчитывали, используя формулу

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1)l_0}{A_0(\Delta l_2 - \Delta l_1)}, \quad (3.4)$$

где F_2 – нагрузка при относительном удлинении 0,3 %, Н;

F_1 – нагрузка при относительном удлинении 0,1 %, Н;

l_0 – длина образца до деформации, мм;

A_0 – площадь поперечного сечения образца до деформации, мм²;

Δl_2 – удлинение при нагрузке F_2 , мм;

Δl_1 – удлинение при нагрузке F_1 , мм.

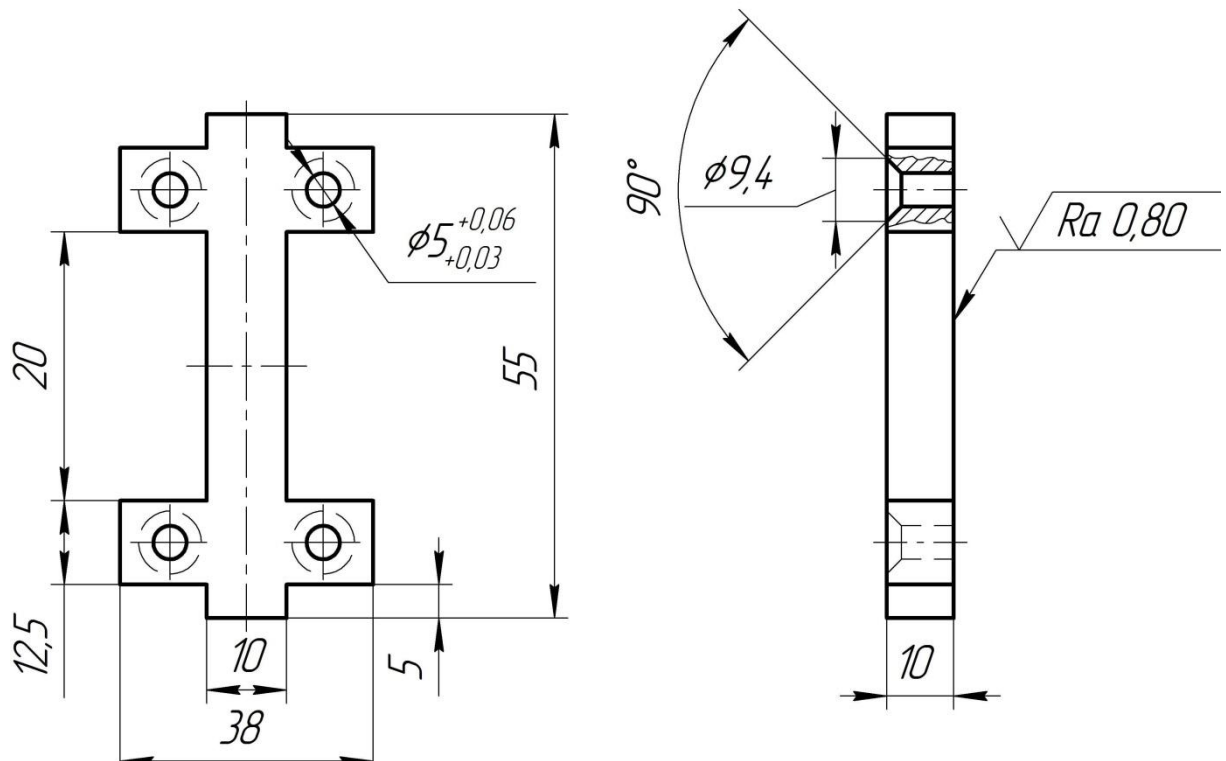


Рисунок 3.5 – Приспособление для равномерного нагружения полимерных пленок при испытаниях на сжатие [44]

Модуль упругости при сжатии E_c рассчитывали, используя формулу [114]

$$E_c = \frac{(F_2 - F_1)h_0}{A_0(\Delta h_2 - \Delta h_1)} \quad (3.5)$$

где F_2 – нагрузка, соответствующая относительной деформации 0,3 %, Н;

F_1 – нагрузка, соответствующая относительной деформации 0,1 %, Н;

h_0 – начальная высота образца или базы, мм;

A_0 – площадь начального поперечного сечения образца, мм²;

Δh_2 – изменение высоты или базы, соответствующее нагрузке F_2 , мм;

Δh_1 – изменение высоты или базы, соответствующее нагрузке F_1 , мм.

3.3 Методика исследования тепло-физических свойств эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе

3.3.1 Методика исследования теплопроводности нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С

Методика и исследовательское оборудование подробно описаны в работе [НЦР, 2022. – №1 (55)]. В экспериментальных исследованиях использовали образцы из нанокомпозитов на основе эластомера Ф-40С. Нанокомпозит, наполненный углеродными нанотрубками имел три состава: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., углеродные нанотрубки «Таунит» – 0,05; 0,1 и 0,15 масс. ч. Образцы представляют собой диски диаметром 15 мм и толщиной 0,5 мм [155].

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 3.6 [69, 97, 155...158]. В начале эксперимента включают нагреватель, далее подается охлаждающая жидкость в холодильник 1. После достижения установившегося температурного режима измеряют инфракрасным пирометром марки Testo 830-T4 температуру свободных концов стержней 3: T_1 , T_2 и T_3 [155].

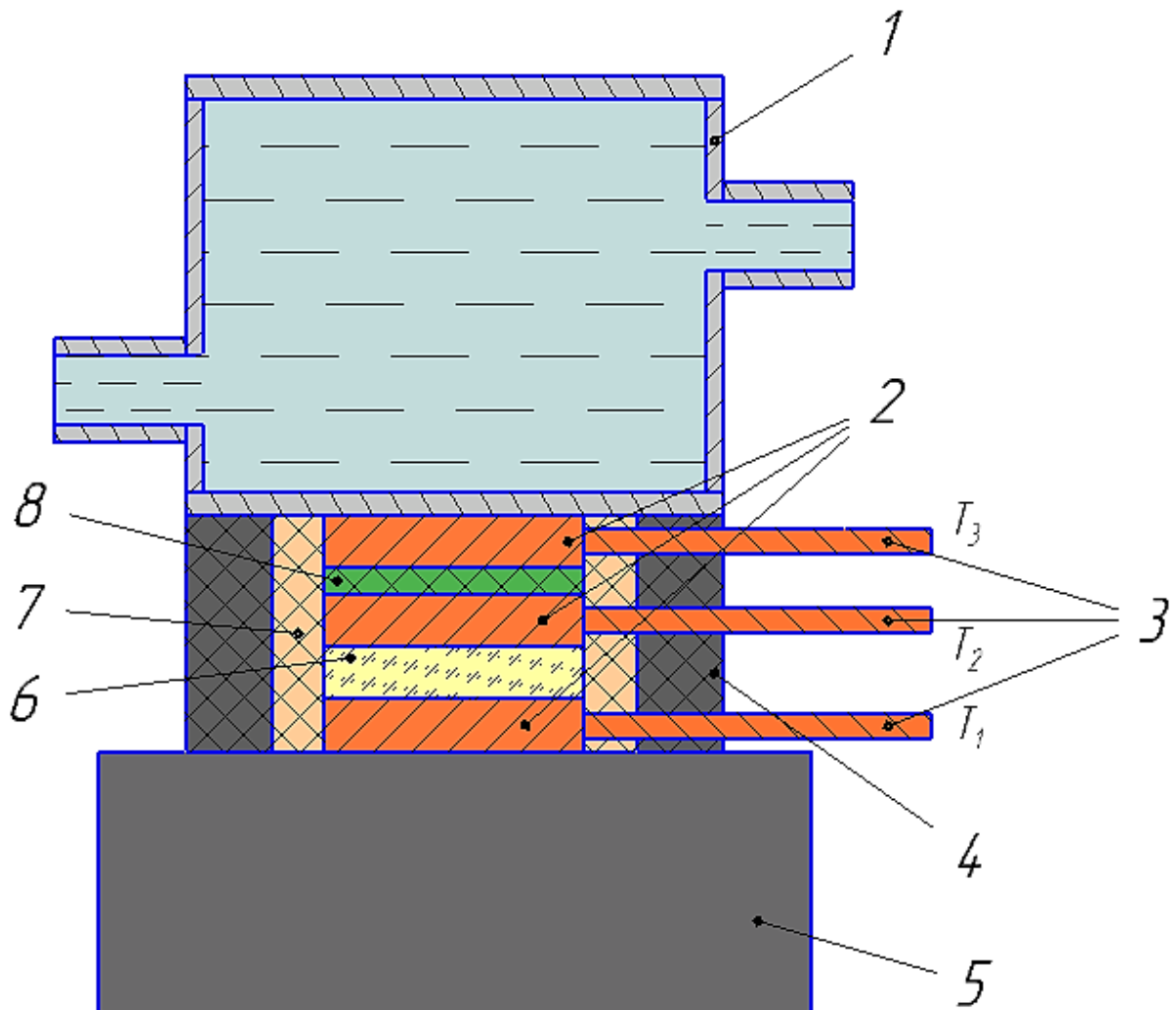
Коэффициент теплопроводности образцов исследуемого полимерного композита определяли по выражению [155, 156]

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_2 l_1 (T_2 - T_3) S d \tau}{S d \tau l_2 (T_1 - T_2)} = \lambda_2 \frac{l_1 (T_2 - T_3)}{l_2 (T_1 - T_2)}, \quad (3.6)$$

где l_1 и l_2 – соответственно толщина дисков 8 и 6, м;

λ_2 – коэффициент теплопроводности оргстекла. $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$;

T_1, T_2, T_3 – температуры металлических стержней.



- 1 – холодильник; 2 – медные диски; 3 – металлические стержни;
 4 – резиновая втулка; 5 – электрическая шита; 6 – диск из оргстекла;
 7 – труба ПВХ; 8 – исследуемый образец

Рисунок 3.6 – «Принципиальная схема установки для исследования теплопроводности полимерных материалов» [69]



Рисунок 3.7 – «Инфракрасный пирометр Testo 830-T4» [69]



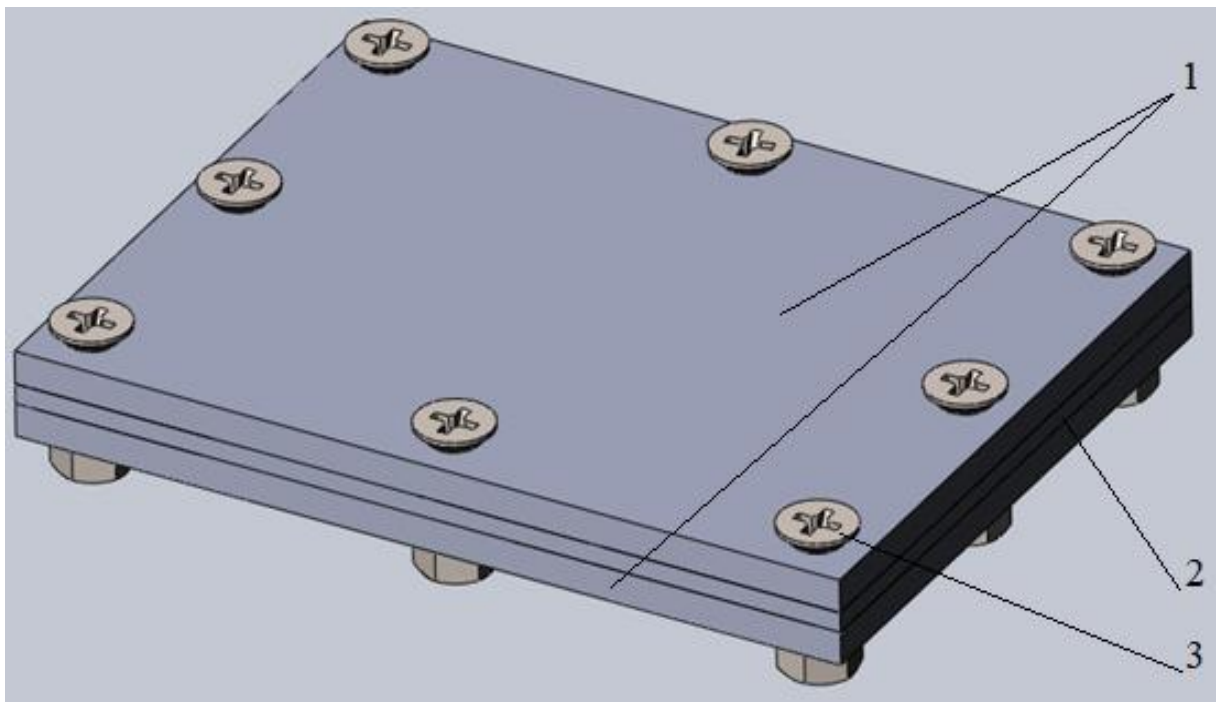
1 – холодильник; 2 – втулка резиновая в сборе с медными дисками и образцом; 3 – электрическая шита с терморегулятором

Рисунок 3.8 – «Установка для исследования теплопроводности полимеров» [69]

3.3.2 Методика исследования термостойкости эластомера Ф-40С и нанокompозита на его основе

Термостойкость эластомера Ф-40С и эластомерных нанокompозитов исследовали, оценивая прочность и относительное удлинение образцов, до и после термического старения. Термическое старение осуществляли в условиях ОДКВ при температуре 200 °С в течение 2 ч [69, 157]. Для обеспечения условий ОДКВ предназначена специальная форма-оснастка, которая включает две одинаковые опорные пластины 1 и рамку-трафарет 2 между ними (рисунок 3.9). Детали оснастки изготовлены из Ст3 ГОСТ 380-2005 [157].

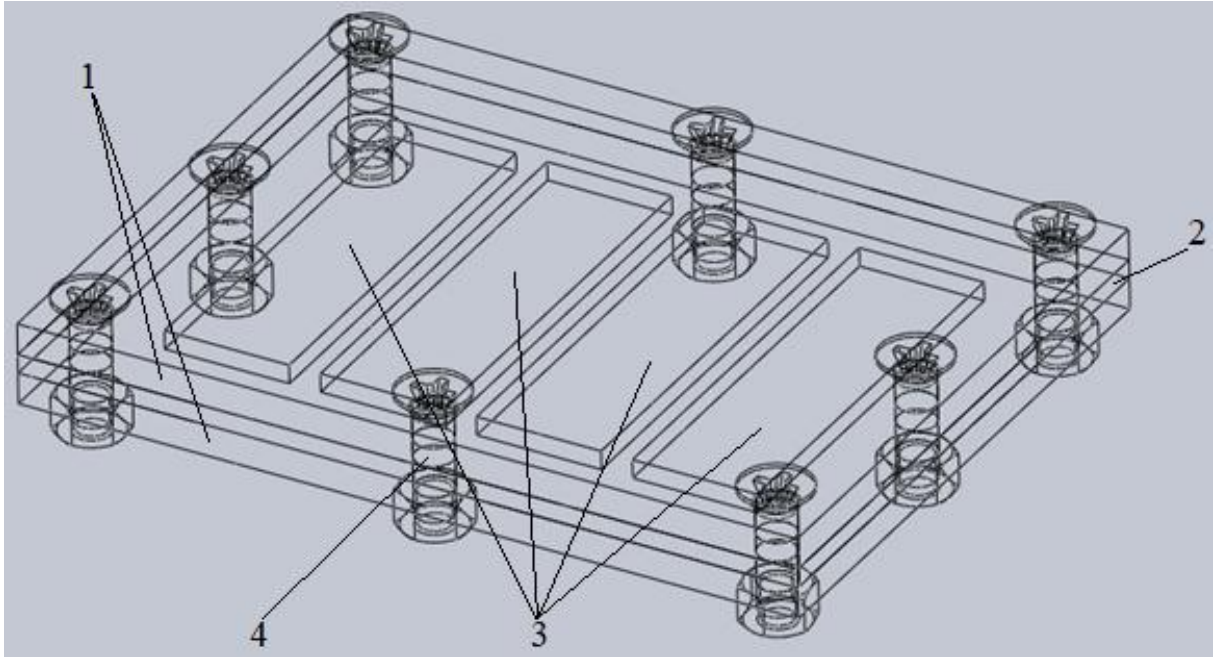
На опорной пластине размещают рамку-трафарет. Образцы 3 вставляют в посадочные окна рамки-трафарета, и накрывают ее второй опорной пластиной (рисунок 3.10) [157].



1 – опорная пластина; 2 – рамка-трафарет; 3 – болт стяжной

Рисунок 3.9 – «Форма-оснастка для высокотемпературного старения пленок в условиях ОДКВ» [69, 157]

Ограничение доступа кислорода воздуха к пленкам обеспечивают стяжкой опорных пластин и рамки-трафарета с образцами в ней, с помощью болтов 4. Далее форма-оснастка в сборе размещается в сушильном шкафу для проведения старения пленок [157].



1 – опорная пластина; 2 – рамка-трафарет; 3 – плёнки; 4 – болт стяжной

Рисунок 3.10 – 3D-Сборка формы-оснастки для высокотемпературного старения плёнок в условиях ОДКВ

Кондиционирование образцов проводили при нормальных условиях в течение 16 ч. Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50. Скорость нагружения образцов составляла 50 мм/мин [157].

Исследование механических свойств образцов выполняли по методике, приведенной в разделе 3.2.

Коэффициенты старения (K_σ , K_ε) образцов рассчитывали, используя формулу [56, 157]

$$K = \frac{A}{O'} \quad (3.7)$$

где O и A – средний показатель (прочность σ или относительное удлинение ε) образцов соответственно до и после старения.

3.4 Методика исследование ультразвукового диспергирования нанокompозита на основе эластомера Ф-40С

3.4.1 Методика определение времени ультразвукового диспергирования раствора эластомерного нанокompозита

Качество смешения и диспергирования УНТ в растворе эластомера после УЗО оценивали по его вязкости. Ультразвуковое озвучивание состава № 2 проводилось в ультразвуковой ванне "GRAD 0,5 HOME STYLE" (рисунок 3.11).

«В таблице 3.3 показаны технические характеристики ультразвуковой ванны "GRAD 0,5 HOME STYLE"» [141].

Отбор компонентов осуществляли с помощью аналитических весов марки ВЛА-200М с ценой деления 0.0001 г. Ультразвуковое озвучивание раствора нанокompозита проводили от 2 до 8 мин. По завершении очередного интервала УЗО, осуществляли отбор раствора нанокompозита и определяли его вязкость с помощью вискозиметра типа ВПЖ-2 по методике ГОСТ 18249-72 (рисунок 3.12).

Таблица 3.3 – «Технические характеристики ультразвуковой ванны "GRAD 0,5 HOME STYLE"» [141]

| 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 |

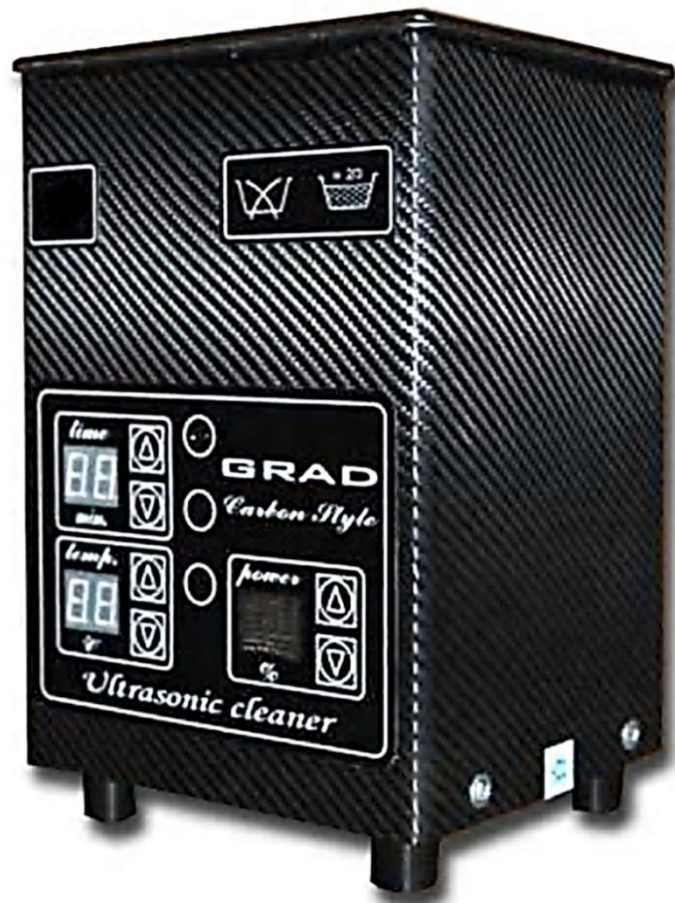


Рисунок 3.11 – «Ультразвуковая ванна «GRAD 0,5 HOME STYLE»» [141]

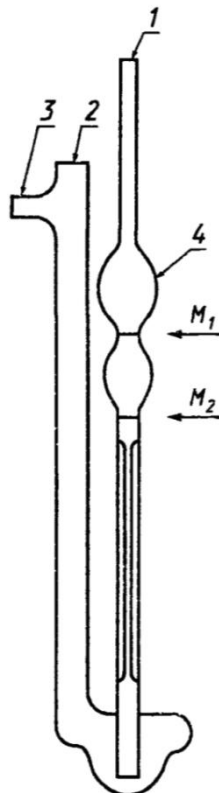


Рисунок 3.12 – Вискозиметр типа ВПЖ-2

Динамическую вязкость раствора нанокompозита вычисляли, используя формулу

$$\eta = K\rho\tau, \quad (3.8)$$

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 рациональное время УЗО исследуемого раствора нанокompозита принимали такое время, при котором вязкость раствора полимерного нанокompозита стабилизировалась.

В ходе эксперимента измеряли температуру раствора эластомерного нанокompозита с помощью инфракрасного пирометра Testo 830-T4 на протяжении всего озвучивания с интервалом в 0,5 мин.

«В таблице 3.4 представлены технические характеристики инфракрасного пирометра Testo 830-T4» [159].

Таблица 3.4 – «Технические характеристики инфракрасного пирометра Testo 830-T4» [159]

| Параметры | Testo 830-T4 |
|-------------------------------|--|
| Тип К (NiCr-Ni) | |
| Диапазон измерений | -50... +500 °C |
| Погрешность | ±0,5 °C + 0,5 % от изм. знач. |
| Разрешение | 0,1 °C |
| Частота измерений | 1,75 с. |
| Инфракрасное измерение | |
| Диапазон измерений | -30...+400 °C |
| Погрешность | ±1,5 °C (-20...0 °C) ±2 °C (-30...-20,1 °C) |

Окончание таблицы 3.4

| | |
|---------------------------------|--|
| | ±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 батарей | 9 В блочная батарейка |
| Ресурс батарей | 15 ч |
| Размеры | 190×75×38 мм |
| Рабочая температура | -20...+50 °С |
| Температура хранения | -40...+70 °С |
| Вес | 200 г |

3.4.2 Методика исследования дегазации раствора полимерного нанокompозита на основе эластомера Ф-40С при ультразвуковой обработке

Дегазацию раствора эластомерного нанокompозита проводили с помощью ультразвуковой ванны «GRAD 0,5 HOME STYLE».

Весы ВК 3000.1 (таблица 3.5) использовали для измерения остаточной массы раствора нанокompозита (рисунок 3.13).

Таблица 3.5 – «Технические характеристики весов ВК 3000.1» [160]

| 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 |



Рисунок 3.13 – Весы лабораторные ВК 3000.1

3.4.3 Методика исследования структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после ручного смешения и УЗО

Растворы нанокompозитов предварительно диспергировали ручным смешением и ультразвуковой обработкой, после чего изготовили из них пленки прямоугольной формы по методике, описанной в разделе 3.2.1. В качестве образцов

использовали пленки нанокompозитов квадратной формы размерами 10×10×10 мм, вырезанные из пленок прямоугольной формы.

Микроструктуру образцов нанокompозитов изучали методом растровой электронной микроскопии. Для исследований использовали электронно-ионный сканирующий микроскоп «Quanta 600 FEG» с электроннолучевой колонной, оснащенной вольфрамовым катодом. Описание и принцип работы микроскопа представлены в приложении Г.

3.4.4 Методика исследования дефектности покрытий нанокompозита на основе эластомера Ф-40С

Дефектность эластомерных нанокompозитных пленок, изготовленных ручным способом и подвергнутых в ходе изготовления, ультразвуковому диспергированию оценивали по площади разрушенного покрытия, размерам и количеству пузырьков на единицу площади. По таким же оценочным параметрам оценивали дефектность полимерных покрытий после инфракрасной обработки. Образцы по завершении калибрования исследовали на наличие дефектов полимерного покрытия: растрескивание, отслаивание и сморщивание.

«Площадь разрушенного покрытия в процентах определяли по значению частотного показателя разрушения C по формуле» [159]

$$C = \frac{n_1}{n} \times 100, \quad (3.9)$$

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

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

«Размеры пор (пузырьков измеряли микроскопом МПБ-2 с 24-х кратным увеличением» [159].

3.5 Методика исследования долговечности посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокompозитом на его основе

Конструкция вибростенда для испытаний на долговечность включает: электромеханический вибратор ИВ-107А, две опорные плиты, плиту-основание и четыре демпфирующие пружины (рисунок 3.14) [4...69].

Симметричный, знакопеременный цикл нагружения создается сдвоенными дебалансами, установленными в концевых частях вала-ротора электродвигателя. Изменяя угол взаимного расположения дебалансов, меняют циклическую радиальную нагрузку на испытываемый подшипниковый узел в диапазоне: 9,9; 15,8 и 20,0 кН [141].

Основание стенда представляет собой металлическую плиту с размерами: 500×500×10 мм. В углах плиты приварены четыре посадочные втулки под демпфирующие, опорные пружины, высотой составляющей 121 мм. При работе стенда амплитуда деформации пружин достигает 1,4 мм. Аналогичные втулки под пружины расположены на верхней плите стенда.

Размещаясь во втулках, пружины соединяют две верхние сдвоенные плиты массой 50 кг каждая и размерами 500×500×25 мм с основанием стенда, образуя при этом гибкую связь.

Вибратор устанавливают на сдвоенные верхние металлические плиты и фиксируют четырьмя болтами.

Дебалансы создают радиальную циклическую нагрузку в 20 кН на подшипник 209 при частоте вращения вала вибратора 3000 мин⁻¹. Учет циклов нагружения выполняет счетчик, соединенный соосно с валом вибратора.

Полимерное покрытие наносят послойно на поверхность подшипникового отверстия волосяной кистью № 4 «Пони». Термическую обработку покрытия выполняют по режиму: температура 150 °С, время 3 ч. Затем покрытие кондиционируют на протяжении 16 часов при нормальной температуре. Для подшипников 209 использовали пластичную смазку ВНИИНП-242 (ГОСТ 20241-74).



Рисунок 3.14 – Стенд для испытания подшипниковых узлов при циклическом нагружении [4...69]

В качестве базы усталостных испытаний принята продолжительность $N_G = 5,94 \times 10^7$ циклов или соответственно 330 ч наработки вибростенда. Восстановленные полимерные посадки испытывают до наступления усталостного разрушения материала, о чем свидетельствует сдвиг наружного кольца подшипника относительно втулки [8].

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Механические свойства эластомера Ф-40С

и нанокомпозитов на его основе

4.1.1 Деформационно-прочностные свойства эластомера Ф-40С

и нанокомпозитов на его основе

В данном эксперименте исследовали механические свойства эластомерных нанокомпозитов, наполненных УНТ «Таунит-М».

Механические свойства нанокомпозитов оценивали прочностью σ_p , деформацией ε_p и удельной работой разрушения α_p в условиях одноосного растяжения образцов.

Начальный этап исследований включал классические эксперименты исследования механических свойств нанокомпозитов трёх составов:

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

Эксперимент показал, что образцы из эластомера Ф-40С обладают прочностью $\sigma_p = 21,23$ МПа (рисунок 4.1). Наполнение материала УНТ приводит к увеличению прочности образцов. Нанокомпозит с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высокой прочностью на 18 % и достигает значения $\sigma_p = 25,02$ МПа.

Нанокомпозит с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высокой прочностью на 32 % и достигает значения $\sigma_p = 28,05$ МПа. В отличие от нанокомпозита с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., увеличение прочности составило 12 %.

Дальнейшее увеличение содержания УНТ приводит к уменьшению прочности. При содержании УНТ $K = 0,125$ масс. ч. сравнительно с полимерной матрицей,

нанокompозитами с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч. и $K = 0,1$ масс. ч. снижение прочности составило 2; 20 и 35 % соответственно. Снижение прочности нанокompозита можно объяснить агрегированием УНТ.

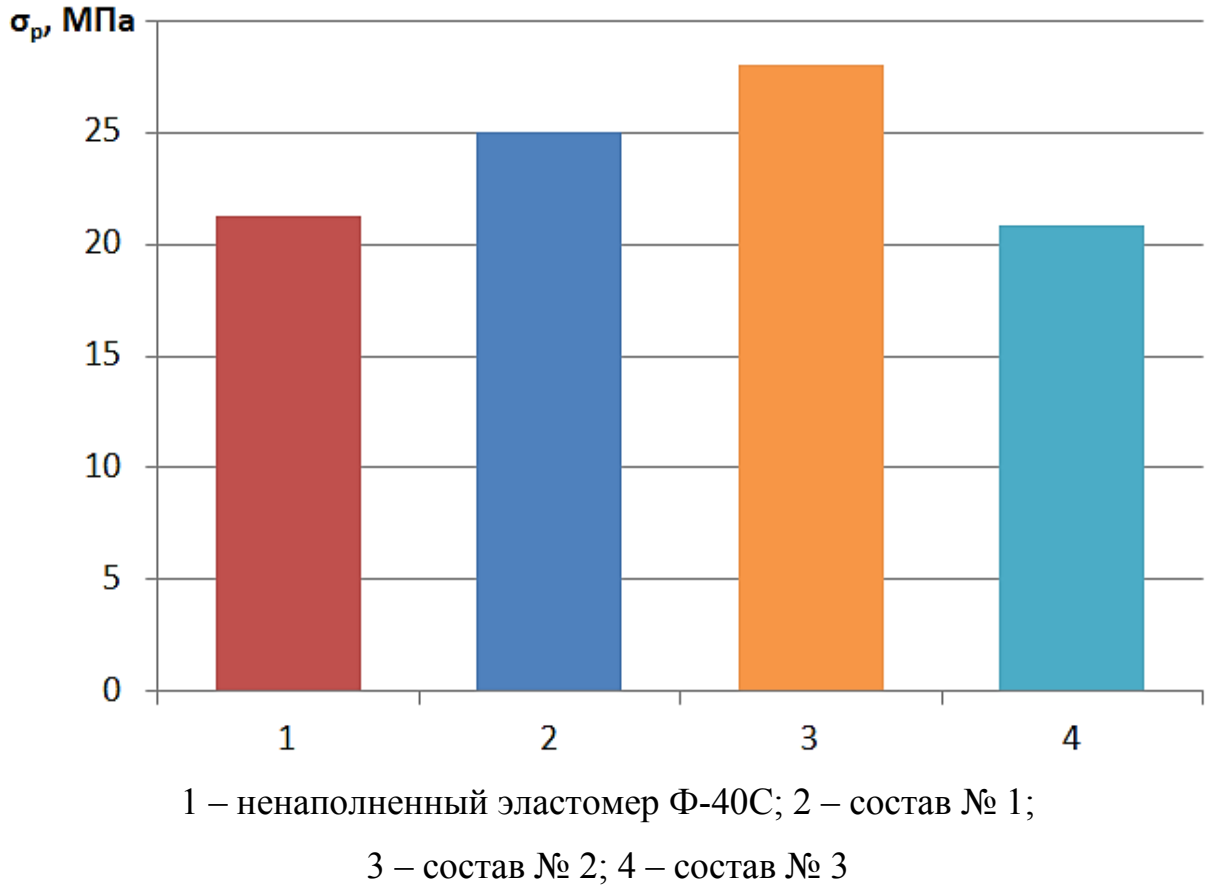


Рисунок 4.1 – Зависимость прочности пленок σ_p от концентрации УНТ K в эластомерном нанокompозите [44]

Образцы из полимерной матрицы показали деформацию $\varepsilon_p = 133$ % (рисунок 4.2). Наполнение материала УНТ приводит к увеличению деформации образцов. Нанокompозит с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высокой в 1,21 раза деформацией и достигает значения $\varepsilon_p = 161$ %. Нанокompозит с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высокой деформацией в 1,66 раза и достигает значения $\varepsilon_p = 221$ %. В отличие от нанокompозита с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., деформация увеличилась в 1,37 раза. Если в микрокомпозитах с увеличением содержания наполнителя деформация микрокомпозита однозначно

уменьшается, то в нанокompозите, наполненном УНТ наблюдается увеличение деформации.

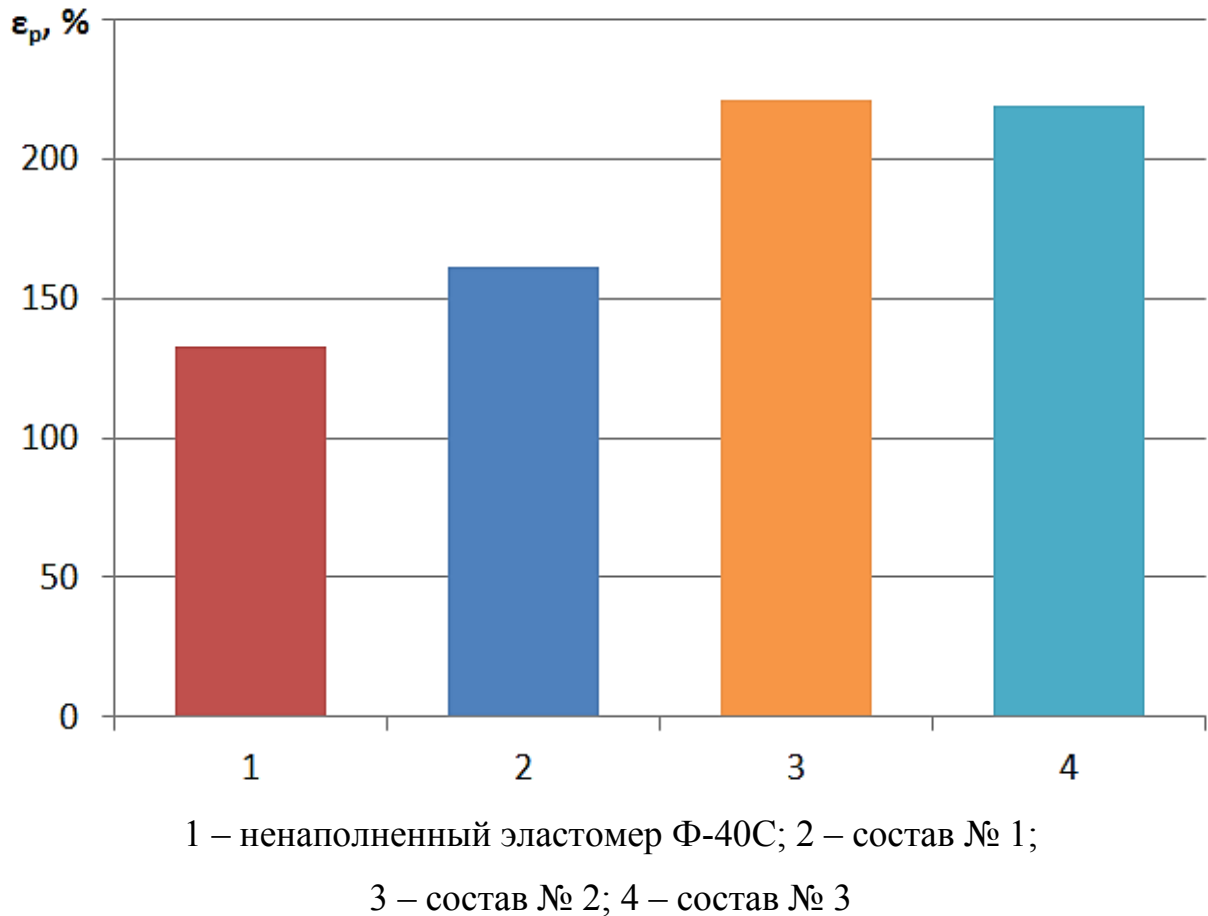


Рисунок 4.2 – Зависимость деформации пленок ϵ_p от концентрации УНТ K в эластомерном нанокompозите [44]

Дисперсные наночастицы, органоглины с одной стороны и УНТ с другой имеют различную поверхность. Последние, как упоминалось ранее в работе Микитаева и Козлова: «...обладают гладкой на атомарном уровне поверхностью. Благодаря этому макромолекулы полимерной матрицы растягиваются на такой поверхности и образуется плотноупакованный межфазный слой «полимерная матрица-УНТ». Эти плотноупакованные межфазные слои приводят к изменению молекулярных и структурных характеристик полимерной матрицы и увеличению молекулярной подвижности» [96].

Дальнейшее увеличение содержания УНТ приводит к уменьшению деформации. При содержании УНТ $K = 0,125$ масс. ч. деформация уменьшается до значения $\varepsilon_p = 219$ %. По сравнению с максимальным значением деформация образцов уменьшилась на 2 %.

Уменьшение деформации нанокompозита можно объяснить агрегированием УНТ.

По удельной работе разрушения образцов α_p оценивают выносливость материала под действием циклических нагрузок. Материал с большим значением α_p обладает большей выносливостью [2...69]. На рисунке 4.3 показана зависимость удельной работы разрушения пленок α_p от содержания УНТ в эластомерном нанокompозите K [44].

Образцы из полимерной матрицы обладают наименьшей выносливостью, значение удельной работы разрушения пленок составляет $\alpha_p = 19,7$ МДж/м³.

Наполнение материала УНТ приводит к повышению выносливости нанокompозита. Нанокompозит с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высокой удельной работой разрушения на 35 % и достигает значения $\alpha_p = 26,51$ МДж/м³.

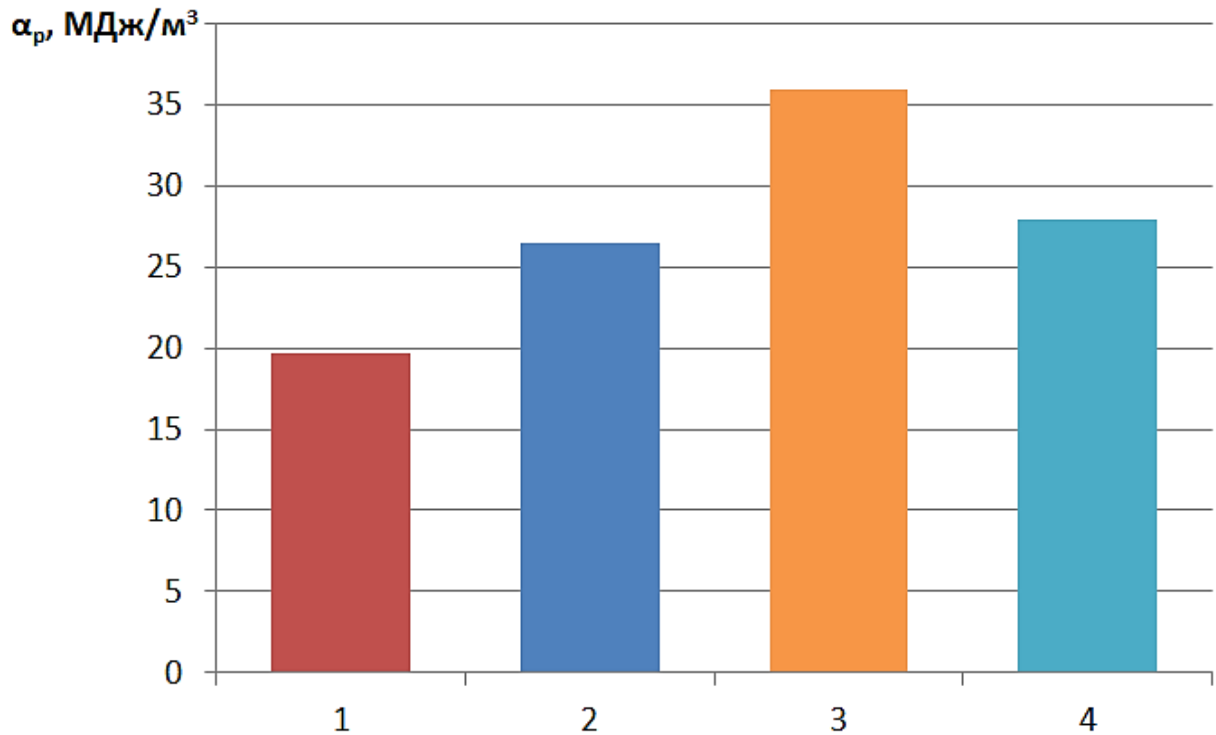
Нанокompозит с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высокой удельной работой разрушения на 82 % и достигает значения $\alpha_p = 35,88$ МДж/м³. В отличие от нанокompозита с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., увеличение удельной работы разрушения составило 36 %.

Экстремальные значения параметра выносливости у нанокompозита с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч. обусловлены его максимальными значениями прочности и деформации.

Дальнейшее увеличение содержания УНТ приводит к уменьшению удельной работы разрушения. При содержании УНТ $K = 0,125$ масс. ч. ее значение уменьшилось до $\alpha_p = 27,93$ МДж/м³. Сравнительно с экстремальным значением уменьшение удельной работы разрушения составило 28 %. Снижение

выносливости эластомерного нанокompозита можно объяснить уменьшением прочности и деформации материала [44].

Таким образом наиболее высокой выносливостью обладает нанокompозит эластомера Ф-40С с содержанием УНТ – 0,1 масс. ч.



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

3 – состав № 2; 4 – состав № 3

Рисунок 4.3 – Зависимость удельной работы разрушения пленок α_p от концентрации УНТ K в эластомерном нанокompозите [44]

Выводы

1. Новый эластомерный нанокompозит обладает наиболее высокими механическими свойствами при следующем оптимальном составе (масс. ч.): эластомер Ф-40С – 100; УНТ – 0,1.

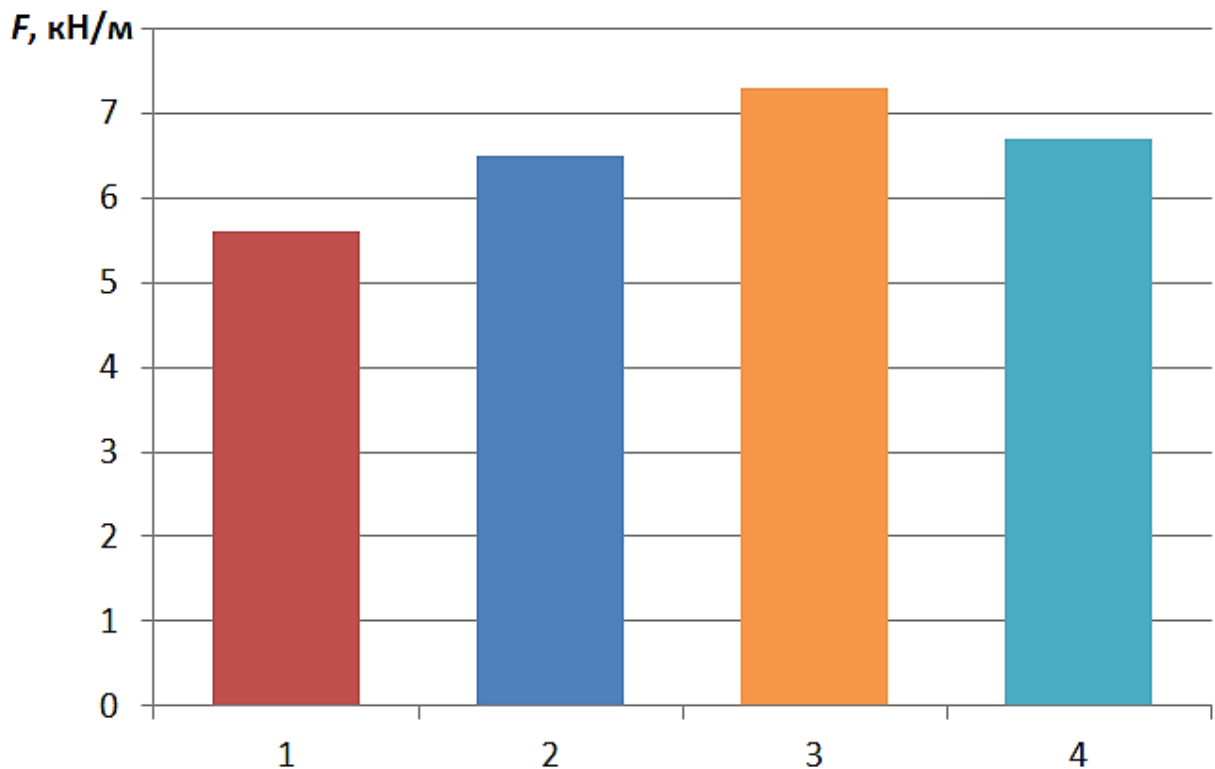
2. В сравнении с полимерной матрицей, материал обладает более высокими потребительскими свойствами: увеличение прочности на 32 %, деформации – 1,66 раза, удельной работы разрушения на 82 %, что характеризует его более высокую

выносливость и создает условия, чтобы повысить долговечность посадок подшипников после восстановления [44].

4.1.2 Адгезионные свойства эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе

Адгезия это важнейшее механическое свойство полимера, т.к. по нему оценивают способность полимерного покрытия не отслаиваться от подложки в процессе запрессовки подшипника в сопрягаемое отверстие в корпусной детали.

Эксперимент показал, что образцы из эластомера Ф-40С обладают показателем прочности связи (адгезией) с подложкой при отслаивании $F = 5,6$ кН/м (рисунок 4.4).



1 – ненаполненный эластомер Ф-40С; 2 – состав № 1;
3 – состав № 2; 4 – состав № 3

Рисунок 4.4 – Зависимость адгезии покрытий F эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе от концентрации наполнителя K [44]

Наполнение материала УНТ приводит к увеличению показателя прочности связи (адгезии). Наноккомпозит с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высокой адгезией на 16 % и достигает значения $F = 6,5$ кН/м.

Наноккомпозит с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высокой адгезией на 30% и достигает значения $F = 7,3$ кН/м. В отличие от наноккомпозита с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., увеличение показателя прочности связи (адгезии) составило 12 %.

Дальнейшее увеличение содержания УНТ приводит к уменьшению показателя прочности связи (адгезии). При содержании УНТ $K = 0,125$ масс. ч. показатель прочности связи (адгезия) уменьшился до значения $F = 6,7$ кН/м. Сравнительно с наноккомпозитом с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., имеющим максимальное значение адгезии снижение показателя прочности связи (адгезии) составило 9 %.

Выводы

1. Покрyтия состава № 2 обладают максимальной адгезией к стальной подложке.
2. УчиTывая когезионные свойства наноккомпозитов, приняли оптимальный состав, при котором материал обладает наиболее высокими механическими свойствами (прочностью, деформацией и адгезией): эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., УНТ – 0,1 масс. ч.

4.1.3 Модуль упругости эластомера Ф-40С и наноккомпозитов на его основе

Модуль упругости характеризует жесткость (податливость) полимерной посадки подшипника. Чем выше этот параметр, тем меньше при радиальной нагрузке на подшипник будет смещаться его ось относительно оси отверстия, меньше будут взаимные перекосы осей валов с подшипниками и шестернями.

На рисунке 4.5 показаны результаты исследований модуля упругости при растяжении эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе.

Эксперимент показал, что образцы из эластомера Ф-40С обладают модулем упругости при растяжении со значением $E_p = 11,17$ МПа.

Наполнение материала УНТ приводит к увеличению модуля упругости при растяжении. Нанокомпозит с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высоким модулем упругости при растяжении на 0,3 % и достигает значения $E_p = 11,20$ МПа.

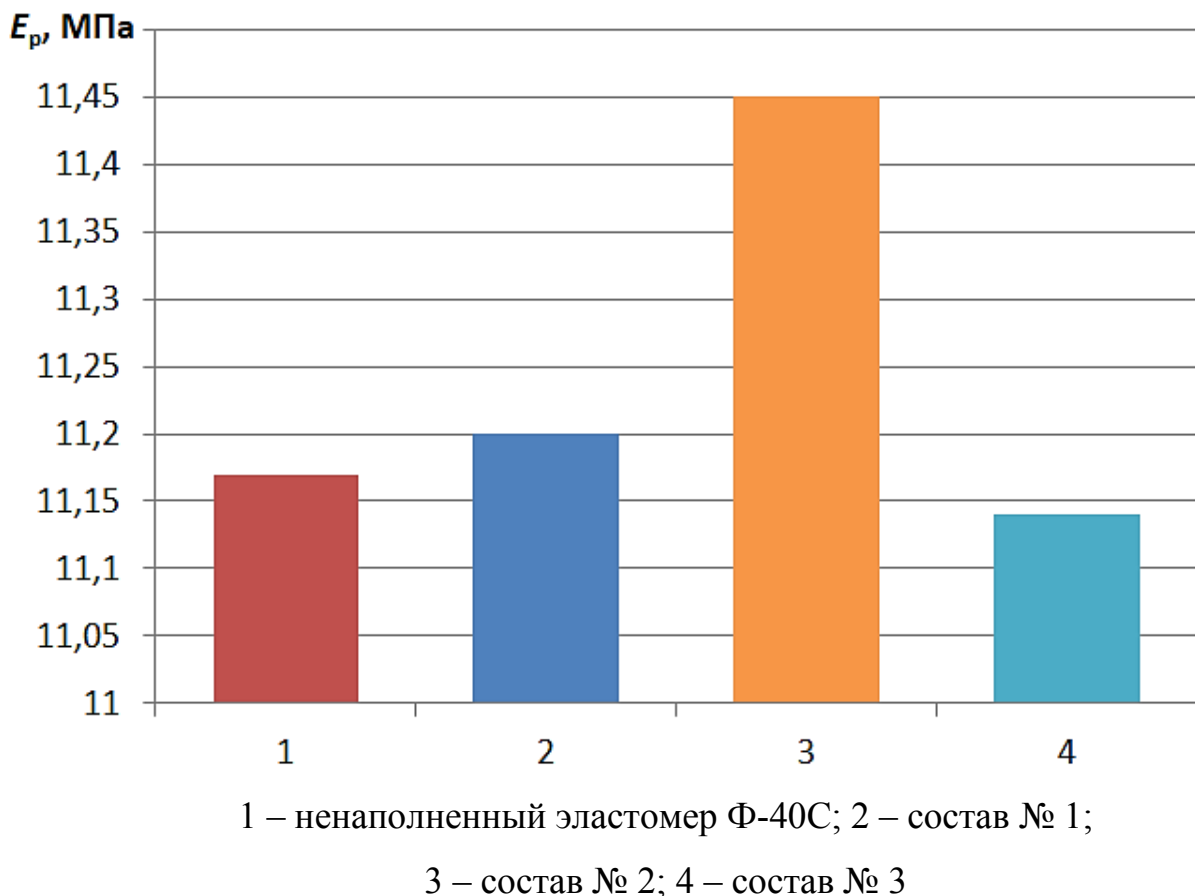


Рисунок 4.5 – Зависимость модуля упругости при растяжении пленок E_p от содержания УНТ K в эластомерном нанокомпозите [44]

Нанокомпозит с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высоким модулем упругости при растяжении на 3 % и достигает значения $E_p = 11,45$ МПа. В отличие от

нанокompозита с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., увеличение модуля упругости при растяжении составило 2 %.

Дальнейшее увеличение содержания УНТ приводит к уменьшению модуля упругости при растяжении. При содержании УНТ $K = 0,125$ масс. ч. модуль упругости при растяжении уменьшился до значения $E_p = 11,45$ МПа. Сравнительно с нанокompозитом с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., имеющим максимальное значение модуля упругости снижение составило 3 % и этот параметр жесткости даже меньше чем у ненаполненного.

На рисунке 4.6 показана зависимость модуля упругости при сжатии пленок E_c от содержания УНТ K в эластомерном нанокompозите [44].

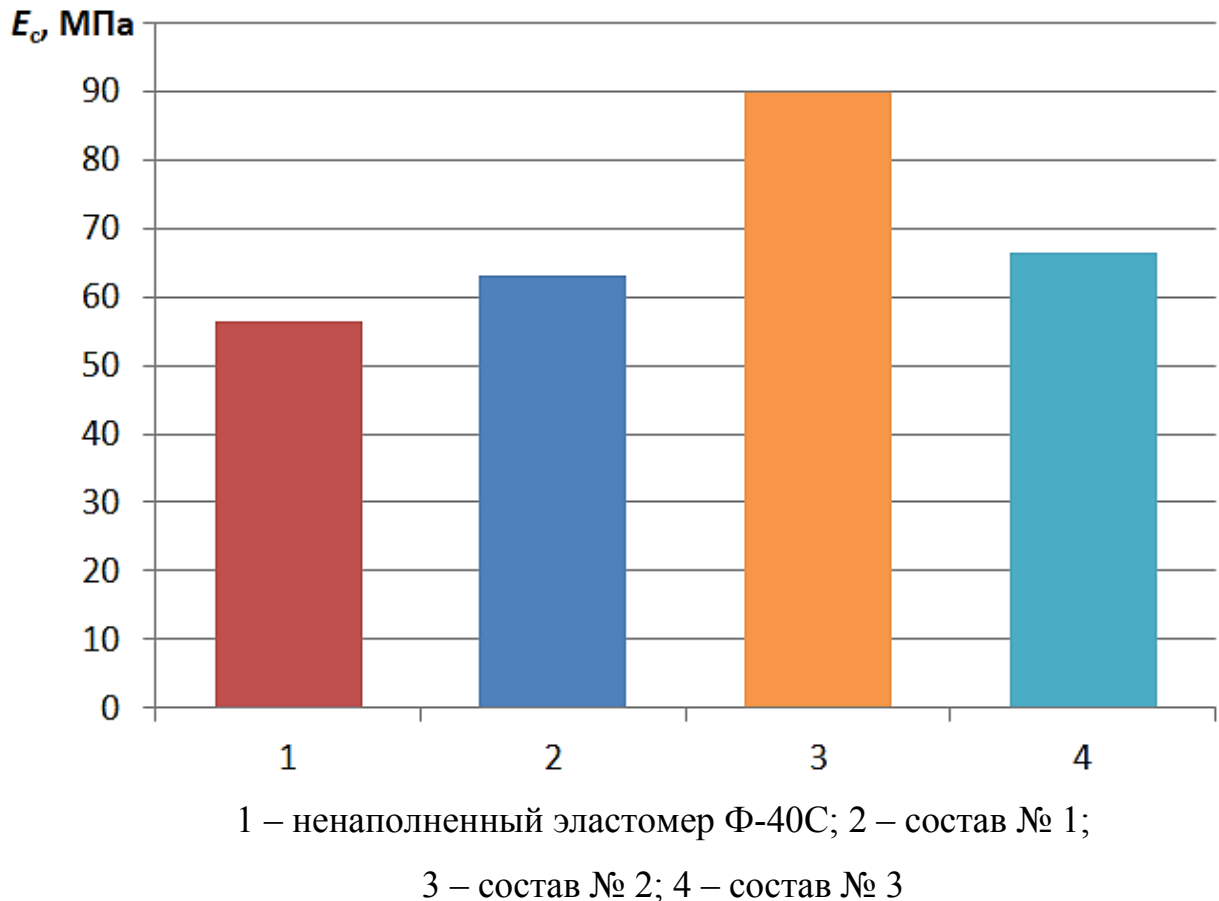


Рисунок 4.6 – Зависимость модуля упругости при сжатии пленок E_c от содержания УНТ K в эластомерном нанокompозите [44]

Эксперимент показал, что образцы из эластомера Ф-40С обладают модулем упругости при сжатии со значением $E_c = 56,37$ МПа.

Наполнение материала УНТ приводит к увеличению модуля упругости при сжатии. Наноккомпозит с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высоким модулем упругости при сжатии на 12 % и достигает значения $E_c = 63$ МПа.

Наноккомпозит с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., по сравнению с полимерной матрицей, обладает более высоким модулем упругости при сжатии на 59 % и достигает значения $E_c = 89,64$ МПа. В отличие от наноккомпозита с содержанием УНТ $K = 0,075$ масс. ч., увеличение модуля упругости при сжатии составило 42 %.

Дальнейшее увеличение содержания УНТ приводит к уменьшению модуля упругости при сжатии. При содержании УНТ $K = 0,125$ масс. ч. модуль упругости при сжатии уменьшился до значения $E_c = 66,41$ МПа. Сравнительно с наноккомпозитом с содержанием УНТ $K = 0,1$ масс. ч., имеющим максимальное значение модуля упругости снижение составило 35 %.

Выводы

1. Модуль упругости на растяжение, после наполнения УНТ эластомера Ф-40С, повышается несущественно на 3 %.
2. Модуль упругости материала на сжатие после наполнения УНТ увеличивается на 59 %. Столь существенное повышение модуля сжатия наноккомпозита снизит податливость опор качения, позволит наносить наноккомпозитное покрытие большей толщины при восстановлении отверстий корпусных деталей, исключая смещение осей валов и подшипников выше допустимых значений.

4.1.4 Оптимизация термической обработки наноккомпозита на основе эластомера Ф-40С

Далее выполнили активный эксперимент по композиционному плану В₂ [44, 161].

Удельная работа разрушения характеризует выносливость материала. Увеличение этого параметра свидетельствует о повышении стойкости материала к циклическим нагрузкам, то есть выносливости [14]. Для определения оптимального режима термической обработки нанокompозита реализован активный эксперимент по композиционному плану В₂. Функцией отклика Y приняли удельную работу разрушения образцов нанокompозита α_p , МДж/м³, а независимыми факторами: X_1 – температуру, °С, X_2 – время, ч. термической обработки [8, 44, 161].

Проведен регрессионный анализ результатов активного эксперимента. В таблице 4.1 показаны матрица плана В₂ и результаты активного эксперимента [44, 161].

Таблица 4.1 – План В₂ и результаты активного эксперимента [44, 161]

| № п/п | X_1 | X_2 | Y_1 | Y_2 | Y_3 | \bar{Y}_g | \hat{Y}_g | S_g^2 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------|
| 1 | -1 | -1 | 27,00 | 26,21 | 27,61 | 26,94 | 27,022 | 0,4927 |
| 2 | +1 | -1 | 22,14 | 22,76 | 22,06 | 22,32 | 22,322 | 0,1486 |
| 3 | -1 | +1 | 25,12 | 25,68 | 25,85 | 25,55 | 25,548 | 0,1459 |
| 4 | +1 | +1 | 21,14 | 21,58 | 21,48 | 21,45 | 21,368 | 0,0569 |
| 5 | -1 | 0 | 31,08 | 31,42 | 31,40 | 31,30 | 32,220 | 0,0364 |
| 6 | +1 | 0 | 26,57 | 26,87 | 26,66 | 26,70 | 26,780 | 0,0237 |
| 7 | 0 | -1 | 30,98 | 31,68 | 31,90 | 31,52 | 31,437 | 0,2308 |
| 8 | 0 | +1 | 30,42 | 29,87 | 30,13 | 30,14 | 30,223 | 0,0757 |

Однородность дисперсий в опытах оценивали с использованием критерия Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена составляет $G_p = 0,407$; а табличное значение составляет $G_T = 0,5612$. В виду того, что расчетное значение критерия

Кохрена по значению меньше табличного, дисперсии в опытах признаны однородными [44, 161].

В результате расчета определены коэффициенты регрессии [44, 161]

$$b_0 = +35,765; b_1 = -2,22; b_2 = -0,607; b_{12} = +0,13;$$

$$b_{11} = -6,765; b_{22} = -4,935.$$

«...Значимость коэффициентов регрессии оценивали сравнением их абсолютных значений со значениями соответствующих доверительных интервалов» [44, 161]

$$\Delta b_0 = 0,1336 < b_0 = +35,765;$$

$$\Delta b_1 = \Delta b_2 = 0,017 < b_1 = -2,22 \text{ и } b_2 = -0,607;$$

$$\Delta b_{12} = 0,0267 < b_{12} = +0,13;$$

$$\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 0,0801 < b_{11} = -6,765 \text{ и } b_{22} = -4,935.$$

«...Значения доверительных интервалов не превышают абсолютные значения коэффициентов регрессии, поэтому коэффициенты регрессии значимы» [44, 161].

Уравнение регрессии в кодированных значениях [44, 161]

$$Y = 35,765 - 2,22X_1 - 0,607X_2 + 0,13X_1X_2 - 6,765X_1^2 - 4,935X_2^2.$$

После раскодирования получили уравнение регрессии в натуральных единицах [44, 161]

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

Рассчитали по уравнению регрессии значение отклика в точках плана [44, 161]

$$\hat{y}_1 = 27,022; \hat{y}_2 = 22,322; \hat{y}_3 = 25,548; \hat{y}_4 = 21,368;$$

$$\hat{y}_5 = 32,220; \hat{y}_6 = 26,780; \hat{y}_7 = 31,437; \hat{y}_8 = 30,223.$$

Выборочная дисперсия S^2 , интегрально оценивающая степень рассеивания \hat{Y}_g , относительно \bar{Y}_g [44, 161]

$$S^2 = 0,02.$$

Адекватность уравнения регрессии проверяли с использованием критерия Фишера [44, 161].

Условие адекватности регрессионной модели $F_p < F_T$.

Табличное значение F -критерия для уровня значимости $P = 0,05$ для числа степеней свободы: числителя $\nu_1 = 8 - 6 = 2$; знаменателя $\nu_2 = 8(3 - 1) = 16$.

$$F_p = 0,3965; F_T = 3,63;$$

$$F_p = 0,3965 < F_T = 3,63.$$

Модель адекватна [44, 161].

Работоспособность модели оценивали коэффициентом детерминации. Условие работоспособности регрессионной модели имеет вид: $R^2 > 0,75$ [44, 161].

Значение коэффициента детерминации составило $R^2 = 0,9919 > 0,75$ **$R^2 = 0,93 > 0,75$** ; следовательно регрессионную модель можно считать работоспособной [44, 161].

На рисунке 4.7 показана зависимость удельной работы разрушения образцов из эластомерного нанокompозита при одноосном растяжении α_p от температуры T и времени t термической обработки [44, 161].

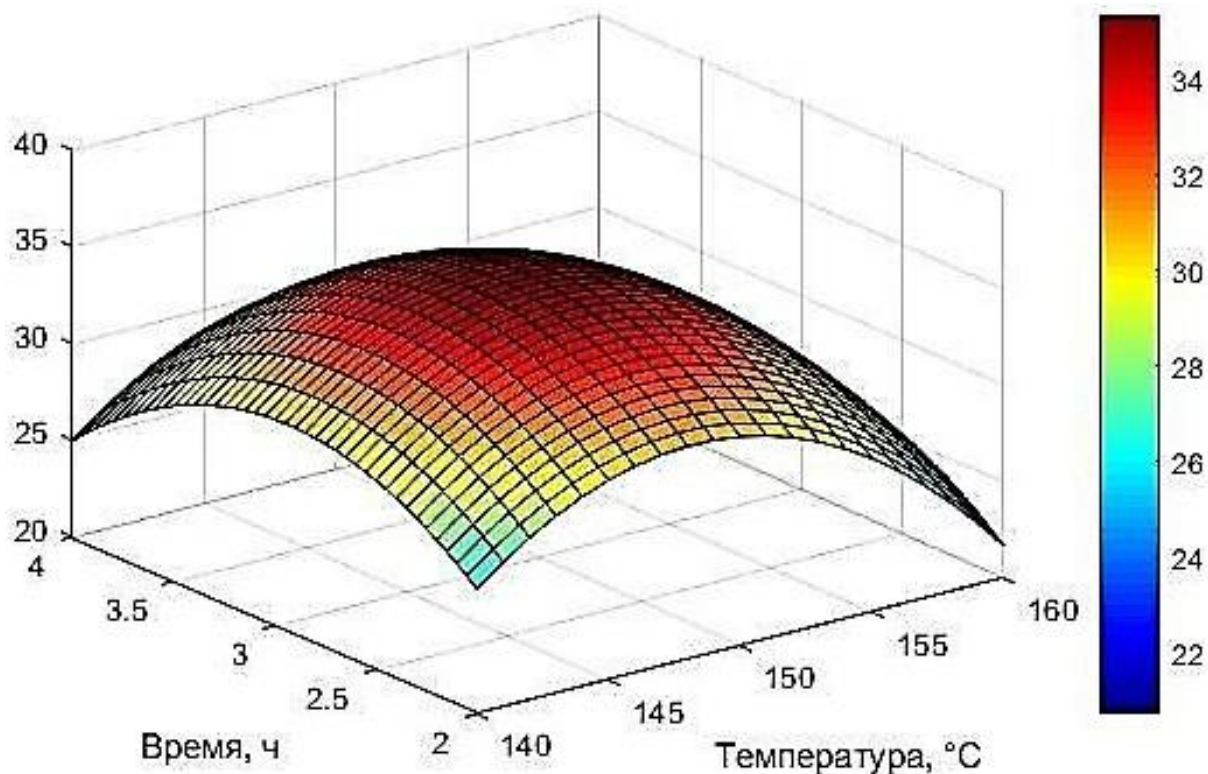


Рисунок 4.7 – Зависимость удельной работы разрушения α_p пленок эластомерго нанокompозита от температуры T и времени t отверждения [44, 161]

После канонического преобразования регрессионной модели построили двумерное сечение поверхности отклика (рисунок 4.8) [44, 161].

Значение функции отклика в точке экстремума составляет $Y_s = 35,9687$ МДж/м³ после термической обработки материала по режиму: температура $T = 148,3$ °C, время $t = 2,9$ ч [44, 161].

Координаты экстремума не совсем удобны для использования в технологии восстановления, в то же время значение удельной работы разрушения $Y_s = 35$ МДж/м³ не значительно отличается от экстремума функции отклика $Y_s = 35,9687$ МДж/м³. Поэтому, в качестве оптимального, режима термической обработки выбрали следующий: температура $T = 150$ °C, время $t = 3$ ч [44, 161].

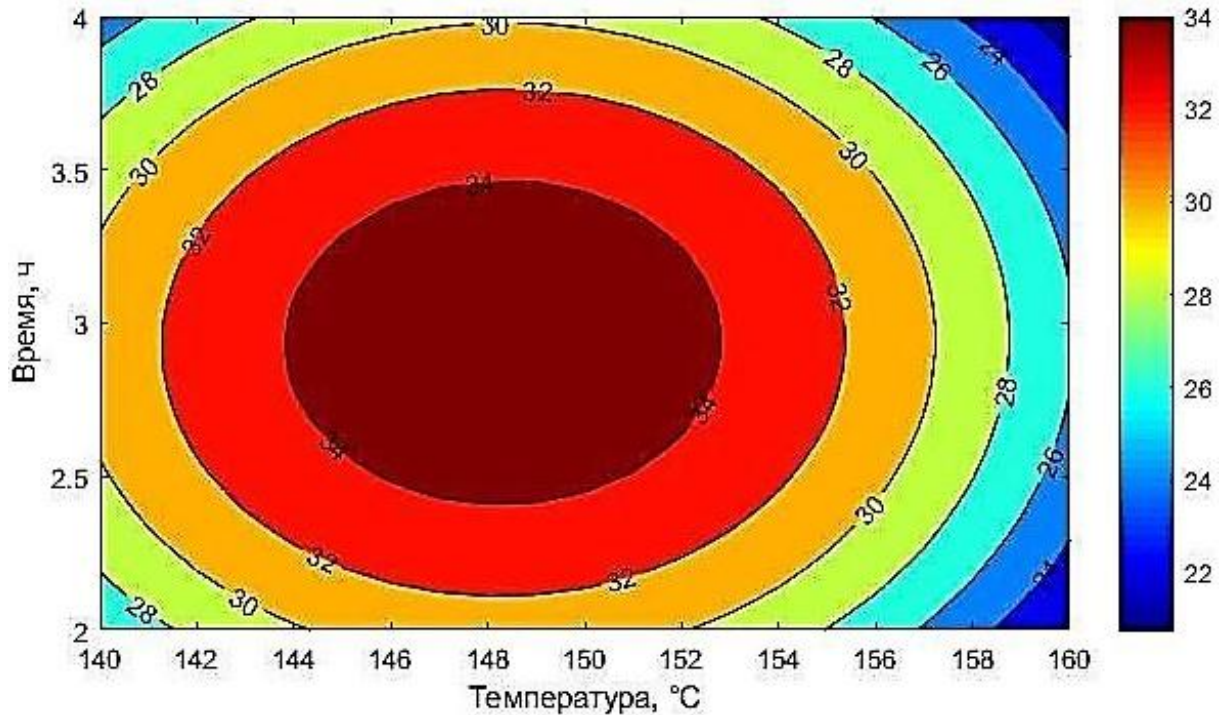


Рисунок 4.8 – Двумерное сечение поверхности отклика [44, 161]

Выводы

1). В результате реализации активного эксперимента получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита эластомера Ф-40С, наполненного УНТ, от температуры и времени термообработки [44, 161].

2). Определен оптимальный режим термической обработки эластомерного нанокompозита: температура $T = 150$ °С, время $t = 3$ ч, при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства. $\alpha_p = 35$ МДж/м³ [44, 161].

4.2 Тепло-физические свойства эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе

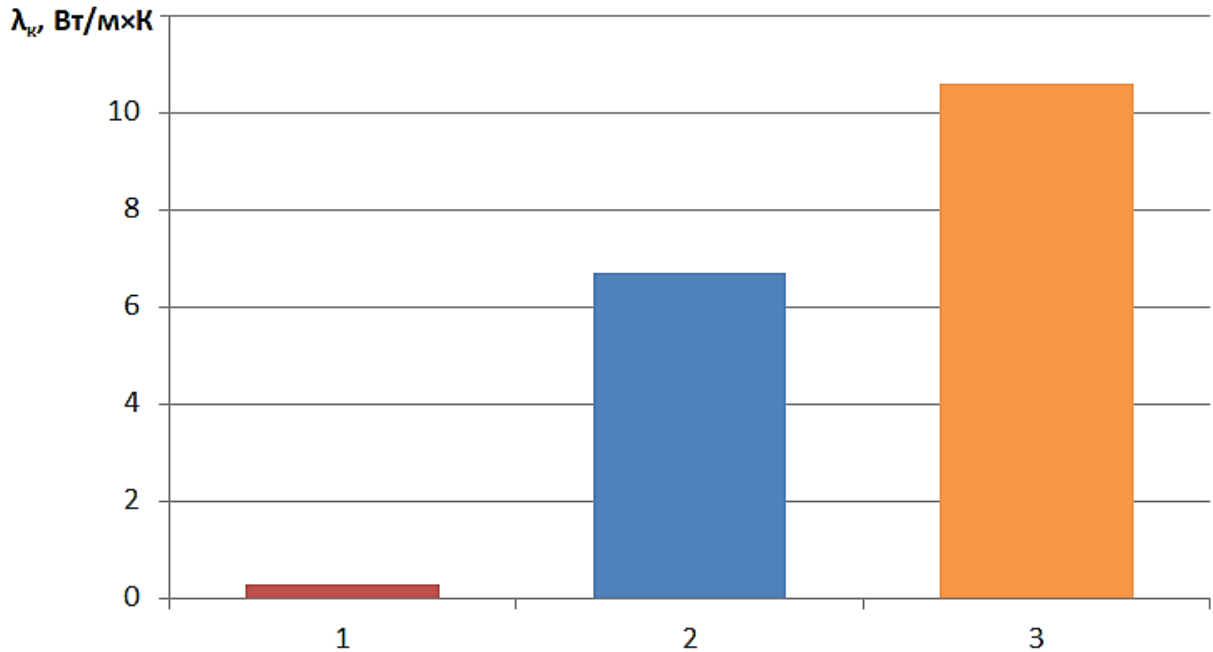
4.2.1 Теплопроводность эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе

Полимерные материалы обладают меньшей теплопроводностью, чем черные

металлы и эта разница достигает 100 раз.

По этой причине эластомеры, так же как другие полимеры: реактопласты, термопласты относят к теплоизоляционным материалам.

«На рисунке 4.9 показаны результаты исследования теплопроводности ненаполненного эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе» [97].



1 – ненаполненный эластомер Ф-40С; 2 – нанокompозит с $K = 0,05$ масс. ч;
3 – нанокompозит с $K = 0,10$ масс. ч.

Рисунок 4.9 – Зависимость теплопроводности λ_k от концентрации УНТ K в эластомерном нанокompозите [35]

Теплопроводность пленок ненаполненного эластомера Ф-40С составляет $\lambda_k = 0,29 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$. С увеличением содержания наполнителя теплопроводность пленок нанокompозита изменяется. При минимальной концентрации наполнителя $K = 0,05$ масс. ч. теплопроводность пленок составляет $\lambda_k = 6,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$. В сравнении с ненаполненным эластомером теплопроводность увеличилась в 23,1 раза. Пленки имеют максимальное теплопроводности $\lambda_k = 10,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ при концентрации

наполнителя $K = 0,1$ масс. ч. В сравнении с ненаполненным эластомером теплопроводность увеличилась в 36,55 раза [35].

После наполнение эластомера УНТ коэффициент теплопроводности нанокompозита повышается в 36,55 раза (от 0,29 до $10,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$), что способствует увеличению теплоотода из зоны трения и, соответственно ресурса подшипников.

Вывод

Коэффициент теплопроводности нанокompозита, наполненного УНТ, в сравнении с ненаполненным эластомером Ф-40С, увеличивается в 36,55 раза, до $\lambda_{\text{к}} = 10,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$.

4.2.2 Термостойкость эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе в условиях ОДКВ

Термостойкость полимерного материала, предназначенного для восстановления посадок подшипников, является его важнейшим эксплуатационным свойством. Очень важно, чтобы материал, имеющий изначально высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства, длительное время не терял их в условиях высоких эксплуатационных температур. В ряде случаев повышенная эксплуатационная температура вызывает термоокислительную деструкцию эластомера, причиной которой является разрыв химических связей основной цепи макромолекул и образование макрорадикалов R. и радикалов RO₂., представляющих собой продукты распада гидропероксидов, появляющихся вследствие окисления макромолекул полимера [69, 97].

Термостойкость эластомера Ф-40С и эластомерных нанокompозитов исследовали, оценивая прочность σ_p и относительное удлинение ϵ_p образцов, до и после термического старения. Термическое старение осуществляли в условиях ОДКВ при температуре 200 °С в течение 2 ч. Для обеспечения условий ОДКВ предназначена специальная форма-оснастка. После сборки форма-оснастка

размещается в сушильном шкафу для проведения термического старения образцов [69, 97].

На начальном этапе исследовали изменение деформационно-прочностных свойств эластомера Ф-40С и нанокompозита после термического старения в условиях ОДКВ. В таблице 4.2 представлены результаты исследования термостойкости полимерных материалов до и после высокотемпературного старения. На рисунке 4.10 показаны диаграммы коэффициентов старения по прочности K_{σ} и относительному удлинению K_{ε} эластомера Ф-40С и нанокompозита на его основе [69, 97].

Как следует из рисунка 4.10 термостойкость нанокompозита, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С, существенно повысилась. Коэффициент старения нанокompозита по прочности, в сравнении с не наполненным эластомером, увеличился от 0,66 до 0,72, т.е. в 1,1 раза, а по деформации, увеличился от 0,34 до 0,4, т.е. в 1,17 раза, что является подтверждением увеличения термостойкости нанокompозита [69, 97].

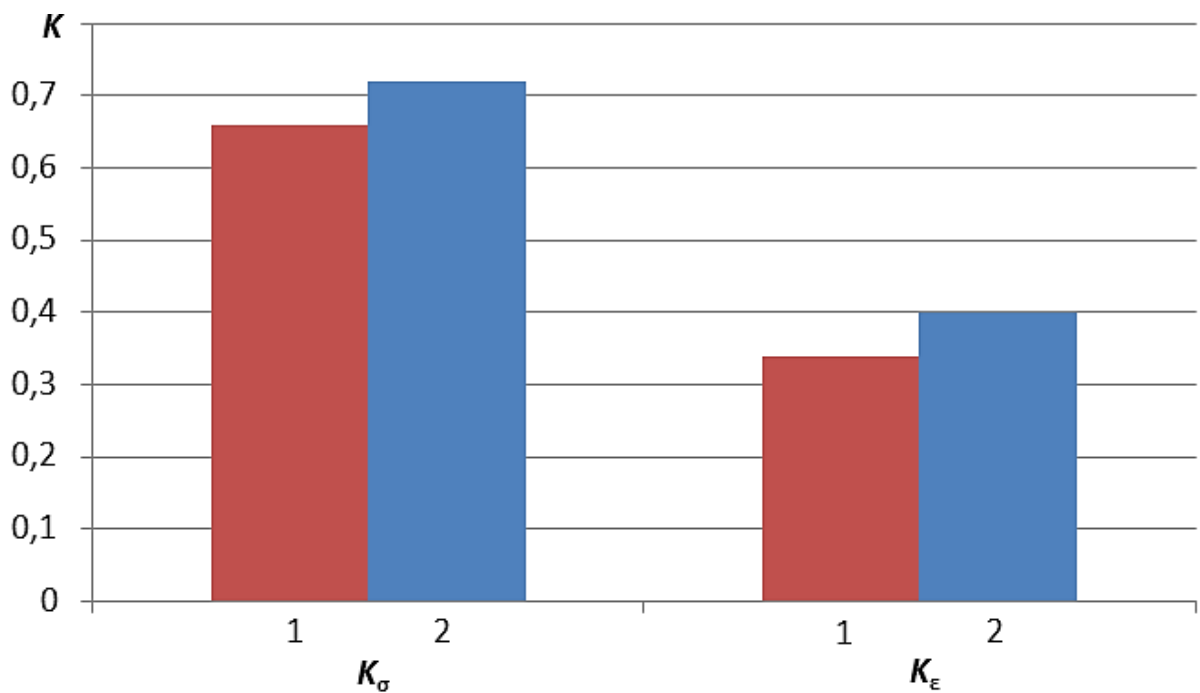
Таблица 4.2 – Механические свойства эластомера Ф-40С и нанокompозита на его основе до и после высокотемпературного старения

| Наименование показателя | Эластомер Ф-40С | Нанокompозит |
|--|-----------------|--------------|
| До старения | | |
| Прочность σ_p , МПа | 21,50 | 26,82 |
| Деформация ε_p , % | 187,16 | 246,23 |
| После старения | | |
| Прочность σ_p , МПа | 14,11 | 19,31 |
| Деформация ε_p , % | 65,01 | 98,50 |
| Коэффициент старения по прочности K_{σ} | 0,66 | 0,72 |
| Коэффициент старения по деформации K_{ε} | 0,34 | 0,40 |

Увеличение коэффициентов старения по прочности K_{σ} и деформации K_{ϵ} свидетельствует о том, что наноккомпозит, в сравнении с ненаполненным эластомером, имеет более высокую термостойкость.

Вывод

Экспериментальные исследования показали, что углеродные нанотрубки «Таунит-М» это ингибиторы процесса термоокисления эластомера Ф-40С. Наполнение УНТ эластомера Ф-40С увеличивает, в сравнении с ненаполненным эластомером, увеличивает термостойкость наноккомпозита по прочности в 1,1 раза, по деформации – 1,17 раза.



1 – эластомер Ф-40С; 2 – наноккомпозит

Рисунок 4.10 – Диаграмма коэффициентов старения по условию прочности K_{σ} и относительному удлинению K_{ϵ}

4.3 Исследование ультразвукового диспергирования нанокompозита на основе эластомера Ф-40С

4.3.1 Определение времени ультразвукового диспергирования раствора эластомерного нанокompозита

Экспериментом установлено, что увеличение продолжительности УЗО приводит к уменьшению вязкости раствора нанокompозита с 0,164 до 0,135 Па×с (рисунок 4.11). Наибольшей вязкостью $\eta = 0,164$ Па×с обладает раствор нанокompозита подвергаемый УЗО в течение $t = 2$ мин. Далее, увеличение продолжительности УЗО приводит к снижению вязкости раствора. По истечении времени УЗО $t = 6$ мин и далее, вязкость раствора стабилизируется на минимальном значении $\eta = 0,135$ Па×с. Из вышеизложенного следует, что эффективное смешение и диспергирование, равномерное распределения углеродных нанотрубок в объеме раствора нанокompозита будут обеспечены при продолжительности УЗО в течение $t = 6$ мин.

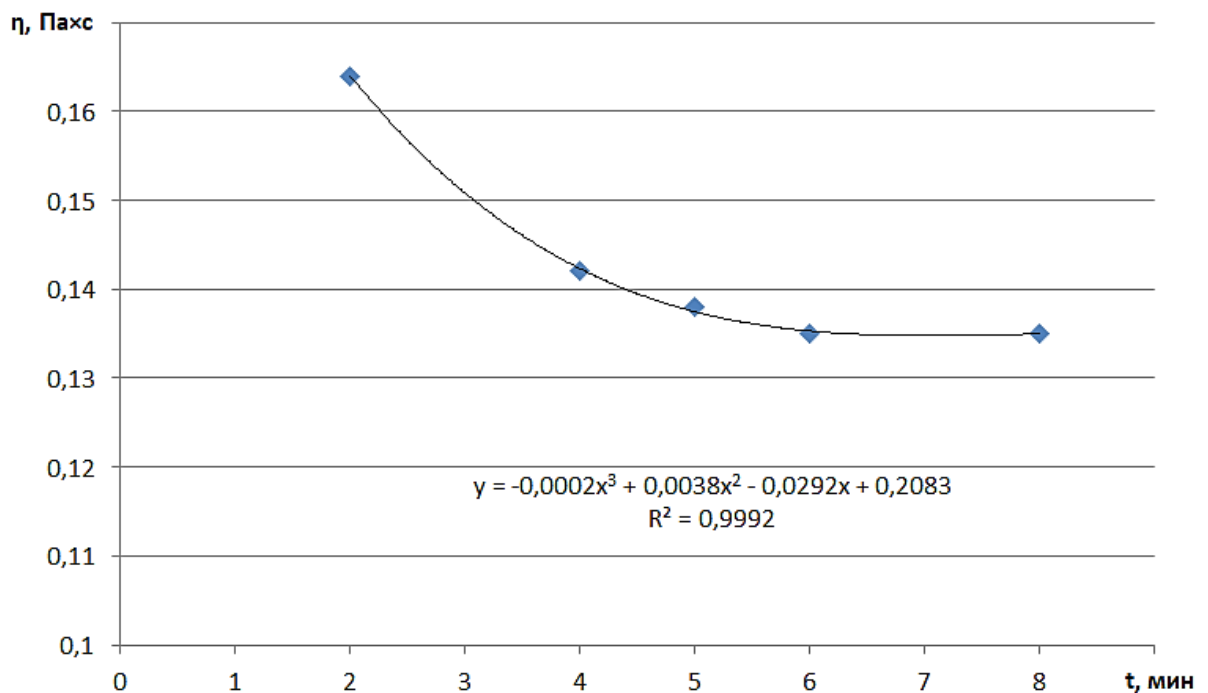


Рисунок 4.11 – Зависимость вязкости η раствора нанокompозита

эластомера Ф-40С от времени ультразвуковой обработки t [129]

Понижение вязкости является следствием не только диспергирования углеродных нанотрубок, но и увеличения температуры раствора нанокompозита при УЗО. Вследствие кавитации, при схлопывании полостей третьей группы, в микрообъемах создается очень высокое давление – до 100 МПа. В последних температура возрастает до 1000 °С. По этой причине при УЗО наблюдается увеличение температуры раствора материала (рисунок 4.12). Если первоначально до проведения УЗО температура раствора нанокompозита составляет $T = 20$ °С, то после УЗО на протяжении $t = 8$ мин она увеличивается по нелинейной зависимости до значения $T = 53,3$ °С [129].

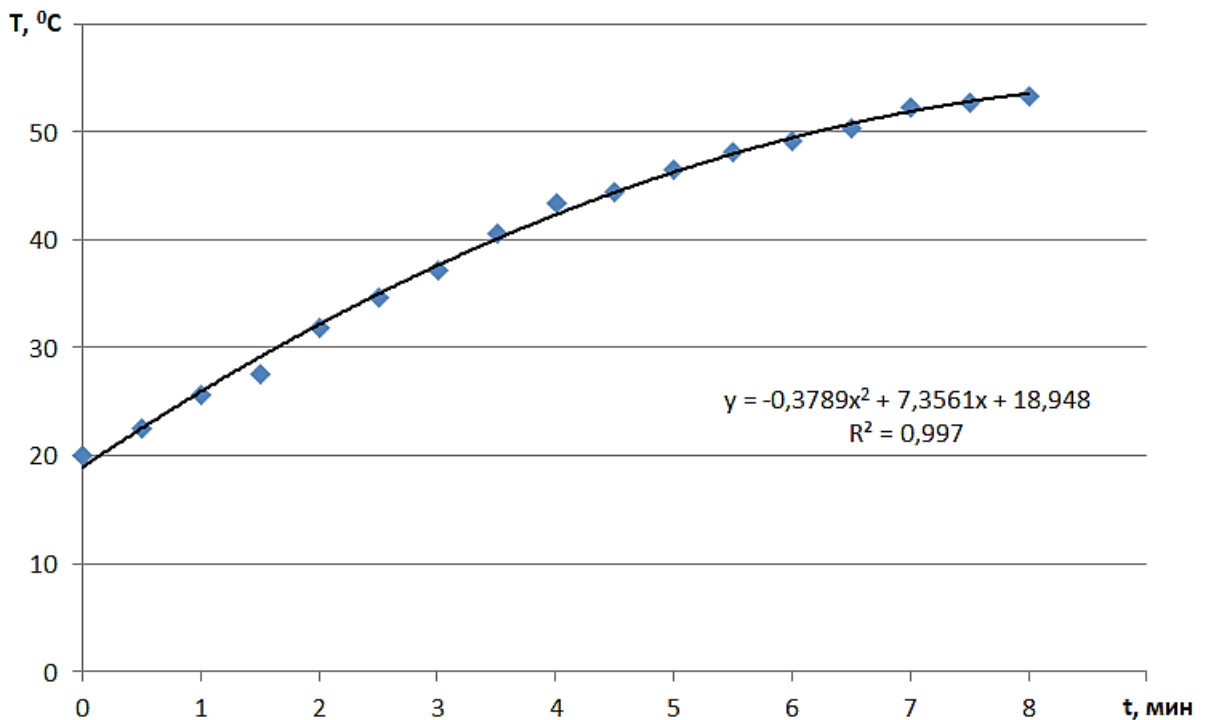


Рисунок 4.12 – Зависимость температуры T раствора нанокompозита от времени УЗО t [129]

УЗО на протяжении $t = 10$ мин приводит к повышению температуры раствора нанокompозита до значения $T = 56$ °С и закипанию ацетона в растворе, что не допускается. Поэтому эффективное смешение и диспергирование, равномерное

распределение углеродных нанотрубок в объеме раствора нанокompозита будут обеспечены при продолжительности УЗО последнего в течение $t = 6$ мин.

4.3.2 Исследование дегазации раствора эластомерного нанокompозита

Дегазация раствора нанокompозита в настоящем эксперименте исследована изучением характера изменения остаточной массы материала в процессе проведения УЗО [129].

Результаты исследования представлены на рисунке 4.13.

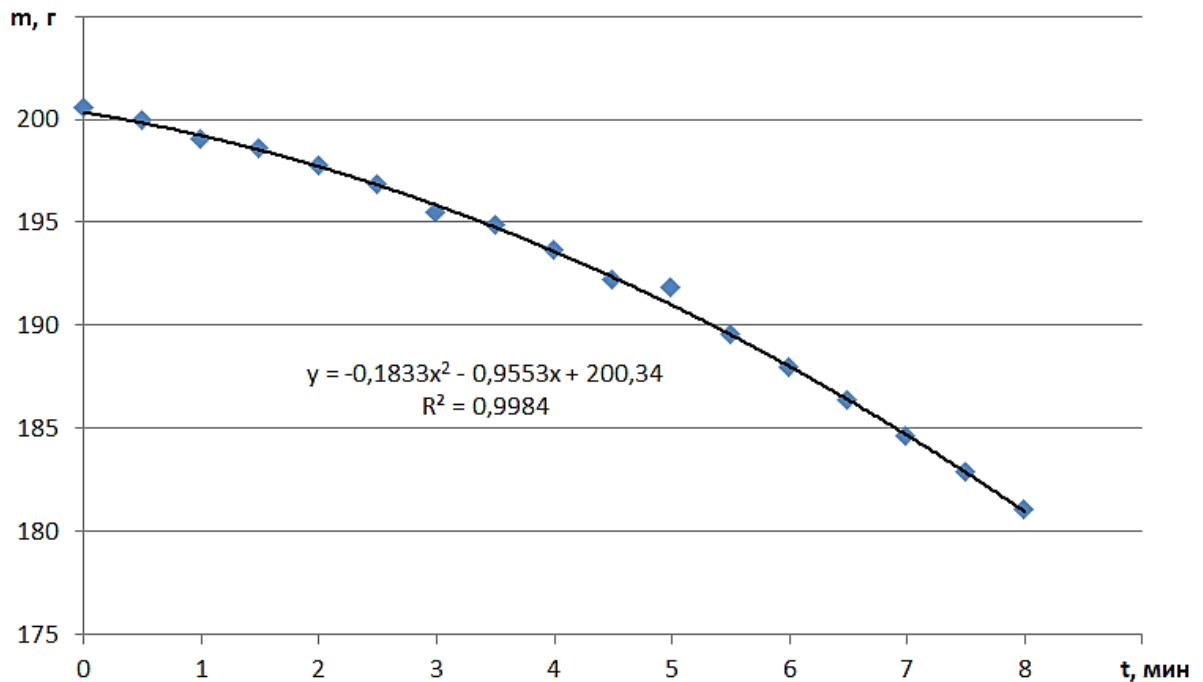


Рисунок 4.13 – Зависимость остаточной массы m раствора нанокompозита от времени УЗО t [129]

В начальный момент эксперимента до начала УЗО раствор нанокompозита имел массу $m = 200$ г. При увеличении продолжительности УЗО, вследствие испарения ацетона, наблюдается уменьшение остаточной массы раствора нанокompозита по зависимости, имеющей не линейный характер. УЗО на протяжении $t = 8$ мин уменьшает остаточную массу раствора нанокompозита до

минимального значения $m = 180,5$ г. Масса испарившегося ацетона достигла 10 % от первоначальной массы раствора нанокompозита, т.е. $m = 19,5$ г. Такое значительное испарение растворителя создает условия для формирования наименьшей пористости в покрытии эластомерного нанокompозита [129].

Вывод

Явление кавитации при УЗО раствора нанокompозита повышает его температура и понижает квазиравновесную концентрацию, т.е. уменьшает концентрацию пузырьков газа в растворе в сравнении со стандартной температурой. По этой причине ультразвуковое диспергирование обеспечивает испарение растворителя до 10% от первоначальной массы раствора эластомерного нанокompозита, что способствует дальнейшему снижению пористости нанокompозитного покрытия [129].

4.3.3 Исследование структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после ручного смешения и УЗО

На начальном этапе исследовали размеры агрегатов наночастиц и элементный состав образцов нанокompозита оптимального состава после ручного смешения и ультразвукового диспергирования.

Оптимальный состав нанокompозита: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч, углеродные нанотрубки (ТУ 1791-003-36280340-2008) – 0,1 масс. ч [35].

На рисунке 4.14 представлено электронное фото структуры образца из нанокompозита после ручного смешения.

На фото показан агрегат из УНТ размером 128,55 мкм.

Электронное фото структуры образца из нанокompозита после УЗО представлено на рисунке 4.15. На фото показаны два агрегата из наночастиц размерами 46,53 и 59,31 мкм. Ультразвуковое смешение и диспергирование, в сравнении с ручным смешением, обеспечивает многократное до 2,76 раза уменьшение размеров агрегатов и выравнивание их по размерам. Размеры агрегатов различаются не значительно – на 27,43 %.

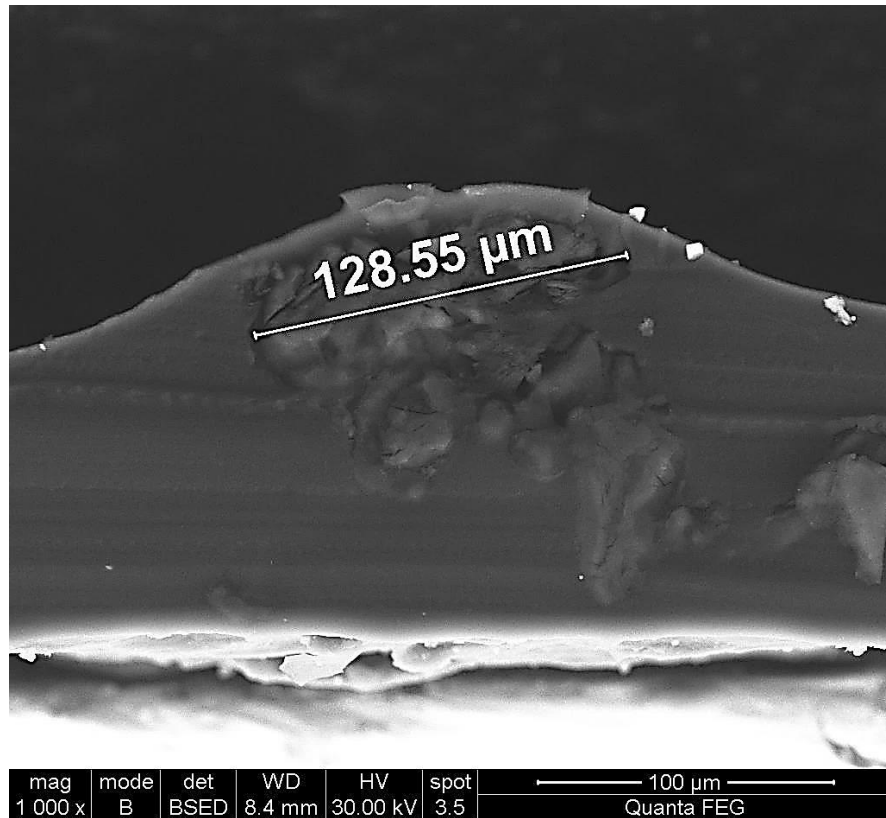


Рисунок 4.14 – Электронное фото и размеры агрегата из УНТ в нанокompозите эластомера Ф-40С после ручного смешения

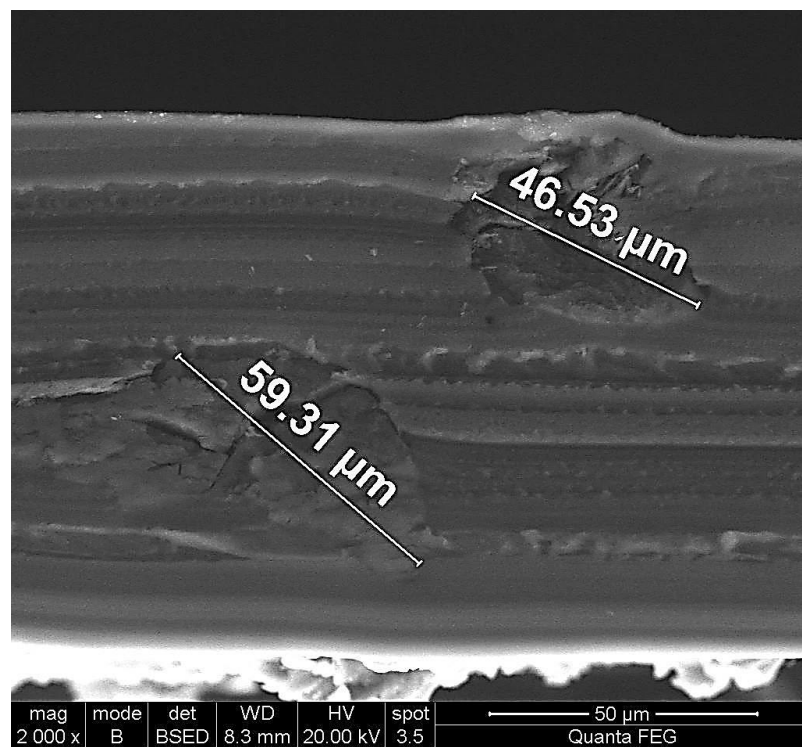


Рисунок 4.15 – Электронное фото и размеры агрегатов из УНТ в нанокompозите эластомера Ф-40С после УЗО

В таблице 4.3 показан элементный состав агрегата из нанокompозита после ручного смешения. Из таблицы 4.3 видно, что в состав агрегата помимо углерода входит большой перечень примесей: O, Al, Si, S, Fe, Ni.

Таблица 4.3 – Элементный состав нанокompозита эластомера Ф-40С, наполненного УНТ после ручного смешения

| eZAF Quant Result | | | | |
|--------------------------------|----------|------|----------|---------|
| Element | Weight % | MDL | Atomic % | Error % |
| Novikov Contr MG-L Area 21 | | | | |
| C K | 60,66 | 0,77 | 72,78 | 10,76 |
| O K | 26,82 | 0,42 | 24,15 | 10,97 |
| Al K | 0,34 | 0,06 | 0,18 | 14,08 |
| Si K | 0,12 | 0,05 | 0,06 | 20,89 |
| S K | 0,17 | 0,04 | 0,07 | 13,92 |
| Fe K | 0,52 | 0,05 | 0,13 | 8,26 |
| Ni K | 1,92 | 0,06 | 0,47 | 3,31 |
| Cu K | 9,46 | 0,08 | 2,15 | 1,90 |

В таблице 4.4 по показан элементный состав агрегата из нанокompозита после УЗО.

Таблица 4.4 – Элементный состав нанокompозита эластомера Ф-40С, наполненного УНТ после УЗО

| eZAF Quant Result - Analysis Uncertainty: 99.00 % | | | | |
|---|----------|------|----------|---------|
| Element | Weight % | MDL | Atomic % | Error % |
| Novikov Contr MG-L +C Selected Area 1 | | | | |
| C K | 96,99 | 0,11 | 99,42 | 9,87 |
| Cu K | 3,01 | 0,03 | 0,58 | 2,74 |

Из таблицы 4.4 видно, что в состав агрегата состоит из углерода и меди. Присутствие меди объясняется рассеянием электронов на медную часть BSE-детектора, по причине низкой проводимости образца и скопления заряда на его поверхности (т.е. это фон от детектора). Отсутствие остальных примесей можно объяснить влиянием УЗО, которая способствует очистке от них агрегатов наночастиц.

Вывод

Ультразвуковая обработка, в сравнении с ручным смешением, многократно до 2,76 раза уменьшает размеры агрегатов и выравнивает их по размерам. Размеры агрегатов различаются не значительно – на 27,43 %.

4.3.4 Дефектность и деформационно-прочностные свойства покрытий после ультразвукового диспергирования

Ресурс полимерного покрытия в ходе эксплуатации в значительной мере зависит от его дефектности. При статических и динамических нагрузках дефекты в покрытии в виде пор и микротрещин являются источником образования и роста трещин приводящих впоследствии к разрушению материала. Основной дефект эластомерных покрытий – это поры, которые образующиеся при испарении паров ацетона в ходе отверждения покрытия.

На рисунке 4.16 представлены пленки из эластомера Ф-40С и его нанокompозита после ручного смешения и ультразвуковой обработки.

После формирования пленок нанокompозита оценивали дефектность последних. На рисунке 4.17 показана пористость образцов. Образцы, полученные при ручном смешении, имеют концентрацию пор $K_{\text{пор}} = 1,6$ шт/см². Дефектность образцов, полученных после УЗО в 1,6 раза ниже и составляет $K_{\text{пор}} = 1$ шт/см². Площадь разрушенной поверхности образцов, полученных при ручном смешении, составляет $S_p = 20$ % (рисунок 4.18). Аналогичный параметр дефектности для образцов, полученных после УЗО, в 1,33 раза ниже и составляет $S_p = 15$ % [129].

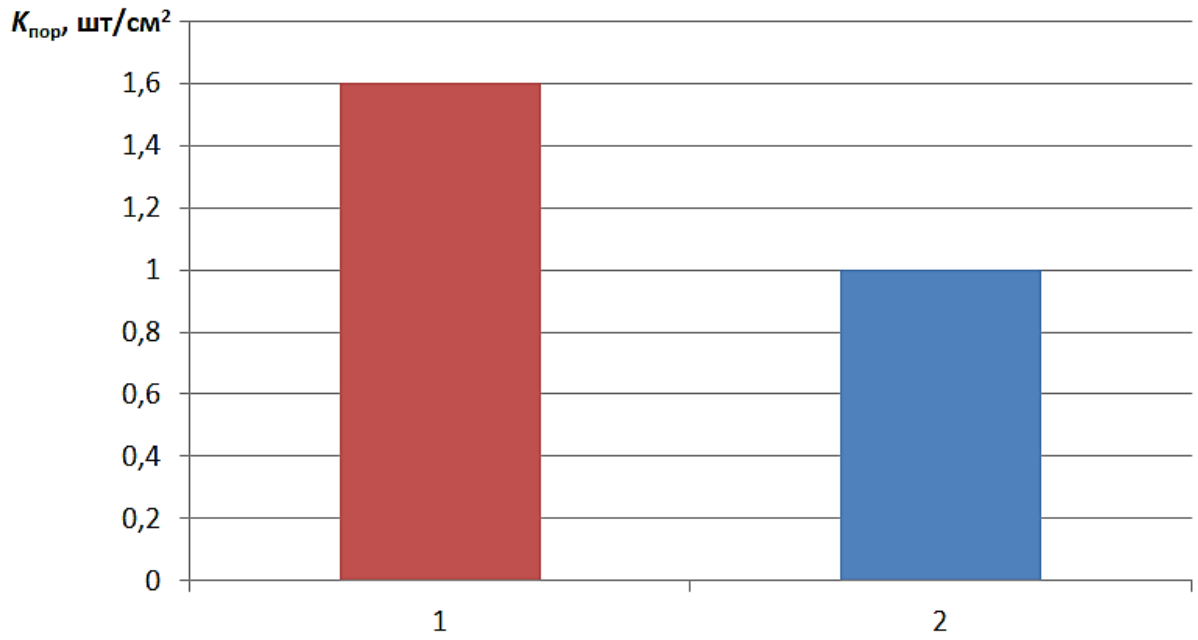


1 –ненаполненный Ф40-С; 2 – композит, после ручного смешения;
3 – композит, после УЗО

Рисунок 4.16 – Фото образцов

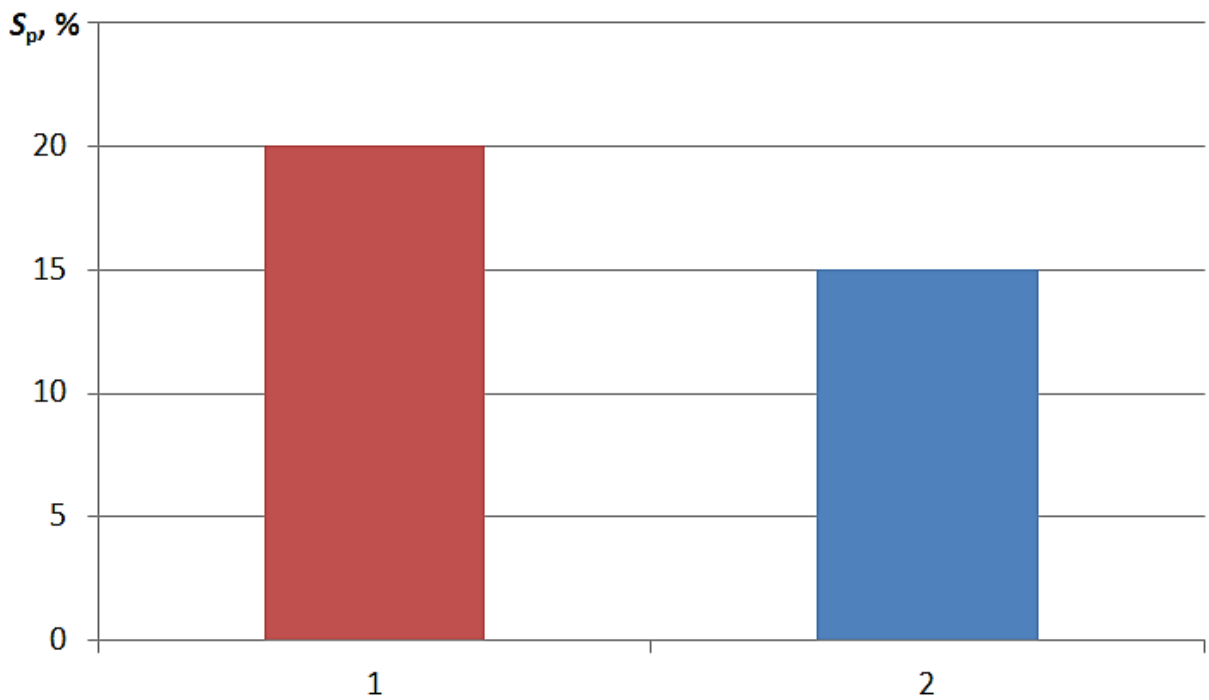
Размеры пор измеряли с помощью микроскопа МПБ-2, который обеспечивает 24-х кратное увеличение. Определили, что средний диаметр пор в пленках эластомера Ф-40С после ручного смешения составил $d = 0,4...0,5$ мм, а в пленках после УЗО этот параметр меньше в 1,6 раза и достигает значений $d = 0,3...0,4$ мм.

Затем провели исследования механических свойств пленок нанокompозита, полученных после ручного смешения и УЗО.



1 – после ручного смешения; 2 –ультразвукового диспергирования

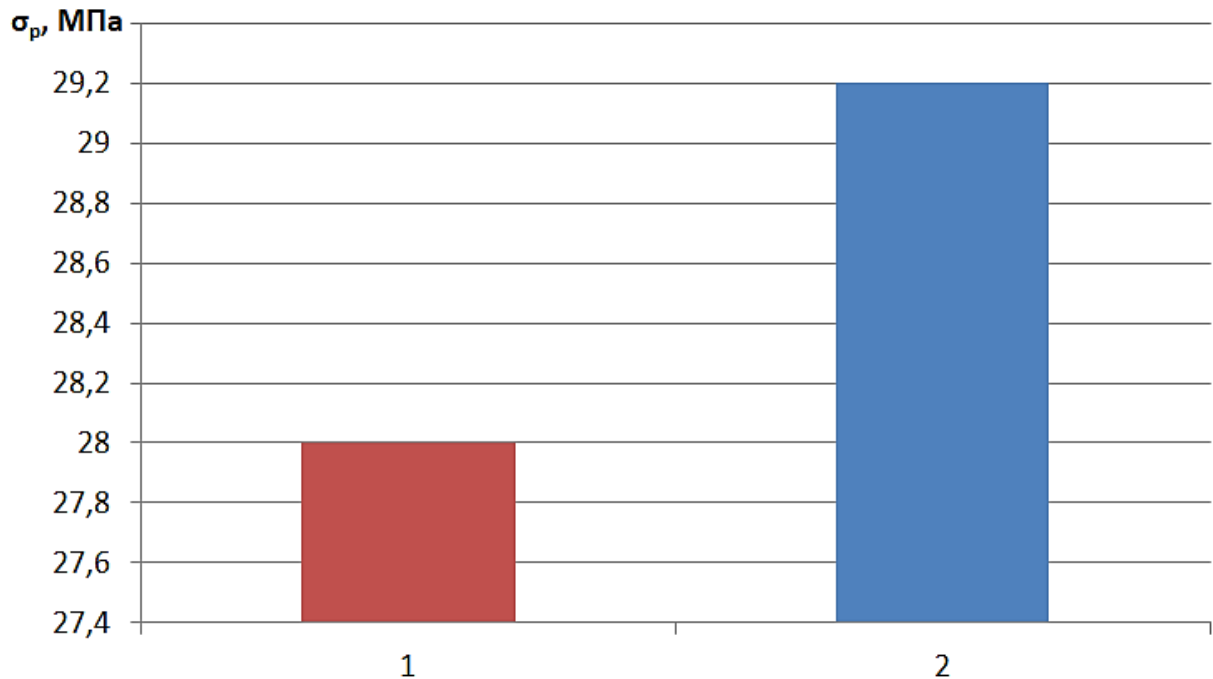
Рисунок 4.17 – Концентрация пор в нанокompозитных покрытиях $K_{\text{пор}}$ [129]



1 – после ручного смешения; 2 –ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.18 – Площадь разрушенного покрытия в нанокompозитных покрытиях S_p [129]

Пленки, сформированные после ручного смешения, обладают прочностью $\sigma_p = 28$ МПа. Образцы, сформированные после УЗО обладают более высокой в 1,04 раза прочностью, которая достигает значения $\sigma_p = 29,2$ МПа (рисунок 4.19).



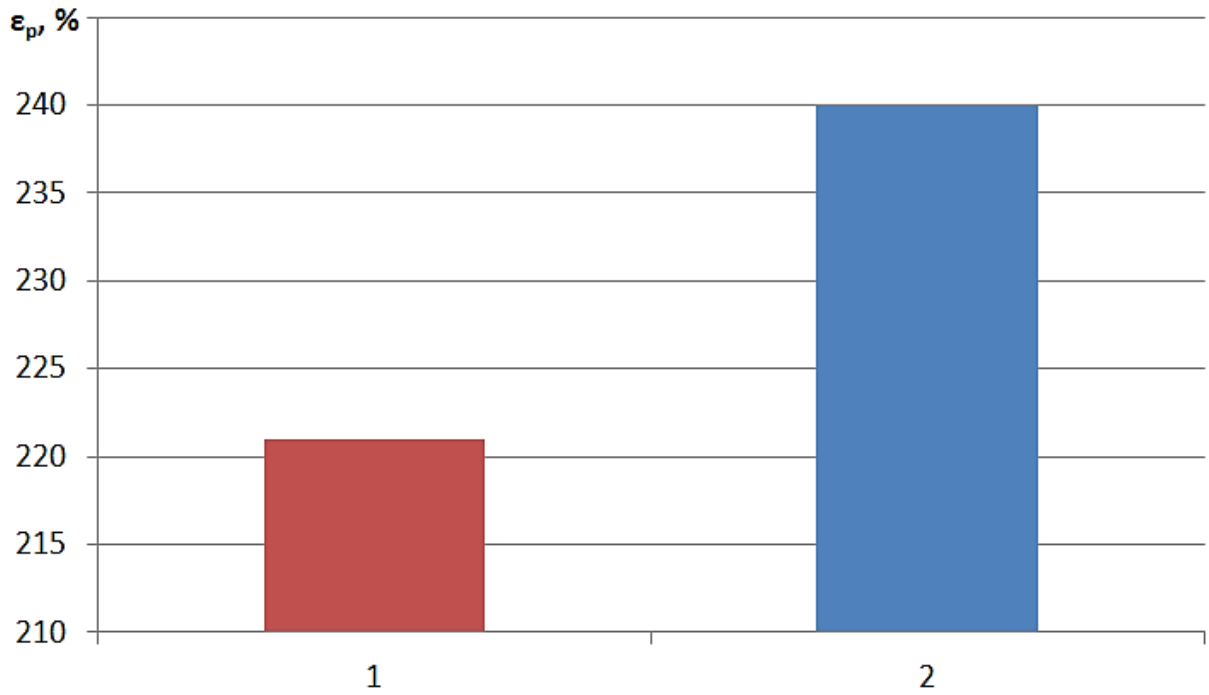
1 – после ручного смешения; 2 –ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.19 – Прочность пленок при одноосном растяжении [129]

Пленки, сформированные после ручного смешения обладают деформацией $\varepsilon_p = 221$ %. Образцы, сформированные после УЗО обладают более высокой в в 1,09 раза деформацией, которая достигает значения $\varepsilon_p = 240$ % (рисунок 4.20).

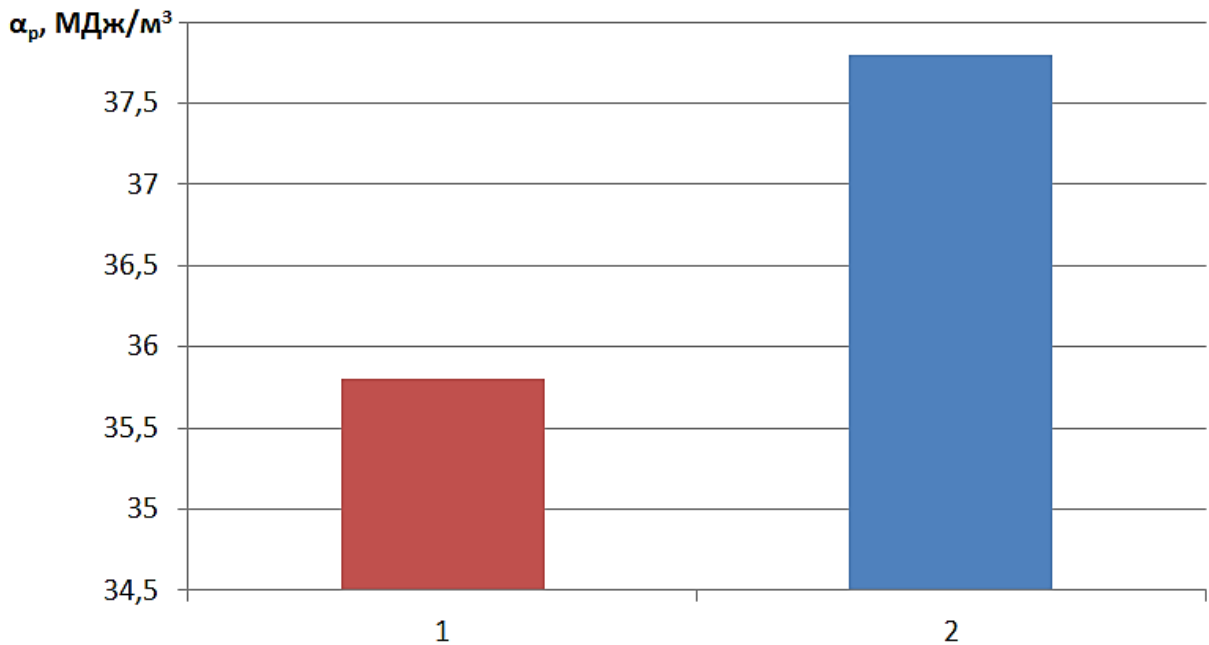
Образцы, сформированные после ручного смешения обладают удельной работой разрушения $\alpha_p = 35,8$ МДж/м³. У пленок, сформированных после УЗО, этот параметр в 1,05 раза больше и достигает значения $\alpha_p = 37,8$ МДж/м³ (рисунок 4.21).

Адгезия пленок, сформированных после ручного смешения, имеет значение $F = 7,276$ кН/м. Образцы, сформированные после УЗО, обладают более высокой в 1,06 раза адгезией, которая достигает значения $F = 7,701$ кН/м (рисунок 4.22).



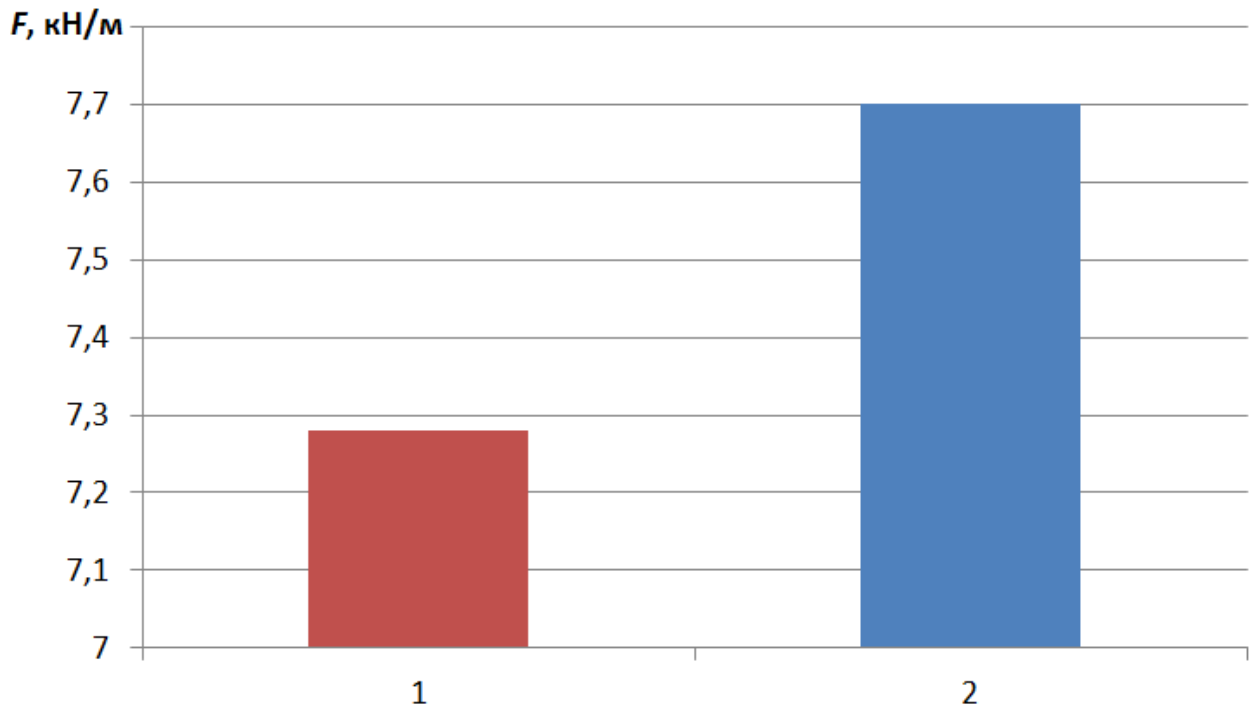
1 – после ручного смешения; 2 – ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.20 – Относительное удлинение пленок при одноосном растяжении [129]



1 – после ручного смешения; 2 – ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.21 – Удельная работа деформации при разрыве пленок [129]



1 – после ручного смешения; 2 – ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.22 – Адгезия покрытий F нанокompозита

Увеличение механических свойств нанокompозита после УЗО, в сравнении с ручным смешением, можно объяснить снижением пористости покрытий.

Таким образом, с учетом вышеизложенного, следует отметить, что после ультразвуковой обработки раствора нанокompозита повышается качество его покрытий и механические свойства [129].

Выводы

1). Определен рациональный режим ультразвуковой обработки раствора нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, наполненного углеродными нанотрубками «Таунит-М»: $N = 55$ Ватт, $t = 6$ мин [129].

2). Ультразвуковая обработка способствует дегазации раствора. Испарение ацетона составляет около 10 % от первоначальной массы раствора нанокompозита, что способствует уменьшению пористости эластомерного нанокompозитного покрытия. По сравнению с ручным смешением, концентрация пор уменьшилась в 1,6 раза, а площадь разрушенной поверхности покрытия в 1,33 раза [129].

3). Ультразвуковое диспергирование и дегазация раствора нанокompозита повышает качество покрытий и соответственно увеличивает их деформационно-прочностные и адгезионные свойства: прочность в 1,04 раза, деформацию в 1,09 раза, удельную работу разрушения в 1,05 раза, адгезию в 1,06 раза. Повышение механических свойств нанокompозита после ультразвуковой обработки повысит эффективность восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобилей [129].

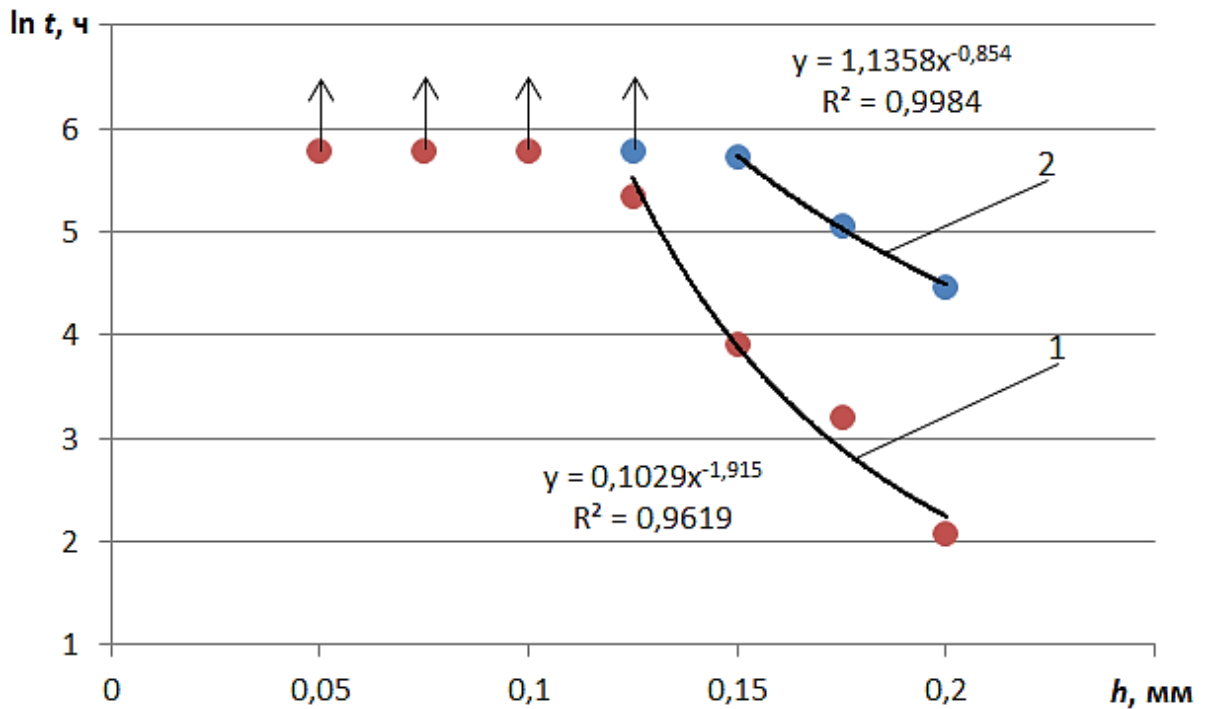
4.4 Исследования долговечности посадок подшипников, восстановленных эластомером Ф-40С и нанокompозитом на его основе

В качестве базы усталостных испытаний принята продолжительность $N_G = 5,94 \times 10^7$ циклов или соответственно 330 ч наработки вибростенда. Восстановленные полимерные посадки испытывают до наступления усталостного разрушения материала, о чем свидетельствует сдвиг наружного кольца подшипника относительно втулки [2].

Усталостные испытания начинали с максимальной толщины полимерной посадки подшипника при которой ее долговечность наименьшая. После разрушения посадки, испытывали полимерную посадку меньшей толщины, и так до тех пор, пока посадка не сохранит работоспособность до конца базы испытаний.

Долговечность посадок подшипников 209 из эластомера Ф-40С и нанокompозита на его основе при различной толщине полимерного покрытия показана на рисунке 4.23.

Точка на кривой означает разрушение полимерной посадки. Точка с стрелкой свидетельствует о том, что материал работоспособен и проворот кольца подшипника во время испытаний отсутствовал. Из графика видно, что ветвь разрушений имеет нелинейный характер – типичная кривая Веллера.



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

Рисунок 4.23 – Зависимость долговечности t полимерных посадок подшипника 209 в корпусной детали от толщины полимерного покрытия h при радиальной нагрузке 20 кН [44, 162]

Наименьший ресурс показала посадка из ненаполненного эластомера при толщине полимерного покрытия 0,20 мм. Она оставалась работоспособной на протяжении 8 ч работы стенда. Посадка из нанокompозита, при такой же толщине покрытия, в сравнении с полимерной матрицей, обладает в 11 раз большим ресурсом, который составил 88 ч [44, 162].

«...Долговечность посадки из не наполненного эластомера при толщине полимерного покрытия 0,175 мм увеличилась до 25 ч. Посадка из нанокompозита, при такой же толщине покрытия, в сравнении с полимерной матрицей, обладает в 6 раз большим ресурсом, который достигает значения 150 ч. Ресурс посадки из не наполненного эластомера при толщине полимерного покрытия 0,15 мм увеличился до 50 ч. Посадка из нанокompозита, при такой же толщине покрытия, в сравнении с полимерной матрицей, обладает в 6,14 раз большим ресурсом, который достигает значения 307 ч. Долговечность посадки из не наполненного эластомера при

толщине полимерного покрытия 0,125 мм увеличилась до 210 ч. Посадка из нанокompозита, при такой же толщине покрытия, прошла базу работы стенда в 330 ч.

Наиболее высокая долговечность отмечена у посадок подшипников из эластомера Ф-40С нанокompозита на его основе, при толщинах полимерных покрытий 0,10 и 0,14 мм, соответственно. У посадок отмечено работоспособное состояние до момента когда стендовые испытания завершились. Проворот кольца подшипника во время испытаний отсутствовал. Поэтому нанокompозит на основе эластомера Ф-40С рекомендуется для восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях с диаметральным износом до 0,28 мм» [44, 162].

Выводы

1. Ресурс посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом эластомера Ф-40С, превышает ресурс посадок не наполненного эластомера в зависимости от толщины полимерного покрытия от 1,5 до 11 раз [44, 162].

2. Нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия в корпусных деталях автомобилей с диаметральным износом до 0,28 мм [44, 162].

5 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

5.1 Технологические рекомендации

В диссертационной работе разработана технология восстановления посадочных подшипниковых отверстий корпусных деталей нанокompозитом эластомера Ф-40С, наполненного УНТ (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Технологическая карта восстановления

| № п/п | Содержание операции | Оборудование, приспособления, инструмент, материалы | Технические условия |
|----------|--|--|--|
| 1 | Измерить посадочные отверстия подшипников и определить значения износа | Нутромер индикаторный | Диаметральный износ не должен превышать допустимого значения 0,28 мм |
| 2 | Очистить поверхность посадочных отверстий от следов коррозии | Верстак слесарный ОРГ 1468А, шкурка шлифовальная Э5М1А № 16 | Обработать поверхности до металлического блеска |
| 3 | Обезжирить поверхность посадочных отверстий | Стол с вытяжным шкафом ОП-2038, технический ацетон, тампон ватный, обернутый марлей | На посадочных местах не должно быть следов масла, грязи и коррозии. Выдержать на воздухе в течение 10 мин. |

Окончание таблицы 5.1

| | | | |
|---|---|---|---|
| 4 | Приготовить нанокомпозит на основе эластомера Ф-40С | Лак Ф-40С (ТУ 6-06-246-92), углеродные нанотрубки «Таунит-М» (ПНСТ 63—2015), весы ВК 3000.1 | Состав наномпозита: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., углеродные нанотрубки «Таунит-М» – 0,1 масс. ч. |
| 5 | Провести ультразвуковое диспергирование (УЗД) раствора нанокомпозита | Ультразвуковая ванна «GRAD 0,5 HOME STYLE» | Время обработки $t = 6$ мин. Мощность УЗД, $W = 55$ Вт. Уровень раствора в ванне $h \leq 14$ мм. |
| 6 | Нанести послойно покрытие из нанокомпозита на посадочные отверстия в корпусной детали | Кисть волосяная № 3...4, раствор нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С | Каждый слой сушить 15...20 минут |
| 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 150 °С в течение 3 ч |
| 8 | Калибровать отверстия с полимерным покрытием | Технологическая оснастка для калибрования | – |
| 9 | Провести контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали | Лупа 8-10 кратного увеличения | Визуальный осмотр |

Новая технология восстановления прошла производственные испытания в ООО «Сосновка-Зернопродукт» (с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовской области). В течение 10 месяцев (февраль – ноябрь 2021 г) проводились эксплуатационные испытания автотракторной техники с восстановленными агрегатами трансмиссии, которые подтвердили ее высокую надежность. Отказы восстановленных агрегатов трансмиссии не фиксировались (приложение Ж).

5.2 Расчет экономической эффективности технологии восстановления корпусных деталей нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С в ООО «Сосновка-Зернопродукт» с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовская область

Себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстия эластомерным нанокompозитом (для условий ООО «Сосновка-Зернопродукт») рассчитывали по известным методикам [163...166] (расчёт представлен в приложении З).

Себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстий эластомерным нанокompозитом составила

$$C_{\text{п}} = 45,11 + 626,3 + 2,25 + 90,22 + 44,63 + 6,36 = 814,87 \text{ р/дм}^2.$$

На предприятии при ремонте техники дефектные корпусные детали подлежат замене на новые. В ООО «Сосновка-Зернопродукт» в 2021 г общая площадь изношенной поверхности в дефектных корпусных деталях составила $N = 1530 \text{ дм}^2$.

Годовые затраты при восстановлении изношенных корпусных деталей, по новой технологии составят

$$Z_{\text{н}} = 1530 \cdot 242,18 = 370535,4 \approx 370535 \text{ р.}$$

Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления эластомерным нанокompозитом составит

$$C_T = 506\,590 - 3_1 = 240\,701 \approx 240 \text{ тыс. р.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

3. Разработан новый эластомерный нанокompозит с оптимальным составом: эластомер Ф-40С – 100 масс. ч., углеродные нанотрубки «Таунит-М» – 0,1 масс. ч. (патент на изобретение № 2751339 РФ). Получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С от режима термической обработки. Определен оптимальный режим нагрева: температура – 150 °С, время – 3 ч, при котором нанокompозит имеет высокую удельную работу разрушения 35,0 МДж/м³. В сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С, нанокompозит имеет более высокие механические свойства: прочность материала увеличилась на 32 %, деформация – 1,66 раза, адгезия – 30 %. Удельная работа разрушения повысилась на 82 %, что свидетельствует о более высокой выносливости материала и создает условия для

повышения долговечности восстановленных посадок подшипников. Увеличение модуля упругости нанокompозита до 59 %, позволит уменьшить податливость восстановленной опоры при радиальном нагружении подшипника, исключить смещение осей подшипника относительно оси отверстия, увеличить предельно допустимую толщину полимерного покрытия при восстановлении корпусных деталей.

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

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

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

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

Библиографический список

1. **Батищев, А. Н.** Пособие гальваника – ремонтника [Текст] / Батищев А. Н.; – М.: Колос, 1980. – 240 с.
2. **Голубев, И. Г.** Исследование долговечности неподвижных соединений, восстановленных железнением при ремонте сельскохозяйственной техники [Текст]: дис ... канд. техн. наук / Голубев И. Г. – М., 1981, – 135 с.
3. **Поляченко, А. В.** Увеличение долговечности восстанавливаемых деталей контактной приваркой износостойких покрытий в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий [Текст]: автореф. дис...докт. техн. наук / Поляченко А. В. – М., 1984. – 44 с.
4. **Черноиванов, В. И.** Совершенствование технологии и повышение качества восстанавливаемых деталей сельскохозяйственной техники [Текст]: автореф. дис... докт. техн. наук / Черноиванов В. И. – М., 1984. – 53 с.
5. **Бурумкулов, Ф. Х.** Совершенствование методов и средств оценки работоспособности и долговечности восстанавливаемых соединений и деталей машин (на примере автотракторных двигателей) [Текст]: автореф. дис...докт. техн. наук. / Бурумкулов Ф. Х. – М., 1986. – 38 с.
6. **Бугаев, В. Н.** Восстановление деталей и повышение ресурса топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей [Текст]: автореф. дис...докт.техн. наук. / Бугаев В. Н. – М., 1987. – 32с.
7. **Авдеев, М. В.** Повышение эффективности восстановления деталей сельскохозяйственной техники [Текст]: автореф. дис...докт. техн. наук. / Авдеев М. В. – Челябинск, 1987. – 46 с.
8. **Курчаткин, В. В.** Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами [Текст]: дис ... док. техн. наук. / Курчаткин В. В. – М., 1989, – 407 с.
9. **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники плазменной наплавкой [Текст]: автореф. дис...докт. техн. наук. / Сидоров А. И. – М., 1989. – 34 с.

10. **Мошенский, Ю. А.** Технологические основы повышения надежности автотракторных валов при восстановлении их наплавкой и термической обработкой [Текст]: автореф. дис... докт. техн. наук. / Мошенский Ю. А. – Пушкин, 1990. – 43 с.
11. **Черновол, М. И.** Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями [Текст]: автореф. дис... докт. техн. наук. / Черновол М. И. – М., 1992. – 35 с.
12. **Мельниченко, И. М.** Восстановление и повышение долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов и покрытий [Текст] / Дис. ... докт. техн. наук. – Гомель, 1991. – 370 с.
13. **Котин, А. В.** Восстановление точности размерных цепей сборочных единиц применение не жестких компенсаторов износа [Текст] / Дис. ... докт. техн. наук. – Саранск, 1998. – 358 с.
14. **Ли, Р. И.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами [Текст]: дис ... докт. техн. наук. / Ли Р. И. – М., 2001, – 340 с.
15. **Зазуля, А. Н.** Справочник инженера по техническому сервису машин и оборудования в АПК [Текст]: / под редакцией д.с.-х. наук, профессора С. М. Бунина – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 604 с.
16. **Башкирцев, В. Н.** Восстановление деталей машин и оборудования адгезивами [Текст]: дис ... докт. техн. наук. / Башкирцев В. Н. – М., 2004, – 397 с.
17. **Гаджиев, А. А.** Технологическое обеспечение долговечности подшипниковых узлов машин применением полимерных материалов [Текст]: автореф. дис... докт. техн. наук. / Гаджиев А. А. – М., 2005. – 35 с.
18. **Кузнецов, Ю. А.** Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования АПК микродуговым оксидированием [Текст]: автореф. дис... докт. техн. наук. / Кузнецов Ю. А. – М., 2006. – 35 с.
19. **Казанцев, С. П.** Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей

сельскохозяйственной техники [Текст]: автореф. дис... докт. техн. наук. / Казанцев С. П. – М., 2006. – 32 с.

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

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

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

23. **Ли, Р. И.** Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники и оборудования перерабатывающих предприятий [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ли Р. И. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2008. – 322 с.

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

25. **Черноиванов, В. И.** Состояние и основные направления развития технического сервиса на селе [Текст] / Черноиванов В. И. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. – № 6, – С. 2-5.

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

27. **Коломейченко, А. В.** Технологии повышения долговечности деталей машин вое становлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными метода ми: автореф. дис. ... докт. тех. наук. – М.: ГНУ ГОСНИТИ, 2011. – 32 с.

28. Технологические рекомендации по применению методов восстановления деталей машин [Текст]. – М.: ГОСНИТИ, 1976. – 181 с.
29. **Крупецкий, В. А.** Восстановление посадочных отверстий установкой колец [Текст] / Крупецкий В. А. // Техника в сельском хозяйстве. – 1981, – № 9. – С. 56-57.
30. Альбом технологических карт на ремонт (восстановление) деталей тракторов и автомобилей [Текст]. – М.: Колос, 1965. – 912 с.
31. **Авдеев, М. В.** Технология ремонта машин и оборудования [Текст] / Авдеев М. В., Воловик Е. Л., Ульман И. Е.; – М.: Агропромиздат, 1986. – 247 с.
32. **Тельнов, Н. Ф.** Ремонт машин [Текст] / Тельнова Н. Ф.; – М.: ВО «Агропромиздат», 1992. – 560 с.
33. **Черноиванов, В. И.** Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве [Текст]: Учебное пособие / Черноиванов В. И., Бледных В. В., Северный А. Э.; – Москва - Челябинск, ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. – 992 с.
34. **Ли, Р. И.** Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники [Текст] : учеб. пособие / Р. И. Ли. – Липецк: ЛГТУ, 2014. – 379 с.
35. **Мельников, А. Ю.** Перспективный полимерный нанокомпозит для восстановления изношенных корпусных деталей автомобилей [Текст] / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников // Наука в Центральной России. – 2021. – №3 (51). – С. 87-95.
36. **Жачкин, С. Ю.** Экспериментальное исследование влияния технологических режимов плазменного напыления на толщину формируемого покрытия [Текст] / Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И., Битюцких О. К. // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2023. – № 25. – С. 42-52.
37. **Жачкин, С. Ю.** Восстановления деталей сельскохозяйственной техники нанесением композиционных покрытий на основе железа [Текст] / Жачкин С. Ю., Астахов М. В., Невструев Ю. А., Сидоркин О. А., Звенигородский И. И. // Наука в центральной России. – 2022. – № 4 (58). – С. 102-109.

38. **Кононенко, А. С.** Исследование влияния размера наночастиц на прочность полимерного состава [Текст] / Хаббатуллин Р. Р., Кононенко А. С. // В сборнике: МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении. сборник трудов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. – С. 258-261.

39. **Кононенко, А. С.** Исследование прочностных свойств и вибростойкости нанокompозиций, применимых для ремонта соединений «вал-подшипник» транспортных средств [Текст] / Кононенко А. С., Кильдеев Т. А. // В сборнике: Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте. сборник статей международной научно-практической конференции. . Липецк, 2022. – С. 273-278.

40. **Карагодин, В. И.** Технологические процессы технического обслуживания и ремонта автомобилей [Текст] – учебник. – М.: Сер. Среднее профессиональное образование, 2023. – 252 с.

41. **Карагодин, В. И.** Ремонт автомобилей [Текст] – учебник. – М.: Сер. Среднее профессиональное образование, 2021. – 232 с.

42. **Астанин, В. К.** Перспективы применения аргоновой сварки [Текст] / Астанин В. К., Коноплин А. Н., Сучков М. С., Корниенко В. Д. // В сборнике: Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Материалы международной научно-практической конференции. Воронеж, 2022. – С. 114-118.

43. **Астанин, В. К.** Преимущества и недостатки ацетиленовой сварки в сравнении ручной дуговой [Текст] / Астанин В. К., Коноплин А. Н., Сучков М. С., Жмыхов Ф. А. // В сборнике: Инновационные технологии и технические средства для АПК. материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 110-летию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». Воронеж, 2022. – С. 48-50.

44. **Ли, Р. И.** Метод ускоренных усталостных испытаний полимерных материалов / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Мельников А. Ю. // Наука в

Центральной России. – 2022. – №3 (57). – С. 92-102.

45. Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Надежность и ремонт машин» [Текст]: Изд-во ОрелГАУ, 2004. – 168 с.

46. Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Надежность и ремонт машин» [Текст] : Изд-во ОрелГАУ, 2005. – 446 с.

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

48. **Воловик, Е. Л.** Справочник по восстановлению деталей [Текст] / Воловик Е. Л.; – М.: Колос, 1981. – 350 с.

49. **Ли, Р. И.** Технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники оборудования перерабатывающих предприятий [Текст] / Ли Р. И.; – Липецк: МичГАУ, 2008. – 322 с.

50. https://studref.com/524046/agropromyshlennost/vosstanovlenie_detaley_elektronatiraniem_vnevannymi_bezvannymi_sposobami

51. **Спицын, И. А.** Совершенствование технологии восстановления посадочных отверстий корпусных деталей электролитическим железнением в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Спицын И. А. – М., 1983. – 190 с.

52. **Новиков, А. Н.** Восстановление посадочных мест под подшипники крупногабаритных деталей цинк - никелевым сплавом [Текст] / Новиков А. Н. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин. – М., 1988. – 95 с.

53. **Кричевский, М. Е.** Применение полимерных материалов при ремонте сельскохозяйственной техники [Текст] / Кричевский М. Е.; – М.: Росагропромиздат, 1988. – 143 с.

54. **Гаджиев, А. А.** Исследование возможности повышения ресурса неподвижных сопряжений, восстановленных полимерными материалами, при ремонте сельскохозяйственной техники [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Гаджиев А. А. – М., 1978. – 154 с.

55. **Лангерт, Б. А.** Исследование и разработка метода восстановления посадочных мест под подшипники в корпусных деталях машин. –ГОСНИТИ, 1972. – Т.43. – с. 43...51.

56. Составы анаэробные уплотняющие (герметики) [Текст]: Клеи акриловые. Каталог. – Черкассы, 1988. – 22 с.

57. Герметики. Анаэробные уплотняющие составы [Текст]: Каталог. – Черкассы, 1980. – 20 с.

58. **Ли, Р. И.** Неразрушающий контроль качества неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники, восстановленных анаэробными герметиками. – дис. ... канд. техн. наук. – М., 1990. – 220 с.

59. **Хамидулова, З. С.** Рогачева И. П., Мурох А. Ф., Аронович Д. А., Синеоков А. П. Новые анаэробные герметики для автомобилестроения // Пластические массы. – 1999. – № 6. – с. 40.

60. **Щетинин, М. В.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивом Анатерм-105 [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Щетинин М. В. – Мичуринск, 2008. – 146 с.

61. **Дёмин, В. Е.** Совершенствование технологии восстановления сопряжений опор корпусных деталей с подшипниками качения применением композиционных анаэробных материалов (на примере корпуса КП трактора Т-150К)

62. **Беркович, М. С.** Исследование и повышение долговечности подшипниковых узлов тракторных трансмиссий [Текст]: дис...канд. техн. наук. / Беркович М. С. – М., 1972, – 130 с.

63. **Ли, Р. И.** Методические указания к лабораторной работе «Восстановление деталей полимерными материалами при ремонте машин и

оборудования» [Текст] / Ли Р. И., Кондрашин С. И. – Мичуринск: Мич. гос. агр-го ун-та, 2007. – 24 с.

64. **Кондрашин, С. И.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники анаэробными герметиками с дисперсными минеральными наполнителями [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Кондрашин С. И. – Мичуринск, 2009. – 118 с.

65. **Бочаров, А. В.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Бочаров А. В. – Мичуринск, 2009. – 150 с.

66. **Машин, Д. В.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники композицией на основе эластомера Ф – 40С [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Машин Д. В. – Мичуринск, 2013. – 149 с.

67. **Зубчанинов, В. Г.** Основы теории упругости и пластичности [Текст]: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / Зубчанинов В. Г.; – М.: Высшая школа, 1990. – 368 с.

68. **Спицын, Н. А.** Подшипники качения [Текст]: Справочное пособие / Спицын Н. А., Сприщевский А. И.; – М.: Машгиз, 1961. – 828 с.

69. **Малюгин, В. А.** Восстановление посадок подшипников качения автомобилей нанокompозитом на основе анаэробного герметика АН-111 [Текст]: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.03: / Малюгин В. А. – Мичуринск, 2019. – 169 с.

70. Shepherd P. D., Golemba F. Y., Maine F. W. //Adv. Chem. Ser. 1974. – Vol. 134. – N 1. – P. 41-49.

71. Usuki A., Kojima Y., Kawasumi M., Okada A., Fukushima Y., Kurauchi T, Kamigaito O. // J. Mater. Res. 1993. – Vol. 8. – N 6. – P. 1179-1184.

72. Kojima Y., Usuki A., Kawasumi M., Okada A., Fukushima Y., Kurauchi T, Kamigaito O. // J. Mater. Res. 1993. – Vol. 8. – N 6. – P. 1185-1194.

73. Dennis H. R., Hunter D. L., Chand D. et al. // Polymer, 2001. Vol. 42. – N 24. – P. 9513-9522.

74. Антипов Е. М., Гусева М. А., Герасин В. А. и др. // *Высокомолекуляр. соединения.* / А. 2003. – Т. 45. – № 11. – С. 1874-1884.
75. Bafna A., Beaucage G., Mirabella E, Mehta S. // *Polymer.* 2003. – Vol. 44. – N 3. – P. 1103 -1115.
76. Антипов Е. В., Гусева М. А., Герасин В. А. и др. // *Высокомолекуляр. соединения.* – А. 2003. – Т. 45. – № 11. – С. 1885-1889.
77. Chand J-H, Park K. D., Cho D. et al. // *Polym. Eng. Sci.* 2001. – Vol. 41. – N 9. – P. 1514-1519.
78. Chang J-H., An Y. U., Kim S. J., Im S. // *Polymer.* 2003. – Vol. 44. – N 15. – P. 5655-5661.
79. Chang J-H., Kim S. J., Joo Y. L., Im S. // *Ibid.* 2004. – Vol. 45. – N 3. – P. 919-926.
80. Fermeglia M., Ferrone M., Priol S. // *Fluid Phase Equilibria.* 2002. – Vol. 212. – N 2. – P. 315-329.
81. Yoon P. J., Hunter D. L., Paul D. R. // *Polymer.* 2003. – Vol. 44. – N 14. – P. 5323-5339.
82. Yoon P. J., Hunter D. L., Paul D. R. // *Ibid.* – P. 5341-5354.
83. Yang Y., Zhu Z, Yin J. et al. // *Ibid.* 1999. – Vol. 40. – N 12. – P. 4407-4414.
84. Tyan H.-L., Liu Y.-C., Wei K.-H. // *Ibid.* 1999. – Vol. 40. – N 14. – P. 4877-1886.
85. Delozier D. M., Orwoll R. A., Cahoon J. F., Johnston N. J., Smith J. G., Connell J. W. // *Ibid.* 2002. – Vol. 43. – N 3. – P. 813-882.
86. Liang Z.-M., Yin J., Xu H.-J. // *Ibid.* 2003. – Vol. 44. – N 4. – P. 1391-1399.
87. Delozier D. M., Orwoll R. A., Cahoon J. F. et al. // *Ibid.* – N 6. – P. 2231-2241.
88. Huang J., He C, Xiao Y, Mya K. Y. et al. // *Ibid.* – N 12. – P. 4491-4499.
89. Liang Z.-M., Yin J., Wu J.-H. et al. // *Eur. J. Polym.* 2004. – Vol. 40. – N 2. – P. 307-314.
90. Chang J-H., Seo B.-S., Hwang D.-H. // *Polymer.* 2002. – Vol. 43. – N 7. – P. 2969-2974.

91. Chin I.J., Albrecht I, Kim H. C. et al. // *Ibid.* 2001. – Vol. 42. – N 15. – P. 5947-5952.
92. Chen J. S., Poliks M. D., Ober C. K. et al. // *Ibid.* 2002. – Vol. 43. – N 13. – P. 4895-4904.
93. Kim B. K., Seo J. W., Jeong H. M. // *Eur. J. Polym.* 2003. – Vol. 39. – N 1. – P. 85-91.
94. Ma J., Xu J., Ren J. H. et al. // *J. Polym.* 2003. – Vol. 44. – N 12. – P. 4619-1624.
95. **Тренисова, А. Л.** Получение композиционных материалов на основе эпоксидного олигомера и нанонаполнителей [Текст]: автореф. дис... кон. техн. наук / Тренисова А. Л. – М., 2009. – 18с.
96. **Микитаев, А. К.** Полимерные нанокомпозиты: многообразие структурных форм и приложений / А. К. Микитаев, Г. В. Козлов, Г. Е. Заиков; Ин-т биохим. физики им. Н. М. Эмануэля РАН. – М.: Наука, 2009. – 278 с.
97. **Киба, М. Р.** Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники нанокомпозитом на основе эластомера Ф-40 [Текст]: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.03: / Киба М. Р. – Мичуринск, 2020. – 174 с.
98. Мищенко С. В., Ткачев А. Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
99. Young's modulus of single-walled nanotubes / A. Knshnan, E. Dujardin, T. W. Ebbesen, P. N. Yianilos, M. M. J. Treacy // *Physics Review Letters.* – 1998. – N 58. – P. 14013-14019.
100. Elastic modulus of ordered and disordered multiwalled carbon nanotubes / J. P. Salvetat, A. J. Kulik, J. M. Bonard, G. Andrew, D. Briggs, T. Stockli, K. Metenier, S. Bonnamy, F. Begum, N. A. Burnham, L. Forro // *Physics Review Letters.* – 1999. – P. 161-165.
101. Elastic and shear moduli of single-walled carbon nanotube ropes / J. P. Salvetat, A. J. Kulik, J. M. Bonard, G. Andrew, D. Briggs, T. Stockli, K. Metemer, S. Bonnamy, F. Beguin, N. A. Burnham, L. Forro // *Physics Review Letters.* – 1999. –

Vol. 82 – P. 944-947.

102. Mechanical properties of carbon nanotubes / J. P. Salvetat, A. J. Kulik, J. M. Bonard, G. Andrew, D. Bnggs, T. Stdckli, K. Metenier, S. Bon-namy, F. Beguin, N. A. Burnham, L. Forro // *Physics Review Letters*. – 1999. – Vol. 69. – P. 144-147.

103. **Treacy, M. M. J.** Exceptionally high young's modulus observed for individual carbon nanotubes / M. M. J. Treacy, T. W. Ebbesen, J. M. Gibson // *Nature*. – 1996. – Vol. 381. – P. 678-680.

104. **Wong, E. W.** Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes / E. W. Wong, P. E. Sheehan, Ch. M. Lie-ber // *Science*. – 1997. – Vol. 277. – N 5334. – P. 1971-1975.

105. **Dai, H.** Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy / H. Dai, T. Daniel, E. Richard et al. // *Nature*. – 1996. – Vol. 384. – Issue 6605. – P. 147-150.

106. Tensile tests of ropes of very long aligned multiwall carbon nanotubes / Z. W. Pan, S. S. Xie, L. Lu et al. // *Applied Physics Letters*. – 1999. – N 74. – P. 3152-3156.

107. **Enomoto, K.** Measurement of young's modulus of carbon nanotubes by nanoprobe manipulation in a transmission electron microscope / K. Enomoto, S. Kitakata et al. // *Applied Physics Letters*. – 2006.

108. Intrinsic thermal vibrations of suspended doubly clamped single-wall carbon nanotubes / B. Babic, J. Furer, S. Sahoo, Sh. Farhangfar, C. Schonenberger // *NanoLetters*. – 2003. – Vol. 3(11) – P. 1577-1580.

109. **Nakajima, M.** Simple synthesis of three primary colour nanoparticle inks of Prussian blue and its analogues / M. Nakajima, F. Arai, T. Fu-kuda // *IEEE Trans on Nanotechnology*. – 2006. – N 5. – P. 243-248.

110. **Елецкий, А. В.** Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе / А. В. Елецкий // *Успехи химии*. – 2007. – Т. 177. – № 3. – С. 233-274.

111. Кононенко А. С., Дмитраков К. Г. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов // *Международный технико-экономический*

журнал. – 2015. – № 1. – С. 89-94.

112. Жачкин С. Ю., Пеньков Н. А., Мандрыкин И. А., Беленцов В. Г. Интенсификация восстановления деталей сельхозмашин дисперсно-упрочненным композитным покрытием на основе хрома // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – №3 (32). – С. 49-54.

113. **Коломейченко, А. В.** Технология восстановления с упрочнением деталей машин на основе применения микродугового оксидирования / Коломейченко А. В., Кравченко И. Н., Пузряков А. Ф., Логачёв В. Н., Титов Н. В. // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 10. – С. 16-21.

114. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019. – Vol. 12. – No. 3. – pp. 261-265.

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

116. R. I. Li, D. N. Psarev. A Model for Forming a Uniform Polymer Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2015. – Vol. 8. – No. 3. – pp. 249-252.

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

118. **Ли, Р. И.** Модификация анаэробных герметиков металлическими наночастицами [Текст] / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, В. А. Малюгин // Клеи. Герметики. Технологии. – 2019. – №2. – С. 21-27.

119. **Шубин, А. Г.** Повышение долговечности посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники, восстановленных герметиком бФ: Автореф. дис.... канд. техн. наук. - М., 1980. – 16 с.

120. **Бутин, А. В.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимер-полимерными композициями [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: /

Бутин А. В. – Мичуринск, 2012. – 127 с.

121. **Школьник, Л. М.** Методика усталостных испытаний: справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 306 с.

122. **Глушкова, М. В.** Надёжность в технике. Методы ускоренных испытаний на усталость для оценки пределов выносливости материалов, элементов машин и конструкций. Методические указания. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 27 с.

123. **Гороховский, А. В.** Композитные наноматериалы. [Текст]: Учебное пособие / А. В. Гороховский. – Саратов.: ФГОУ ВПО СГТУ, 2008. – 76 с.

124. **Гуняев, Г. М.** Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. – М.: Химия, 1981. – 232 с.

125. New Scientist, 18 September, 2004. – p. 18.

126. Козлов Г. В., Буря А. И., Липатов Ю. С. Механизм усиления полимерных нанокомпозитов, наполненных углеродными нанотрубками. Reports of National Academy of Sciences of Ukraine, 2008. – № 1. – p. 132-136.

127. **Нарисава, И.** Прочность полимерных материалов. Пер. с япон. / Под ред. А. А. Берлина. – М.: Химия, 1987. – 398 с.

128. Полимерные нанокомпозиты: Многообразие структурных форм и приложений / А. К. Микитаев, Г. В. Козлов, Г. И. Заиков; Ин-т биохим. физики им. Н. М. Эмануэля РАН. – М.: Наука, 2009. – 278 с.

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

130. Парфеев В. М., Олдырев П. П. – Мех. полимер., 1977. – № 6. – с. 1058-1061.

131. Гуняев Г. М., Сорина Т. Г. – Пласт. массы, 1971. – № 11. – с. 13-15.

132. Наполнители для полимерных композиционных материалов. Под ред. Г. С. Каца и Д. В. Милевски. Пер. с англ. / Под ред. П. Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981. – 736 с.

133. Dickie R. A., in Polymer Blends Vol. 1 (Eds D. R. Paul, S. Newman) (New York: Academic Press, 1978) p. 353; Дики Р., в кн. Полимерные смеси Т. 1 (Под ред. Д. Пола, С. Ньюмена). – М.: Мир, 1981. – с. 397.
134. Бобрышев А. Н. и др. Синергетика композитных материалов. – Липецк: НПО ОРИУС, 1994. – с. 250.
135. Козлов, Г. В. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокомпозитов. Успехи физических наук. – 2015 – т. 185. – № 1. – С. 35-64.
136. Козлов Г. В., Яновский Ю. Г., Карнет Ю. Н. Физико-механические свойства наноструктурированных полимерных композитов в рамках фрактального и мультифрактального описаний. – М.: OneBook, 2013. – с. 545.
137. Козлов Г. В., Яновский Ю. Г., Карнет Ю. Н. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных композитов: фрактальный анализ. – М.: Альянстрансатом, 2008. – с. 352.
138. **Ли, Р. И.** Условия формирования равномерного полимерного покрытия на наружной поверхности вращающейся цилиндрической детали / Р. И. Ли // Клеи. Герметики. Технологии – 2015. – № 4. – С. 33-38.
139. R. I. Li, M. R. Kiba. Production Technology of Metallopolymer Rolling Bearings. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2016. – Vol. 9. – No. 2. – pp. 161-164.
140. **Агранат, Б. А.** Ультразвуковая технология / учебное пособие / Б. А. Агранат [и др.]. – М.: «Металлургия», 1974. – 503 с.
141. **Колесников, А. А.** Повышение качества восстановления корпусных деталей автомобилей полимерными композиционными материалами после ультразвуковой обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10: / Колесников А. А. – Орел, 2017. – 179 с.
142. **Агранат, Б. А.** Основы физики и техники ультразвука / учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
143. **Бронин, Ф. А.** Исследование кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел в ультразвуковом поле высокой интенсивности: дис.

...канд. техн. наук. / Бронин Ф. А. – М., 1966. – 264 с.

144. <http://instplast.ru/>

145. <http://www.nanotc.ru/productions/87-cnm-taunit>

146. ГОСТ 14236-81. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.

147. **Быконя, А. Н.** Повышение деформационно-прочностных свойств полимеров после инфракрасной обработки [Текст] / Р. И. Ли, А. Н. Быконя, В. Е. Ерохин // Современное состояние садоводства Российской Федерации, проблемы отрасли и пути их решения. Материалы науч. -практ. конф. 17-18 сентября 2020 года в г. Мичуринске Тамбовской области. – Мичуринск: наукоград РФ, 2020. – с. 204-208.

148. ГОСТ 12423-66. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб) [Текст]. – М.: Изд-во стандартов. 1989. – 6 с.

149. **Аскадский, А. А.** Деформация полимеров [Текст] / Аскадский А. А.; – М.: Химия, 1973. – 448 с.

150. **Либерман, Б. Я.** Машины для испытаний подшипников качения. – М.: Машиностроение, 1965. – 152 с.

151. Крассовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. – М.: БГУ им. Ленина, 1982. – 302 с.

152. **Ли, Р. И.** Основы научных исследований [Текст] : Учеб. пособие / Р. И. Ли. – Липецк: ЛГГУ, 2013. – 190 с.

153. ГОСТ 21981-76 Герметики. Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании [Текст]. – М.: Изд-во стандартов. 1991. – 8 с.

154. ГОСТ 9550-81 Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе [Текст]. – М.: Изд-во стандартов. 2004. – 8 с.

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

156. Методы определения теплопроводности и температуропроводности Под ред Л. В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.

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

158. **Михеев, В. А.** Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями / Михеев В. А., Судаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т.58, № 7. С. 571-575.

159. www.testo.ru

160. <https://www.mirvesov.ru/laboratornye-vesy-laboratornye-vesy/1069.htm>

161. **Мельников, А. Ю.** Определение оптимальной термообработки полимерного нанокompозита. В книге: Материалы областного профильного семинара "Школа молодых ученых" по проблемам технических наук. Тезисы и доклады семинара. – Липецк, 2022. – С. 138-141.

162. Ли Р. И., Мельников А. Ю. Новый метод ускоренных усталостных испытаний полимерных материалов. В сборнике: Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте. сборник статей международной научно-практической конференции. – Липецк, 2022. – С. 302-309.

163. **Шпилько, А. В.** Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [Текст] / Шпилько А. В., Драгайцев В. И., Тулапин П. Ф. и др.; – М.: Аграрная наука, 1998. – 127 с.

164. **Сергеев, И. В.** Экономика предприятия [Текст] / Сергеев И. В. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 297 с.

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

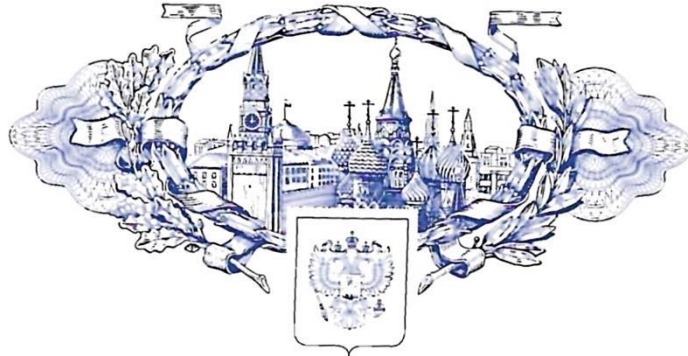
166. **Кравченко, И. Н.** Техничко-экономическое обоснование инженерных решений по эксплуатации и ремонту машин [Текст] / Кравченко И. Н., Шилина Н. В., Попова Л. Н., Карцев С. В., Пучин Е. А., Карев А. М.; – М.: Издательство УМЦ «Триада», 2006. – 144с.

167. **Бабусенко, С. М.** Проектирование ремонтно-обслуживающих предприятий [Текст] – М.: Агропромиздат, 1990. – 352 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2757271

Композиция для покрытия металлических изделий

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

Авторы: *Ли Роман Иннокентьевич (RU), Псарев Дмитрий Николаевич (RU), Киба Мария Романовна (RU), Быконя Андрей Николаевич (RU), Мельников Антон Юрьевич (RU), Ерохин Виктор Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2020134361

Приоритет изобретения 19 октября 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 12 октября 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 19 октября 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Павлов



Приложение Б
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2751339

**Способ восстановления изношенных посадочных
отверстий в корпусных деталях покрытием из раствора
полимерного материала**

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

Авторы: *Ли Роман Иннакентьевич (RU), Псарев Дмитрий Николаевич (RU), Ризаева Юлия Николаевна (RU), Киба Мария Романовна (RU), Быкопя Андрей Николаевич (RU), Мельников Антон Юрьевич (RU)*

Заявка № 2020111470

Приоритет изобретения 18 марта 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 13 июля 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 18 марта 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



Приложение В
(справочное)



Приложение Г

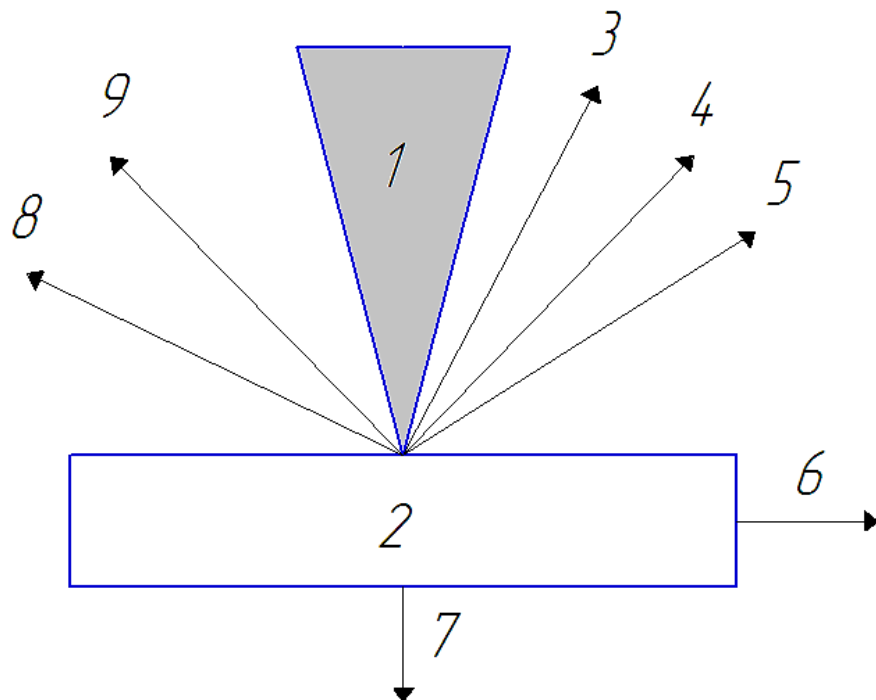
Описание и принцип работы электронного микроскопа «Quanta 600 FEG»

Энерго-дисперсионный анализатор рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенный в растровый электронный микроскоп «Quanta 600 FEG», обеспечил получение спектров характеристического рентгеновского излучения в различных точках по поперечному шлифу образца.

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) позволяет определить элементный состав микрообъектов по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению. При анализе характеристического спектра в РСМА применяют два типа спектрометров: бескристалльный или с кристаллом-анализатором. В качестве базы для РСМА используют электронно-оптическую систему растрового электронного микроскопа. При взаимодействии электронного зонда с образцом (рисунки Г.1 и Г.2) одним из возбуждаемых сигналов является рентгеновское излучение двух видов: характеристическое и тормозное.

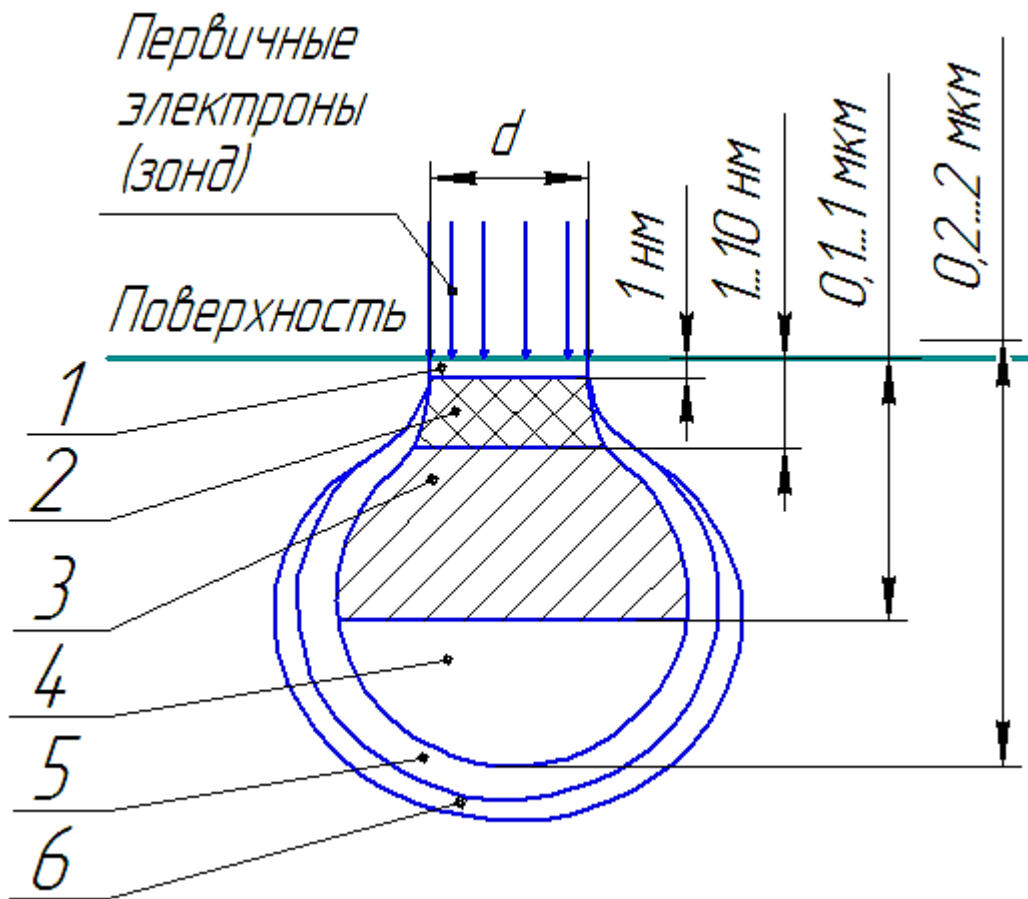
Тормозное рентгеновское излучение является следствием торможения первичных электронов в электрическом (кулоновском) поле атомов анализируемого материала. Кинетическая энергия первичных электронов частично или полностью преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Это непрерывное рентгеновское излучение т.к. оно обладает непрерывным спектром с энергией от нуля до энергии падающего электрона. При рентгеноспектральном микроанализе тормозное излучение нежелательно, так как вносит основной вклад в увеличение уровня фона и не может быть исключено. При проникновении первичных электронов в образец они тормозятся не только электрическим полем атомов, но и непосредственным столкновением с электронами атомов материала. В результате этого первичные электроны могут выбивать электроны с внутренних К-, L-, или M-оболочек, оставляя атом образца в энергетически возбужденном состоянии. Образующие вакансии заполняются переходами электронов с более высоких энергетических уровней. Атом переходит в основное состояние,

избыточная энергия выделяется в виде кванта рентгеновского излучения. Поскольку энергия возникающего кванта зависит только от энергии участвующих в процессе электронных уровней, а они являются характерными для каждого элемента, возникает характеристическое рентгеновское излучение. Так каждый атом имеет вполне определенное конечное число уровней, между которыми возможны переходы только определенного типа, характеристическое рентгеновское излучение дает дискретный линейчатый спектр.



1 – электронный луч; 2 – объект; 3 – отраженные электроны; 4 – вторичные электроны; 5 – Оже-электроны; 6 – ток поглощенных электронов; 7 – прошедшие электроны; 8 – катодолуминесцентное излучение; 9 – рентгеновское излучение

Рисунок Г.1 – Эффекты взаимодействия электронного луча с объектом



Области генерации: 1 – Оже-электронов; 2 – вторичных электронов; 3 – отраженных электронов; 4 – характеристического рентгеновского излучения; 5 – тормозного рентгеновского излучения; 6 – флуорисценции

Рисунок Г.2 – Области сигналов и пространственное разрешение при облучении поверхности объекта потоком электронов (зонд)

**Приложение Д
(справочное)**



«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор ООО «Сосновка-Зернопродукт»
Кошаров А.Н.
25 февраля 2021 г.

АКТ

на проведение производственных испытаний

25 февраля 2021 г. с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовская область

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «Сосновка-Зернопродукт» заведующий гаражом Баранов Г.В. с одной стороны и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., аспирант Мельников А.Ю. с другой, составили настоящий акт о том, что на предприятии ООО «Сосновка-Зернопродукт» проведена производственная проверка технологии восстановления посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях автомобилей КАМАЗ-45143 и тракторов МТЗ-1221, МТЗ-1525, МТЗ-2022 полимерным композитом на основе эластомера Ф-40С.

Восстановлены посадочные отверстия под подшипники качения в следующих деталях:

картер коробки передач автомобилей КАМАЗ-45143 (141701015) – 2 шт., картер коробки передач трактора МТЗ-1221 (80-1701025-А) – 1 шт., картер коробки передач трактора МТЗ-1525 (1222-1702081) – 1 шт., картер коробки передач трактора МТЗ-2022 (2022-1701025Б) – 1 шт. В результате собраны две опытных коробки передач автомобиля КАМАЗ-45143, одна опытная коробка передач трактора МТЗ-1221, одна опытная коробка передач трактора МТЗ-1525, одна опытная коробка передач трактора МТЗ-2022.

Наблюдения за опытными узлами будут осуществляться специалистами ООО «Сосновка-Зернопродукт» и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ.

Зав. гаражом

д.т.н., профессор

к.т.н, доцент, докторант

аспирант

Баранов Г.В.

Ли Р.И.

Псарев Д.Н.

Мельников А.Ю.

Приложение Е (справочное)

Генеральный директор ООО «Сосновка-Зернопродукт»

Кочаров А.Н.

22 ноября 2021 г.



АКТ

эксплуатационных испытаний

22 ноября 2021 г. с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовская область

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «Сосновка-Зернопродукт» заведующий гаражом Баранов Г.В. с одной стороны и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., аспирант Мельников А.Ю. с другой, составили настоящий акт об эксплуатационных испытаниях опытных агрегатов трансмиссии автомобилей и тракторов, у которых посадочные отверстия под подшипники качения восстановлены полимерным композитом на основе эластомера Ф-40С.

Таблица – Опытные агрегаты трансмиссии с восстановленными отверстиями под подшипники качения

| Хоз. номер автомобиля, трактора | Марка автомобиля, трактора | Наработка объекта за период испытаний, мото-ч, км | Наименование узла |
|---------------------------------|----------------------------|---|-------------------|
| 1 | КАМАЗ-45143 | 62458 км | Коробка передач |
| 2 | КАМАЗ-45143 | 65471 км | Коробка передач |
| 3 | МТЗ-1221 | 1940 мото-ч | Коробка передач |
| 4 | МТЗ-1525 | 1750 мото-ч | Коробка передач |
| 5 | МТЗ-2022 | 1770 мото-ч | Коробка передач |

Время (календарная продолжительность) эксплуатации с февраля 2021 года по ноябрь 2021 года.

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

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

Зав. гаражом

Баранов Г.В.

д.т.н., профессор

Ли Р.И.

к.т.н, доцент, докторант

Псарев Д.Н.

аспирант

Мельников А.Ю.

Приложение Ж
(справочное)

Генеральный директор ООО «Сосновка-Зернопродукт»



Акт внедрения (реализации) результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «Сосновка-Зернопродукт» заведующий гаражом Баранов Г.В. с одной стороны и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., аспирант Мельников А.Ю. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты научной работы по теме «Исследование долговечности и разработка технологии восстановления корпусных деталях автотракторной техники композитом на основе эластомера Ф-40С» 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 композитом на основе эластомера Ф-40С.

Результаты исследований используются на предприятии ООО «Сосновка-Зернопродукт».

Годовой экономической эффект от использования результатов НИР составляет 240 000 (двести сорок тысяч) рублей.

Зав. гаражом
д.т.н., профессор
к.т.н, доцент, докторант
аспирант

Баранов Г.В.
Ли Р.И.
Псарев Д.Н.
Мельников А.Ю.

Приложение 3

Расчет себестоимости восстановления изношенной поверхности отверстия наноккомпозитом эластомера Ф-40С

Себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстия наноккомпозитом эластомера Ф-40С рассчитывали по формуле [158...161]

$$C_{\Pi} = ЗП + C_{\text{м}} + П_{\text{р}} + C_{\text{оуп}} + C_{\text{эл}} + A_{\text{об}}, \quad (3.1)$$

где ЗП – заработная плата рабочих, р/дм²;

$C_{\text{м}}$ – цена ремонтных материалов для восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстия, р/дм²;

$П_{\text{р}}$ – прочие расходы при производстве продукции, р;

$C_{\text{оуп}}$ – накладные расходы на организацию и управление производством, р;

$C_{\text{эл}}$ – затраты на электроэнергию, р;

$A_{\text{об}}$ – амортизационные отчисления на оборудование, р.

Затраты на заработную плату рабочих определяли по выражению

$$ЗП = ЗП_{\text{о}} + ЗП_{\text{д}} + Н_{\text{сс}}, \quad (3.2)$$

где $ЗП_{\text{о}}$ – затраты на основную заработную плату рабочих, р;

$ЗП_{\text{д}}$ – затраты на дополнительную заработную плату рабочих, р;

$Н_{\text{сс}}$ – затраты на начисления социального страхования, р.

Основную заработную плату рабочих рассчитали по формуле

$$ЗП_{\text{о}} = T_{\text{об}} \times C_{\text{ч}}, \quad (3.3)$$

где $T_{\text{об}}$ – общие затраты труда на восстановление 1 дм² изношенной поверхности отверстия, ч;

C_q – часовая тарифная ставка, р/ч.

Трудоемкость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстия в корпусной детали $T_{об}$, определяли в ходе хронометража, как норму времени на выполнение всех операций при восстановлении (таблица 3.1).

При выполнении операций восстановления корпусной детали приняли четвертый разряд слесаря со сдельной оплатой труда и часовым тарифом в 150 руб/ч (по данным ООО «Сосновка-Зернопродукт»)

$$ЗП_о = 0,21 \times 150 = 31,5 \text{ р/дм}^2.$$

Дополнительную заработную плату рабочего определили по формуле

$$ЗП_д = ЗП_о \times K_{дп}, \quad (3.4)$$

где $K_{дп}$ – коэффициент дополнительной оплаты, который составляет 10 % от основной зарплаты рабочего (по данным ООО «Сосновка-Зернопродукт»)

$$ЗП_д = 31,5 \times 0,1 = 3,15 \text{ р/дм}^2.$$

Таблица 3.1 – Норма времени на восстановление 1 дм² изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусной детали нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С

| № п/п | Наименование операции | Норма времени, мин/дм ² |
|-------|--|---------------------------------------|
| 1 | Обезжиривание поверхности | 0,40 |
| 2 | Отбор компонентов нанокompозита | 2,0 |
| 3 | УЗД нанокompозита | 4,0 |
| 4 | Нанесение покрытия из раствора нанокompозита на изношенное отверстие | 0,5 |

| | | |
|---|---|---------------------------------|
| 5 | Загрузка в сушильный шкаф | 0,30 |
| 6 | Выгрузка из сушильного шкафа | 0,30 |
| 7 | Калибрование отверстий с полимерным покрытием | 5,0 |
| 8 | Контроль | 0,25 |
| | Итого: | 12,75 (0,21 ч/дм ²) |

Начисления на социальное страхование рассчитывали по формуле

$$H_{cc} = (ЗП_o + ЗП_d) \times K_{cc}, \quad (3.5)$$

где K_{cc} – коэффициент начислений социального страхования, который составляет 30,2 % от суммы основной и дополнительной зарплаты рабочего.

$$H_{cc} = (31,5 + 3,15) \times 0,302 = 10,46 \text{ р/дм}^2.$$

Заработная плата рабочего при восстановлении 1 дм² изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусной детали

$$ЗП = 31,5 + 3,15 + 10,46 = 45,11 \text{ р/дм}^2.$$

Цена материалов при восстановлении 1 дм² изношенной поверхности отверстий в корпусной детали

$$C_m = H_m \times C_m, \quad (3.6)$$

где H_m – норма расхода материалов при восстановлении 1 дм² изношенной поверхности отверстий в корпусной детали, кг/дм²;

C_m – удельная цена ремонтных материалов, р/кг.

Цена ремонтных материалов, используемых при восстановлении изношенных отверстий в корпусной детали, показана в таблице 5.2.

Таблица 3.2 – Цена ремонтных материалов, используемых при восстановлении 1 дм² изношенной поверхности отверстий в корпусной детали

| № п/п | Наименование материала | Цена р/кг | Расход, кг/дм ² | Стоимость р/дм ² |
|-------|------------------------|-----------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 | Эластомер Ф-40С | 2615 | 0,0012 | 3,14 |
| 2 | Ацетон технический | 150 | 0,015 | 2,25 |
| 3 | УНТ «Таунит-М» | 35800 | 0,00004 | 1,43 |
| | Итого | 38565 | 0,01624 | 626,30 |

$$C_m = 626,3 \text{ р/дм}^2.$$

Прочие расходы состоят из расходов на производство единицы i -го вида продукции и их принимают равными 5 % от заработной платы

$$P_p = 0,05 \times 3P_o, \quad (3.7)$$

$$P_p = 0,05 \times 45,11 = 2,25 \text{ р.}$$

Затраты на организацию и управление производством состоят из командировочных расходов, затрат на амортизацию, электричество, оплату связи, коммунальных и других платежей

$$C_{оуп} = 3P_o \times K_{оуп}, \quad (3.8)$$

где $K_{оуп}$ – коэффициент, который учитывает затраты на организацию и управление производством, $K_{оуп} = 2$.

$$C_{\text{оуп}} = 45,11 \times 2 = 90,22 \text{ р.}$$

Затраты на электроэнергию определяли по формуле

$$C_{\text{эл}} = (W_{y1}T_{\text{оп1}} + W_{y2}T_{\text{оп2}}) \times K_{\text{п}} \text{Ц}_{\text{эл}}, \quad (3.9)$$

где W_{y1} и W_{y2} – установленная мощность потребления электроэнергии ультразвуковой ванны и сушильного шкафа СНОЛ-3.5, 3.5, 3.5/3, кВт;

$T_{\text{оп1}}$ и $T_{\text{оп2}}$ – время на проведение операций ультразвукового диспергирования и термической обработки, ч;

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

$\text{Ц}_{\text{эл}}$ – стоимость электроэнергии за 1 кВт/ч, р.; $\text{Ц}_{\text{эл}} = 4,04$ р.

$$C_{\text{эл}} = (0,055 \times 0,42 + 3,5 \times 3) \times 1,05 \times 4,04 = 44,63 \text{ р.}$$

Амортизационные отчисления на оборудование из расчета на восстановление одной корпусной детали

$$A_{\text{об}} = \frac{0,1 \times (\text{Ц}_{\text{н1}}T_{\text{ос1}} + \text{Ц}_{\text{н2}}T_{\text{ос2}} + \text{Ц}_{\text{н3}}T_{\text{ос3}} + \text{Ц}_{\text{н4}}T_{\text{ос4}})}{R\Phi_{\text{вр}}}, \quad (3.10)$$

где $\text{Ц}_{\text{н1}}$, $\text{Ц}_{\text{н2}}$, $\text{Ц}_{\text{н3}}$, $\text{Ц}_{\text{н4}}$ – цена новых: ультразвуковой ванны, сушильного шкафа, весов лабораторных, калибрующей оснастки, р;

$T_{\text{ос1}}$, $T_{\text{ос2}}$, $T_{\text{ос3}}$, $T_{\text{ос4}}$ – основное время выполнения операций: УЗД, термической обработки, взвешивания компонентов эластомерного состава и калибрования отверстий с полимерным покрытием, ч;

$R\Phi_{\text{вр}}$ – расчетный фонд времени работы оборудования, ч [162].

$$A_{\text{об}} = \frac{0,1 \times (5900 \times 0,37 + 40400 \times 3 + 7780 \times 0,07 + 19740 \times 0,1)}{1971} = 6,36 \text{ р.}$$

Полная себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстий в корпусной детали нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С

$$C_{\text{п}} = 45,11 + 626,3 + 2,25 + 90,22 + 44,63 + 6,36 = 814,87 \text{ р/дм}^2.$$

Годовые затраты на восстановление нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С изношенных посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях сельскохозяйственной техники определяли по формуле

$$Z_{\text{г}} = N \times C_{\text{п}}, \quad (3.11)$$

где N – годовая программа восстановления (общая суммарная площадь восстановления поверхности посадочных отверстий в корпусных деталях), дм².

В ООО «Сосновка-Зернопродукт») в 2021 г корпусные детали не восстанавливали, а заменяли на новые. По результатам выбраковки корпусных деталей общая площадь изношенной поверхности, подлежащей восстановлению, составила $N = 326,29$ дм².

Годовые затраты при восстановлении корпусных деталей сельскохозяйственной техники, по новой, разработанной в диссертации технологии, составит

$$Z_{\text{г}} = 326,29 \times 814,87 = 265\,889 \text{ р.}$$

Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники составит

$$C_{\text{г}} = Z_2 - Z_1, \quad (3.12)$$

где Z_2 – годовые затраты на приобретение новых деталей, р;

Z_2 – годовые затраты на восстановление корпусных деталей по новой технологии, р.

Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С составит

$$C_r = 506\,590 - Z_1 = 240\,701 \approx 240 \text{ тыс. р.}$$