

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МИЧУРИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

КИБА МАРИЯ РОМАНОВНА



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

Специальность 05.20.03 Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент Псарев Д. Н.

Мичуринск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1 Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований.....	11
1.1 Наноразмерные частицы для наполнения полимерных материалов.....	11
1.2 Полимерные материалы и композиты для восстановления посадочных мест подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники.....	17
1.3 Технологические способы обеспечения точности размеров посадочных отверстий при восстановлении полимерными материалами.....	35
1.4 Выводы. Цель и задачи исследований.....	45
2 Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления корпусных деталей нанокompозитами на основе эластомеров.....	48
2.1 Повышение термостойкости композита эластомера при введении металлических наночастиц.....	48
2.2 Деформационно-прочностные свойства композита эластомера наполненного металлическими наночастицами.....	52
2.2.1 Модуль упругости нанокompозита.....	52
2.2.2 Особенности повышения прочности и трещиностойкости эластомерных композитов.....	58
2.2.3 Повышение теплостойкости и теплопроводности композита эластомера при введении металлических наночастиц.....	71
2.3 Технологическое обеспечение точности размеров отверстий с полимерным покрытием при восстановлении корпусных деталей.....	75
3 Методика экспериментальных исследований.....	80
3.1 Общая методика исследований.....	80
3.2 Методика исследования деформационно-прочностных свойств пленок эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.....	83
3.3 Методика исследования адгезии эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.....	88
3.4 Методика исследования теплостойкости эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.....	90

3.5 Методика исследования теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.....	93
3.6 Методика исследования термостойкости эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.....	96
3.7 Методика исследования усилия резания при калибровании покрытий нанокompозита эластомера Ф-40.....	98
3.8 Методика исследования повреждаемости и точностных характеристик покрытий нанокompозита после калибрования.....	104
3.9 Методика исследования долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом на основе эластомера Ф-40.....	105
4 Результаты экспериментальных исследований и их анализ.....	108
4.1 Исследование деформационно-прочностных свойств пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40.....	108
4.1.1 Исследование и оптимизация состава нанокompозита.....	108
4.1.2 Исследование модуля упругости нанокompозита.....	119
4.2 Исследование адгезии нанокompозита на основе эластомера Ф-40.....	121
4.3 Исследование теплостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40.....	122
4.4 Исследование теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.....	124
4.5 Исследование термостойкости эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе в условиях ОДКВ.....	127
4.6 Исследование зависимости усилия резания покрытий нанокompозита от переднего угла режущей кромки калибра-резца.....	129
4.7 Исследование повреждаемости и точностных характеристик покрытий нанокompозита после калибрования.....	132
4.8 Исследование долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом эластомера Ф-40.....	136
5 Реализация результатов исследований и их	

технико-экономическая оценка.....	141
5.1 Технологические рекомендации.....	141
5.2 Расчет экономической эффективности технологии восстановления корпусных деталей нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области.....	142
Заключение.....	149
Библиографический список.....	151
Приложения.....	165

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность отечественного сельскохозяйственного производства России в значительной степени определяется ценой производимой продукции. Затраты на технический сервис сельскохозяйственной техники и технологического оборудования перерабатывающих предприятий составляют существенную статью в себестоимости сельскохозяйственной продукции.

Восстановление изношенных деталей позволяет значительно снизить затраты на ремонт машин и оборудования, повысить его надежность. Для восстановления требуется в 20-30 раз меньше металла, чем при изготовлении аналогичных новых деталей. Исключив металлургический цикл производства при восстановлении 1 тн стальных деталей экономится 180 кВт/ч электроэнергии, 0,8 тн угля, 0,5 тн известняка, 175 м³ природного газа [1].

Увеличение объемов восстановления деталей это мировая тенденция. Высокие объемы восстановления деталей имеют место в Северной Америке и Европе. В США восстановление деталей проводят с 1940 г., в Англии с 1945 г., в Германии с 1947 г. По данным ГОСНИТИ в настоящее время в развитых странах (США, Япония) доля восстановленных деталей в общем объеме потребления запасных частей достигает 35-40%. В СССР 1986 г. она составляла 19,5%, в современных условиях России доля восстановленных деталей в поставках новых запасных частей составляет 8...9% [2].

Наиболее высокий экономический и технический эффект достигается при восстановлении корпусных деталей техники. Это объясняется большой материалоемкостью и ценой последних с одной стороны и относительно не высокими затратами на восстановление с другой стороны.

К преимуществам современных технологий восстановления следует отнести возможность устранения повышенных износов и увеличения послеремонтного технического ресурса детали, что повышает соответственно надежность узлов, агрегатов и машины в целом [3...29].

При дефектации корпусных деталей, последние в большинстве случаев выбраковывают по причине износа посадочных отверстий под подшипники качения. Этот дефект приводит к изменению относительного расположения валов, шестерен и подшипников в агрегатах трансмиссии сельскохозяйственной техники. Соответственно нарушается соосность и параллельность валов, изменяется взаимное положение сопрягаемых поверхностей деталей. Перекос осей отверстий в корпусной детали агрегата трансмиссии приводит к перекосу наружного и внутреннего колец подшипников, меняет взаимное положение зубьев шестерен вследствие чего на них существенно увеличиваются контактные напряжения. При перекосе колец подшипника повышаются напряжения в зоне контакта нагруженных тел с беговой дорожкой, что приводит к снижению его долговечности.

Если нарушена параллельность валов, это приводит к изменению межцентрового расстояния между шестернями, увеличению контактных напряжений на зубьях, появлению следов усталостного выкрашивания, излома, отказу агрегата.

Подшипниковые отверстия корпусных деталей изнашиваются в основном вследствие фреттинг-коррозии сопрягаемых поверхностей в посадках подшипников [30...34].

Изношенные корпусные детали сельскохозяйственной техники восстанавливают различными способами: установкой дополнительной детали, различными видами ручной и механизированной наплавки, электроконтактной приваркой стальной ленты и др. [3]. Недостатками большинства способов являются: необходимость в сложном технологическом оборудовании, потребность в персонале высокой квалификации, проведении механической обработки отверстий до и после наращивания, высокие энергопотребление и затраты, низкая фреттингостойкость отверстий после восстановления.

Технологии восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях полимерами включают достаточно простые операции, не требуют больших затрат, обеспечивают полную фреттингостойкость отверстий после восстановления, многократное повышение ресурса подшипниковых узлов [9, 13...18, 22].

Перспективным направлением, обеспечивающим высокую эффективность восстановления посадочных отверстий корпусных деталей, является разработка полимерных композитов. Благодаря наполнению полимерной матрицы высокодисперсными частицами, существенно повышаются потребительские свойства материала и понижается его цена [9, 13...15]. Большую научную и практическую актуальность имеют исследования и последующая разработка новых полимерных нанокомпозитов. В настоящее время отечественные товаропроизводители предлагают большой перечень наночастиц материалов, что создает предпосылки для разработки перспективных высокоэффективных технологических процессов восстановления, которые могут увеличить послеремонтный ресурс корпусных деталей, повысить надежность и сократить затраты при ремонте техники.

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

Для компенсации износа посадочных отверстий подшипников в корпусных деталях при восстановлении используют анаэробные герметики, акриловые адгезивы, эластомеры и композиты на их основе. Анализ способов восстановления, в которых используются вышеуказанные материалы, показал, что наиболее технологичным является восстановление отверстий нанесением покрытия из растворов эластомеров и композитов на их основе.

В настоящее время в России выпускается широкий ассортимент наночастиц различной формы, размера, органической и не органической природы. Однако, вопрос обоснования выбора наночастиц для наполнения эластомеров, которые будут применяться при восстановлении посадочных отверстий корпусных деталей, не изучен и требует всестороннего исследования.

Проведенный литературный обзор показал, что вопрос влияния наночастиц на теплопроводность, тепло- и термостойкость, прочность и долговечность эластомеров не изучен и требует исследования.

Представляют большой научный и практический интерес исследования механических, теплофизических свойств и разработка полимерного нанокompозита на основе эластомера Ф-40.

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

Настоящая работа посвящена повышению эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 за счет обеспечения точности размеров полимерных покрытий, увеличения их тепло- и термостойкости, теплопроводности, обеспечения высокой долговечности восстановленных посадок подшипников.

Научная новизна диссертации заключается в теоретическом обосновании повышения тепло- и термостойкости, теплопроводности, прочности и долговечности посадок подшипников качения, восстановленных композитами на основе эластомеров, наполненных металлическими наночастицами, регрессионной модели удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40, исследовании деформационно-прочностных и адгезионных свойств, теплопроводности, тепло- и термостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40, определении оптимальных геометрических параметров режущей кромки калибра, исследовании повреждаемости и отклонений от заданных размеров полимерных покрытий после механической обработки калибром, долговечности посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом.

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

Объект исследований. Пленки и полимерные покрытия, подшипники качения, посадки «корпус-подшипник», восстановленные нанокompозитом на основе эластомера Ф-40.

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

В диссертации разработаны новый полимерный нанокompозит оригинального состава и технология для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники. Технология восстановления внедрена в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района, Липецкой области.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Липецкой области в рамках научного проекта №17-48-480268/17 по теме «Методология исследования полимерных композиционных наноматериалов и разработки технологии и оборудования для восстановления корпусных деталей транспорта и технологического оборудования металлургических и машиностроительных предприятий Липецкой области» и планом госбюджетных научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО МичГАУ на 2016...2020 годы по теме № 6 «Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта деталей с.-х. техники и оборудования» на кафедре «Стандартизация, метрология и технический сервис» Мичуринского государственного аграрного университета.

Материалы диссертационной работы прошли апробацию и обсуждение на:

- научных конференциях сотрудников ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ в 2015...2020 гг.;
- XIX международной научно-практической конференции «Повышение эффективности и экологические аспекты использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве», ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов), 2016 г.;
- XII Международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления», ЛГТУ (г. Липецк), 2017 г.
- XV Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». 19-20 марта 2020 г. (г. Курск);

- II Международной научно-технической конференции «Автомобили, транспортные системы и процессы». 22 мая 2020 г. (г. Курск);
- заседании кафедры «Стандартизация, метрология и технический сервис» ФГБОУ ВО МичГАУ в 2020 г.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 25 печатных работах, в том числе 5 публикаций в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 4 публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки, и 3 патента на изобретение РФ (приложения А..В).

Диссертационная работа содержит: введение, пять глав, общие выводы, библиографический список и приложения. Объем работы 176 страницы машинописного текста. Диссертация включает 74 рисунка, 15 таблиц, 8 приложений и библиографический список из 140 наименований.

На защиту выносятся:

- теоретические предпосылки повышения эффективности эластомеров для восстановления корпусных деталей при введении металлических наноразмерных наполнителей;
- регрессионная модель удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40, результаты экспериментального исследования деформационно-прочностных и адгезионных свойств, теплопроводности, тепло- и термостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40, калибрования, оценки качества и точности покрытий нанокompозита после механической обработки калибром, долговечности посадок подшипников качения восстановленных новым нанокompозитом;
- технология восстановления посадочных отверстий корпусных деталей нанокompозитом Ф-40 и оценка ее технико-экономической эффективности.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Наноразмерные частицы для наполнения полимерных материалов

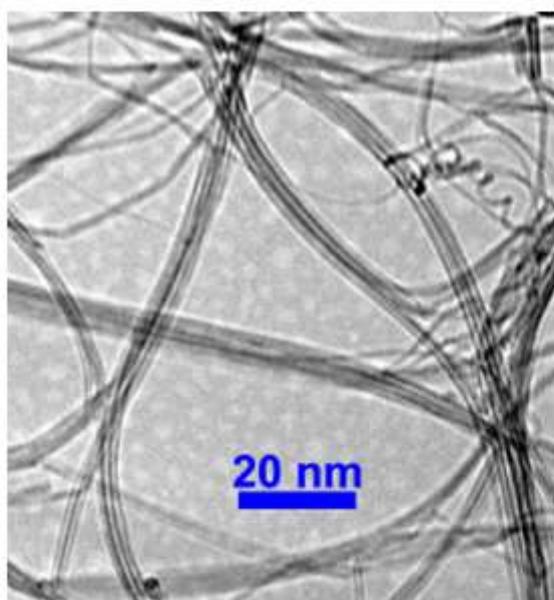
Наноструктурированные композиты (Nanostructured composites) это материалы, в которых наночастицы наполнителя в небольшом количестве введены в раствор (расплав) материала матрицы (металл или полимер). При отверждении (охлаждении) раствора (расплава) формируются структуры, которые отличаются структуры не наполненного материала матрицы. Введение наночастиц наполнителя изменяет в лучшую сторону физико-механические, теплофизические и др. потребительские свойства полимерных нанокомпозитов. Содержание наночастиц наполнителя в наноструктурированных материалах как правило не превышает 5 масс.% [35].

В качестве наполнителей в настоящее время используют наночастицы металлов, неметаллов, сплавов, оксидов, нитридов, карбидов, силикатов и др. [36]. Форма наночастиц различна: нанотрубки (простые и многослойные типа «русская матрешка», «шестигранная призма» или «свиток»), нановолокна, сферической и нерегулярной формы, слоистые неорганические структуры (наноглины) [37].

Нанотрубки и нановолокна

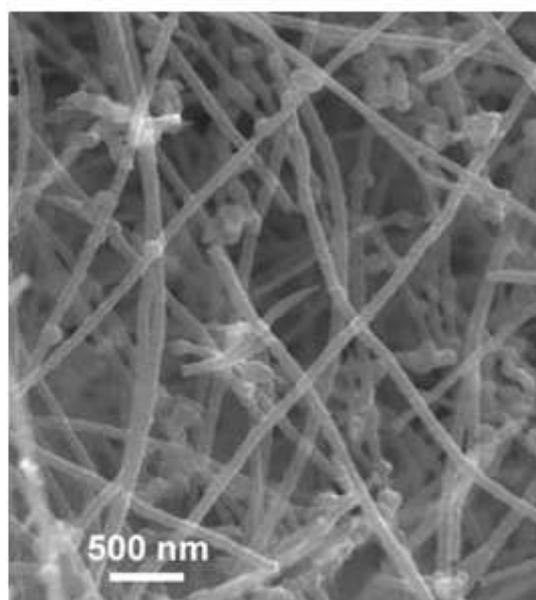
Углеродные однослойные и многослойные нанотрубки, нановолокна простые и графитизированные, нанотрубки с привитыми слоями и функциональными группами делят по длине на короткие и длинные. Длинные нанотрубки и нановолокна имеют протяженность от 5 до 30 мкм, диаметром от 1 до 20 нм, обычно взаимно переплетены [38]. Короткие имеют длину от 0,5 до 2 мкм, диаметр от 20 до 50 нм, хорошо диспергируются в различных средах.

Металлические нанотрубки представлены следующими составами: B_4C , BN , LaF_3 , SiC , TiS_2 , MoS_2 , ZrS_2 . Габаритные размеры нанотрубок: длина от 3 до 30 мкм, наружный диаметр от 25 до 100 нм, внутренний от 10 до 80 нм.



а)

индивидуальные (единичные);



б)

переплетение нанотрубок

Рисунок 1.1 – Нанотрубки [38]

Нанотрубки из оксидов и гидроксидов металлов:

Y_2O_3 , MgO , TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $K_2Ti_6O_{13}$, $CaSnO_3$, $BaSnO_3$, CuO ,
 La_2O_3 , $Ni(OH)_2$

и др, имеют длину от 0,2 до 20 мкм, наружный диаметр от 40 до 200 нм, внутренний диаметр – от 15 до 150 нм.

Потребителю также предлагают короткие нановолокна и наностержни: металлические (Ag , Bi , In , Si), полупроводниковые (GaP , InP), нитридные (Si_3N_4) и оксидные (TiO_2).

Наночастицы сферической или нерегулярной формы

Материал наночастиц из металлов и сплавов:

Ag , Au , Pt , Pd , Al , Cr , Cu , W , Mo , Ni , Fe , $Cu - Zn$, $Fe - Ni$, $W - Cu$, $W - Mn - Al$,
 $W - Ni - Cu$, $W - Ni - Fe$;

неметаллов: (B , Si); нитридов: AlN , BN , CrN , Si_3N_4 , TiN , ZrN ; карбидов:
 B_4C , Mo_2C , TiO_2 , SiC , TiC ; боридов: TiB_2 , NbB_2 ; а также сложных компаундов:
 $Si_3(C_{0.5}N_{0.5})_4$, $TiC_{1-x}N_x$.

Форму сфер и чешуек имеют также частицы наноалмаза и графита (С), простых и сложных оксидов. Размеры частиц колеблются в диапазоне от 15...30 до 400...600 нм.

Слоистые неорганические структуры

Форму слоистых чешуек имеют природные неорганические структуры: монтмориллонит [39...41], гекторит [39, 42], вермикулит [43], каолин, сапонит [44] и др. Размеры слоев: длина до 200 нм, ширина около 1 нм, толщина до 100 нм.

Наибольшее распространение для восстановления неподвижных соединений получили нанокompозиты наполненные углеродными нанотрубками (УНТ) и нанопорошками металлов (*Al, Cu* и др.) и оксидов металлов (Al_2O_3 – бемит) [Коненко, Демин, Малюгин].

Для получения УНТ используют три основных способа: дуговой способ, способ лазерной абляции и пиролиз углеводородов [45].

Методы получения наночастиц металлов представлены на рисунке 1.2 [46-47]. Способы получения наночастиц металлов делят на две группы: физические и химические методы. Особенности способов позволяют получить наночастицы различной размерности, в широком спектре физико-механических, теплофизических, химических и других свойств. Способы и технологии на их основе отличает техническая сложность, производительность, экологичность, энергопотребление, комплекс потребительских свойств (размер, форма, физические, химические и др. свойства) синтезируемых наночастиц [48...50].

УНТ содержат двойные углеродные связи, к которым могут присоединяться различные радикалы, химические соединения, полимерные цепочки. Поэтому при введении УНТ в полимерную матрицу полимерные цепочки могут удлиняться, а деформационно-прочностные свойства повышаться [51]. В таблице 1.1 показаны прочность и модуль упругости композитных нитей с увеличением содержания УНТ в матрице из нефтяной смолы.

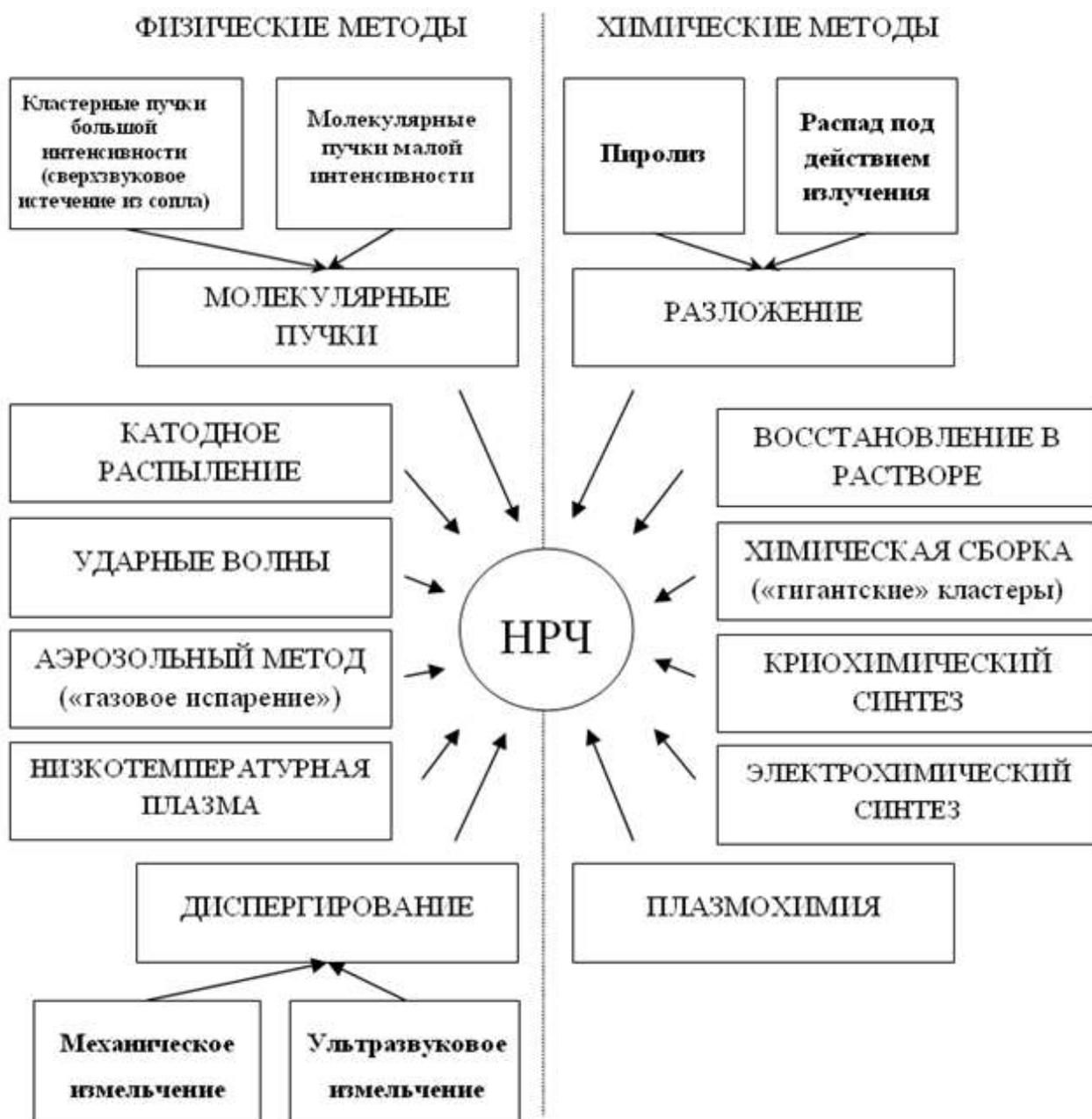


Рисунок 1.2 – Способы получения наноразмерных частиц металлов [46]

Таблица 1.1 – Деформационно-прочностные свойства композитных нитей с различным содержанием УНТ [51]

№ п/п	Содержание УНТ в композите, мас.%	0	1	5
1	Прочность при разрыве, МПа	570	620	850
2	Модуль упругости, ГПа	34	41	78

Как следует из таблицы 1.1 с увеличением содержания УНТ в композите до 5 мас.% прочность повышается до 1,5 раз, а модуль упругости до 2,29 раза.

Однако такие значительные изменения механических свойств возможны при обеспечении однородного характера заполнения матрицы УНТ. В противном случае образуются жгуты, включающие в себя около сотни плотноупакованных индивидуальных УНТ. Между жгутами, которые имеют различную ориентацию в полимерной матрице образуются области, заполненные полимерным материалом, а также возможны пустоты в виде продольных эллиптических разломов. В случае неоднородного характера заполнения матрицы УНТ композит имеет место повышенную хрупкость. Причиной является разрушение индивидуальных нанотрубок при относительно незначительных нагрузках. Поэтому для обеспечения однородного заполнения матрицы УНТ, и соответственно высоких деформационно-прочностных свойств композита, требуются технически достаточно сложные способы диспергирования частиц наполнителя. Например, суспензию УНТ в этаноле подвергают ультразвуковой обработке в течение 2 ч, чтобы отделить нанотрубки друг от друга, затем суспензию УНТ смешивают с эпоксидной смолой механизированным способом, после чего смесь подвергают термической обработке в течение 10 ч в вакууме при температуре 50°C. В заключение в смесь добавляют отвердитель и помещают ее в вакуумную камеру на 10...15 мин для удаления сорбированного воздуха. Подобный способ обработки усложняет и удорожает технологию приготовления и применения композита по назначению.

В таблице 1.2 представлены результаты исследования деформационно-прочностных и трибологических свойств ПТФЭ и композитов на его основе, наполненных простыми (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2) и сложными (шпинели $CoAl_2O_4$, $MgAl_2O_4$, кордиерит $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$) оксидными нанопорошками [50...51].

Как следует из таблицы 1.2 композиты, наполненные оксидом алюминия, оксидом хрома и кордиеритом, имеют деформационно-прочностные свойства близкие к не наполненному ПТФЭ. Композит, наполненный шпинелями, имеет более высокую деформацию и незначительно прочность. В остальных компози-

тах наблюдается снижение деформационно-прочностных свойств. Благодаря высокой твердости надмолекулярных сферолитов простых и сложных оксидных нанопорошков имеет место более высокая износостойкость (меньшая скорость изнашивания) и коэффициент трения в сравнении с ПТФЭ, однако для композитов, предназначенных для восстановления посадочных мест подшипников, эти параметры не являются основными [9, 15, 52, 53]. Поэтому применение оксидных нанопорошков в качестве наполнителей для композитов, предназначенных для восстановления посадочных мест подшипников, можно считать нецелесообразным.

Таблица 1.2 – Деформационно-прочностные и трибологические свойства ПТФЭ и композитов на его основе [36]

Состав	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Скорость изнашивания, мг/ч	Коэффициент трения
ПТФЭ	20-22	300-320	70-75	0,04
ПТФЭ + кокс	16-18	290-300	12-16	0.15-0.30
ПТФЭ + MoS ₂	18-20	160-180	40-45	0.20-0.30
ПТФЭ + 2 мас.% Al ₂ O ₃	20-25	300-320	0.4-1.2	0.18-0.20
ПТФЭ + 2 мас.% Cr ₂ O ₃	18-22	310-330	5.0-5.6	0.20-0.22
ПТФЭ + 2 мас.% ZrO ₂	17-20	300-320	4.6-48	0.17-0.19
ПТФЭ + (2.0 – 3.5)мас.% CoAl ₂ O ₄	19-24	330-400	1.2-4.3	0.15-0.18
ПТФЭ + (2 – 5)мас.% MgAl ₂ O ₄	18-22	300-310	0.6-3.4	0.17-0.19
ПТФЭ + (2 – 5)мас.% 2MgO • 2Al ₂ O ₃ • 5SiO ₂	22-23	310-320	3.0-5.4	0.18-0.19

В работах Бочарова А.В. и Машина Д.В. [54, 55] приведено теоретическое и экспериментальное обоснование выбора микроразмерных, а в работе Малюгина В.А. – наноразмерных нанопорошков из металлов для наполнения композитов, предназначенных для восстановления посадочных мест подшипников [56]. Поэтому представляет научный и практический интерес исследование нанопорошков из металлов в качестве наполнителей для композита на основе эластомера Ф-40.

1.2 Полимерные материалы и композиты для восстановления посадочных мест подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники

В настоящее время для компенсации износа посадочных отверстий подшипников в корпусных деталях при восстановлении используют анаэробные герметики, акриловые адгезивы, эластомеры и композиты на их основе.

Анаэробные герметики отличаются способностью длительно сохранять свои первоначальные свойства без изменений и с высокой скоростью полимеризоваться в зазоре между сопрягаемыми металлическими деталями после вытеснения из зазора кислорода воздуха [57]. Анаэробные герметики имеют хорошую адгезию к металлам, высокую стойкость к различным контактным средам: вода, трансмиссионные, моторные и индустриальные масла, топлива, органические растворители, кислоты, щелочи и др. Герметики после отверждения работоспособны при эксплуатационной температуре в диапазоне от -60 до +175 °С [58].

В основе анаэробных герметиков лежат полимеризационно-способные соединения акрилового ряда, преимущественно диметилакриловые эфиры полиалкиленликолей, которые с высокой скоростью преобразуются в пространственно сшитые полимеры. Анаэробные герметики также содержат ингибирующие и иницирующие системы, благодаря которым обеспечивается длительное хра-

нение герметиков и быстрое отверждение, различные загустители для придания необходимых тиксотропных свойств, модификаторы, красители и другие компоненты [59].

Корпорация Henkel (Германия) предлагает анаэробные герметики марки Loctite 620 и Loctite 638, которые применяют для фиксации подшипников качения в отверстиях автоматических коробок передач [60]. Компания Three Bond (Япония) выпускает анаэробный герметик марки TB1324 такого же назначения [61].

В России анаэробные герметики марок «Анатерм» и «Унигерм» производит в большой номенклатуре НИИ полимеров им. Каргина [59].

Главным недостатком, который ограничивает широкое использование анаэробных герметиков это относительно высокая цена. В этой связи, чтобы повысить экономическую эффективность восстановления в материал вводят различные наполнители.

В работе Купреева М. П. предложены композиты на основе анаэробных герметиков, предназначенные для восстановления посадочных мест подшипников [62]:

- 1) микроразмерные частицы железа – 15% от общей массы, анаэробный герметик – остальное;
- 2) микроразмерные частицы бронзы или меди – 15%; анаэробный герметик – остальное;
- 3) тальк – 25%; микроразмерные частицы железа – 5%; анаэробный герметик – остальное;
- 4) графит – 25%; микроразмерные частицы бронзы, меди или железа – 0,1%; анаэробный герметик – остальное;
- 5) микроразмерные частицы алюминия – 25%; микроразмерные частицы бронзы, меди или железа – 0,1%; анаэробный герметик – остальное.

Профессором Котиным А. В. с сотрудниками МГУ им. Н.П. Огарева разработан композит для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники. Состав композита: анаэробный герметик Анатерм-

6В – 100масс.ч., тальк – 20масс.ч., микроразмерные частицы бронзы – 1...2масс.ч. [14].

В работе Кондрашина С.И. разработан композит для восстановления неподвижных соединений подшипников качения [63]. Состав композита: (в % от общей массы): анаэробный герметик АН-111 – 100; микротальк Талькон Т-20 – 9,6; микроразмерные частицы бронзы БПП-1 – 1,2. Прочность клеевого соединения композита при равномерном отрыве (рисунок 1.3) увеличилась на 17% (до 21,8 МПа) в сравнении с ненаполненным герметиком (18,6 МПа). Недостатком материала является его склонность к старению в процессе эксплуатации.

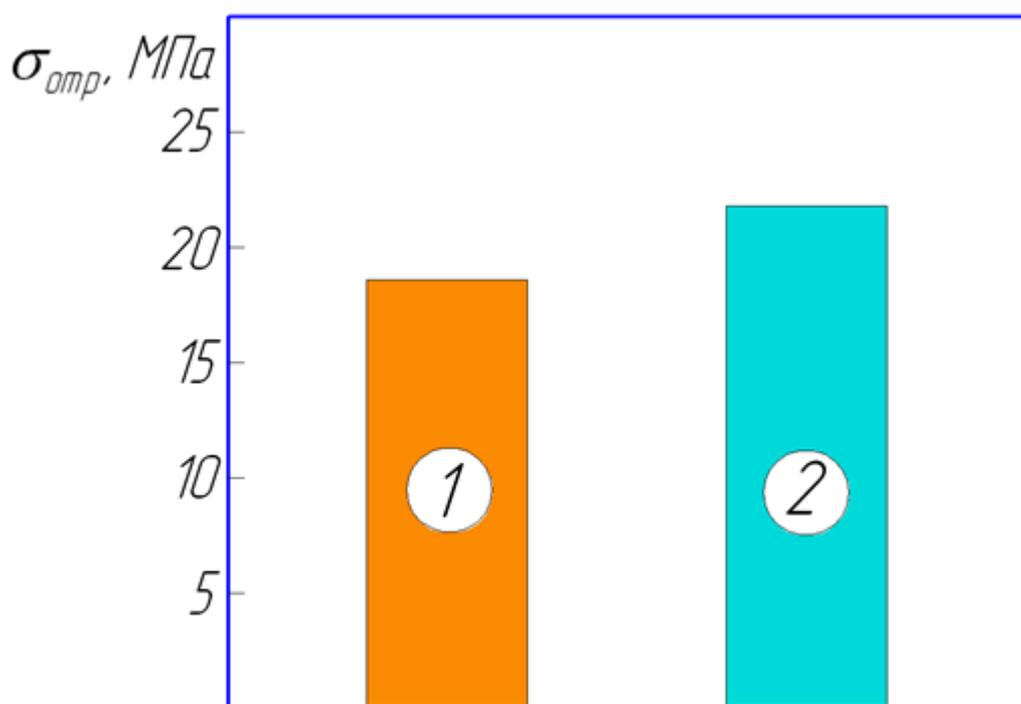


Рисунок 1.3 – Прочность клеевого соединения, выполненного анаэробным герметиком АН-111 (1) и композитом на его основе (2) [63]

Для восстановления посадочных мест подшипников в тяжело нагруженных подшипниковых узлах в работе Бочарова А.В. предложен композит [54]. Состав композита: анаэробный герметик АН-112 – 100%, микроразмерные частицы алюминия ПАП-1 – 12%; микроразмерные частицы алюминия бронзы БПП-1 – 0,35%. Следует отметить, что в сравнении с не наполненным герметиком АН-112, удельная работа разрушения композита увеличилась в 1,33 раза, ресурс

восстановленных посадок увеличился до 30%, коэффициент теплопроводности – 23 раза (рисунок 1.4), благодаря чему повысился теплоотвод и нагрев подшипниковых узлов снизился на 12°C.

Деминым В. Е. разработан нанокомпозит на основе герметика АН-111 [64]. Состав нанокомпозита: анаэробный герметик АН-111 – 78,08%; акриловый лак АК-506 – 21,7%; наночастицы сплава железа с никелем – 0,22%.

Прочность клеевых соединений нанокомпозита, в сравнении с не наполненным полимером увеличилась в 1,22 раза, от 23 до 28,2 МПа.

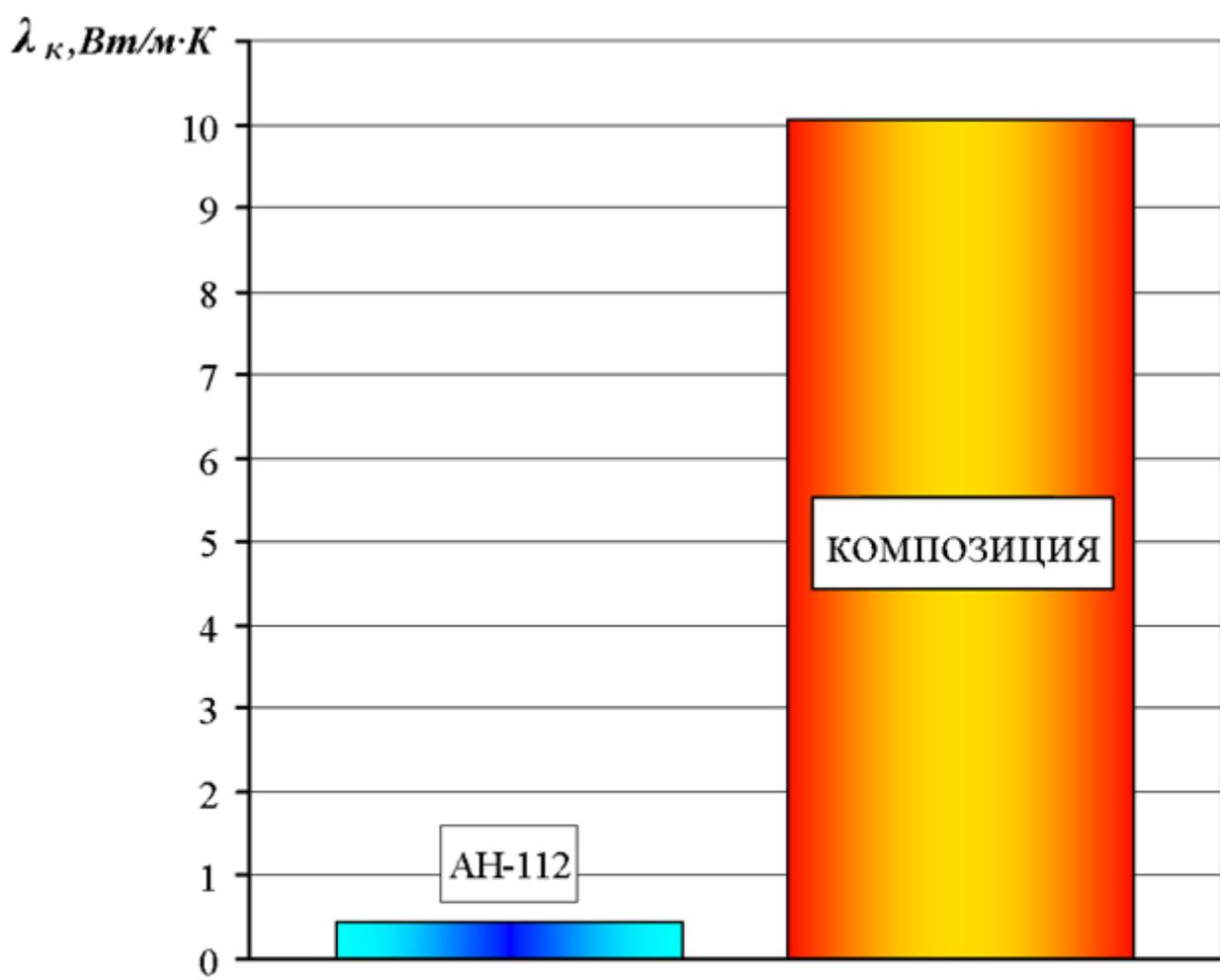


Рисунок 1.4 – Теплопроводность анаэробного герметика АН-112 и композита на его основе [54]

Недостатком вышеуказанного состава являются завышенные требования к точности содержания наполнителей. Это усложняет операцию приготовления композита, повышает ее трудоёмкость и соответственно цену.

В работе Малюгина В.А. теоретически и экспериментально обоснован выбор металлических наночастиц алюминия и меди при наполнении анаэробного герметика АН-111. По результатам исследований разработан оригинальный состав нанокompозита: анаэробный герметик АН-111 – 100*масс.ч.*, наночастицы алюминия – 1,0*масс.ч.*, наночастицы меди – 0,25*масс.ч.* [56]. В сравнении с не наполненным герметиком прочность клеевых соединений нанокompозита увеличилась в 1,28 раза, от 26,4 до 33,8 МПа, деформация в 1,15 раза, от 8,2 до 9,5%, удельная работа разрушения в 1,27 раза, от 71,2 до 90 МДж/м³ (рисунки 1.5...1.7).

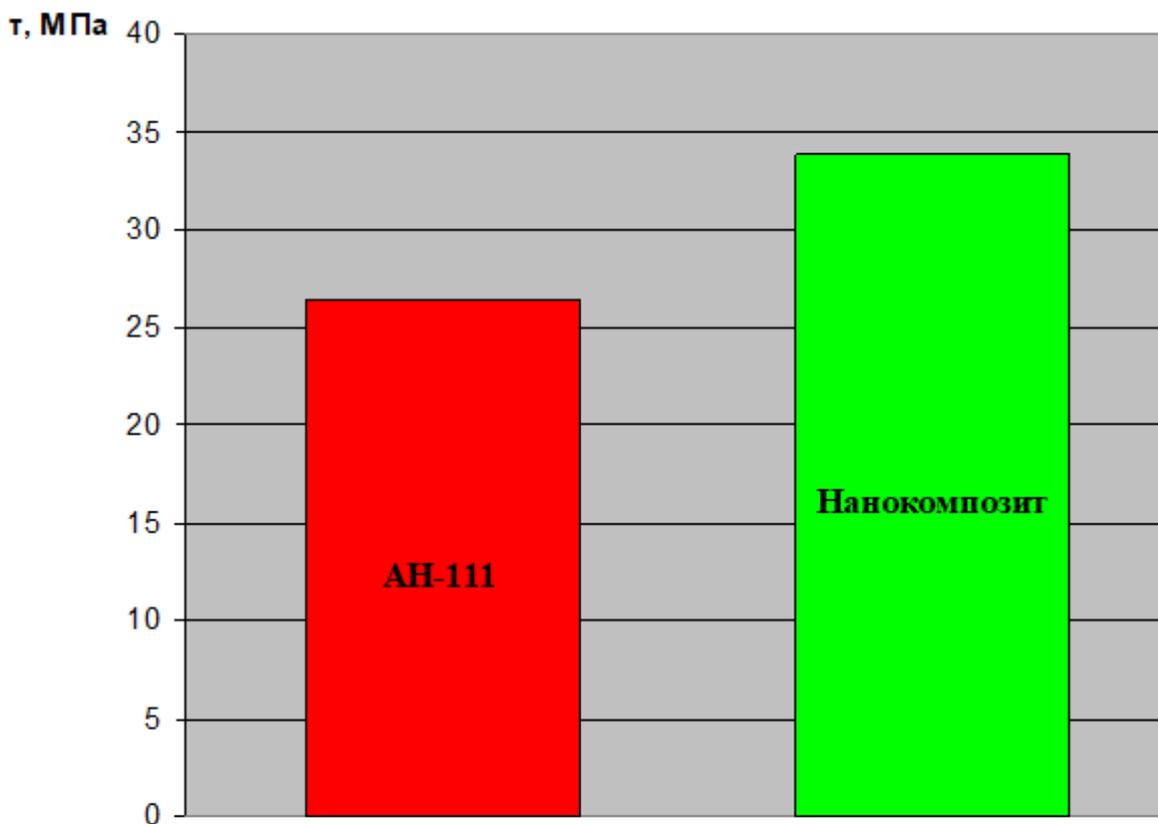


Рисунок 1.5 – Прочность τ клеевых соединений герметика АН-111 и нанокompозита на его основе [56]

После ввода металлических нанопорошков коэффициент теплопроводности нанокompозита увеличился, в сравнении с не наполненным полимером, до 5,26 раза (рисунок 1.8) от 0,41 до 2,16 Вт/м*К.

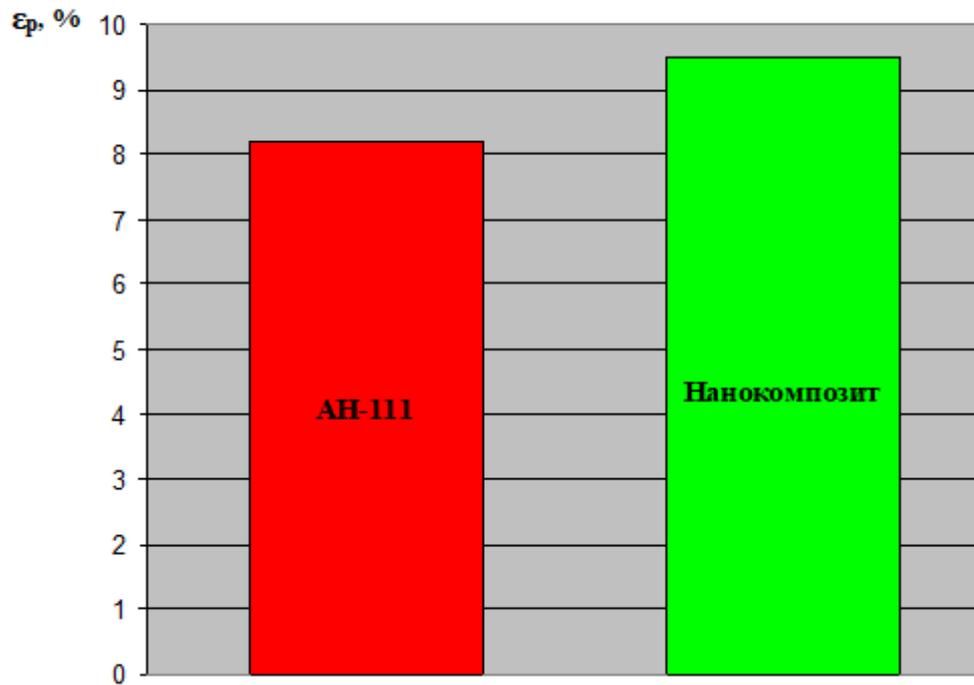


Рисунок 1.6 – Относительное удлинение ϵ_p клеевого шва соединений герметика АН-111 и наноккомпозита на его основе [56]

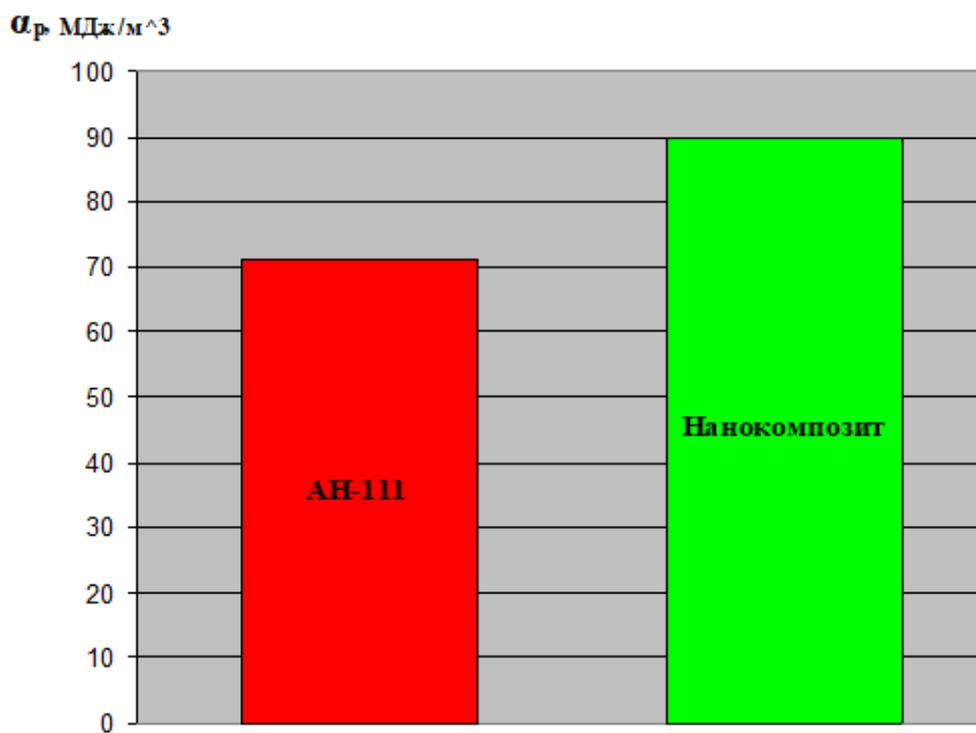


Рисунок 1.7 – Удельная работа разрушения α_p клеевых соединений герметика АН-111 и наноккомпозита на его основе [56]

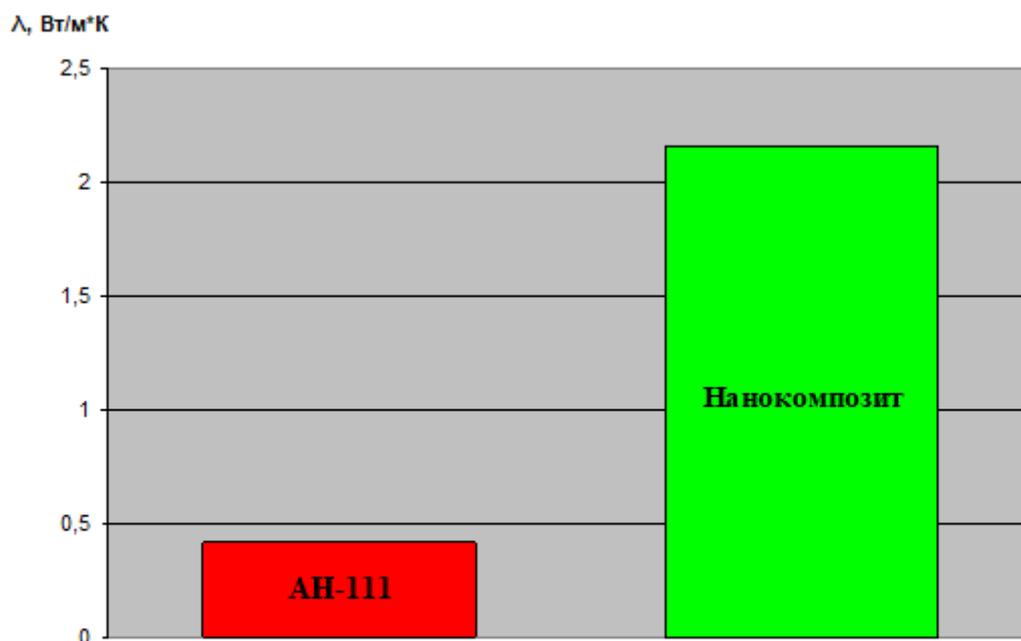


Рисунок 1.8 – Коэффициент теплопроводности герметика АН-111 и наноккомпозита на его основе [56]

Стендовые испытания на выносливость посадок подшипников, восстановленных наноккомпозитом показали, в сравнении с не наполненным герметиком, увеличение ресурса до 1,42 раза. Это позволяет восстанавливать посадочные места подшипников с большим износом, т.е. имеет место повышение эффективности технологии восстановления.

Результаты исследований на рисунках 1.5...1.8 показывают перспективность применения металлических нанопорошков для наполнения полимерных материалов. Наночастицы обеспечивают существенное улучшение физико-механических свойств наноккомпозита в сравнении с не наполненным анаэробным герметиком АН-111.

НИИ полимеров им. академика Каргина (Нижегородская область РФ) производит акриловый клей АН-105. Назначение адгезива – склеивание металлов, стекла, керамики и пластмасс. Материал включает две компоненты А и Б. При смешении компонентов начинается процесс полимеризации адгезива. Отверждение проводят при комнатной температуре. с образованием клеевого шва, имеющего высокую стойкость к вибрации и ударным нагрузкам, большую прочность и высокую скорость отверждения.

В работе Щетинина М.В. приведены результаты исследования деформационно-прочностных свойств АН-105 (рисунок 1.9).

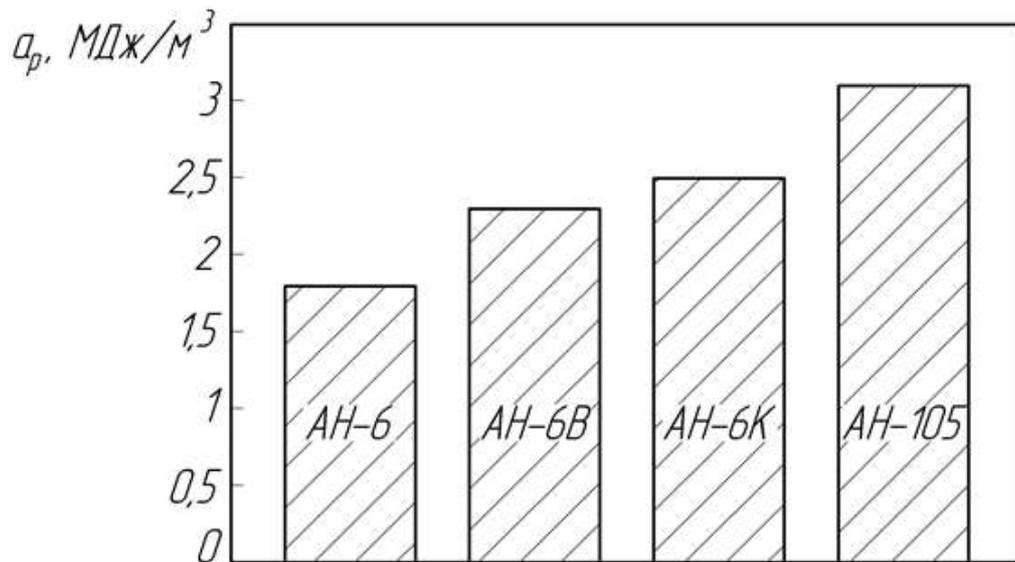


Рисунок 1.9 – Удельная работа разрушения анаэробных герметиков и акрилового адгезива АН-105 [65]

Адгезив АН-105 отличается более высокими деформационно-прочностными свойствами, в сравнении с анаэробными герметиками АН-6, АН-6В и АН-6К. Минимальную удельную работу разрушения имеют пленки анаэробного герметика АН-6 – 1,8 МДж/м³, максимальную – образцы пленок АН-105 – 3,1 МДж/м³ [65]. Деформационно-прочностные свойства пленок клея АН-105 выше аналогичного показателя герметиков: АН-6 в 1,72; АН-6К – 1,24 раза. По итогам проведенных исследований разработана технология восстановления посадок подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники.

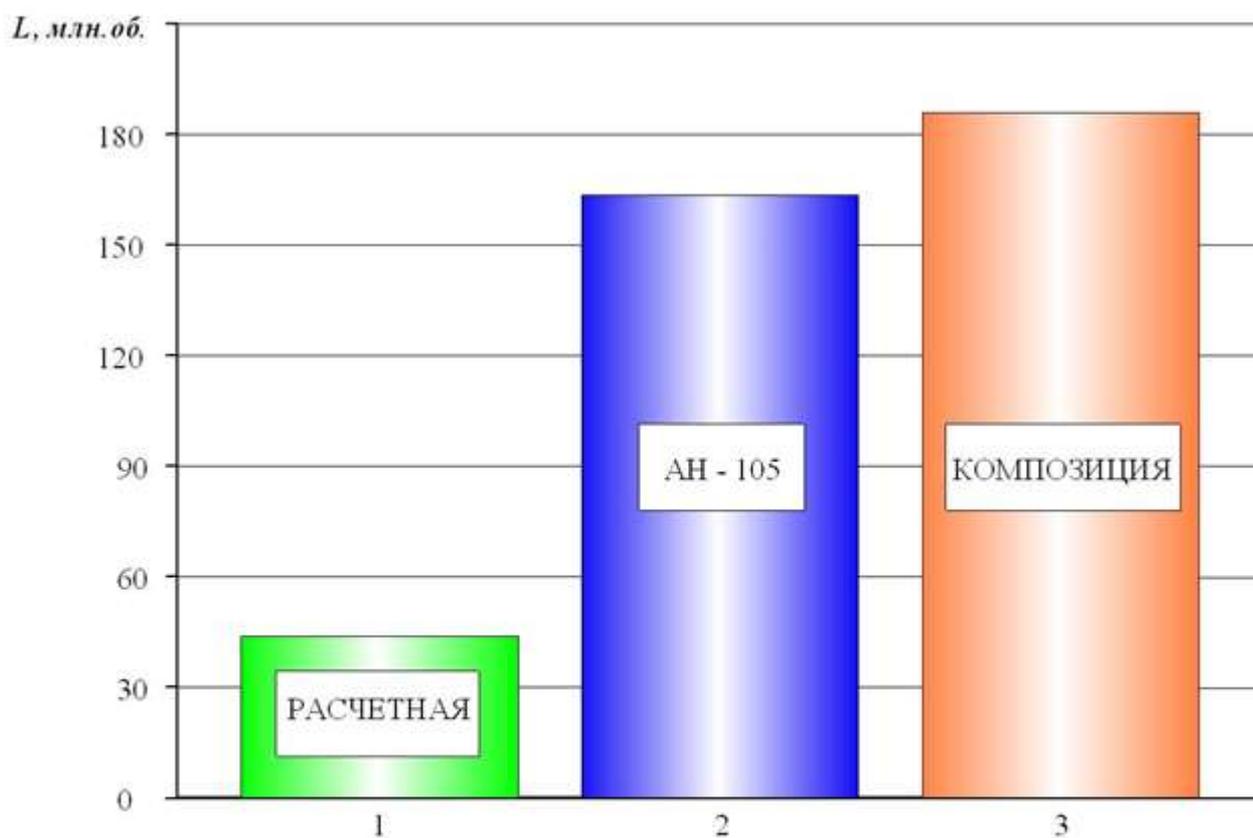
Бутиным А.В. предложен полимер-полимерный композит на основе акрилового клея АН-105 [66]. Для эластификации, повышения ударной прочности, снижения температуры и вибранагруженности восстановленных подшипниковых узлов в матрицу АН-105 введен эластомер Ф-40.

Исследования показали, что в сравнении с не наполненным АН-105, прочность пленок композита увеличилась на 43,3% до 16,2 МПа, деформация – 1,32

раза до 23,3%, удельная работа разрушения на 43,9% до 4,62 МДж/м³. Композит стал эластичнее АН-105 на 54%. Модуль механических потерь уменьшился от 2,313 до 1,067 МПа [67].

При циклическом нагружении температура деталей подшипникового узла, с посадкой, восстановленной композитом, снизилась на 7°С в сравнении с ненаполненным клеем АН-105, а амплитуда вибрации подшипникового узла уменьшилась до 9% меньше чем у ненаполненного адгезива.

Стендовые испытания показали, что в сравнении с не наполненным АН-105, долговечность подшипника с посадкой, восстановленной композитом, на 15% выше, достигает 186,72 млн.об. и в 4,4 раза превышает расчетную долговечность (рисунок 1.10).



1 – расчетная; 2 – с посадкой восстановленной акриловым клеем АН-105;
3 – с посадкой восстановленной композитом клея АН-105

Рисунок 1.10 – Долговечность L подшипника 209 при циркуляционном нагружении наружного кольца [68]

Бутиным А.В. разработана технология восстановления неподвижных соединений подшипников качения полимер-полимерным композитом на основе акрилового клея АН-105, внедренная в ОАО «Большие Избищи» Данковского районов Липецкой области [68].

При восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники хорошо себя зарекомендовали эластомеры отечественного производства: ГЭН-150(В), герметик 6Ф, лаки Ф-40 и Ф-40С [9, 15, 69...74]. Герметик 6Ф, лаки Ф-40 и Ф-40С имеют одинаковую основу. Отличие в том, что герметик 6Ф поставлялся в сухим в виде рулонов. Перед использованием его нарезали на кусочки и растворяли в ацетоне в течение суток. Лаки Ф-40 и Ф-40С поставляются в виде раствора и готовы для применения. Отличие лаков Ф-40 и Ф-40С в том, что бутадиен-нитрильный каучук СКН-40 в лаках разных производителей. По этой причине потребительские свойства лаков Ф-40 и Ф-40С несколько отличаются.

В настоящее время эластомеры ГЭН-150(В) и герметик 6Ф не производятся.

Лаки Ф-40 и Ф-40С (ТУ 6-06-246-92) выпускают в виде раствора композита каучука СКН-40С и модифицированной смолы ФКУ в ацетоне [75...77]. Производителем и разработчиком лаков является АО «Институт пластмасс им. Г. С. Петрова» (г. Москва).

В работе Кирсанова Ф.А. исследован эластомер Ф-40С и разработана технология восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, включающая операцию размерного калибрования. Исследования показали, что модуль упругости эластомера Ф-40С составляет 1040 МПа и в 1,2 раза превышает модуль упругости эластомера Ф-40 [78]. Материал отличается более высокими адгезионными свойствами. Показатель адгезионной прочности эластомера Ф-40С в 3,38 раза больше аналогичного показателя эластомера Ф-40 и составляет 10,8 кН/м. Размерное калибрование позволяет исключить влияние усадки полимера в ходе отверждения. По этой причине увеличивается точность размеров отверстия с полимерным покрытием, повышается эффективность восстановления.

Полимерные материалы являются теплоизоляторами, поэтому их теплопроводность меньше аналогичного параметра черных металлов около 100 раз. По этой причине в тяжело нагруженных подшипниковых узлах с посадками, восстановленными полимерными материалами, в процессе эксплуатации ухудшен теплоотвод. Возможное увеличение температуры полимерного материала вследствие гистерезисных потерь, затрудненный теплоотвод могут привести к существенному росту температуры деталей подшипника, смазочного материала и, в ряде случаев, явиться причиной снижения ресурса подшипникового узла.

Наполнение полимера металлическим порошком существенно увеличивает теплопроводность материала. В работе Машин Д.В. исследовано влияние металлических микроразмерных порошков алюминия и меди на потребительские свойства композита на основе эластомера Ф-40С [53, 79...80]. Установлено, что при наполнении металлическими частицами коэффициент теплопроводности микрокомпозита на основе эластомера Ф-40С увеличился до $19,97 \text{ вТ/м}^* \text{ К}$ (рисунок 1.11). В сравнении с аналогичным параметром не наполненного эластомера Ф-40С ($\lambda_{II} = 0,27 \text{ вТ/м}^* \text{ К}$) коэффициент увеличился 73,96 раза. Проведенный литературный обзор показал, что вопрос влияния наночастиц на теплопроводность эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, не изучен и требует исследования.

Значение предельной толщины эластомерного покрытия существенным образом ограничено податливостью восстановленной опоры под действием радиальной нагрузки, так как податливость определяет смещение оси подшипника относительно оси отверстия. Чрезмерное увеличение толщины полимерного покрытия уменьшает коэффициент податливости опоры качения, т.е. при нагружении увеличивается смещение оси подшипника относительно оси отверстия. Это приводит к перекосу подшипников, осей валов, зубьев шестерен, снижению их ресурса [81...82]. По этой причине предельная толщина покрытия из раствора эластомера Ф-40С не превышает 0,1 мм [83].

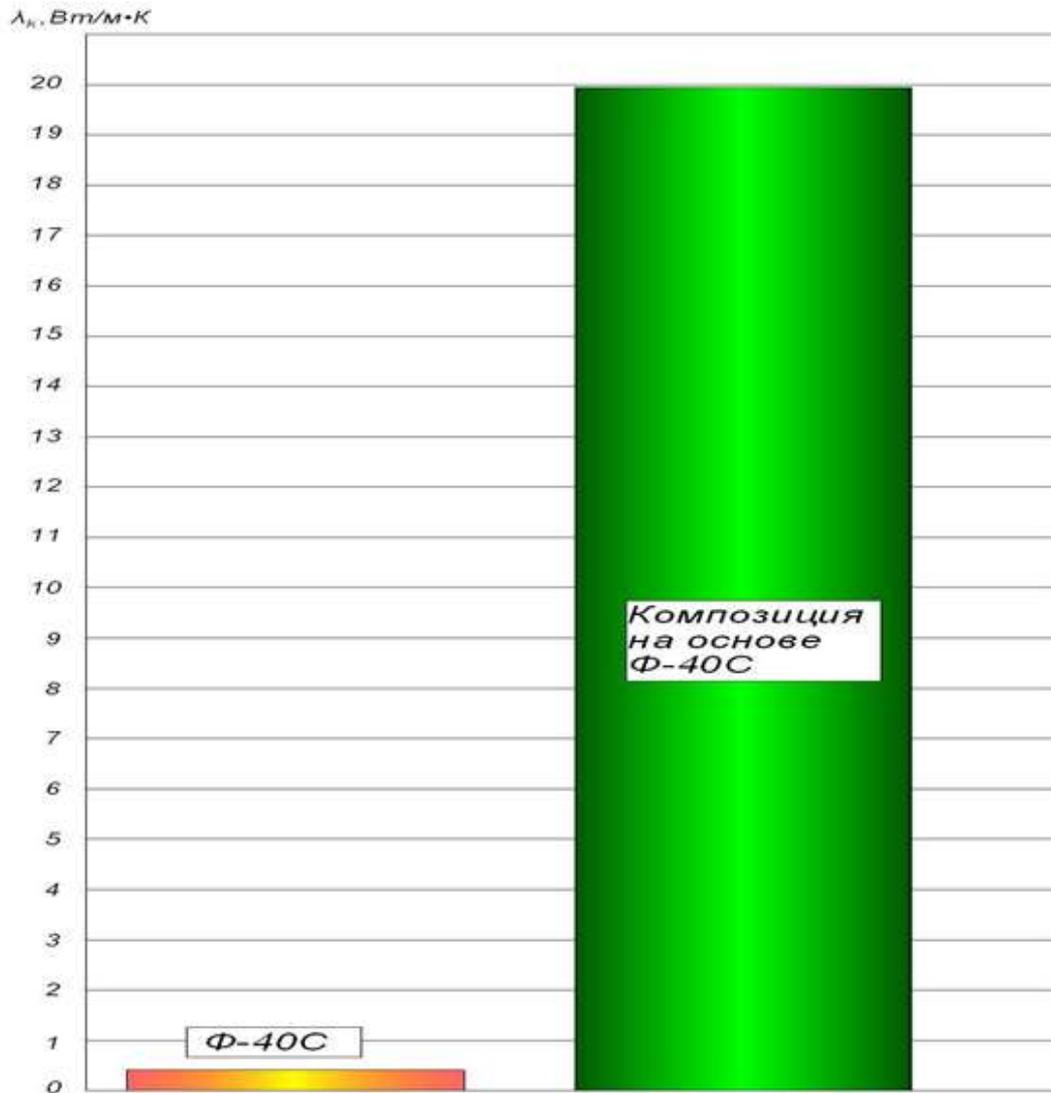


Рисунок 1.11 – Теплопроводность эластомера Ф-40С и композиции на его основе [53]

Для увеличения предельной толщины полимерного покрытия и увеличения тем самым компенсируемого износа, предложен состав композита на основе эластомера Ф-40С: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; алюминиевая пудра ПАП-1 – 16 масс.ч.; бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 масс.ч.

Эксперимент показал, что модуль упругости ПКМ на основе эластомера Ф-40С составляет 1111,1 МПа, что на 25 % больше модуля упругости эластомера Ф-40 и на 11 % больше модуля упругости эластомера Ф-40С [84].

Исследованиями установлено, что в посадке подшипника из композита на основе эластомера Ф-40С коэффициент Кирхгофа вырос в сравнении со стандартным подшипником (соединение «сталь-сталь») от 3,64 до 9,58 раз в зависимости

от толщины полимерного покрытия. При этом пятно контакта нагруженных тел с дорожкой качения возросло от 1,11 до 1,86 раза в сравнении со стандартным подшипником. С ростом толщины полимерного покрытия коэффициент податливости упругого основания уменьшается по линейной зависимости от 65,72 до 45,39 Н/мм² (рисунок 1.12). Благодаря вводу микроразмерных металлических частиц в эластомер Ф-40С, коэффициент податливости упругого основания композита вырос от 1,29 до 1,37 раза в сравнении с не наполненной матрицей [85].

Из-за повышения модуля упругости композита, предельная толщина покрытия из композита на основе эластомера Ф-40С увеличилась на 25% до 0,125 мм. Однако с увеличением модуля упругости покрытия деформация наружного кольца подшипника при нагружении уменьшается, соответственно, в сравнении с не наполненным полимером, больше контактные напряжения и меньше ресурс.

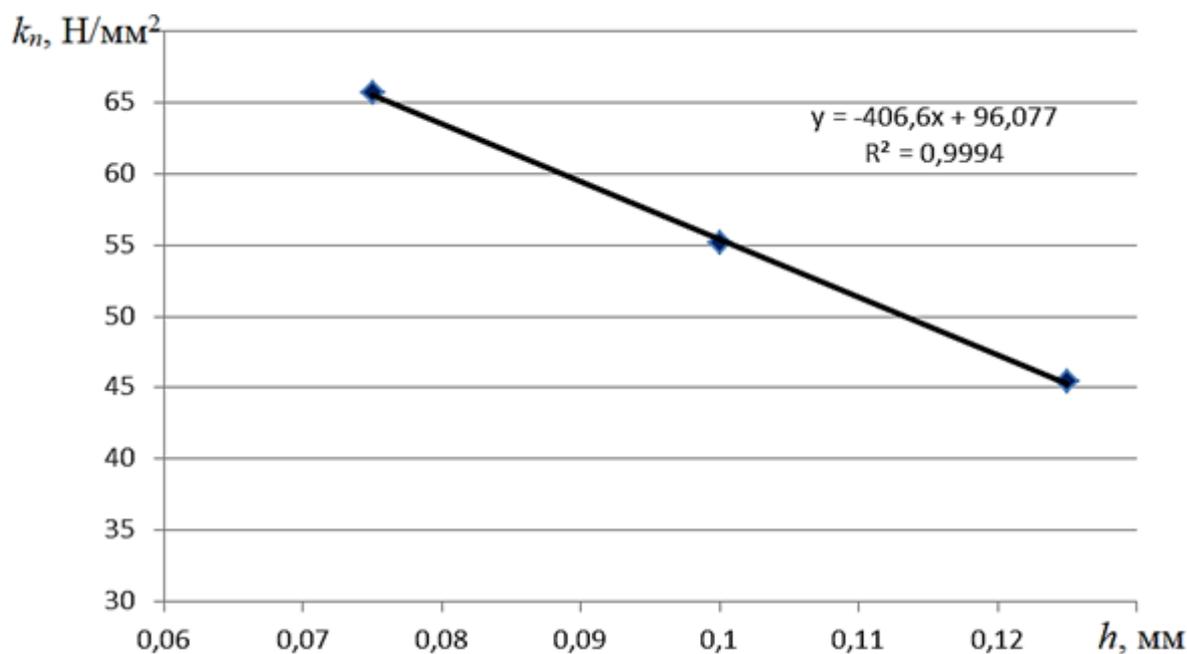


Рисунок 1.12 – Изменение коэффициента податливости k_n при различной толщине h полимерной подложки из композиции эластомера Ф-40С [85]

К недостаткам эластомеров ГЭН-150(В), герметика 6Ф, лаков Ф-40 и Ф-40С следует отнести их относительно не высокую теплостойкость (рисунок 1.13). Наименьшую теплостойкость (60°С) имеет эластомер ГЭН-150(В). При дальней-

шем увеличении температуры материал из высокоэластического переходит в вязкотекучее состояние [9].

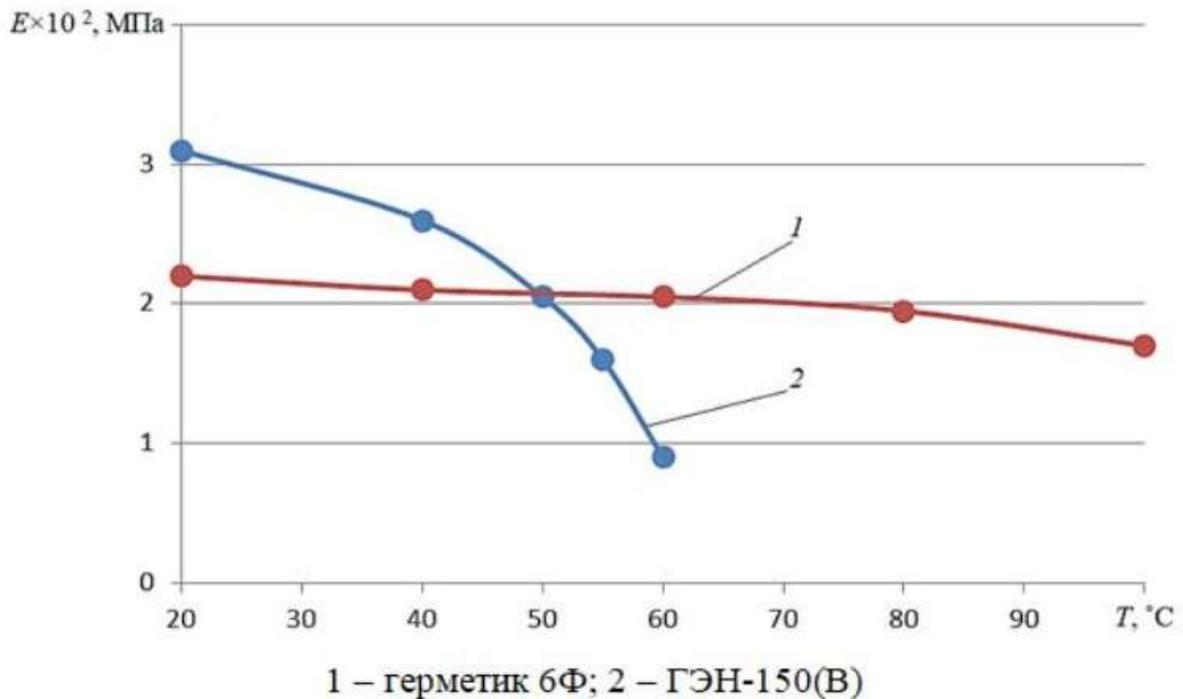


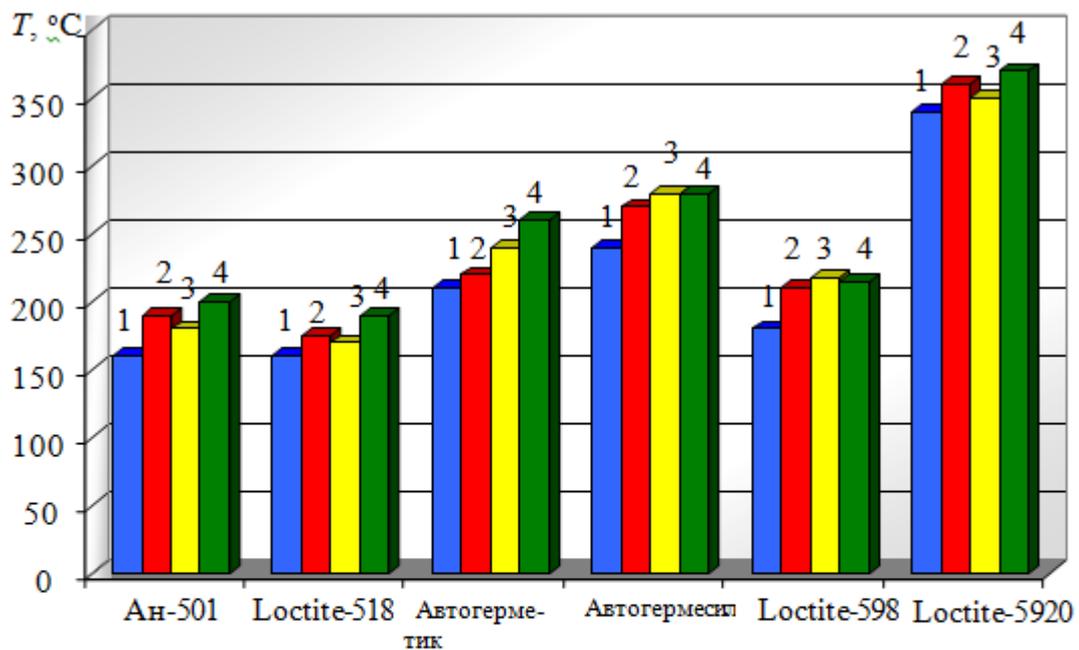
Рисунок 1.13 – Зависимость модуля упругости E покрытий герметика 6Ф и эластомера ГЭН-150(В) от температуры T [9]

Герметик 6Ф имеет более высокую теплостойкость. Материал пребывает в высокоэластическом состоянии при температурах от 20 до 100°C. С дальнейшим увеличением температуры материал переходит в вязкотекучее состояние. По этой причине вышеуказанный эластомер получил более широкое применение при восстановлении корпусных деталей, чем эластомер ГЭН-150(В).

Так как герметик 6Ф, лаки Ф-40 и Ф40С имеют одинаковую основу (смола ФКУ и синтетический каучук СКН-40) теплостойкость этих материалов одинаковая и составляет 100°C. В виду того, что подшипники обычного исполнения нагреваются при эксплуатации до температуры 70...90°C, желательно, чтобы нанокompозиты на основе эластомеров имели более широкий температурный запас по теплостойкости.

Наполнение полимерной матрицы металлическими микроразмерными частицами практически не меняет теплостойкость и температуру стеклования компози-

тов [86]. В работе Кононенко А.С. исследована теплостойкость нанокomпозитов для герметизации неподвижных разъемных соединений («жидких» прокладок). Теплостойкость не наполненных герметиков: АН-501 – 150°C , Loctite-518 – 160°C , Автогерметик – 200°C , Автогермесил – 240°C , Loctite-598 – 210°C и Loctite-5920 – 340°C [23]. В качестве наполнителей применяли наночастицы гидроксида алюминия $ALOOH$ (бемит), коллоидный раствор наночастиц серебра (НС) и углеродные нанотрубки (УН). Теплостойкость определяли по изменению модуля упругости материала при его нагреве. После ввода наночастиц наполнителя теплостойкость композитов повысилась. У нанокomпозитов, наполненных бемитом, теплостойкость увеличилась до 19%, НС – 17% и УН – 25% (рисунок 1.14).



1 – незаполненный герметик; 2 – герметик + бемит;

3 – герметик + НС; 4 – герметик + УН

Рисунок 1.14 – Изменение теплостойкости T герметиков после наполнения наночастицами [87]

Установлено, что введение наночастиц в анаэробные и силиконовые герметики изменяет размер полимерных волокон и расстояние между ними (рисунок 1.15).

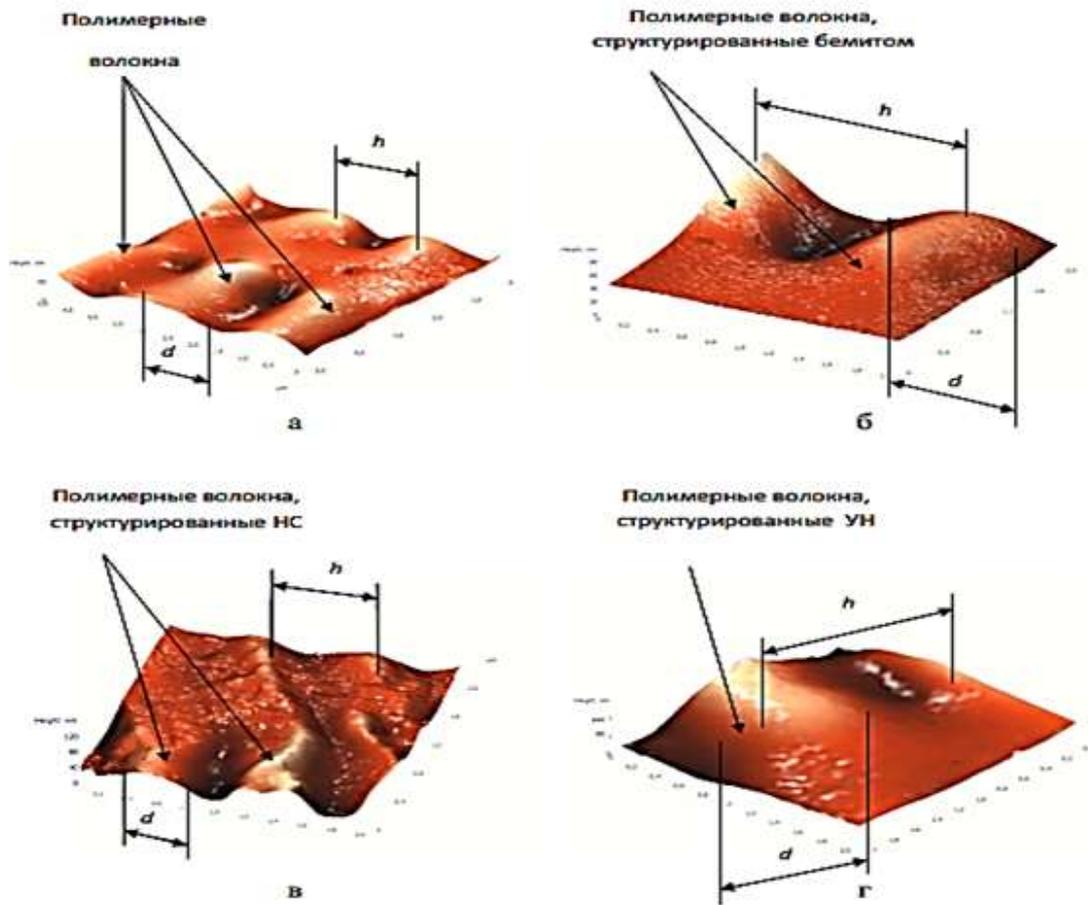


Рисунок 1.15 – Поверхности Автогерметика и нанокompозитов на его основе [87]

Это приводит к изменению свойств нанокompозитов. Например, в не наполненном Автогерметике радиус полимерных волокон составил 60 нм (рисунок 1.15, а). После наполнения герметика бемитом аналогичный параметр увеличился до 80 нм (рисунок 1.15, б), *НС* – до 120 нм (рисунок 1.15, в) и *УН* – до 100 нм (рисунок 1.15, г). Помимо увеличения размера полимерных волокон, увеличилось и расстояние между ними.

Благодаря высокой поверхностной энергии наночастиц, последние вступают в межмолекулярное взаимодействие с полимерными волокнами и распределяются вокруг них посредством слабых Ван-дер-Ваальсовых сил.

В виду того, что между наночастицами и макромолекулами полимера действуют только слабые межмолекулярные связи, «жесткость» и «гибкость» наноструктурированных волокон определяется «жесткостью» и «гибкостью» волокон ненаполненного полимера.

Благодаря сохранению гибкости волокон, с увеличением толщины последних, повышаются высокоэластическая деформация, упругие свойства и уменьшается остаточная деформация в полимерных нанокомпозитах.

В тоже время имеет место уменьшение подвижности полимерных цепей, увеличение толщины последних, благодаря наночастицам, снижает влияние внешней температуры и повышает теплостойкость нанокомпозита.

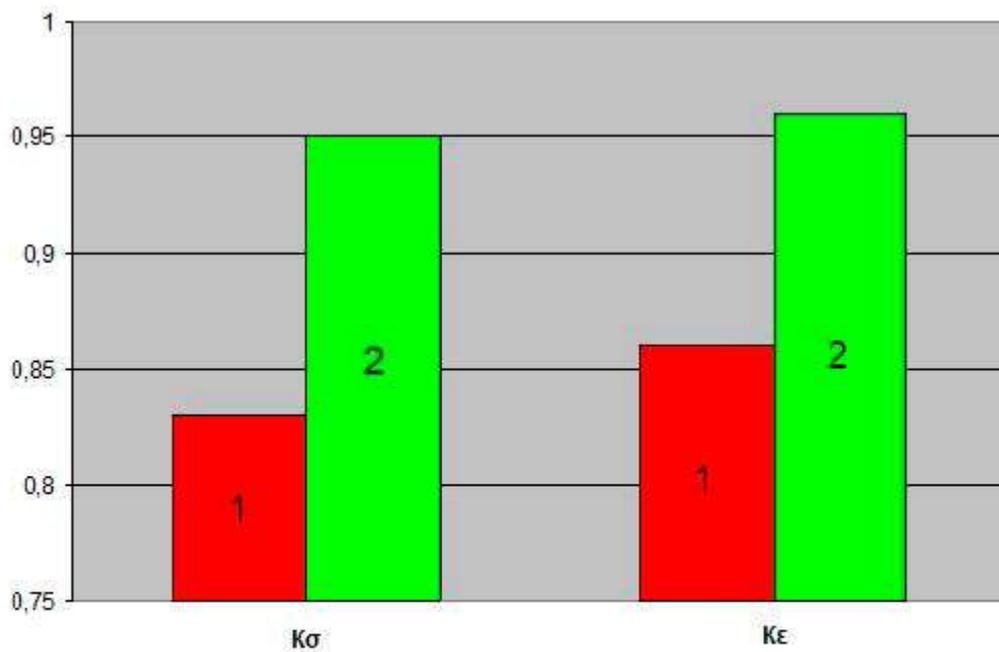
Полученные нанокомпозиты, отличаются от не наполненных материалов, упорядоченной структурой, более высокими деформационно-прочностными и теплофизическими свойствами. Проведенный литературный обзор показал, что вопрос влияния наночастиц на теплостойкость эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, не изучен и требует исследования.

Деформационно-прочностные и адгезионные свойства полимерного материала играют важную роль. Благодаря упругой деформации покрытия и соответственно колец подшипника при нагружении последнего, происходит снижение напряжений в зоне контакта нагруженных тел с дорожками качения и увеличивается ресурс подшипника. Повышенная прочность и трещиностойкость характеризуют способность материала противостоять циклическим нагрузкам и обеспечивают высокую выносливость материала. Высокая адгезия препятствует отслаиванию полимерного покрытия при запрессовке подшипника. Поэтому наноразмерные наполнители должны повышать деформационно-прочностные и адгезионные свойства композита в сравнении с не наполненным полимером. Необходимо исследовать влияние наполнителей на вышеупомянутые потребительские свойства разрабатываемого нанокомпозита на основе эластомера Ф-40.

В процессе эксплуатации подшипникового узла автотракторной трансмиссии полимерное покрытие, в восстановленном посадочном отверстии, подвергает-

ся термоциклированию. Воздействие повышенных и пониженных температур приводит к термическому старению полимерного материала. Поэтому увеличение термостойкости является актуальной задачей при разработке новых композитов, предназначенных для восстановления отверстий в корпусных деталях автотракторной техники.

Как было показано ранее на рисунках 1.5...1.8, ввод наночастиц меди и алюминия в матрицу анаэробного герметика АН-111 обеспечивает существенное улучшение физико-механических свойств нанокompозита. Установлено улучшение и теплофизических свойств нанокompозита [88]. Введение наночастиц меди в матрицу полимера повысило термостойкость материала. Экспериментальные исследования показали, что в сравнении с ненаполненным герметиком АН-111, коэффициенты старения нанокompозита увеличились по прочности в 1,14 раза, от 0,83 до 0,95 (рисунок 1.16), по относительному удлинению в 1,11 раза, от 0,86 до 0,96 (рисунок 1.17).



1 – герметик АН-111; 2 – нанокompозит на его основе

Рисунок 1.16 – Коэффициенты старения по условной прочности K_{σ} и относительному удлинению K_{ϵ} [88]

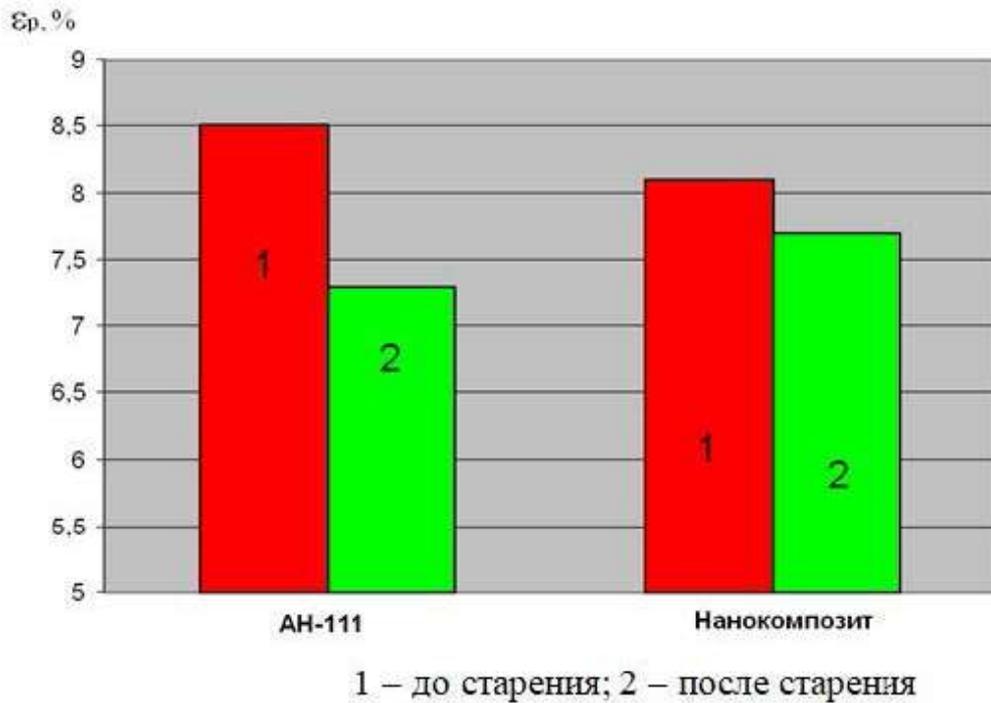


Рисунок 1.17 – Относительное удлинение герметика АН-111 и наноккомпозита на его основе до и после высокотемпературного старения [88]

Вопрос влияния металлических наноразмерных частиц на термостойкость эластомера Ф-40 не изучен и требует всестороннего исследования. Необходимо теоретически обосновать выбор металлических НРЧ наполнителя для композита на основе эластомера Ф-40, обеспечивающего увеличение термостойкости материала.

1.3 Технологические способы обеспечения точности размеров посадочных отверстий при восстановлении полимерными материалами

При восстановлении посадочных отверстий корпусных деталей полимерными материалами используют три способа [9, 15, 54...56, 89... 92]:

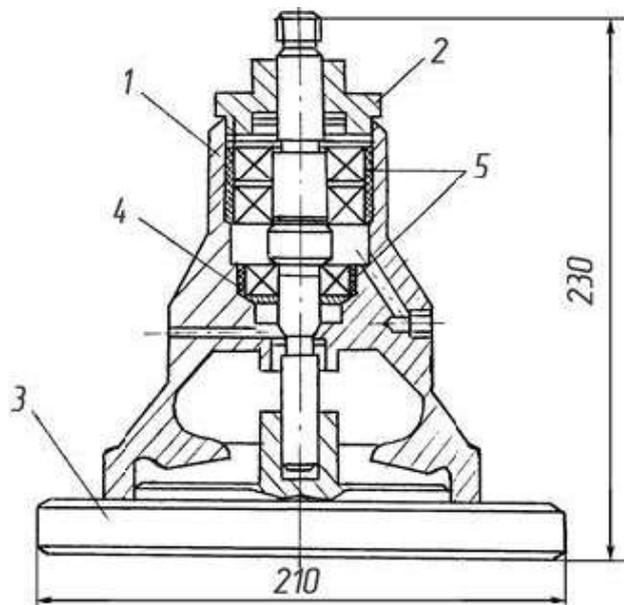
1 – вклеивание подшипника наружным кольцом в изношенное посадочное отверстие корпусной детали;

2 – нанесение полимерного покрытия на посадочную поверхность изношенного отверстия и последующее формование отверстия под заданный размер;

3 – нанесение полимерного покрытия на посадочную поверхность изношенного отверстия и последующее калибрование отверстия под заданный размер.

При восстановлении адгезивами посадок подшипников качения с износом в сопряжении более 0,05 мм рекомендуется использовать специальные центрирующие приспособления [15, 93, 94]. На рисунке 1.18 показана технологическая оснастка, которую используют приклеивании в изношенные отверстия корпуса водяного насоса подшипников 304, 305 с валом [15, 95].

Чтобы обеспечить равномерное распределение адгезива в зазоре между сопрягаемыми деталями, последние устанавливают в вертикальном положении. При восстановлении адгезивами посадок подшипников в корпусных деталях агрегатов трансмиссии автомобилей и тракторов задача центрирования сопрягаемых деталей существенно усложняется. Сложно зафиксировать в вертикальном положении вал с подшипниками и шестернями, ограничен выбор технологических баз и др. По этой причине задача обеспечения соосности осей вклеиваемых подшипников с осями посадочных отверстий является основной технологической проблемой при восстановлении корпусных деталей агрегатов трансмиссии адгезивами.



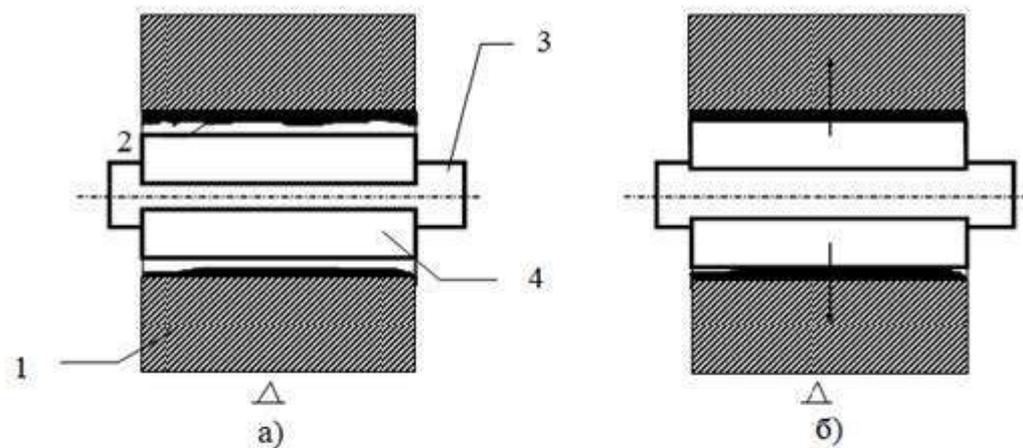
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – основание; 4,5 – адгезив

Рисунок 1.18 – Центрирующее приспособление для восстановления адгезивом посадок подшипников 304, 305 в изношенном корпусе водяного насоса [95]

Профессором Котиным А. В. и сотрудниками (МГУ им. Н.П. Огарева) разработан способ калибровки полимерных покрытий в отверстиях корпусных де-

талей автомобилей. На рисунке 1.19 представлена схема формирования полимерного покрытия [14].

Технология восстановления изношенной корпусной детали включает операции в следующей последовательности: монтаж корпусной детали 1 на технологическую базу; зачистка и обезжиривание посадочной поверхности изношенных отверстий; нанесения полимерного покрытия; формирование полимерного покрытия. Для формирования используют специальные цилиндрические оправки 3 (скалки). Чтобы исключить осевое выдавливание материала полимерного покрытия при вводе скалки в отверстие ее калибрующий элемент состоит из раздвижных полуколец 4. При формировании в отверстие с полимерным покрытием вводят оправку 3 с раздвижными полукольцами 4, которые предварительно сжаты.



а) оправка с кольцами в сжатом состоянии; б) формирование полимерной композиции разжимающимися полукольцами

1 – корпусная деталь; 2 – слой полимерной композиции; 3 – оправка;
4 – раздвижные полукольца

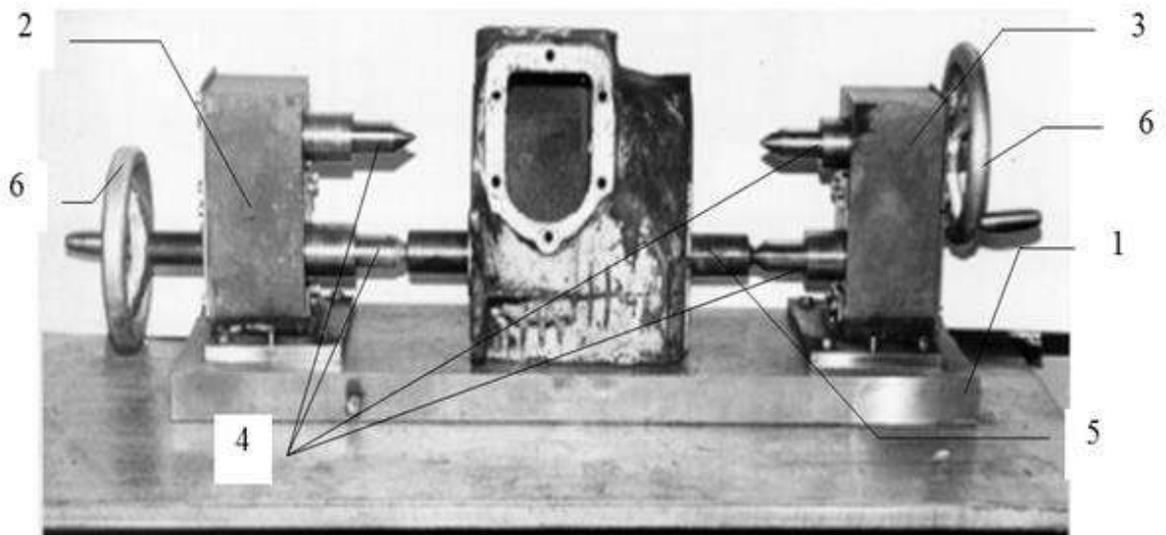
Рисунок 1.19 – Схема формирования полимерного покрытия после нанесения на изношенное посадочное отверстие корпусной детали [14]

Для предотвращения прилипания композита к формирующим полукольцам их поверхность обработана алмазным выглаживанием. Перед вводом на поверхность

полукольца наносят тонкий слой масла марки АКЗп-6. По завершении ввода оправки в отверстие полукольца разжимают, что обеспечивает формирование полимерного покрытия под заданный размер.

После полной полимеризации композита полукольца сжимают и выводят оправку из отверстия корпусной детали.

На рисунке 1.20 показана технологическая оснастка для восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусе коробки передач автомобиля ГАЗ-53. В состав оснастки входят плита 1 с закрепленными на ней левой 2 и правой 3 стойками. Каждая стойка имеет два центра 4, которые центрируют скалки 5. При помощи маховиков 3 центры стоек перемещаются в горизонтальной плоскости. Расстояние между центрами приспособления составляет $100,625^{+0,05}$ мм.



1 - плита; 2 - левая стойка; 3 - правая стойка; 4 - центра; 5 - нижняя скалка;
6 - маховики

Рисунок 1.20 – Приспособление для восстановления отверстий корпуса коробки передач автомобиля ГАЗ-53 [14]

Допустимый перекосяк и не параллельность общей оси центров на базовой длине 250 мм не более 0,04 мм. Первоначально на изношенные отверстия наносят покрытие из композита на основе анаэробного герметика АН-6В. После определенного времени выдержки, вращают маховики и медленно вводят рабочие части

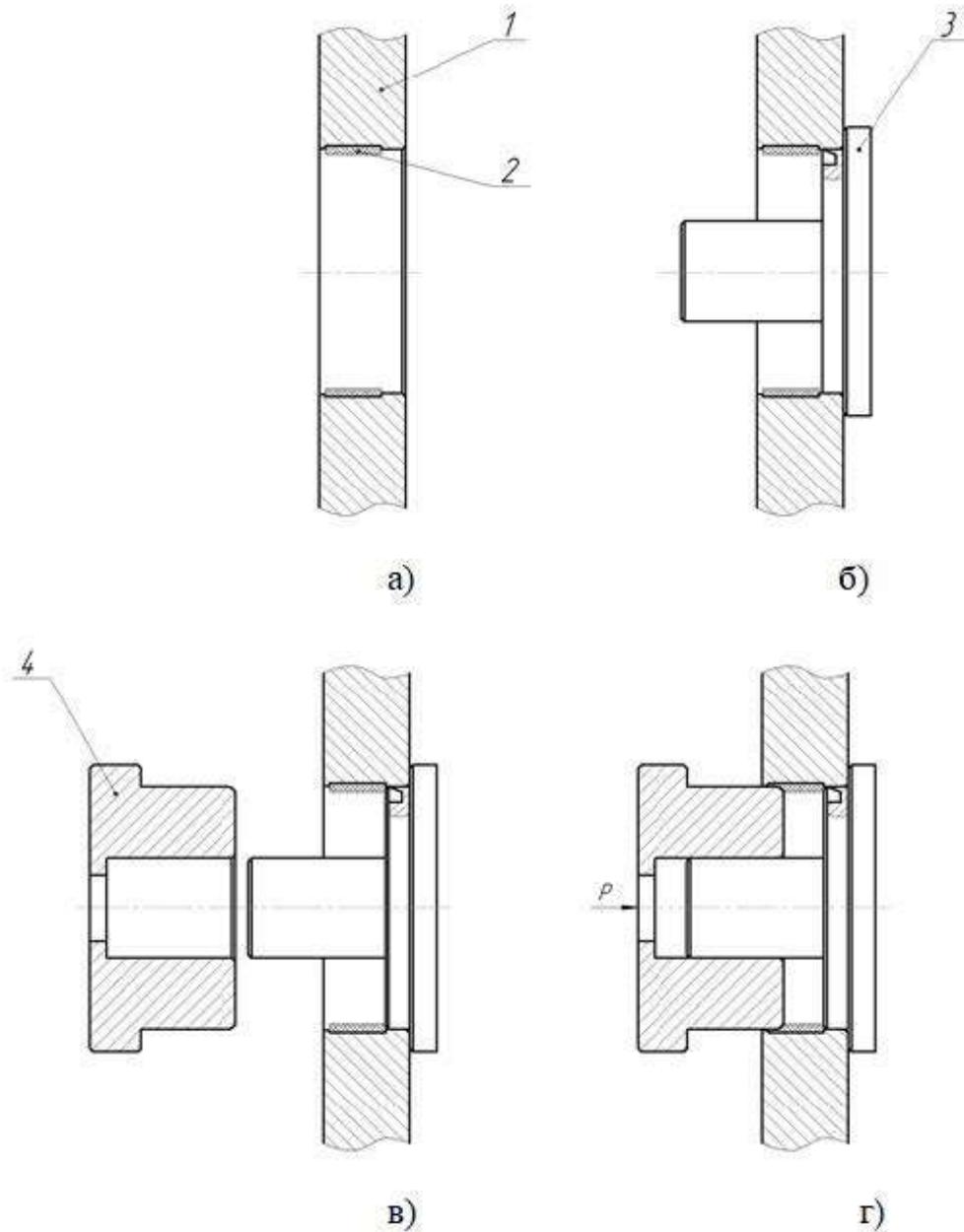
скалок в отверстия. Далее разжимают полукольца и полимерное покрытие формуется под заданный размер и форму. По завершении полимеризации композита, вращая маховики, выводят конусы из оправок, удаляют скалки, после чего корпусную деталь демонтируют с плиты.

В работе Мироненко А.В. разработан способ формования отверстия с полимерным покрытием из композита на основе акрилового клея АН-110 [96]. Покрытие из композита наносят послойно на изношенную поверхность отверстия вручную кистью. Каждый слой отверждают в течение 2 минут. После нанесения покрытия в восстанавливаемое отверстие устанавливают базирующую деталь. Для центрирования осей базирующей детали и посадочного отверстия используют не изношенную поверхность отверстия (рисунок 1.21).

В том случае, если имеет место износ по всей поверхности отверстия, следует использовать технологическую базу присоединяемой детали, в частности крышку подшипника [97...98]. После присоединения крышки подшипника к торцу корпусной детали, базирующую деталь базируют по поверхности крышки. Последняя не изнашивается, так как сопрягается с зазором с валом, опирающимся на подшипник (рисунок 1.22). Далее корпусную деталь поворачивают в положение при котором ось базирующей детали будет находиться в вертикальном положении. Для исключения прилипания покрытия композита к рабочей поверхности калибра, последнюю покрывают тонким слоем пластичной смазки. Калибр насаживают на хвостовик базирующей детали и перемещают вдоль него, до тех пор, пока торец калибра не упрется в торец базирующей детали. Калибр, перемещаясь вдоль базирующей детали, скругленным торцом удаляет излишки полимерного материала, а цилиндрической боковой поверхностью формирует отверстие с полимерным покрытием под заданный размер и форму. После полимеризации покрытия композита, оснастку разбирают.

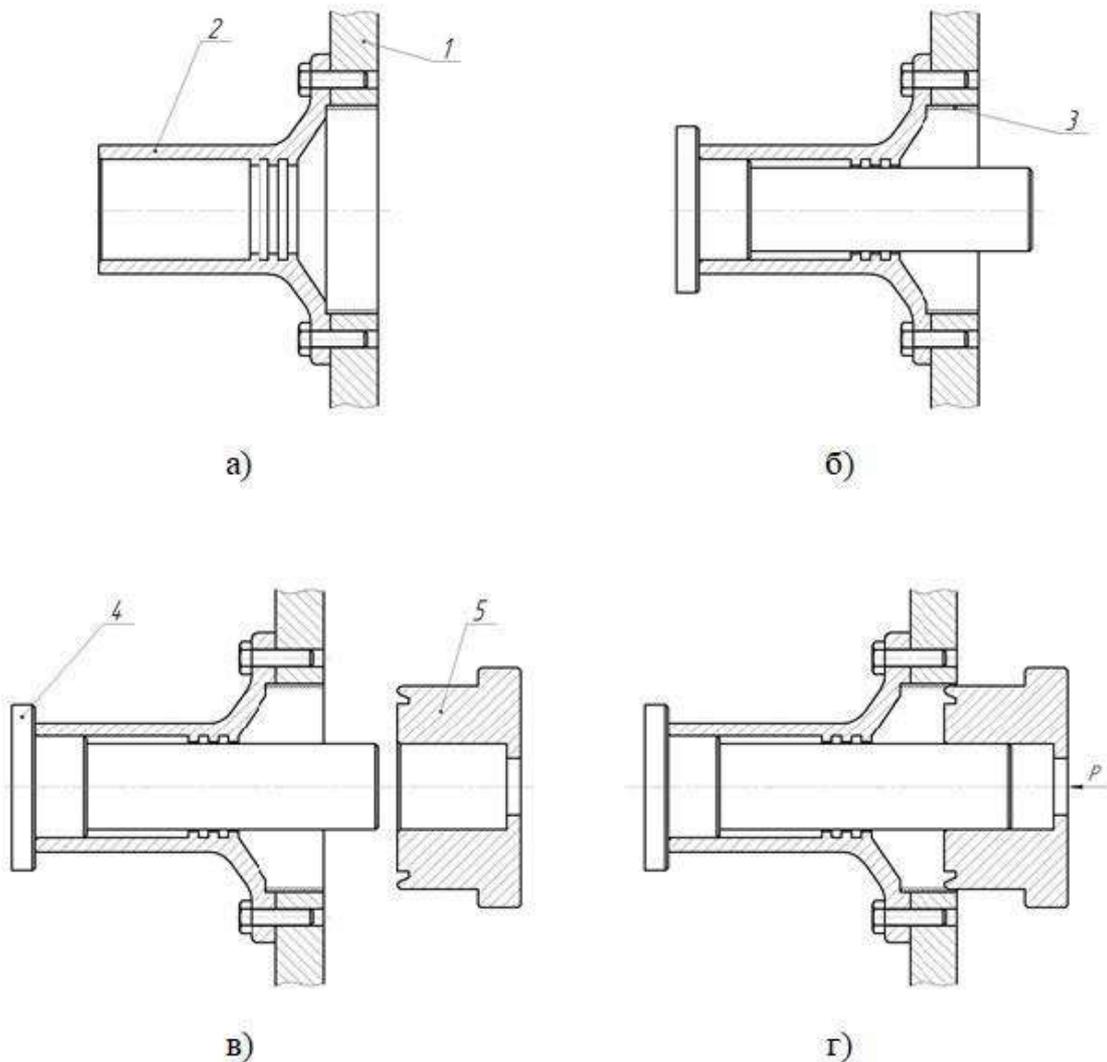
Известные способы формования (калибрования) отверстий с полимерным покрытием имеют общий недостаток – точность отверстий с полимерным покрытием существенным образом зависит от усадки полимерного материала при

отверждении, которая зависит от качества приготовления полимерного композиционного материала, условий отверждения.



а – изношенное отверстие с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирющей детали в отверстие корпусной детали; в – установка калибра на хвостовик базирющей детали; г – калибрование; 1 – корпусная деталь; 2 – полимерное покрытие; 3 – базирющая деталь; 4 – калибр

Рисунок 1.21 – Последовательность этапов получения отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали [96]



а – изношенные отверстия в корпусной детали и в крышке подшипника с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирющей детали в неизношенное отверстие сопрягаемой детали; в – установка калибра на хвостовик базирющей детали; г – калибрование; 1 – корпусная деталь; 2 – крышка подшипника 3 – полимерное покрытие; 4 – базирющая деталь; 5 – калибр
 Рисунок 1.22 – Последовательность этапов получения отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали с крышкой подшипника [96]

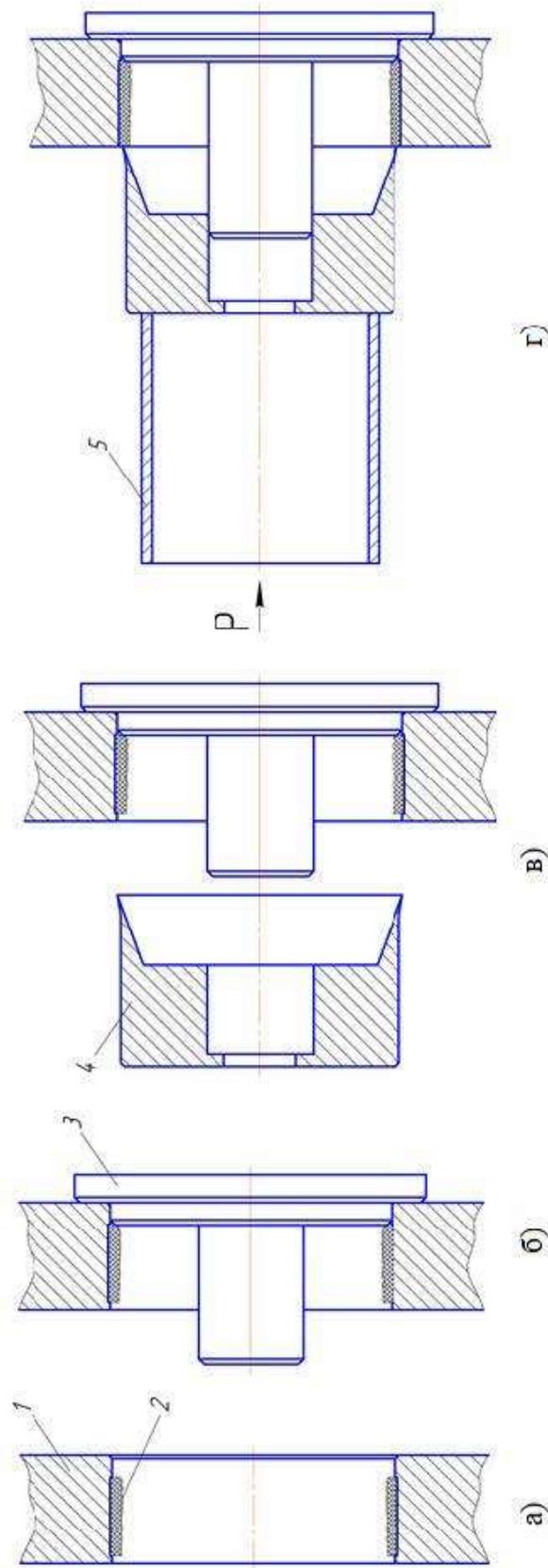
Разработано устройство для калибрования посадочных отверстий с полимерным покрытием (Патент на изобретение РФ № 2604238). Устройство состоит из базирющей детали и калибра [99]. Базирющая деталь 3 представляет собой

трехступенчатую ось (рисунок 1.23). Все ступени выполнены цилиндрической формы. Ступень максимального диаметра выполняет опорную функцию, ступень среднего диаметра предназначена для базирования по не изношенной поверхности отверстия сопрягаемой детали, ступень минимального диаметра называют хвостовиком и ее поверхность выполняет функцию направляющей для калибра. Калибр 4 состоит из режущей кромки и примыкающего к ней цилиндра постоянного диаметра с тремя отверстиями. Наружная часть режущей кромки конической формы и выполняет функцию задней поверхности цилиндрического резца. К ней примыкает боковая наружная поверхность калибра цилиндрической формы. Внутренняя поверхность режущей кромки конической формы и выполняет функцию передней поверхности цилиндрического резца. Отверстие среднего диаметра цилиндрической формы и ее поверхность предназначена для базирования и перемещения по ней хвостовика базирующей детали. Отверстие минимального диаметра цилиндрической формы, выполнено сквозным, а ее торец выполняет функцию упора для хвостовика базирующей детали. Отверстие предназначено также для съема калибра с хвостовика при перекосе и заклинивании.

Базирующую деталь 3 вставляют в отверстие корпусной детали до упора в ее торец. Базирование детали осуществляется по не изношенной поверхности сопрягаемого отверстия корпусной детали.

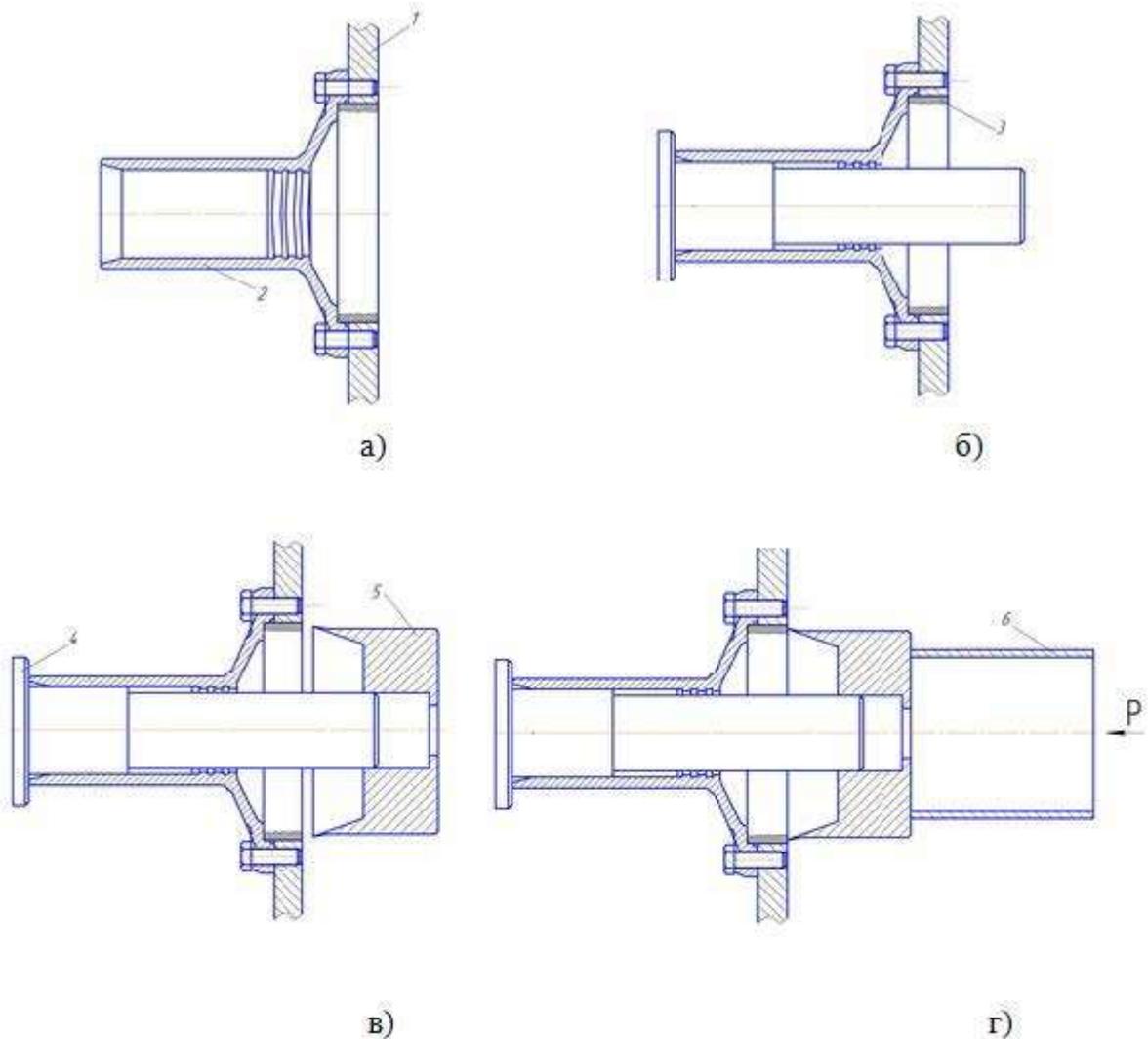
В случае, когда изношена вся поверхность посадочного отверстия, используют технологическую базу присоединяемой детали [85, 86]. Для этого используют крышку подшипника, которую фиксируют болтами в резьбовых отверстиях корпусной детали. Базирующую деталь 4 вставляют в отверстие крышки подшипника. Ступень среднего диаметра базирующей детали базируется по не изношенной поверхности внутреннего отверстия крышки подшипника (рисунок 1.24).

Корпусную деталь устанавливают таким образом, чтобы базирующая деталь приняла вертикальное положение. Далее калибр 4 сажают на хвостовик базирующей детали 3 с противоположной стороны отверстия (рисунок 1.22).



а) — изношенное отверстие с нанесенным полимерным покрытием; б) — установка базирующей детали в отверстие корпусной детали; в) — установка калибра на хвостовик базирующей детали; г) калибрование; 1 — корпусная деталь; 2 — полимерное покрытие; 3 — базирующая деталь; 4 — калибр; 5 — монтажная труба [99]

Рисунок 1.2.3 — Последовательность этапов калибрования отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали (подшипниковый шит, корпус водяного насоса двигателя)



а – изношенные отверстия в корпусной детали и в крышке подшипника с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирющей детали в изношенное отверстие сопрягаемой детали; в – установка калибра на хвостовик базирющей детали; г) калибрование; 1 – корпусная деталь; 2 – крышка подшипника; 3 – полимерное покрытие; 4 – базирющая деталь; 5 – калибр; 5 – монтажная труба [99]

Рисунок 1.24 – Последовательность этапов калибрования отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали (корпус коробки передач, корпус раздаточной коробки автомобиля или трактора)

В заключении при помощи монтажной трубы 5 и молотка перемещают калибр вдоль отверстия с полимерным покрытием до упора торцевой части стенки калибра в торцевую стенку хвостовика. Калибр перемещаясь, срезает режущей кромкой излишки полимерного покрытия. Таким образом, обеспечивают заданный размер и форму отверстия с полимерным покрытием.

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

1.4 Выводы. Цель и задачи исследований

Литературный обзор и анализ априорной информации показали, что при восстановлении посадочных мест подшипников качения автотракторной техники сервисной службе сельхозпредприятий предлагается достаточно широкий спектр отечественных и зарубежных полимерных композитов.

Большую перспективу в вопросе повышения эффективности восстановления корпусных деталей техники представляют исследования и разработка композитов на основе эластомеров, наполненных наночастицами.

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

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

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

Анализ литературных источников показал, что термостойкость эластомеров Ф-40 и Ф-40С составляет не более 100 °С. Этот параметр ограничивает применение эластомеров для восстановления посадок тяжело нагруженных подшипниковых узлов техники. Проведенный литературный обзор показал, что вопрос влияния наночастиц на термостойкость эластомеров, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, не изучен и требует исследования.

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

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

Анализ литературных источников показал, что способ калибрования, разработанный в патенте на изобретение РФ № 2604238, является наиболее техноло-

гичным для обеспечения точности размеров посадочных отверстий в корпусных деталях при восстановлении полимерными материалами. Этот способ обеспечивает высокое качество и точность полимерного покрытия после калибрования. Представляют научный и практический интерес всесторонние исследования процесса калибрования, качества и точности отверстий с покрытиями, выполненными наноккомпозитом на основе эластомера Ф-40.

Целью настоящей работы является повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники наноккомпозитом на основе эластомера Ф-40 за счет повышения качества полимерных покрытий, увеличения их тепло- и термостойкости, теплопроводности, обеспечения высокой долговечности восстановленных неподвижных соединений подшипников.

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

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

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ НАНОКОМПОЗИТАМИ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРОВ

2.1 Повышение термостойкости композита эластомера при введении металлических наночастиц

Наполнение эластомеров наночастицами не однозначно изменяет термостойкость композитов. Этот параметр определяется видом материала наночастиц, которые являются наполнителем и каучуком, составляющим основу полимерной матрицы. Исследования термоокислительной деструкции композитов на основе натурального каучука, наполненных частицами меди, марганца, кобальта, показали, что последние выступают как катализаторы термоокисления [100, 101]. Установлено, что наиболее активный катализатор деструкции натурального каучука – это медь. Частицы меди, а также ее оксиды являются участниками окислительно-восстановительных реакций термоокисления натурального каучука, что приводит к значительному снижению кажущейся энергии активации процесса от 112,8 до 69,8 кДж/моль. Исследования показали, что частицы металлов железа, никеля, цинка и свинца к катализаторам термоокисления не относятся.

Причиной термоокислительной деструкции полиолефинов, происходящей при высокой температуре, является разрыв химических связей основной цепи макромолекул и образование макрорадикалов R., а также возникновение радикалов RO₂ – продуктов распада гидропероксидов, которые образуются при окислении макромолекул полимера [102].

Металлы переменной валентности могут быть катализаторами для одних и ингибиторами цепных радикальных процессов окисления для других видов каучука являются. Характер каталитического действия металла переменной валентности (в виде стеаратов), т.е. является он катализатором или ингибитором термоокисления полимера, определяет строение каучука. Например, если медь является катализатором для натурального каучука, то для бутадиен-нитрильных каучуков

этот металл – ингибитор процесса окисления [103, 104]. Условием повышения термостойкости каучуков является устранение слабых мест в структуре материала и связывание свободных радикалов, которые образуются в процессе термораспада.

В работе Михайлюк А.Е. исследовано влияние наночастиц металлов переменной валентности на термостойкость эластомеров. В таблице 2.1 представлена эффективная энергия активации термодеструкции $E_{акт}$ этиленпропиленового каучука и композитов на его основе, наполненных металлическими наночастицами [46].

Таблица 2.1 – Энергия активации $E_{акт}$ термодеструкции композитов модифицированных частицами металлов переменной валентности [46]

Тип металлических частиц	Дозировка, %	$E_{акт}$: кДж/моль
Не модифицированный полимер	–	70,8
<u>Cu</u>	0,4	67,9
	4,0	172,3
	22,0	69,3
<u>Ni</u>	0,4	100,8
	3,8	134,0
	16,5	144,8
<u>Pb</u>	0,5	137,1
	4,6	141,0
	18,1	98,9
<u>Bi</u>	0,5	102,6
	5,1	72,9
	21,3	77,3

Параметр $E_{акт}$ рассчитывали методом Коутса-Редферна [105]. Как следует из таблицы 2.1 введение наночастиц металлов переменной валентности в эластомер увеличивает энергию активации процесса термодеструкции полимерного материала, т.е. повышает термостойкость композита. Увеличение параметра $E_{акт}$ объясняется присутствием в композите высокодисперсных

химически активных частиц металла. Поверхности частиц имеют активные центры, которые образуют хемосорбционные связи с макромолекулами полимера.

В таблице 2.2 представлена потеря массы этиленпропиленового каучука и композитов на его основе, при повышенной температуре.

Таблица 2.2 – Температура 5 % (T_5) и 10 % (T_{10}) потери массы исследуемых композитов [46]

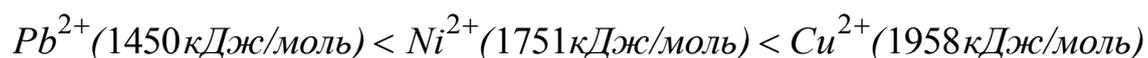
Тип металлических частиц	Способ модификации	Дозировка, %	T_5 , °C	T_{10} , °C
Не модифицированный полимер		–	340	360
Cu	В матрице эластомера	0,5	350	377
		5,0	369	380
		20,0	336	366
	На вальцах	0,5	375	388
		5,0	350	365
		20,0	335	350
Ni	В матрице эластомера	0,5	352	369
		5,0	365	381
		20,0	343	364
	На вальцах	0,5	336	351
		5	351	368
		20	350	376
Pb	В матрице эластомера	0,5	358	364
		5,0	356	373
		20,0	377	386
	На вальцах	0,5	342	360
		5	345	365
		20	321	356
Bi	В матрице эластомера	0,5	360	381
		5,0	341	370
		20,0	320	361
	На вальцах	0,5	355	381
		5	340	355
		20	350	373

Из таблицы 2.2. следует, что наночастицы металлов никеля, меди, свинца и висмута увеличивают термическую стойкость полимерной матрицы этиленпропиленового каучука и увеличение достигает 37°C.

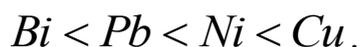
Образцы из этиленпропиленового каучука и композитов на его основе подвергали старению при температуре 250 °С в условиях ограниченного доступа кислорода воздуха. Испытания показали, что у образцов из композитов, в сравнении с не наполненным эластомером, коэффициенты старения по прочности в 1,8...2,4 раза, по относительному удлинению в 1,3...1,7 раза больше [46].

Таким образом установлено, что наночастицы металлов переменной валентности относятся к ингибиторам цепных радикальных процессов окисления этиленпропиленового каучука. Стабилизирующий эффект при термической деструкции эластомера вызван возникновением хемосорбционных связей между металлическими наночастицами и макромолекулами полимера.

С увеличением энергии ионизации металлов, между поверхностью металлических наночастиц и макромолекулами каучука образуются более прочные хемосорбционные связи, что является причиной более высокой термостойкости материала



Металлы, которые использовали в качестве наполнителей, по степени увеличения термостойкости эластомера к высокотемпературной деструкции можно расположить в следующей последовательности:



Результаты, представленные в работе Михайлюк А.Е., свидетельствуют о том, что использование наночастиц металлов переменной валентности в качестве наполнителей эластомера, значительно повышает термостойкость последнего.

Как упоминалось ранее, медь является ингибитором процесса окисления бутадиен-нитрильных каучуков. В основе эластомера Ф-40 лежит бутадиен-нитрильный каучук СКН-40, поэтому, чтобы повысить термостойкость нанокompозита на основе эластомера Ф-40 следует использовать наночастицы меди [106]. Из перечня представленных ранее металлов, медь имеет наиболее высокую энергию ионизации, поэтому следует ожидать, что наночастицы меди образуют с макромолекулами каучука СКН-40 прочные хемосорбционные связи, вследствие чего термостойкость нанокompозита на основе эластомера Ф-40 увеличится.

2.2 Деформационно-прочностные свойства композита эластомера наполненного металлическими наночастицами

2.2.1 Модуль упругости нанокompозита

В нанокompозитах при взаимодействии полимера с частицей наполнителя на поверхности последней образуется адсорбированный слой (межфазная область), который свойствами существенно отличается от полимерной матрицы. Имеет место «замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, т.е. у поверхности наночастиц наполнителя.

В работах [107...109] установлено, что в композитах на основе эластомеров наполненных дисперсными наночастицами формируются в среднем два межфазных слоя: первый в результате взаимодействия поверхности наночастицы наполнителя с полимерной матрицей, что приводит к «замораживанию» молекулярной подвижности в этом слое и его стеклообразному состоянию, второй – результат взаимодействия стеклообразного межфазного слоя с матрицей из эластомера.

Частицы наполнителя и межфазные области являются армирующим элементом эластомерного нанокompозита, повышающим его модуль упругости. В работе [107] исследован композит на основе бутадиен-стирольного каучука, наполненный наноразмерным фуллеренсодержащим минералом – наношунгитом. Установлено, что модуль упругости межфазного слоя меньше аналогичного параметра

наполнителя только лишь на 23 – 45%, однако больше модуля упругости полимера до 8,5 раз (рисунок 2.1).

Известно, что наполнение анаэробных герметиков частицами меди повышает скорость и глубину полимеризации материала. Причиной являются ионы металла меди, которые активно участвуют в окислительно-восстановительных процессах [15, 56, 70].

При наполнении высокодисперсным медным порошком время отверждения анаэробного герметика АН-6В сокращается в 9,6 раза: с 96 до 10 ч [15]. Прочность композита, в сравнении с не наполненным герметиком АН-6В, увеличилась в 1,67 раза: от 12 до 20 МПа [15, 70].

В работе Малюгина В.А. установлено, что время полимеризации анаэробного герметика АН-111 составляет 3,0 ч. при температуре 20 °С (рисунок 2.2). В композите на основе герметика АН-111, наполненном наночастицами меди, скорость отверждения увеличилась, соответственно время отверждения сократилось в 2 раза, до 1,5 ч (рисунок 2.3).

Увеличилась глубина полимеризации, что подтверждается повышением прочности плёнок нанокompозита, в сравнении с не наполненным герметиком АН-111, в 1,24 раза: от 14,9 до 18,5 МПа (рисунок 2.4).

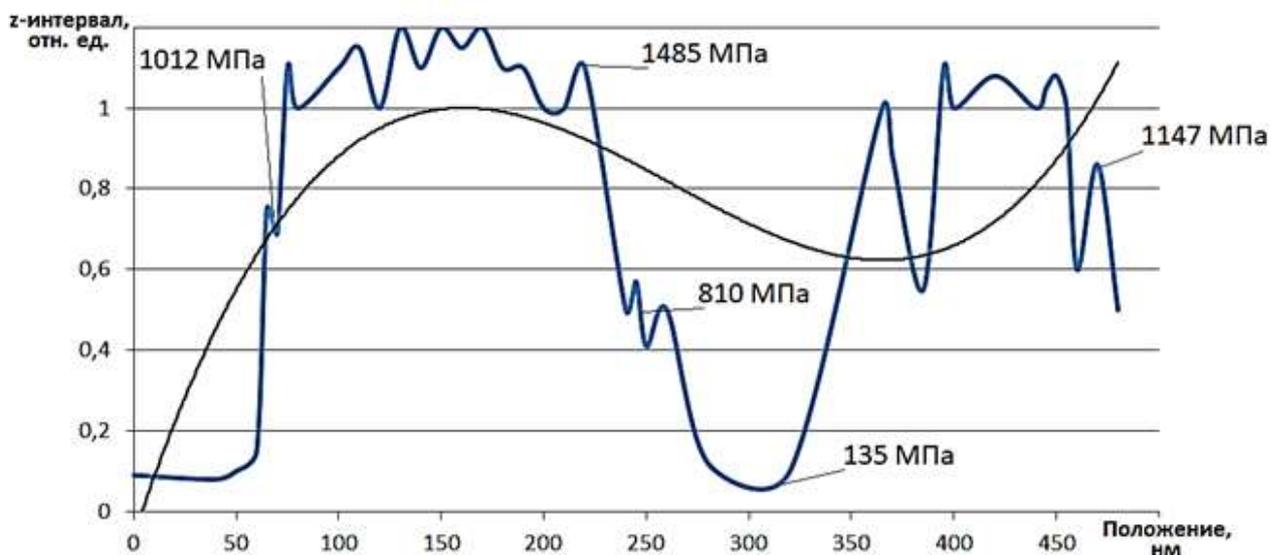
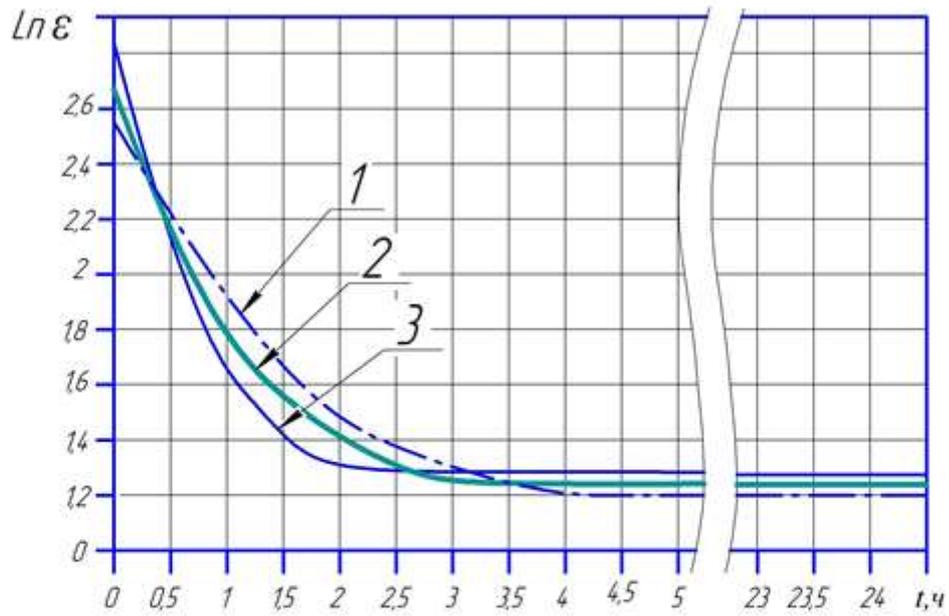
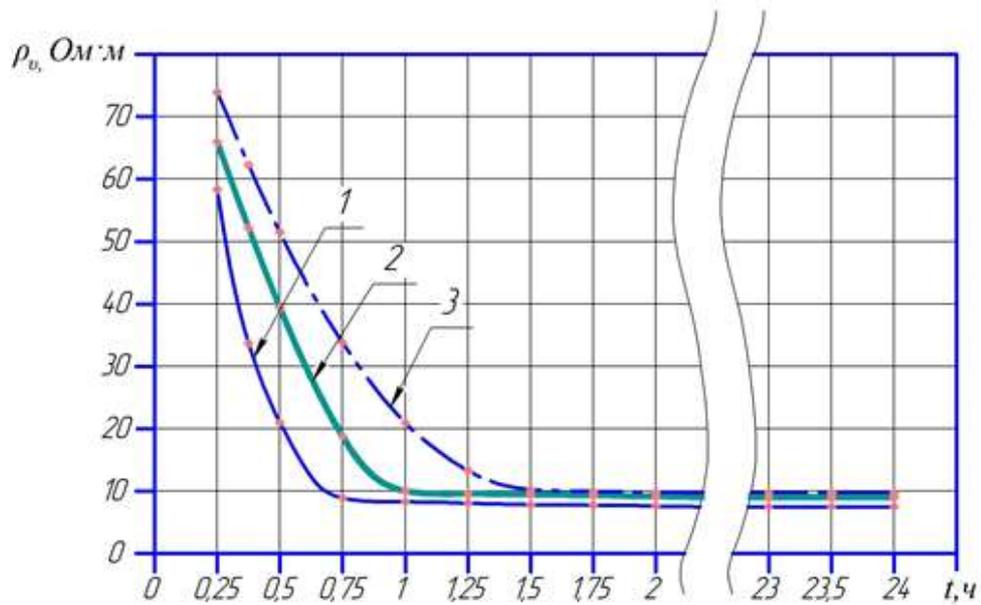


Рисунок 2.1 – Механические характеристики структурных компонентов нанокompозита на основе бутадиен-стирольного каучука, определенных наноиндентированием (деформация 150 нм) [107]



1 – при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – при $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – при $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 2.2 – Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ клеевого шва герметика АН-111 от времени отверждения [56]



1 – при температуре $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 2.3 – Зависимость удельного электрического сопротивления ρ_v клеевого шва нанокompозита на основе герметика АН-111 от времени отверждения [56]

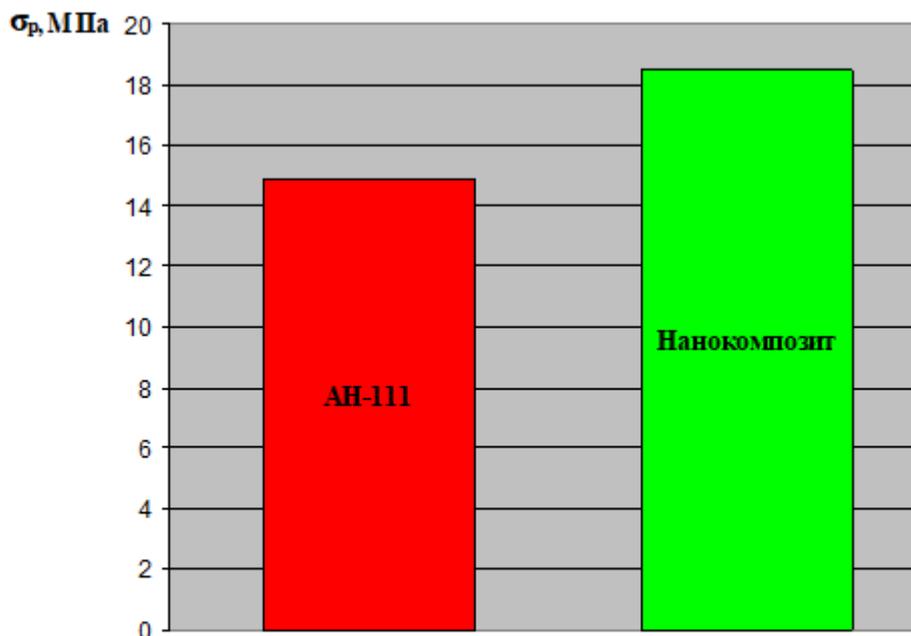


Рисунок 2.4 – Прочность при одноосном растяжении σ_p пленок герметика АН-111 и наноккомпозита на его основе [56]

Исследования в работах [110, 111] показали, что ввод лиофилизированных к каучуку высокодисперсных частиц алюминия, марганца, железа оказывает вулканизующее и усиливающее действие на композиты на основе хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков.

В работе Машина Д.В. наполнение эластомера Ф-40С микроразмерными частицами бронзы БПП-1 привело к увеличению глубины и скорости полимеризации, о чем свидетельствуют понижение температуры термической обработки композита, в сравнении с не наполненным эластомером, на 20⁰С – со 160 до 140⁰С, сокращение времени термической обработки на 0,5 ч – с 3 до 2,5 ч. Установлено увеличение на 8 % модуля упругости композита, в сравнении с не наполненным эластомером, от 1037 до 1111 МПа (рисунок 2.5).

Введение наночастиц меди в эластомер Ф-40 позволит обеспечить «замораживание» молекулярной подвижности и повысит модуль упругости наноккомпозита.

Получим формулу для расчета модуля упругости наноккомпозита на основе эластомера.

Введение металлических наночастиц в раствор эластомера увеличивает его вязкость. Причиной увеличения вязкости и повышения сопротивления течению являются межфазные области с «замороженной» молекулярной подвижностью полимера в этих (межфазных) областях.

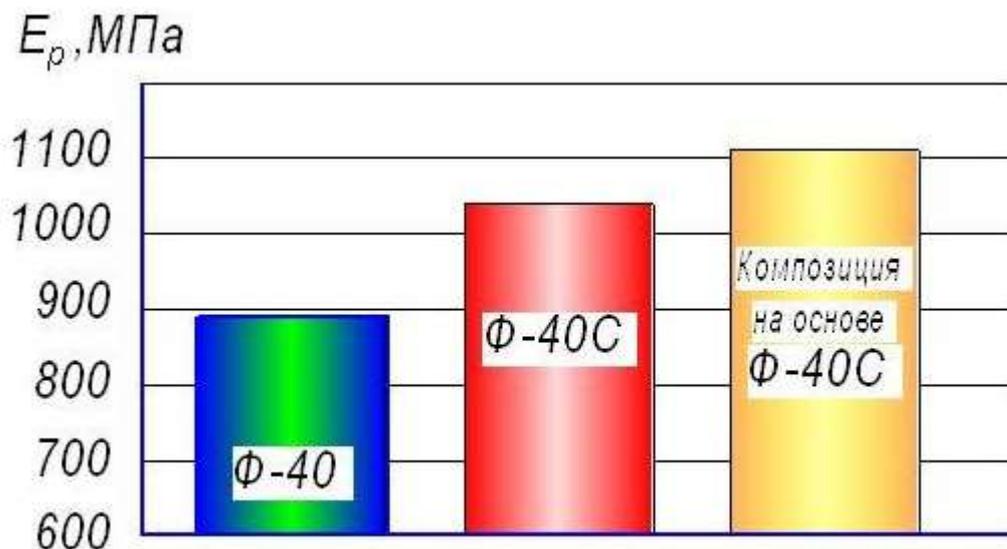


Рисунок 2.5 – Модуль упругости E_p эластомеров и композита

Благодаря высокой удельной поверхности дисперсных наночастиц, эффективное насыщение полимеров наполнителем (достижение экстремальных деформационно-прочностных свойств) достигается при низких концентрациях, до 5 масс.ч. Получим формулу для расчета модуля упругости эластомерного нанокompозита

Для суспензий с очень низкой концентрацией твердых частиц вязкость суспензии (полимерного нанокompозита) справедливо уравнение Эйнштейна [112]

$$\eta = \eta_1(1 + k_E \varphi_2), \quad (2.1)$$

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

При течении тело подвержено сдвиговой деформации. Следует отметить, что вязкотекучее и высокоэластическое состояния полимера очень похожи. Исхо-

для из вышеизложенного, для полимеров, которые находятся в высокоэластическом состоянии выполняется условие

$$\frac{\eta}{\eta_1} = \frac{G}{G_1}, \quad (2.2)$$

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

После подстановки (2.1) в (2.2) получили формулу расчета модуля жесткости (сдвига) эластомерного композита

$$G = G_1(1 + k_E \varphi_2) \quad (2.3)$$

Эластомерный композит приняли изотропным. Так как при восстановлении посадочных отверстий толщина полимерного покрытия не может быть больше 0,15 мм, будет справедливым допущение о линейном характере зависимости деформации материала от нагрузки. В этом случае выполняется соотношение [113]

$$G = \frac{E}{2 + 2\mu} \quad (2.4)$$

Формулу (2.4) подставили в выражение (2.3) и после преобразования получили

$$\frac{E_{нк}}{2 + 2\mu_{нк}} = \frac{E_{нм}}{2 + 2\mu_{нм}}(1 + k_E \varphi_2), \quad (2.5)$$

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

Приближенно, с достаточной достоверностью, можно принять равенство коэффициентов Пуассона эластомера и эластомерного нанокомпозита. В этом случае формула (2.5) преобразуется к виду

$$E_{nk} \approx E_{nm}(1 + k_E \varphi_2) \quad (2.6)$$

Получена формула (2.6) для расчета модуля упругости наполненного эластомера. В формуле (2.6) учтены деформационно-прочностные свойства полимерной матрицы (модуль упругости эластомера), форма и удельная поверхность наночастиц наполнителя, а также их содержание в композите.

2.2.2 Особенности повышения прочности и трещиностойкости эластомерных композитов

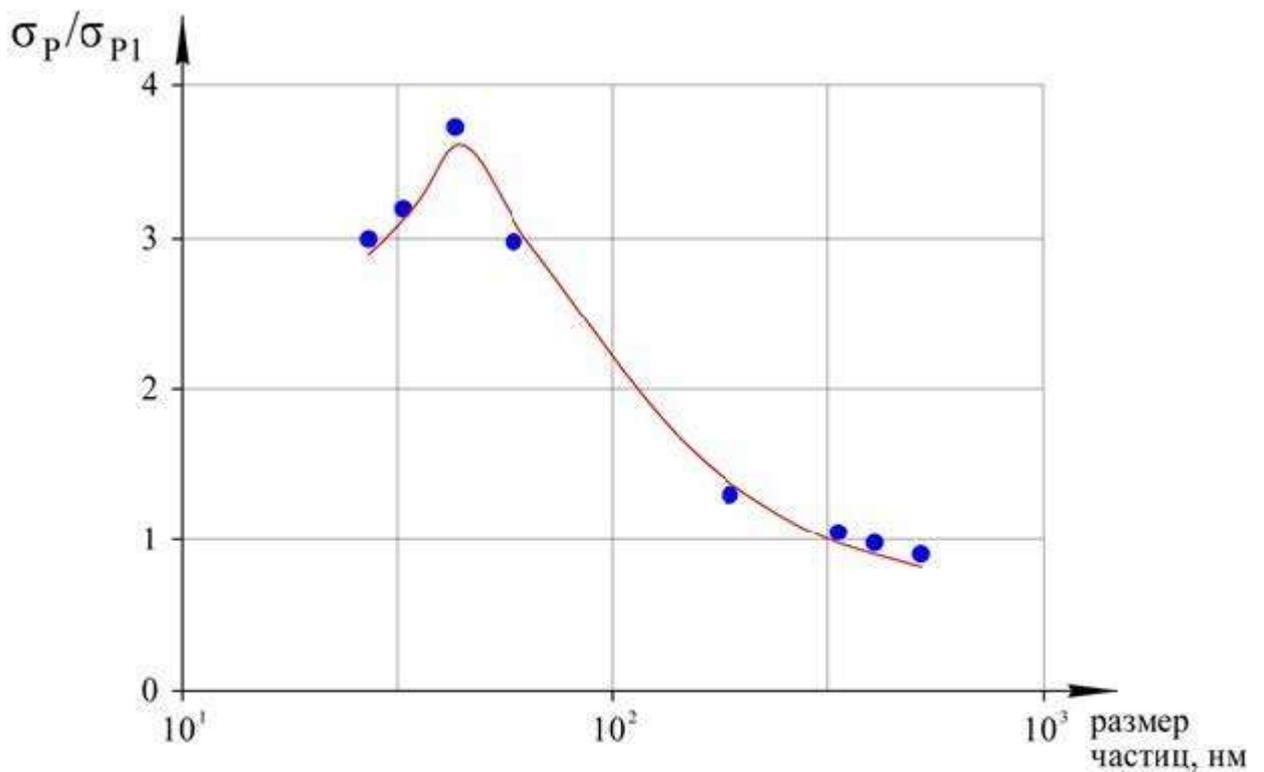
На усиление полимерных композитов в т.ч. эластомерных, влияют следующие факторы: размер и форма частиц наполнителя, вид распределения по объему полимерной матрицы, смачиваемость частиц наполнителя полимерным материалом и соответствующая адгезия между ними [115].

Размер частиц наполнителя определяет длину трещин, возникающих в матрице эластомера под нагрузкой, и соответственно его прочность. Прочность резины резины на основе бутадиенового каучука, наполненной наночастицами размером 70 нм, увеличивается до 3,8 раз (рисунок 2.6).

Размер наночастиц влияет на размер микротрещин, возникающих при нагружении композита, который будет значительно меньше критического. Вследствие того, что наночастицы имеют высокую удельную поверхность, количество микротрещин, которые образуются в эластомерной матрице, будет существенно больше, чем в композите, наполненном микроразмерными частицами. Поэтому требуется приложить больше энергии для разрушения материала, наполненного наночастицами.

Различная форма частиц влияет в основном на их способность к образованию цепочечных и разветвленных структур.

Композит будет иметь наиболее высокую прочность при равномерном распределении наночастиц по объему полимерной матрицы. Образование агломератов наночастиц приводит к возникновению дефектных областей и снижению прочности материала.



наполнитель: латексные частицы сополимера стирол: дивинилбензол:
акрилонитрил (75:20:5)

Рисунок 2.6 – Зависимость относительной прочности σ_p / σ_{p1} резины на основе бутадиенового каучука от размера частиц наполнителя [114]

Совместимость наполнителя и полимера характеризуется смачиваемостью, которая существенным образом влияет на свойства композита. При плохой смачиваемости частиц наполнителя полимером возникают такие структурные дефекты как агломераты частиц, уменьшается содержание наполнителя в соседних областях, снижается прочность материала.

Влияние адгезии полимера к наполнителю всесторонне рассмотрено в работе Воюцкого [115]. Адгезионная теория усиления эластомеров рассматривает композит как множество микроскопических адгезионных соединений типа эластомер – частица наполнителя. Установлено, что имеет место линейная зависимость прочности композитов от значений адгезии, которая подтверждает корректность адгезионной теории усиления эластомеров.

В адгезионной теории усиления увеличение прочности эластомерного композита, который содержит цепочечные структуры, обеспечивается не за счет контакта частиц наполнителя между собой, а благодаря наличию в зазоре, окружающем место контакта, молекул полимера, каждая из которых прочно связана по крайней мере с двумя частицами наполнителя.

В соответствии с Бики связи частиц наполнителя друг с другом разрушаются при небольших удлинениях, вследствие отрыва полимерных цепей сетки от частиц наполнителя либо разрыва сильно растянутых полимерных цепей сетки [112], которые закреплены между двумя соседними частицами наполнителя (рисунок 2.7). Такая модель предусматривает разрушение отдельных прочных связей при небольшой деформации материала. При деформации материала полимерная цепь А разорвется в первую очередь, так как она уже значительно деформирована, а затем цепь В. Разрыв цепи С или ее отрыв от поверхности наполнителя произойдет в последнюю очередь при значительно большем удлинении.

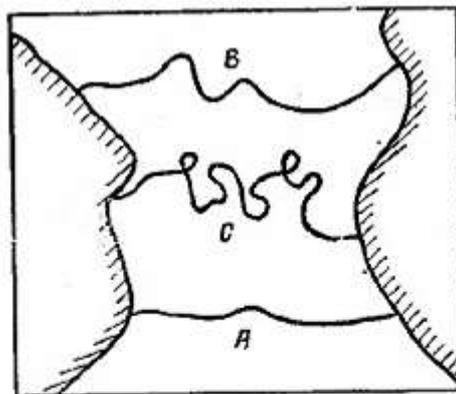


Рисунок 2.7 – Схематическое изображение цепей каучука, связанных с двумя частицами наполнителя [112]

На степень упрочения существенным образом влияет межмолекулярное взаимодействие в полимере. Эффект усиления наиболее заметен в полимерах с низким межмолекулярным взаимодействием. Если имеет место сильное межмолекулярное взаимодействие в полимере – эффект усиления не столь очевиден.

Упорядочение макромолекул полимера, изменение их подвижности вблизи поверхности контакта эластомер – наполнитель, ориентация макромолекул на поверхности частиц наполнителя под воздействием несимметричных силовых полей вокруг последних, являются также причиной усиления полимеров.

Молекулярное движение существенным образом определяет прочность наполненных полимеров. В сравнении с не наполненным эластомером прочность композита при температурах ниже температуры стеклования интенсивно понижается. Это связано с невозможностью релаксации напряжений, которые возникают из-за различия термических коэффициентов расширения полимера и наполнителя. Поэтому в композите подвижность кинетических элементов влияет не только на деформационные процессы и развитие дефектов; но и на когезию материала.

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

Выравнивание напряжений при разрыве связей эластомер-наполнитель

Основной причиной увеличения прочности эластомерных композитов является выравнивание напряжений по объему материала в ходе его деформации.

Механизм усиления эластомеров при вводе наполнителей в матрицу объясняется в основном механическими эффектами, которые связаны с распределением напряжений в композите в ходе деформации. Другие факторы оцениваются по степени их влияния на механические характеристики композита.

При высоких удлинениях, вследствие значительных напряжений в эластомерном композите, точки зацеплений, узлы полимерной сетки, а также частицы наполнителя перемещаются. По этой причине общая релаксация напряжений в наполненном эластомере обусловлена процессами релаксации при отрыве цепей

каучука от частиц наполнителя, и перегруппировкой самих частиц наполнителя, которая осуществляется с очень малой скоростью.

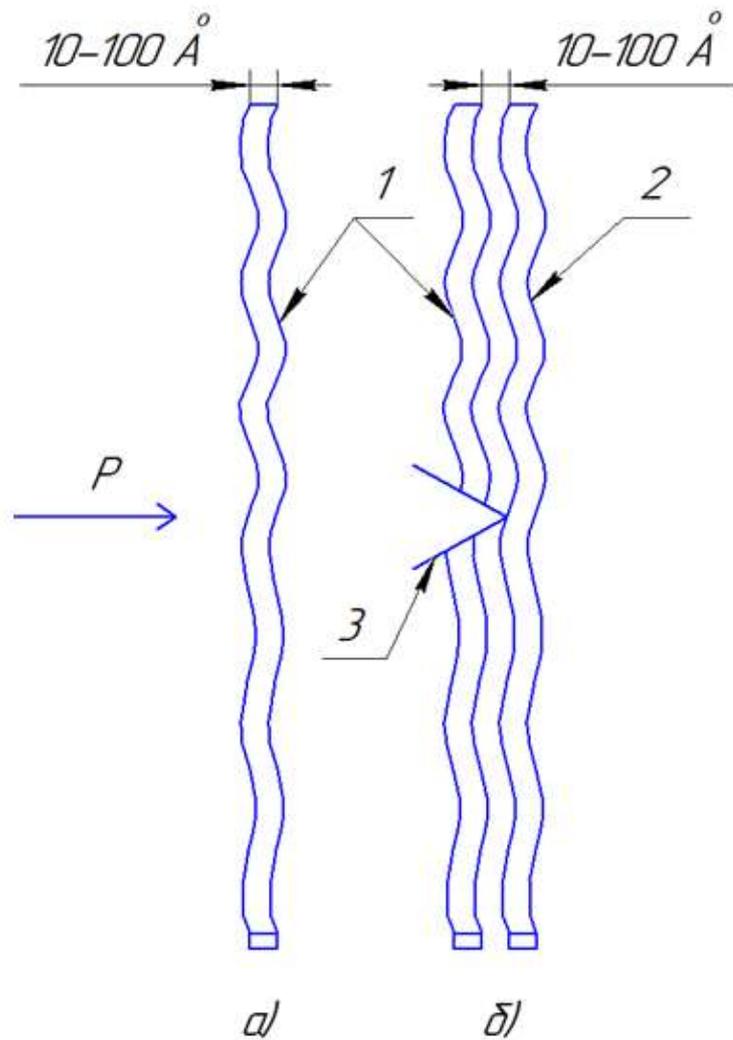
При деформации резины многочисленные связи каучук-сажа разрываются, а затем молекулы каучука вновь закрепляются на поверхности частиц сажи в других положениях, происходит восстановление новых связей, которые при этом частично ориентированы в направлении деформации. По этой причине возникает местная релаксация и выравнивание локальных избыточных напряжений. Чем прочнее связь наполнитель-каучук, тем больше эффект усиления эластомерного композита. Это связано с тем, что при дальнейшем деформировании материала опять происходит разрыв и восстановление связей наполнитель-каучук в новых положениях с ориентацией молекул полимера в направлении деформации и поэтому для разрыва связей требуется еще большее напряжение.

Эффект усиления определяется также структурой эластомера и, соответственно его упругими свойствами, так как от последних зависит напряжение, которое возникает на поверхности частиц наполнителя и его локализация. По этой причине при равном количестве поперечных связей и сцеплений каучук-наполнитель степень усиления у разных каучуков отличается. Механизм выравнивания напряжений при растяжении эластомерного композита подтверждает преобладание физического взаимодействия между молекулами каучука и частицами наполнителя, так как при более сильных связях был бы невозможен отрыв цепей от частиц каучука.

Притупление растущих трещин в материале

Вторым фактором увеличения прочности наполненных эластомеров является характером роста трещин, которые образуются в дефектах в массе эластомера (притупление вершин растущих трещин) [116]. Полимерная матрица у вершины трещины подвергается значительным напряжениям, которые выше номинального напряжения в образце около 10^3 раз. После разрыва тонкого полимерного волокна у вершины трещины надрыв перемещается на расстояние (рисунок 2.8), примерно сопоставимое с толщиной волокна ($10 - 100 \overset{\circ}{A}$).

При этом происходит релаксация разорванного волокна, а высокое напряжение передается смежному полимерному волокну, которое теперь находится у вершины надрыва. Это волокно деформируется под остаточной нагрузкой от ранее разорванного волокна и для его разрыва требуется дополнительная энергия. Скорость распространения надрыва зависит от избыточного напряжения на волокне и вязко-упругих свойств эластомера. Средняя скорость распространения трещины это отношение времени распространения трещины t_6 через n волоконцев.



1, 2 – полимерное волокно; 3 – вершина трещины; P – нагрузка при деформации
а) до разрыва волокна; б) после разрыва волокна

Рисунок 2.8 – Притупление растущих трещин в материале

Напряжение и удлинение при разрыве можно определить по формулам

$$\sigma_p = k/\Gamma(t_B/n),$$

(2.7)

$$(\varepsilon - \varepsilon^{-2}) = k[\Gamma(t_B)/\Gamma(t_B/n)]$$

где σ_p – номинальное напряжение, при котором происходит разрушение, Па; ε – относительное удлинение при разрыве; k – константа, включающая фактор концентрации напряжения и относительное удлинение при разрыве волокна; $\Gamma(t)$ – обобщенная функция ползучести, Па⁻¹.

В соответствии с формулой (2.7) прочность наполненных эластомеров зависит от значений константы k и характера кривых ползучести. Тем не менее, установлено, что после наполнения каучука величина k значительно не меняется. Поэтому повышение прочности обусловлено различной ползучестью наполненных и не наполненных эластомеров. Это различие вызвано увеличением модуля упругости наполненных эластомеров.

Скорость роста трещин существенным образом определяется гистерезисными свойствами эластомеров. Гистерезис наполненных эластомеров выше, чем не наполненных. Чем выше гистерезис, тем меньше скорость разрастания трещин.

Причины увеличения гистерезиса в наполненных эластомерах: 1) энергия, выделяемая при разрыве физических связей между частицами наполнителя и каучука, 2) заторможенность движения полимерных цепей у поверхности частиц наполнителя.

Вследствие повышенного механического гистерезиса степень релаксации напряжения композитов в области больших деформаций перед вершиной разрастающейся трещины всегда больше, чем в не наполненных эластомерах. По этой причине в эластомерных композитах будет наблюдаться повышение трещиностойкости и выносливости материала, то есть способности сопротивляться циклическим нагрузкам – увеличение долговечности материала.

Сеточные теории усиления эластомеров по Вики объясняют упрочнение тем, что между цепями каучука и частицами активного наполнителя образуются прочные связи, а неподвижные узлы сетки, образованные такими связями, определяют деформационно-прочностные свойства резины. Степень усиления зависит в основном от количества связей, их прочности и подвижности частиц наполнителя в полимерной матрице.

При малых деформациях между напряжением σ и деформацией ε справедливо соотношение [112]

$$\sigma = (v_r + v_f)kT(\varepsilon - \varepsilon^{-2}), \quad (2.8)$$

где v_r – первоначальное число эффективных цепей в сетке; v_f – дополнительное число цепей, введенных в сетку при образовании связи с частицами наполнителя (всюду v – число цепей в единице объема смеси каучук-наполнитель).

Величину v_f можно определить по формуле

$$v_f = (S/s)\Phi,$$

где S – площадь поверхности наполнителя; s – средняя площадь, приходящаяся на один активный центр, Φ – объемная доля наполнителя.

Как следует из формулы величина v_f прямо пропорциональна площади поверхности наполнителя S и объемной доле наполнителя Φ , и обратно пропорциональна средней площади, приходящейся на один активный центр s .

Площадь, приходящаяся на один активный центр s , определяется размером частицы наполнителя S , поэтому отношение этих величин называют коэффициентом пропорциональности $\beta = \frac{S}{s}$.

С учетом выше изложенного формула (2.8) получила вид

С учетом выше изложенного формула (2.8) получила вид

$$\sigma = (v_0 v_1 + \beta \Phi) kT (\varepsilon - \varepsilon^{-2}), \quad (2.9)$$

где v_0 – значение v_0 для ненаполненного полимера, v_1 – концентрация каучука.

Из формулы (2.9) следует, что с увеличением объемной доли наполнителя прочность повышается. Однако это справедливо до определенного (оптимального) значения наполнения Φ_{opt} . При значениях больше Φ_{opt} увеличивается вероятность агрегации частиц наполнителя, что приводит к снижению прочности композита.

Необходимо отметить, что увеличение деформации материала является причиной повышения прочности композита. Поэтому при разработке эластомерных нанокомпозитов следует стремиться к увеличению деформационных свойств материала.

Увеличение рассеивания энергии в объеме материала по линии разрыва

Третьим фактором увеличения прочности является рассеивание энергии в объеме материала по линии разрыва.

В эластомерном композите связь каучук-наполнитель не превышает поверхностную энергию матрицы. По этой причине в ходе деформации материала в последнем образуются многочисленные очаги разрушения, что вызывает повышенное рассеяние энергии. Разрушение в материале происходит скачкообразно от одной поверхности раздела каучук-наполнитель к другой по зигзагообразной линии. Благодаря этому значительно увеличиваются путь и работа разрушения эластомерного композита. Чем больше работа разрушения, тем выше стойкость материала к циклическим нагрузкам, его выносливость и, соответственно, долговечность [9].

В работе Муллинза Л. исследовано разрушение наполненных резин, которое проводили методом электронной микроскопии [114]. Установлено, что разрыв перемещается по зигзагообразной линии от одной поверхности раздела каучук-наполнитель к другой. Разрушение происходит по слабым местам, которыми могут быть поверхности частиц наполнителя и граничные к ним области. В нано-

композитах разрушение поверхности металлических наночастиц маловероятно, однако высока вероятность разрушения агрегатов наночастиц.

Структура вулканизатов имеет многочисленные внутренние дефекты, которые являются причиной повышенного рассеяния энергии, так как для разрушения образца требуется большой объем резины, который следует подвергать сильному растяжению. Объем резины, участвующий в деформировании и величина рассеиваемой энергии деформации зависят от адгезии каучука к наполнителю. Таким образом, появление дефектов (гетерогенности) может не только ослаблять прочность адгезионного соединения, но и быть причиной упрочнения материала.

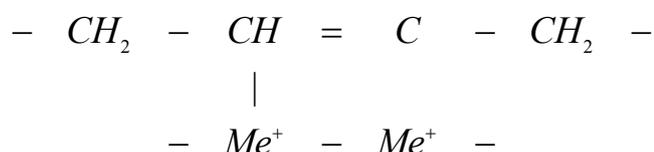
Образование цепочечных структур частиц наполнителя между собой

Отдельным фактором усиления эластомеров является способность частиц наполнителя образовывать в полимере цепочечные структуры. Исследования Догадкиным и сотрудниками наполненных каучуков [112] показали, что с увеличением степени структурирования (развития цепочечной структуры наполнителя) возрастает эффект усиления. Цепочечные структуры из частиц активного наполнителя образуются в среде каучука по причине того, что поверхность таких частиц энергетически неоднородна. Энергия взаимодействия частиц наполнителя между собой больше, энергии взаимодействия на границе раздела каучук-наполнитель. Цепочечные структуры усиливают композит, потому что выполняют роль матрицы, на которой ориентируются молекулы каучука. Чем больше развита цепочечная структура, тем больше ее влияние на ориентацию цепей каучука.

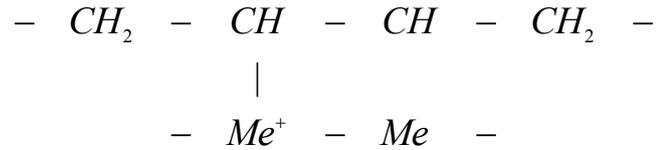
При деформировании резин, содержащих цепочечные структуры из частиц активного наполнителя, плоскость разрыва пересекает более прочные связи между частицами наполнителя, что препятствует разрушению.

Химическое взаимодействие металлических частиц с молекулами каучука

Частицы металлов переменной валентности и непредельных каучуков могут образовывать ковалентные связи по следующей схеме [116]



или



Доказательством является тот факт, что наличие в натуральном каучуке коллоидных частиц железа, никеля и кобальта приводит к образованию металлкауучкового геля.

Наполнение полиуретановых каучуков высокодисперсными частицами железа приводит к возникновению координационных соединений на границе раздела азотсодержащий полимер – металл.

Образование хемосорбционных связей между макромолекулами полимера и ультрадисперсными частицами металлов отмечено в композитах на основе карбоксилатного каучука. Изучая набухание и десорбцию вышеуказанных композитов, авторы пришли к заключению о необратимости данного процесса.

В работе Михайлюк А.Е. в матрице эластомера СКЭПТ-40 на основе этиленпропиленового каучука, при высоких сдвиговых деформациях синтезированы наночастицы металлов переменной валентности [46, 47]. Образцы композитов с оптимальными концентрациями наночастиц меди и никеля имеют более высокую прочность по сравнению с не наполненным эластомером СКЭПТ-40 (рисунок 2.9).

В нанокompозитах на основе эластомера СКЭПТ-40 образуются хемосорбционные связи между макромолекулами каучука и поверхностью металлических наночастиц, что увеличивает прочность и термостойкость материалов [46].

Резины с высокодисперсными частицами металлов отличаются повышенными деформационно-прочностными свойствами. Причиной являются прочные связи каучук-металл, образующиеся в момент раскрытия двойных связей. В таблице 2.3 показаны деформационно-прочностные свойства композитов на основе хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков, наполненных ультрадисперсными частицами металлов [116].

Из таблицы следует, что наиболее высокие показатели имеют композиты, наполненные частицами алюминия и марганца.

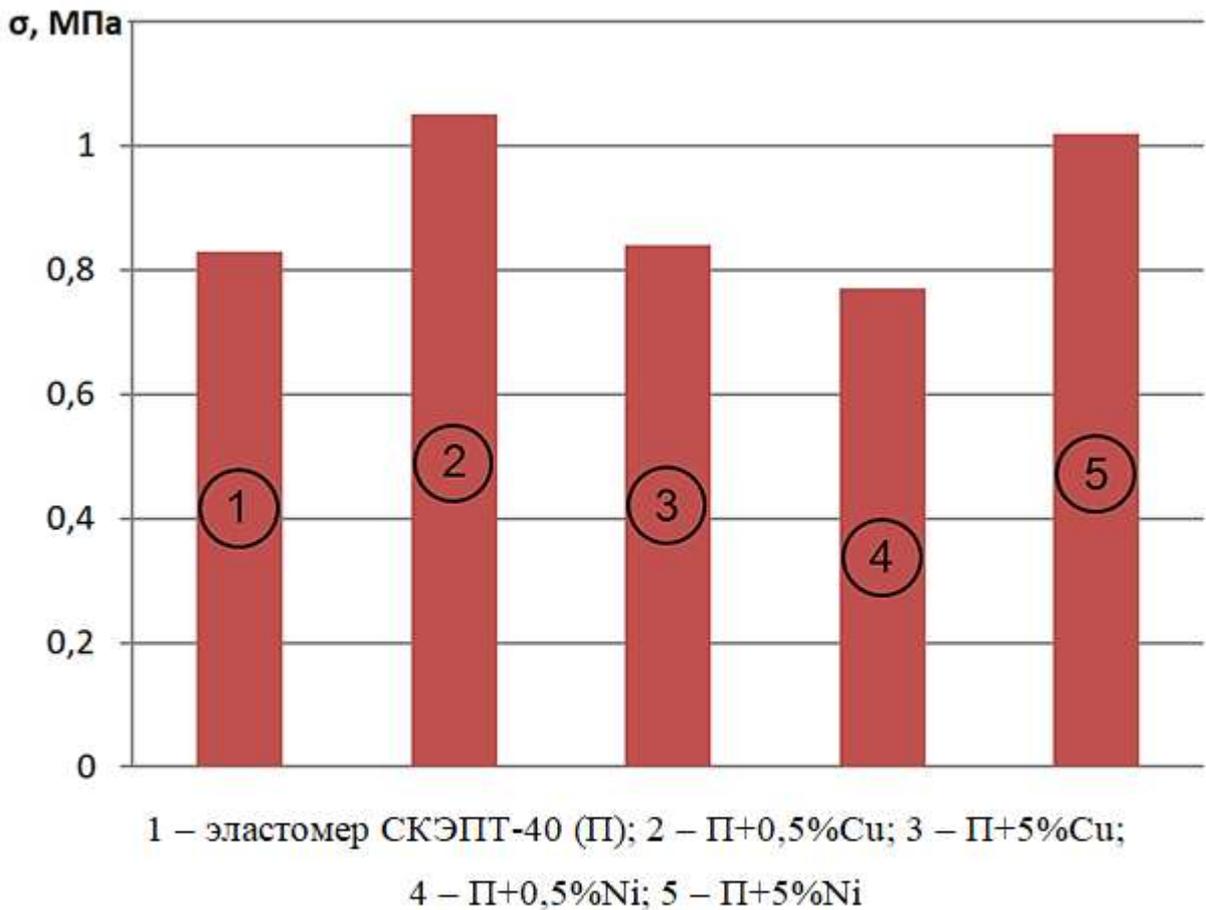


Рисунок 2.9 – Прочность σ образцов эластомера СКЭПТ-40 и композитов на его основе [46]

Алюминий имеет наиболее высокую удельную поверхностную энергию разрушения. Использование частиц алюминия в качестве наполнителя полимерных материалов повышает поверхностную энергию разрушения, прочность, трещиностойкость и выносливость композитов [54...56, 86]. Поэтому, с учетом данных таблицы 2.3, наполнение эластомера Ф-40 на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-40, наночастицами алюминия приведет к увеличению прочности и долговечности нанокомпозита.

Выводы

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

Таблица 2.3 – Свойства вулканизатов на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-26, содержащих ультрадисперсные частицы металлов [116]

Показатели	Кон троль ный	Марганец			Железо			Свинец			Алюминий		
		3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10
Масс. ч.													
Предел прочности при растяжении, МПа	27,4	32,4	33,3	32,7	32,4	33,2	32,1	28,2	32,7	29,0	26,8	33,3	29,8
Относительное удлинение, %	520	630	630	600	590	560	530	570	540	400	600	570	520
Сопротивление раздиру, кН/м	55		68			85			55			56	

2. При наполнении эластомеров металлическими наночастицами образуются хемосорбционные связи между макромолекулами каучука и поверхностью металлических наночастиц, что увеличивает деформационно-прочностные свойства материала. Наполнение эластомера Ф-40 на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-40 наночастицами алюминия приведет к увеличению прочности и долговечности нанокомпозита.

2.2.3 Повышение теплостойкости, и теплопроводности композита эластомера при введении металлических наночастиц

Теплостойкость

Эластомеры: ГЭН-150(В), герметик 6Ф, лаки Ф-40 и Ф-40С, в сравнении с анаэробными герметиками, акриловыми и цианакрилатными адгезивами, отличаются относительно не высокой теплостойкостью. Наиболее низкую теплостойкость имеет эластомер ГЭН-150(В) – около 60°C. С повышением температуры выше указанной полимер из высокоэластического состояния переходит в вязкотекучее [9]. Теплостойкость герметика 6Ф, лаков Ф-40 и Ф-40С, имеющих примерно одинаковую основу существенно выше. Материалы находятся в высокоэластическом состоянии в интервале от 20 до 100°C, а при более высокой температуре переходит в вязкотекучее состояние. Этим объясняется ограниченное, в сравнении с другими указанными выше эластомерами, применение эластомера ГЭН-150(В) при восстановлении изношенных посадочных мест подшипников. Однако учитывая, что подшипники обычного исполнения нагреваются при работе до температур 70...90°C, необходимо, чтобы полимерные материалы для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, обладали большим температурным запасом по теплостойкости.

Наполнение полимерных материалов микроразмерными металлическими частицами практически не изменяет теплостойкость и температуру стеклования композита [117, 118]. Теплостойкость микрокомпозита фактически определяется теплостойкостью полимерной матрицы.

Совершенно другая картина наблюдается в полимерных нанокомпозитах на основе эластомеров.

Наполнение полимерной матрицы металлическими наночастицами, приводит к образованию сетчатых образований с наночастицами в узлах. По этой причине молекулярная подвижность полимерных цепей уменьшается, а теплостойкость соответственно увеличивается [119].

В разделе 2.2.1 было установлено что, в нанокомпозитах при взаимодействии полимера с частицей наполнителя на поверхности последней образуется адсорбированный слой (межфазная область), который свойствами существенно отличается от полимерной матрицы. Имеет место «замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, т.е. у поверхности наночастиц наполнителя. Модуль упругости межфазного меньше аналогичного параметра материала наполнителя, но многократно превышает модуль упругости полимера матрицы. В виду высокой удельной поверхности наночастиц наполнителя, доля межфазных областей в полимерном нанокомпозите значительно больше, чем в микрокомпозите. «Замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, повышение модуля упругости, являются причиной увеличения теплостойкости нанокомпозита в сравнении с не наполненным эластомером.

Теплопроводность

В соответствии с механизмом теплопереноса различают три категории твердых тел:

- диэлектрики, в которых теплопроводность вызвана колебаниями решетки;
- металлы, в которых перенос тепла осуществляется преимущественно электронами;
- вещества ограниченно проводящие тепло, в которых совмещены оба вида теплопроводности.

Полимерные композиты можно отнести в последней категории теплопроводящих тел.

Теплопроводность аморфных полимеров с повышением температуры до температуры стеклования T_c увеличивается. При повышении температуры после величины T_c теплопроводность снижается.

Теплопроводность полимерного двухкомпонентного композита можно определить по уравнению Максвелла, который представил полимерную систему как изотропную среду, в которой внедрены частицы наполнителя, имеющие сферическую форму.

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2v(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + v(\lambda_1 - \lambda_2)} \right), \quad (2.10)$$

где $\lambda_{\text{эфф}}$ – эффективная теплопроводность гетерогенной системы; λ_1 – теплопроводность непрерывной фазы; λ_2 – теплопроводность диспергированной фазы; v – объемная концентрация диспергированной фазы.

Значительное влияние на процесс теплопереноса в полимерных композитах оказывают также следующие факторы:

- образование агрегатов из частиц наполнителя, что при определенной концентрации приводит к образованию проводящих "мостиков" между частицами и возникновению эффекта прыжковой проводимости;
- взаимодействие частиц полимера с поверхностью частиц наполнителя приводит к образованию граничного слоя, свойства которого существенно отличаются свойств полимерной матрицы;
- пористость полимерной матрицы в композите.

В виду того, что в нашей работе исследуется система из трех компонентов, формула (2.10) не пригодна для расчетов.

Коэффициент теплопроводности трехкомпонентного полимерного нанокомпозита можно определить по формуле [120]

$$\lambda_K = \lambda_1 \cdot \left[\frac{\varphi_2}{1-\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\varphi_1}{\frac{1}{(1-\nu_{12})} - \frac{\varphi_1}{3}} \right) + \frac{\varphi_3}{1-\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\varphi_1}{\frac{1}{(1-\nu_{13})} - \frac{\varphi_1}{3}} \right) \right], \quad (2.11)$$

где $\lambda_K, \lambda_1, \lambda_2$ и λ_3 – коэффициенты теплопроводности композита, полимера и наполнителей, $\frac{Bm}{m \cdot K}$; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – объемные доли полимера и наполнителей;

$$\nu_{12} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad \nu_{13} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1}.$$

Вместо отношений ν_{12} и ν_{13} в формулу (2.11) подставим теплопроводности компонентов смеси и окончательно получим

$$\lambda_K = \lambda_1 \cdot \left[\frac{\varphi_2}{1-\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\varphi_1}{\frac{1}{(1-\frac{\lambda_2}{\lambda_1})} - \frac{\varphi_1}{3}} \right) + \frac{\varphi_3}{1-\varphi_1} \cdot \left(1 - \frac{1-\varphi_1}{\frac{1}{(1-\frac{\lambda_3}{\lambda_1})} - \frac{\varphi_1}{3}} \right) \right] \quad (2.12)$$

Формула (2.12) позволяет, используя коэффициенты теплопроводности и объемные доли эластомера и двух наполнителей, рассчитать коэффициент теплопроводности трехкомпонентного полимерного нанокомпозита.

Коэффициенты теплопроводности различных материалов, которые применяются как наполнители полимеров, представлены в таблице 2.4.

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

Таблица 2.4 – Коэффициенты теплопроводности различных материалов [47]

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м ² ·К)
Глина	0,2
Мел	0,8-2,2
Стекло	1
Графит	1,1-17,4
Тальк	2,7
Сталь	45-55
Бронза	64
Алюминий	200-240
Медь	380-400
Серебро	430

2.2 Технологическое обеспечение точности размеров отверстий с полимерным покрытием при восстановлении корпусных деталей

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

В работах [99, 121... 123] калибрование отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях проводят после термической обработки покрытия, поэтому влияние усадки полимера на размер восстановленного отверстия полностью исключено. Технологическая оснастка для калибрования состоит из базирующей детали и калибра (рисунок 1.22).

Полимерное покрытие, которое калибруют под заданный размер, имеет прямолинейные образующие. Калибр выполняет роль резца, при движении он перемещается параллельно обрабатываемой поверхности, внедряясь при этом в по-

следнюю на заданную глубину. По эти признакам вышеуказанный способ механической обработки полимерного покрытия идентифицировали как строгание. При обосновании геометрических характеристик калибра была использована теория резания полимеров и рекомендуемые геометрические характеристики строгальных резцов.

Для любого обрабатываемого полимерного материала можно экспериментально определить критический передний угол резца, обеспечивающий нулевое значение радиальной составляющей силы резания $P_y = 0$. После механической обработки резцом, который заточен на критический передний угол, полимерное покрытие будет иметь наиболее точные размеры и минимальную шероховатость.

Экспериментальные исследования показали, что при увеличении переднего угла γ от 50° до 70° , силы резания уменьшаются. В виду того, что калибрование полимерного покрытия проводят за один проход, приняли геометрические параметры чистового строгального резца: главный угол в плане $\varphi = 0$, задний угол $\alpha = 10^\circ$.

При увеличении угла γ калибра, усилие резания F понижается. Зависимость носит прямолинейный характер (рисунок 2.10). При минимальном значении переднего угла $\gamma = 50^\circ$ усилие резания максимальное $F = 0,997$ кН. Калибр с углом $\gamma = 60^\circ$ обеспечивает снижение усилия резания до 1,26 раза, $F = 0,792$ кН. При максимальном значении переднего угла калибра $\gamma = 70^\circ$ усилие резания имеет минимальное – $F = 0,346$ кН. В сравнении с передним углом калибра $\gamma = 50^\circ$, усилие резания уменьшилось в 2,88 раза [121].

После механической обработки калибром с передним углом $\gamma = 50^\circ$ площадь разрушенного полимерного покрытия составила 10,5 % (рисунок 2.11). При калибровании режущим инструментом с углом $\gamma = 60^\circ$ этот показатель уменьшился в 1,2 раза, до 8,74 %. После механической обработки калибром с максимальным передним углом $\gamma = 70^\circ$ площадь разрушенного полимерного покрытия уменьшилась до 4,2 %. В сравнении с углами $\gamma = 50$ и 60° показатель качества снизился 2,5 и 2,08 раза соответственно.

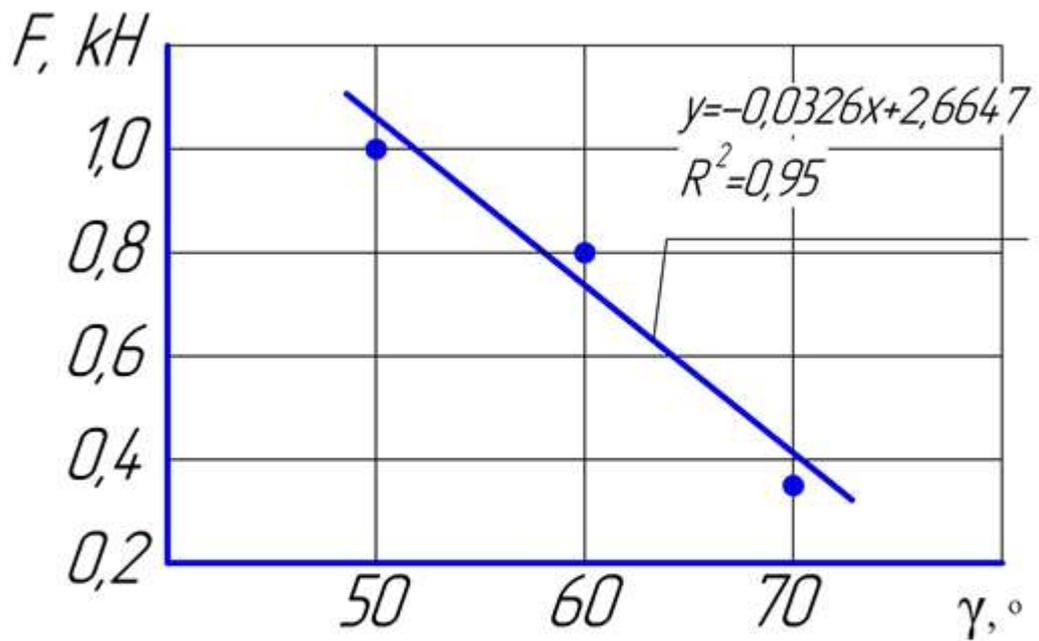
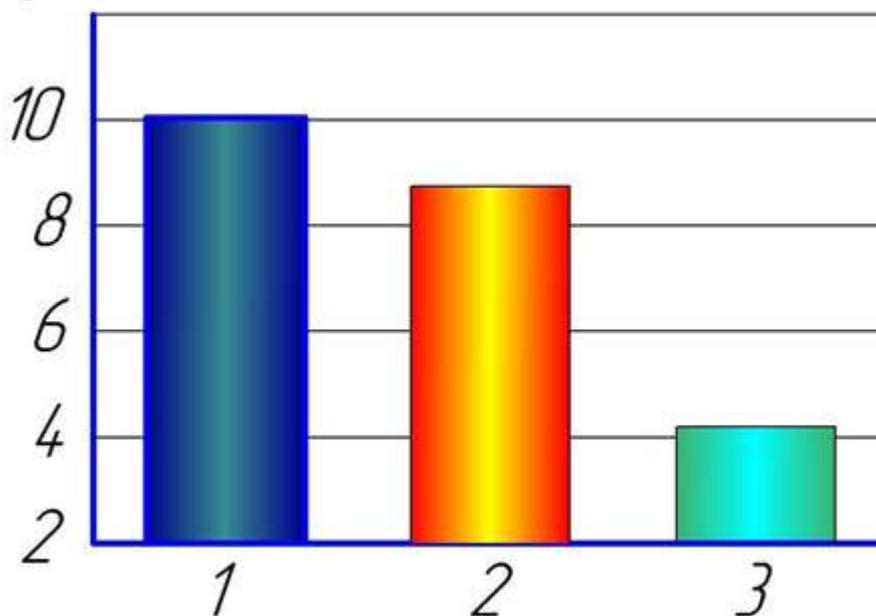


Рисунок 2.10 – Зависимость усилия резания F эластомера Ф-40С от переднего угла калибра-резца γ [121]

Площадь
разрушенного
покрытия, %



1) передний угол $\gamma = 50^\circ$; 2) передний угол $\gamma = 60^\circ$; 3) передний угол $\gamma = 70^\circ$

Рисунок 2.11 – Площадь разрушенного покрытия после механической обработки эластомера Ф-40С калибром-резцом [121]

Отклонение от круглости полимерного покрытия в отверстии корпусной детали является важным показателем, который влияет на смещение осей отверстия и подшипника. При угле калибра $\gamma = 50^\circ$ этот параметр после калибрования составил 12 мкм. Отклонение от круглости полимерного покрытия после прохода калибра с углом $\gamma = 60^\circ$ уменьшилось в 1,71 раза – до 7 мкм. После обработки калибром с максимальным значением переднего угла $\gamma = 70^\circ$ этот параметр минимальный – 3 мкм. В сравнении с углами $\gamma = 50$ и 60° отклонение от круглости меньше в 4 и 2,33 раза.

По результатам экспериментальных исследований определены рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра для механической обработки покрытий эластомера Ф-40С: передний угол $\gamma = 70^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$, которые обеспечивают высокую точность и качество покрытия.

Таким образом, исследованиями установлено, что определение рациональных геометрических параметров режущей кромки калибра, обеспечивает заданный размер восстановленного отверстия и высокое качество полимерного покрытия после калибрования.

Представляют научный и практический интерес всесторонние исследования процесса калибрования, качества и точности отверстий с покрытиями, выполненными нанокompозитом на основе эластомера Ф-40, с целью определения рациональных геометрических параметров режущей кромки калибра.

Выводы

1. Стабилизирующий эффект при термической деструкции эластомеров обеспечивают хемосорбционные связи между металлическими наночастицами и макромолекулами полимера. Благодаря высокой энергии ионизации меди, при взаимодействии ее наночастиц с макромолекулами каучука СКН-40 образуются прочные хемосорбционные связи. Поэтому для повышения термостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40 следует использовать наночастицы меди.

2. Введение наночастиц меди в эластомер Ф-40 позволит обеспечить «замораживание» молекулярной подвижности полимера и повысит модуль упругости нанокомпозита. Получена формула (2.6) для расчета модуля упругости эластомерного нанокомпозита, которая учитывает деформационно-прочностные свойства полимерной матрицы, форму, удельную поверхность и концентрацию наночастиц наполнителя в композите.
3. Проведенный анализ выявил 5 факторов повышения прочности и долговечности эластомерных композитов: выравнивание напряжений при разрыве связей эластомер-наполнитель, притупление растущих трещин в материале, увеличение рассеивания энергии в объеме материала по линии разрыва, образование цепочечных структур частиц наполнителя между собой, образование ковалентных или хемосорбционных связей между наночастицами и макромолекулами эластомера. Наполнение эластомера Ф-40 наночастицами меди и алюминия повысит прочность и долговечность (выносливость) нанокомпозита.
4. При вводе металлических наночастиц в полимерную матрицу, образуются сетчатые образования с наночастицами в полимерных цепях. При этом молекулярная подвижность цепей снижается, а теплостойкость нанокомпозита увеличивается.
5. Медь и алюминий обладают наиболее высокой теплопроводностью. Поэтому наполнение эластомера Ф-40 наночастицами меди и алюминия повысит теплопроводность нанокомпозита. Предложена формула (2.12) для расчета теплопроводности трехкомпонентного эластомерного композита, которая учитывает коэффициенты теплопроводности и объемные доли эластомера и двух наполнителей.
6. Определение рациональных геометрических параметров режущего инструмента при калибровании полимерного покрытия, обеспечит заданный размер восстановленного отверстия и высокое качество полимерного покрытия после калибрования.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Общая методика исследований

На основе цели и задач исследований, которые поставлены в диссертационной работе, разработана общая схема проведения теоретических и экспериментальных исследований (рисунок 3.1).

Объекты исследований в диссертационной работе:

- пленки и покрытия на различных стальных подложках из эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе;
- втулки с покрытием на внутренней поверхности из эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе;
- подшипниковые узлы, с посадочными местами восстановленными эластомером Ф-40 и нанокompозита на его основе.

Лак Ф-40 поставляется в виде раствора композита бутадиен-нитрильного каучука и модифицированной фенольной смолы в ацетоне. Разработчиком и производителем материала является ОАО "НИИ пластических масс им. Г. С. Петрова" (г. Москва). Эластомер в виде раствора поступает к потребителю, в удобных для использования, пластиковых емкостях различного объема.

Компоненты лака Ф-40 (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.% [124];
- 3) ацетон технический, ГОСТ 2768-84 – 80 масс.%.

В качестве наполнителей эластомера Ф-40 использовали наноразмерные частицы алюминия и меди.

В таблице 3.1 представлены параметры нанопорошка алюминия (70) [125].

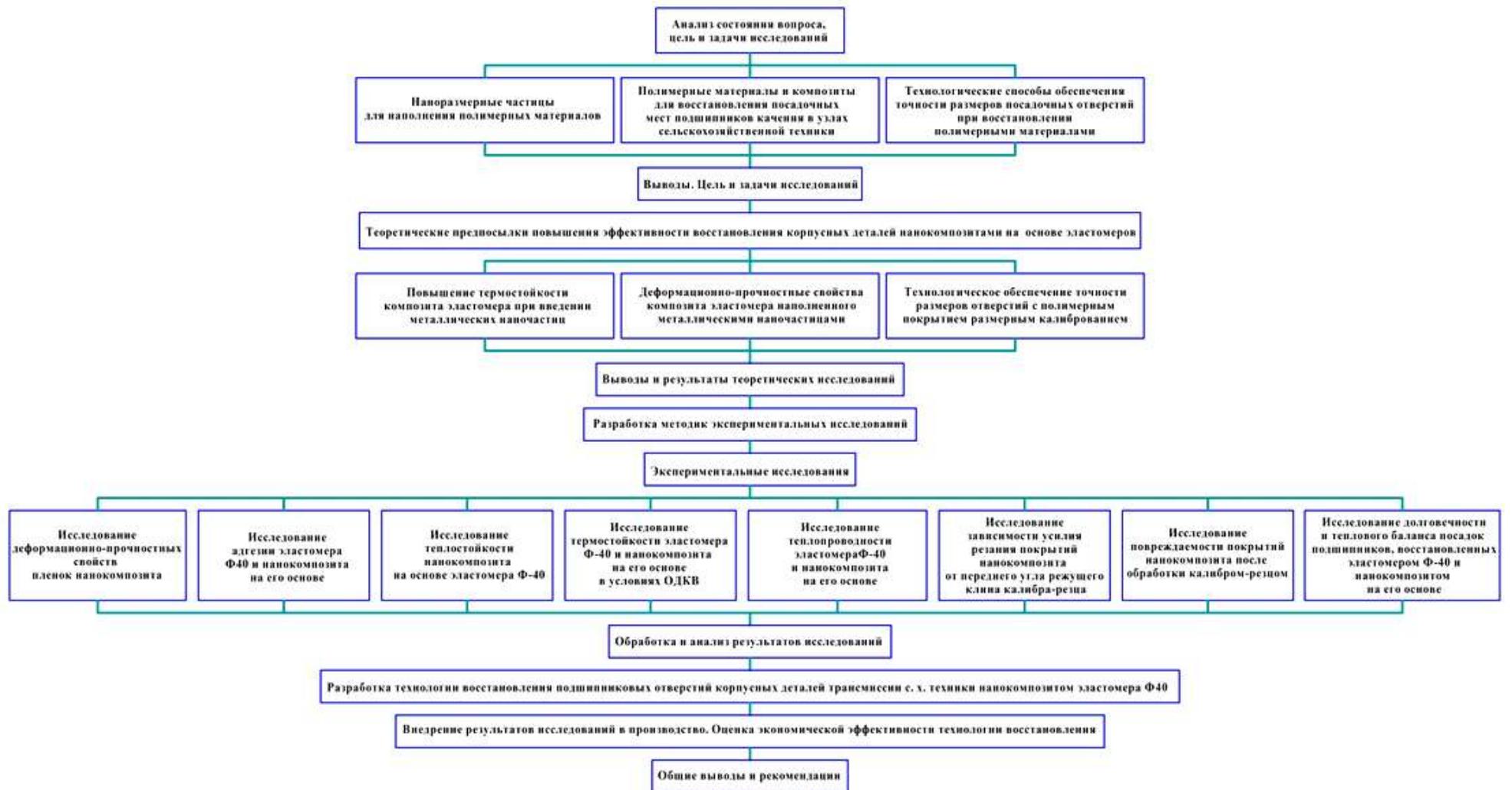


Рисунок 3.1 – Общая схема теоретических и экспериментальных исследований

Таблица 3.1 – Параметры нанопорошка алюминия (70)

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Значения
1	Среднеарифметический размер частиц	нм	50...70
2	Насыпная плотность	г/см ³	0,07
3	Точка плавления	°С	640
4	Содержание активного алюминия	%	90
5	Удельная поверхность	м ² /г	24,5

В таблице 3.2 представлены параметры нанопорошка меди [125].

Таблица 3.2 – Параметры нанопорошка меди (70)

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Значения
1	Среднеарифметический размер частиц	нм	50...70
2	Насыпная плотность	г/см ³	5
3	Точка плавления	°С	1200
4	Удельная поверхность	м ² /г	6,8...12
5	Содержание металлической меди	%	98

Отбор компонентов выполняли на весах лабораторных M-ER 122ACF-3000.05 LCD (приложение Г). Компоненты смешивали вручную в течение 1 мин, затем диспергировали в ультразвуковой ванне «GRAD 0,5 HOME STYLE» (приложение Г) в течение 4 мин при мощности озвучивания 55 Вт [84].

Зазор в сопряжении «корпус-подшипник», имитирующий износ, обеспечивали посредством механической обработки посадочного отверстия под подшипник.

Измерение внутренних диаметров образцов осуществляли индикаторными нутромерами (ГОСТ 868-72) с индикаторной головкой ИЧ-1-0,001, у которой цена деления составляет 0,001 мм (ТУ 3942-017-74229882-2014 ЧИЗ)

При измерении наружных поверхностей образцов использовали рычажную скобу (ГОСТ 11098-75) с ценой деления 0,002 мм и микрометры гладкие МК с ценой деления 0,01 мм (ГОСТ 6507-90) .

Эксперименты реализовали в соответствии с частными методиками, описанными в данной главе ниже.

3.2 Методика исследования деформационно-прочностных свойств пленок эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе

На начальном этапе исследовали прочность и деформацию пленок нанокompозитов четырех составов: состав №1: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1,6 масс. ч., Cu – 1,4 масс. ч.; №2: Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1,8 масс. ч., Cu – 1,6 масс. ч.; №3: Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2,0 масс. ч., Cu – 1,8 масс. ч.; №4: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2,2 масс. ч., Cu – 2,0 масс. ч.

Деформационно-прочностные свойства пленок эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе оценивали прочностью пленок при одноосном растяжении σ_p , относительным удлинением ε_p и удельной работой деформации при разрыве пленок α_p [126].

Образцы представляли собой пленки прямоугольной формы размерами: 50×10×0,15 мм. Расчетная длина образца составляла 30 мм. Подложка для формирования пленок представляла собой опорную пластину, изготовленную из фторопласта-4. Размеры пластины: 200×160×4 мм. Для обеспечения необходимой формы и геометрических размеров пленок использовали рамку-графарет, изготовленную из стали 3 (рисунок 3.2). Размеры рамки: 180×140×0,8 мм. В рамке профрезерованы шесть окон. Размеры окон: 60×15 мм.

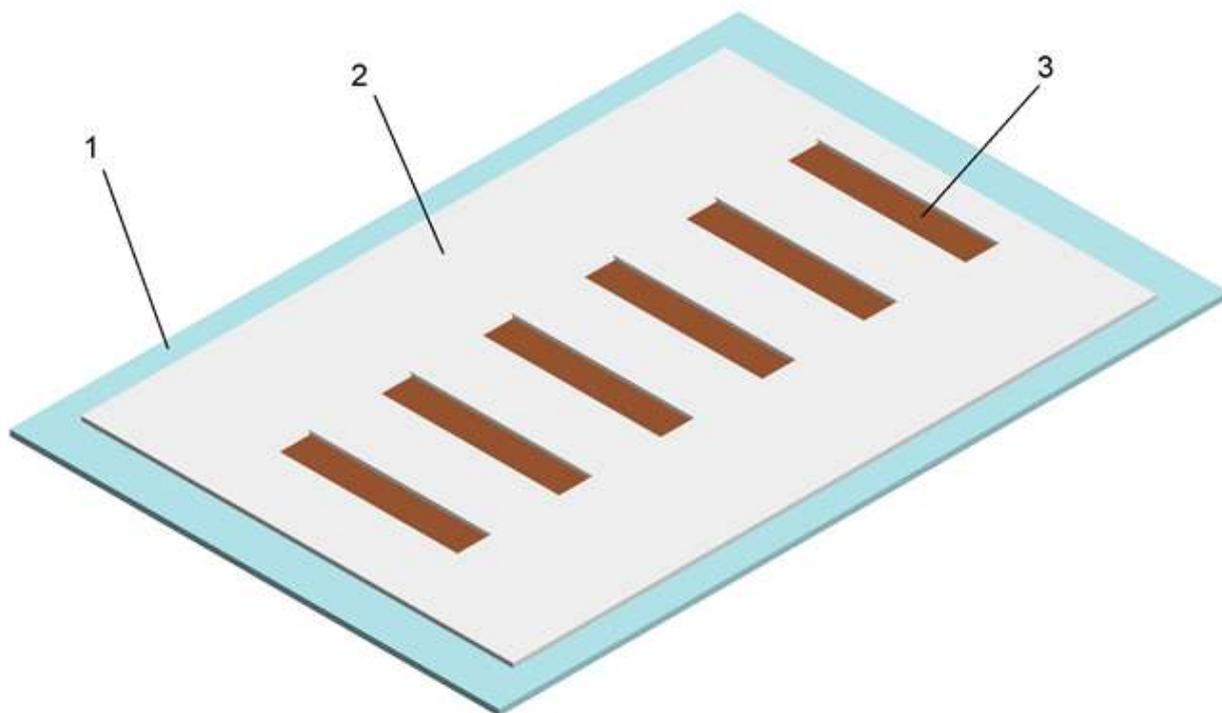
После наложения рамки на фторопластовую пластину, заполнили ее окна, нанося послойно покрытие из раствора полимерного материала волосяной кистью 5. По завершении заполнения окон рамки раствором полимерного материала, поверхность последнего формовали фторопластовой крышкой, чтобы придать равнотолщинность полимерным покрытиям. По завершении отверждения образцы кондиционировали при комнатной температуре в течение 16 ч [127].

Предельное отклонение размеров образцов по длине и ширине составляло не более $\pm 0,1$ мм.

Образцы испытывали на разрывной машине ИР 5082-50 (рисунок 3.3). Исследования проводили с одновременной записью диаграммы «нагрузка-

деформация». Масштабы измерений: нагрузки $M:1\text{мм} = 1,6\text{ Н}$; деформации $M1:1$.

Испытания образцов проводили с постоянной скоростью нагружения 50 мм/мин.



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

Рисунок 3.2 – Форма-оснастка для получения пленок

Так как, скорость распространения волн в высокоэластических полимерных материалах составляет 30...50 м/с, скорость нагружения образцов обеспечивала равномерное распределение напряжений по объему образца [128].

Прочность пленок σ_p определяли по формуле [113]

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

где F_p – разрушающая нагрузка, Н; A_H – площадь поперечного сечения пленки, мм².



Рисунок 3.3 – Разрывная машина ИР 5082-50

Относительное удлинение пленок ε_p рассчитывали по формуле

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta l_o}{l_o} \cdot 100, \quad (3.2)$$

где l_o – начальная расчетная длина пленки, мм; Δl_o – изменение расчетной длины образца в момент разрыва, мм.

Работа деформации при растяжении образцов А определена измерением площади на диаграмме, которая ограничена кривой "нагрузка - деформация" и осью абсцисс.

Удельная работа деформации при растяжении образцов α_p определена делением значения работы деформации А на объем полимерной пленки $V = 180 \times 10^9 \text{ м}^3$.

Для оптимизации состава нанокompозита провели многофакторный эксперимент, используя композиционный план В₂ [129]. Проведенный предварительно классический эксперимент показал нелинейную зависимость удельной работы при растяжении пленок эластомерного нанокompозита от содержания частиц наполнителей. За функцию отклика Y принята удельная работа разрушения α , МДж/м³, в качестве независимых факторов выбрали: X₁ – содержание алюминиевых наночастиц (ТУ 1791-003-36280340-2008), масс.ч., X₂ – медных наночастиц (ТУ 1791-003-36280340-2008), масс.ч. [126].

В таблице 3.3 показаны факторы, уровни и интервалы их варьирования. Результаты многофакторного эксперимента обрабатывали посредством регрессионного анализа, используя известную методику [129].

Модуль упругости при растяжении пленок полимерного материала определяли как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительного удлинения.

Модуль упругости при растяжении E_p , МПа рассчитывали по формуле [130]

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_0}{A_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)}, \quad (3.3)$$

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.

Таблица 3.3 – Факторы с уровнями и интервалами их варьирования

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервалы варьирования фактора
		нижний	нулевой	верхний	
Концентрация: нанопорошок алюминия, масс.ч.	X ₁	1	2	3	1
нанопорошок меди, масс.ч.	X ₂	0,6	1,6	2,6	1

Модуль упругости при сжатии пленок полимерного материала определяли как отношение приращения напряжения к соответствующему приращению относительного сжатия [130].

Равномерность нагружения образцов при сжатии обеспечивало специальное приспособление, которое изготовили из стали 40Х (рисунок 3.4).

Модуль упругости при сжатии E_c , МПа рассчитывали по формуле [130].

$$E_c = \frac{(F_2 - F_1) \cdot h_0}{A_0 \cdot (\Delta h_2 - \Delta h_1)}, \quad (3.4)$$

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.

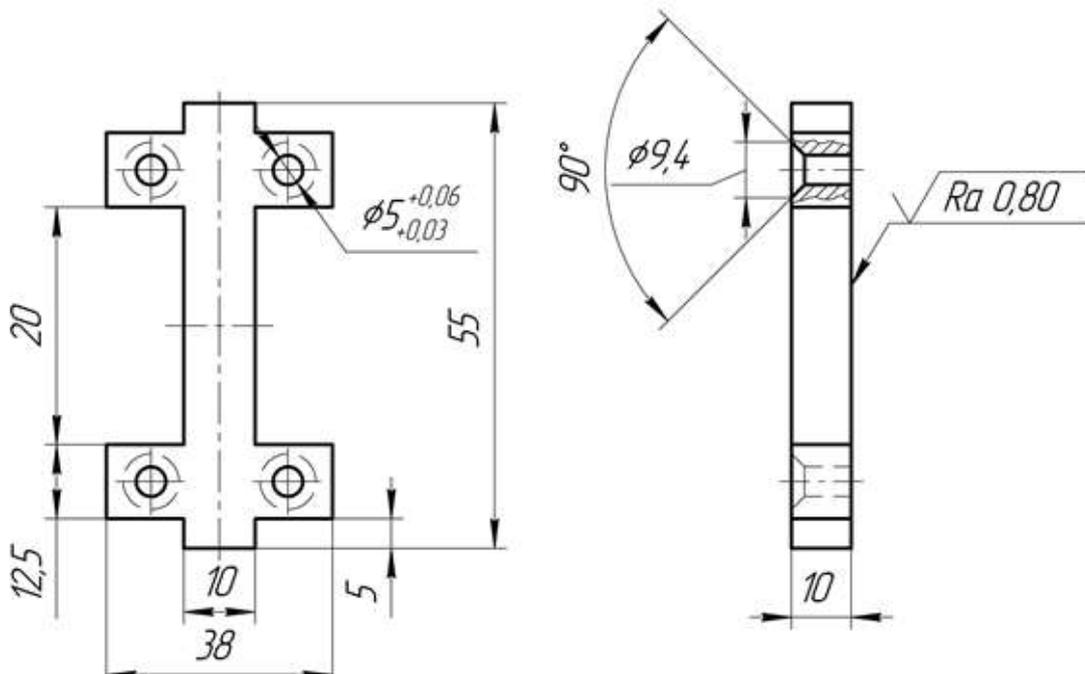


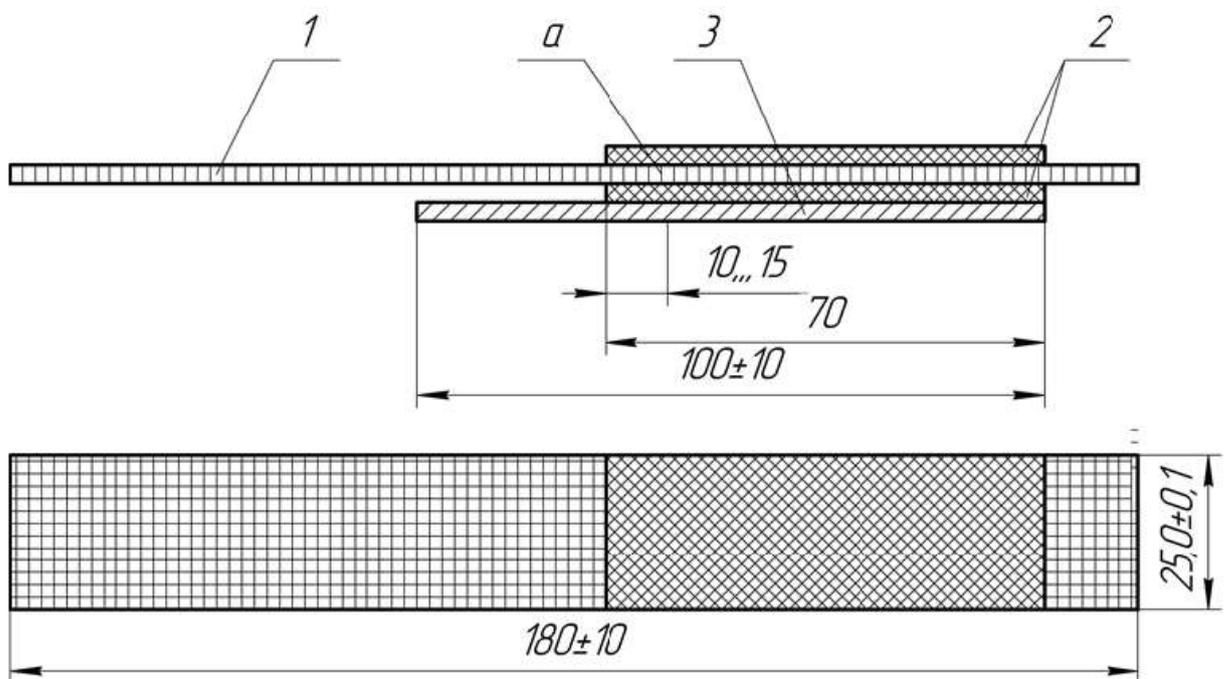
Рисунок 3.4 – Приспособление для равномерного нагружения полимерных пленок при испытаниях на сжатие

3.3 Методика исследования адгезии эластомера Ф-40

и нанокompозита на его основе

В соответствии с ГОСТ 21981-76 адгезию полимерных материалов

оценивали прочностью связи F материала с металлом при отслаивании образцов. При изготовлении образцов в качестве подложки использовали пластины из стали 45. Размеры пластины: $100 \times 25 \times 3$ мм. Поверхность пластины обработана под шероховатость $Ra\ 0,63$. На обработанную поверхность пластины наносили послойно волосяной кистью №5 покрытие из раствора полимерного материала. Далее на покрытие накладывали железную сетку №07 (ГОСТ 3826-82). Затем на уложенную сетку послойно наносили слой раствора полимерного материала (рисунок 3.5).



1 – сетка металлическая; 2 – покрытие эластомера Ф-40 (нанокompозита на его основе); 3 – металлическая пластина; а – место подреза

Рисунок 3.5 – Образец для исследования адгезии полимерных материалов

Расчетная длина соединения сетки с пластиной посредством полимерного материала составляла 70 мм.

Исследовали покрытия из эластомера Ф-40 и трех составов нанокompозита.

Состав №1: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1 масс. ч., Cu – 0,6 масс. ч.

Состав №2: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2 масс. ч., Cu – 1,6 масс. ч.

Состав №3: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 3 масс. ч., Cu – 2,6 масс. ч.

Образцы отверждали при температуре 150°C в течение 3 ч в шкафу сушильном СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3. После термической обработки образцы кондиционировали в течение 16 ч при комнатной температуре 23 °С [127].

Образцы испытывали на разрывной машине ИР 5082-50 в трехкратной повторности. За результат испытаний приняли среднее арифметическое значение параллельных опытов.

Показатель прочности связи герметика с металлом при отслаивании каждого образца ($F, Н / м$) определяли по формуле [131]

$$F = \frac{P}{b}, \quad (3.5)$$

где \bar{P} – усилие при отслаивании полимерного покрытия от металлической подложки, Н; b – ширина полимерного покрытия, мм.

3.4 Методика исследования теплостойкости эластомера Ф-40 и нанокомпозита на его основе

Теплостойкость полимерного материала – это важная эксплуатационная характеристика, которая устанавливает верхнюю допустимую температуру использования материала в реальных условиях эксплуатации.

Теплостойкость оценивали по изменению условного модуля упругости полимерного покрытия, в которое внедряли шариковый индентор при различных температурах нагрева образцов. По достижении и выше температуры теплостойкости полимерного материала модуль упругости последнего резко уменьшается.

Модуль упругости рассчитывали по формуле Герца [23]

$$E = 0,795 \frac{P}{\Delta^{3/2} d^{1/2}}, \quad (3.6)$$

где P – нагрузка на шарик, Н;

Δ – глубина погружения шарика в полимерное покрытие, м;

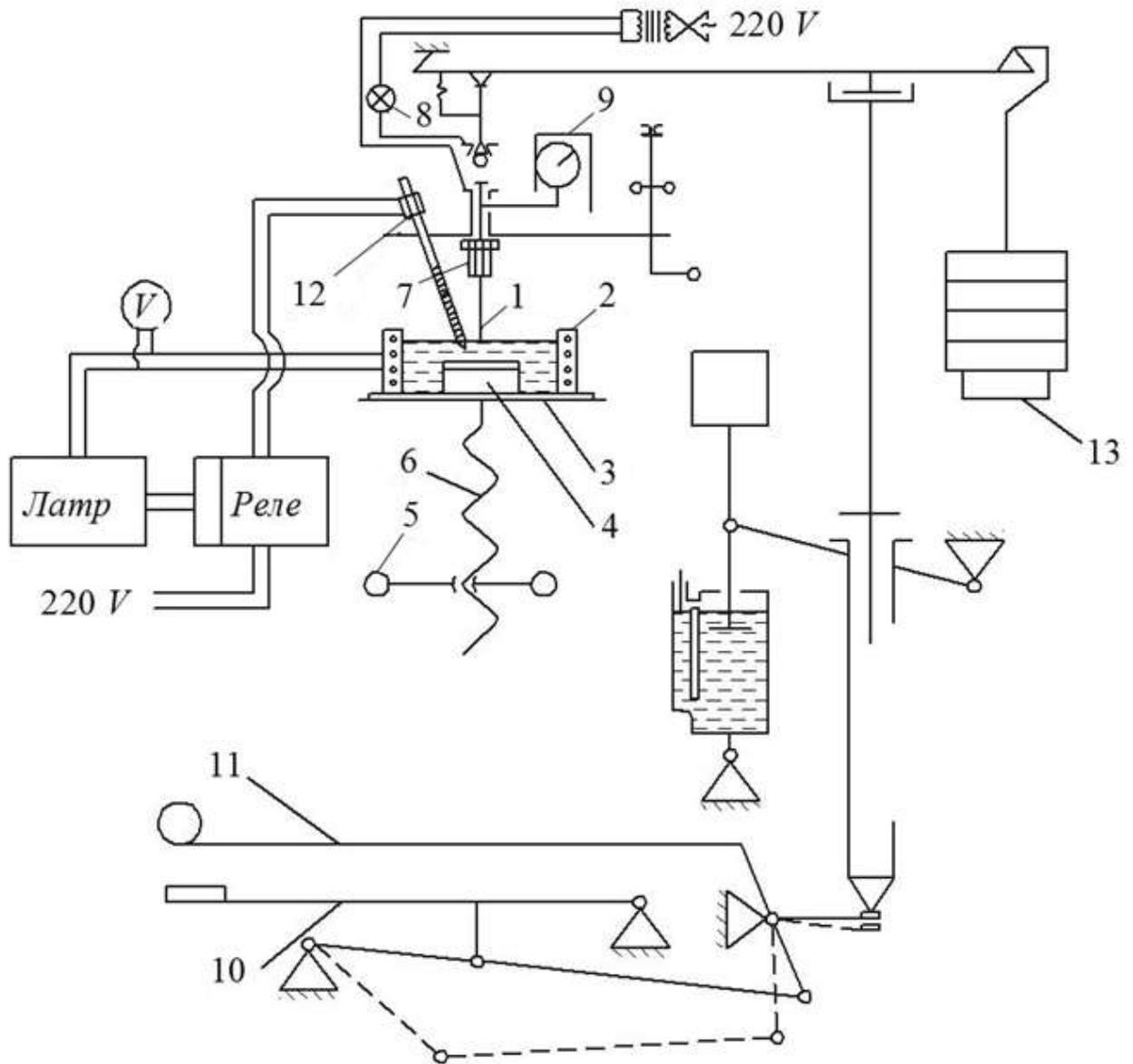
d – диаметр шарика, $d = 0,01$ м.

Образцы представляли собой цилиндрические диски диаметром 30 и толщиной 5 мм, изготовленные из стали 3. На поверхность диска наносили послойно покрытие из раствора нанокompозита толщиной 0,2 мм, которое впоследствии подвергали термической обработке при оптимальной температуре и кондиционированию.

Теплостойкость покрытий из эластомерного нанокompозита исследовали используя модернизированный твердомер типа ТП. На рисунках 3.6 и 3.7 показаны общий вид прибора и его кинематическая схема.



Рисунок 3.6 – Общий вид модернизированного твердомера типа ТП



1 – индентор; 2 – ванна; 3 – стол; 4 – образец; 5 – маховик; 6 – винт;
 7 – шпindelь; 8 – лампочка; 9 – индикаторная головка; 10 – рычаг спусковой; 11 – рукоятка; 12 – электроконтактный термометр; 13 – грузы
 Рисунок 3.7 – Кинематическая схема модернизированного твердомера типа ТП

Прибор для исследования теплостойкости полимерных материалов включает: твердомер, оснащенный шариковым индентором 1, индикаторной головкой 9, масляную ванну 2, систему нагрева и регулирования температуры с электроконтактным термометром 12.

Образец с покрытием из нанокompозита толщиной 0,2 мм установили на опорный стол.

Затем маховиком 5 и винтом 6 опорный стол поднимали до контакта полимерного покрытия с шариковым индентором 1, который фиксируется в шпинделе 7. Момент контакта шарикового индентора с покрытием регистрировали по загоранию контрольной лампочки 8.

Давление на шарик создавали с помощью грузов 13. Рукояткой 11 взводили механизм грузового привода, нажимали на рычаг спусковой 10 и по секундомеру отсчитывали время приложения нагрузки. Время нагружения составляло 60 с.

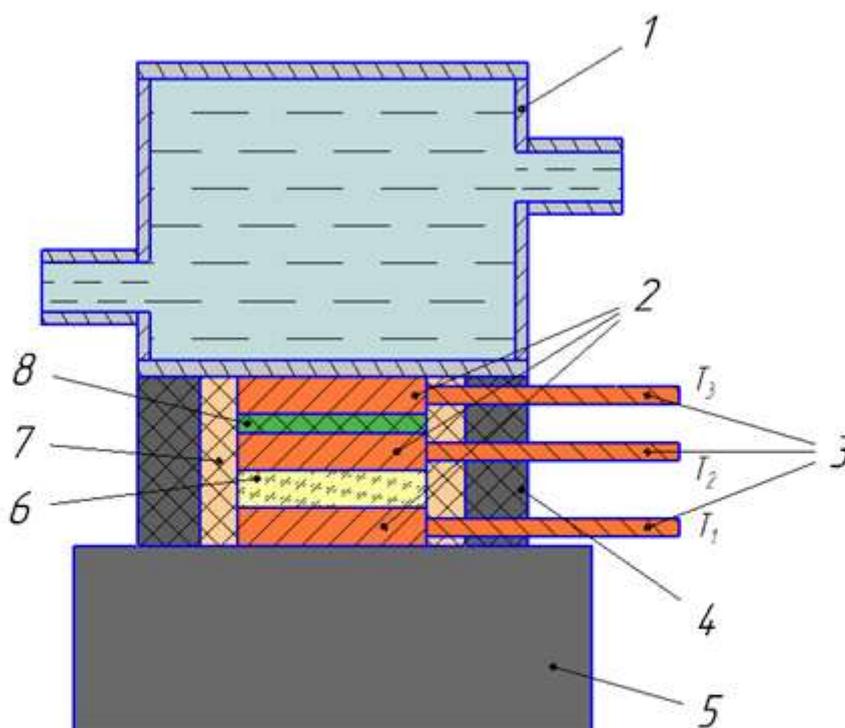
Глубину погружения шарика в покрытие нанокompозита под нагрузкой измеряли используя индикаторную головку МИГ-1М с ценой деления 0,001 мм, которая установлена на станине прибора и опирается на рычаг, соединенный со шпинделем 7.

3.5 Методика исследования теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе

Исследования теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе проводили используя метод температурного градиента. В основе метода лежит принцип доставки постоянного теплового потока от источника тепла (нагревателя) к охлаждающему устройству (холодильнику), который проходит при этом через эталонный и исследуемый образцы [132]. На рисунке 3.8 показана принципиальная схема установки, которую использовали при исследовании теплопроводности полимерных материалов представлена [56].

Установка включает холодильник 1, через который протекает холодная вода, три медных диска 2, диск из исследуемого материала 8, диск из оргстекла 6, и нагреватель 5 (электрическая нагревательная плита). Диски 2 изготовлены из меди марки М1 [133], имеют диаметр 15 мм и толщину 3 мм. Теплоизоляцию дисков 2, 6 и 8 от окружающей среды обеспечивают труба из ПВХ 7, в которую эти диски помещены, а также резиновая втулка 4, которая опоясывает теплоизолирующую трубу 7. К медным дискам крепятся пайкой

металлические стержни 3, которые покрыты теплоизоляцией. В ходе эксперимента со свободных концов стержней 3 измеряли температуру: T_1 , T_2 и T_3 .



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

Рисунок 3.8 – Принципиальная схема установки для исследования теплопроводности полимерных материалов [56]

Образцы для исследования теплопроводности представляли собой диски диаметром 15,0 и толщиной 0,5 мм, которые были изготовлены из эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.

Образец 8 размещали между верхним и средним медными дисками. Между нижним и средним медными дисками разместили диск 6 из оргстекла СО-95-К. Для измерения температуры к медным дискам припаяли металлические стержни. Все диски размещали в теплоизоляционный слой из трубы ПВХ, последнюю в резиновую втулку.

Затем собранный узел нижним торцом установили на нагревательный элемент электрической плиты 5, а на его верхний торец установили холодильник. После включения электрической нагревательной плиты, открыли подачу водопроводной воды в холодильник 1. По достижении установившегося температурного режима инфракрасным пирометром марки Fluke-62 (приложение Г) фиксировали температуру на медных дисках: T_1 , T_2 и T_3 . Фото экспериментальной установки представлено на рисунке 3.9.



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

Рисунок 3.9 – Установка для исследования теплопроводности полимеров

Коэффициент теплопроводности исследуемых образцов λ_1 рассчитывали по формуле [134]

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_2 l_1 (T_2 - T_3) S d \tau}{S d \tau l_2 (T_1 - T_2)} = \lambda_2 \frac{l_1 (T_2 - T_3)}{l_2 (T_1 - T_2)}, \quad (3.7)$$

где l_1 и l_2 – соответственно толщина дисков 8 и 6, м; λ_2 – коэффициент теплопроводности оргстекла, Вт/м·К; T_1, T_2, T_3 – температуры металлических стержней.

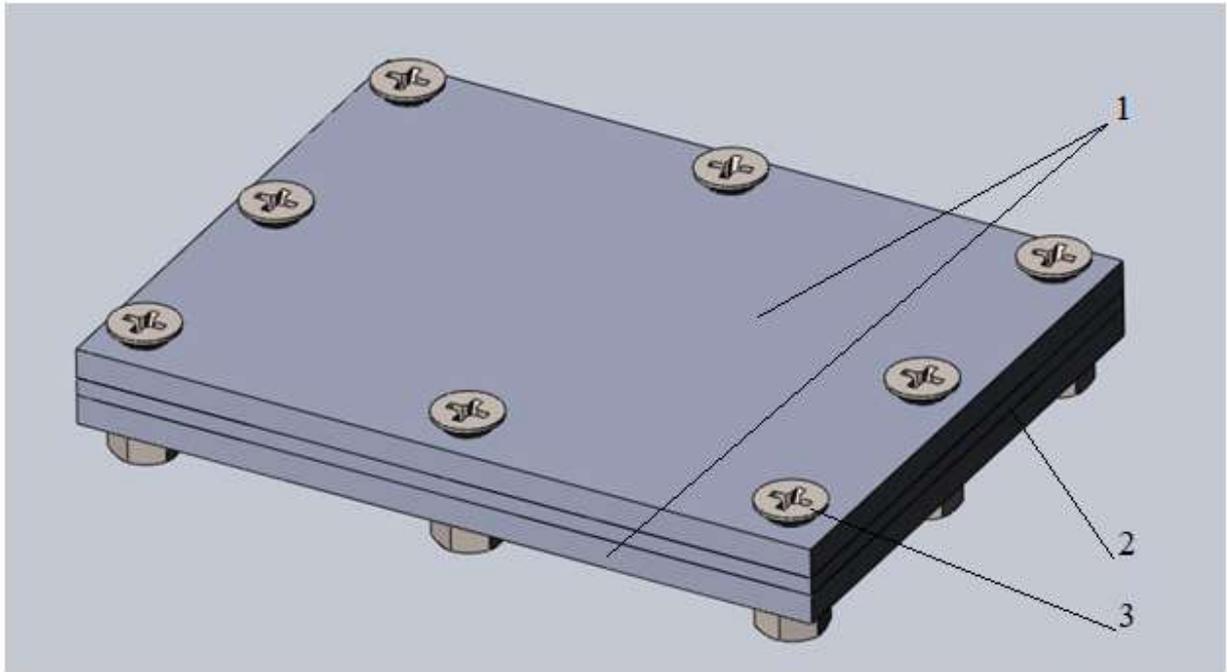
3.6 Методика исследования термостойкости эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе

Для оценки термостойкости эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе исследовали изменение прочности и относительного удлинения образцов, после старения в условиях ограниченного доступа кислорода воздуха (ОДКВ) при температуре 250°С в течение 8 ч [56]. Старение образцов проводили в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3. Образцы представляли собой полимерные пленки размерами 50×10×0,15 мм, которые изготовили с помощью специальной формы (рисунок 3.2). Готовые образцы перед старением размещали в специальную форму-оснастку (рисунок 3.10).

Форма-оснастка для высокотемпературного старения пленок в условиях ОДКВ состоит из двух одинаковых опорных пластин 1 между которыми устанавливают рамку-трафарет 2. Все детали оснастки выполнены из Ст3 ГОСТ 380-2005.

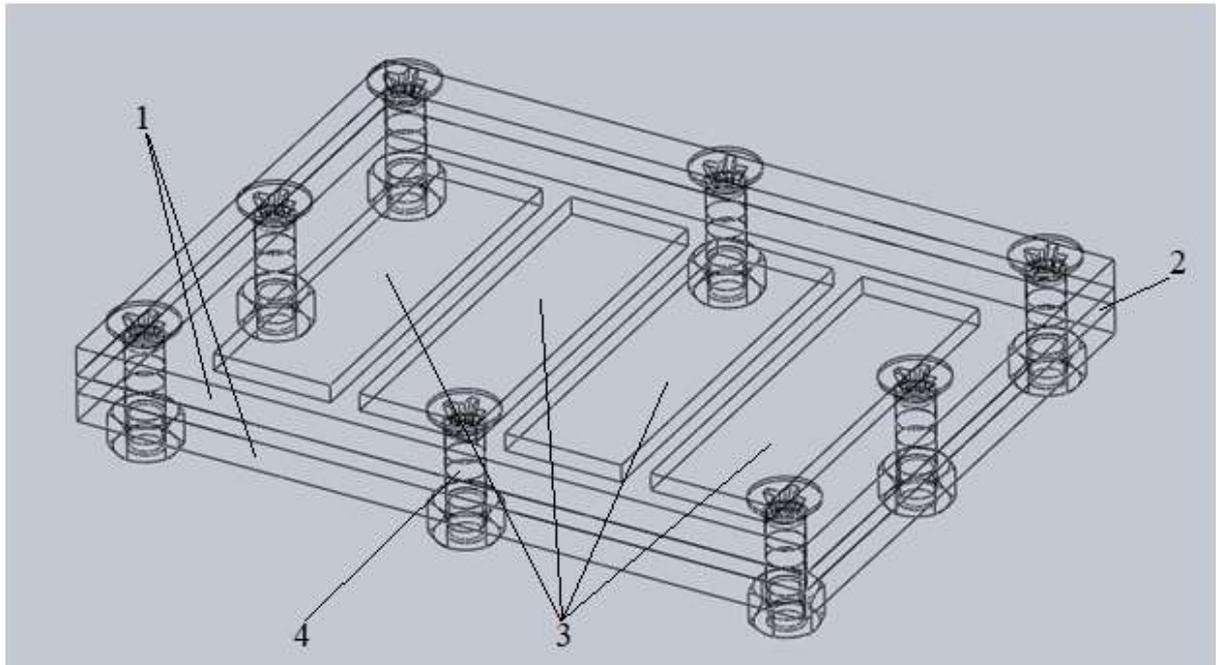
На опорную пластину устанавливают рамку-трафарет. Пленки 3 размещают в рамку-трафарет, затем на последнюю устанавливают вторую опорную пластину (рисунок 3.11).

Чтобы ограничить доступ кислорода воздуха к пленкам, опорные пластины с рамкой-трафаретом и пленками в ней, стягивают болтами. Собранный форму-оснастку помещают в сушильный шкаф для старения образцов.



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

Рисунок 3.10 – Форма-оснастка для высокотемпературного старения пленок
в условиях ОДКВ



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

Рисунок 3.11 – 3D-Сборка формы-оснастки для высокотемпературного
старения пленок в условиях ОДКВ

Образцы после старения кондиционировали при стандартной температуре в течение 16 ч. Исследования деформационно-прочностных свойств образцов после старения проводили на разрывной машине ИР 5082-50 согласно методике, описанной в разделе 3.2.

Коэффициенты старения (K_{σ} , K_{ε}) образцов рассчитывали по формуле [46]

$$K = \frac{A}{O}, \quad (3.8)$$

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

3.7 Методика исследования усилия резания при калибровании покрытий нанокompозита эластомера Ф-40

Целью проводимых исследований являлось определение зависимости усилия резания покрытий нанокompозита эластомера Ф-40 F от переднего угла режущей кромки калибра-резца γ .

В качестве образцов использовали втулки с покрытием нанокompозита эластомера Ф-40, нанесенным на поверхность отверстий. Втулки изготовлены из стали 40Х. Рабочий чертеж втулки показан на рисунке 3.12. Поверхность отверстия втулки зачищали до металлического блеска шкуркой шлифовальной Э5М1А №16, после чего двукратно обезжировали ацетоном и просушивали в течении 10 мин.

Покрытие из раствора нанокompозита наносили послойно кистью волосяной №3. Каждый слой просушивали 20 мин. Термическую обработку покрытий нанокompозита эластомера Ф-40 проводили в сушильном шкафу СНОЛ-3.5, 3.5,3.5/3 при температуре 150°C в течение 3 ч.

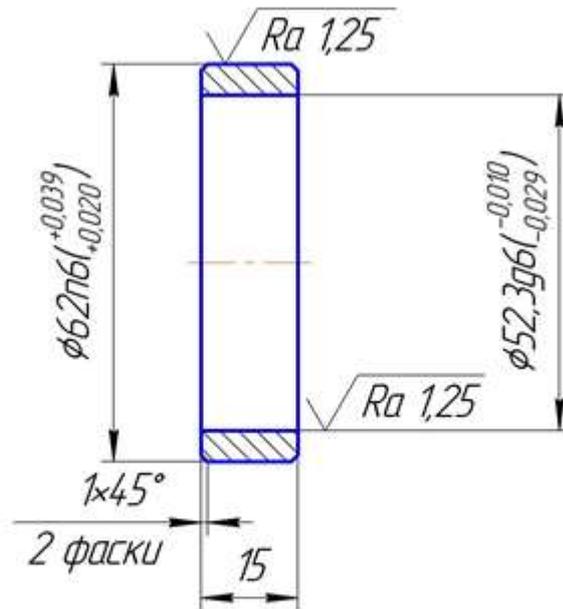


Рисунок 3.12 – Втулка для исследования усилия резания покрытий нанокompозита эластомера Ф-40

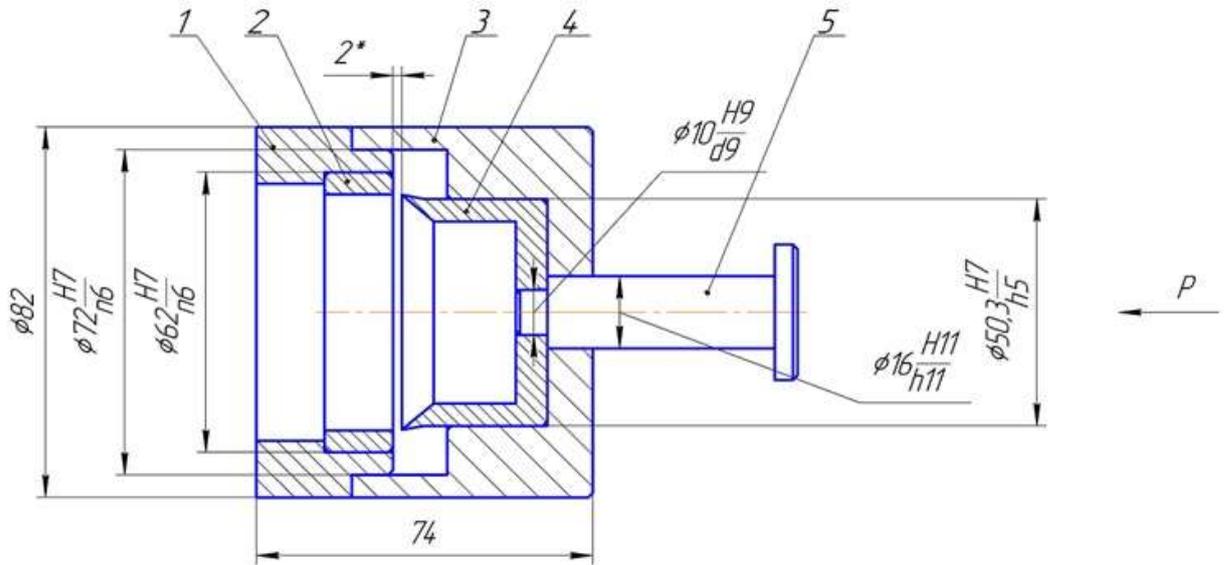
По завершении термической обработки образцы кондиционировали в течение 16 ч при комнатной температуре [127]. Толщина покрытия составляла 0,2 мм.

При исследовании изготовили и использовали оригинальное приспособление, сборочный чертеж которого показан на рисунке 3.13. Приспособление включает в себя корпус центрирующей оправки, крышку центрирующей оправки, калибры-резцы с различным углом заточки режущей кромки и палец.

Корпус (рисунок 3.14) и крышка центрирующей оправки (рисунок 3.15) центрируют втулку с полимерным покрытием и калибр-резец.

Палец (рисунок 3.16) передает усилие от штока разрывной машины калибру-резцу и обеспечивает соосность последнего с крышкой центрирующей оправки.

Соосность корпуса и крышки центрирующей оправки обеспечена выполнением отверстий в деталях за один проход. Втулка с полимерным покрытием базируется наружной поверхностью по посадочному отверстию.



1 – корпус центрирующей оправки; 2 – втулка с полимерным покрытием;
3 – крышка центрирующей оправки; 4 – калибр-резец; 5 – палец

Рисунок 3.13 – Приспособление в сборе для исследования усилия резания полимерных покрытий

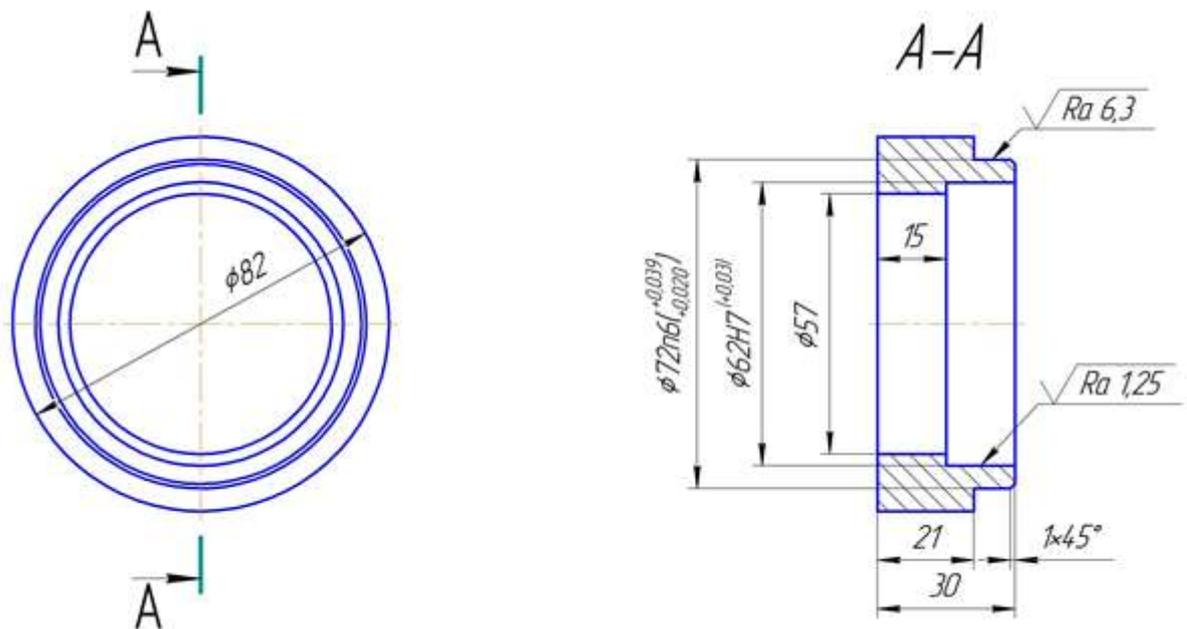


Рисунок 3.14 – Корпус центрирующей оправки

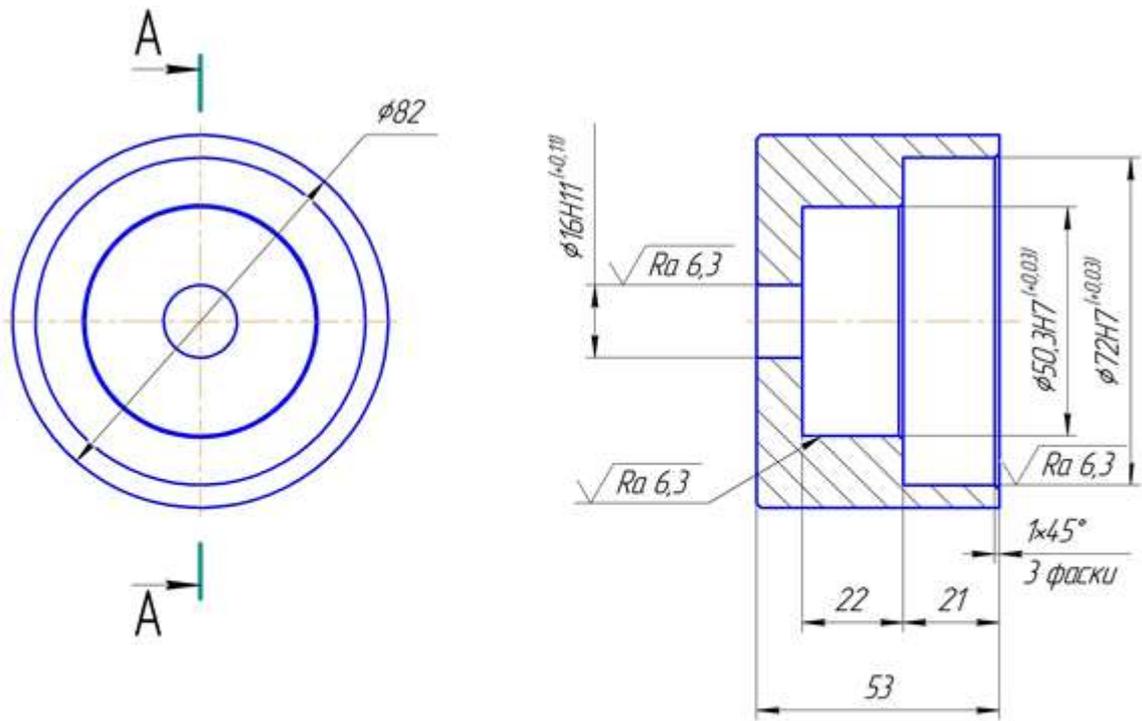


Рисунок 3.15 – Крышка центрирующей оправки

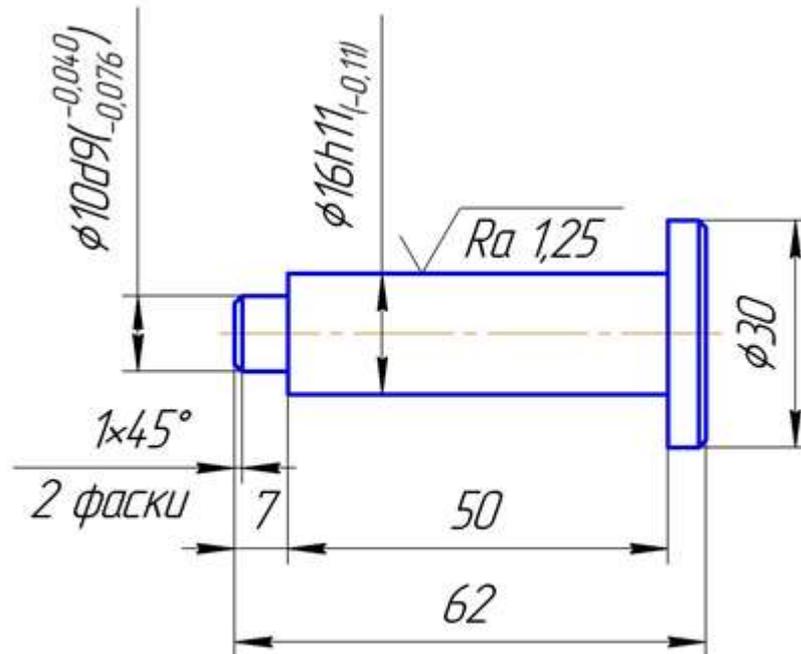


Рисунок 3.16 – Палец

Калибр-резец базируется по поверхности торцевой ступени пальца, а последний – по поверхности отверстия в крышке центрирующей оправки.

Для размерного калибрования полимерных покрытий нанокompозита эластомера Ф-40 изготовили калибры-резцы из стали 40Х с углом заточки режущей кромки: 50°, 60°, 70°. Рабочий чертеж калибра-резца представлен на рисунке 3.17.

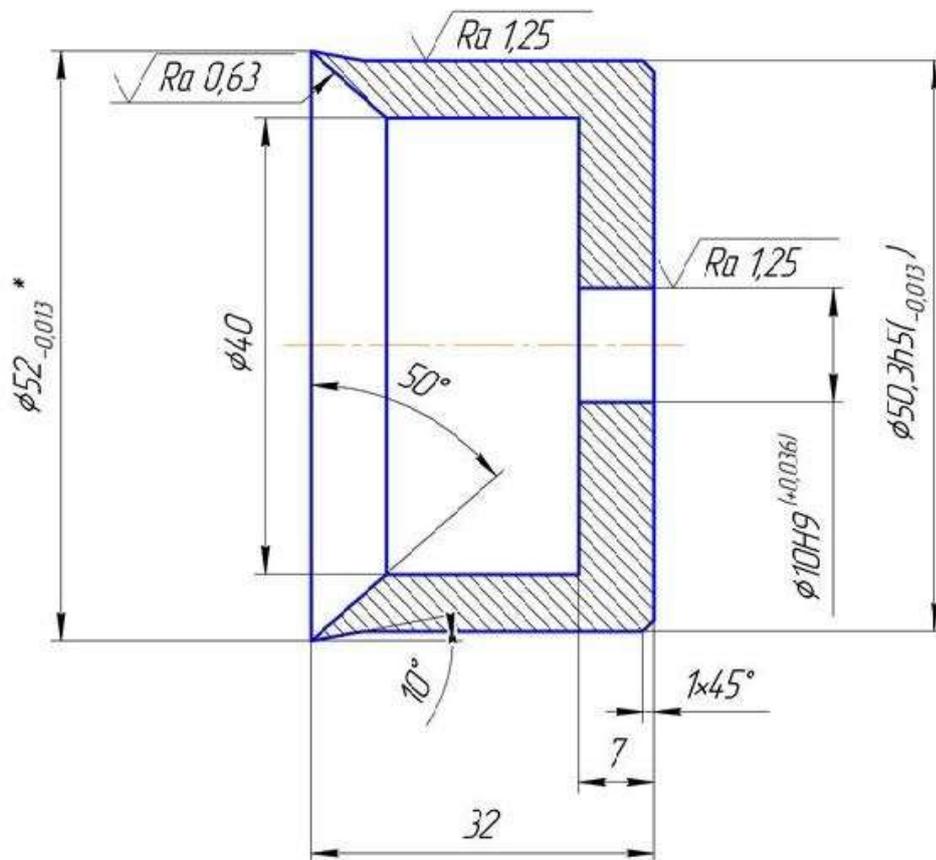


Рисунок 3.17 – Калибр-резец

Перед сборкой приспособления на сопрягаемые поверхности деталей наносили тонкий слой пластичной смазки Литол-24. Далее втулку с полимерным покрытием 2 установили в посадочном отверстии корпуса 1, калибр-резец – в крышку центрирующей оправки 3 и посадили его на палец 5, после чего собрали приспособление.

Приспособление в вертикальном положении устанавливают на опорный стол разрывной машины ИР 5082-50.

Шток машины, воздействуя на палец, перемещает калибр-резец, который срезает лишний слой полимерного покрытия и калибрует тем самым покрытие под заданный размер.

Испытания образцов проводили с одновременной записью диаграммы «нагрузка-деформация». Масштабы измерений: нагрузки $M:1\text{мм} = 1,6\text{ Н}$; деформации $M1:1$. Нагружение образцов при испытаниях проводили с постоянной скоростью 10 мм/мин.

На рисунке 3.18 показано фото деталей оснастки для исследования усилия резания полимерных покрытий нанокompозита Ф-40 при различных углах резания.



1 – калибр-резец; 2 – втулка-образец; 3 – ось; 4 – корпус центрирующего приспособления; 5 – центрирующая оправка

Рисунок 3.18 – Фото приспособления для исследования усилия резания полимерных покрытий нанокompозита Ф-40 при различных углах резания

3.8 Методика исследования повреждаемости и точностных характеристик покрытий нанокompозита после калибрования

Исследования проводили на образцах, в качестве которых использовали втулки с покрытием нанокompозита эластомера Ф-40 после калибрования. После калибрования фиксировали дефекты полимерного покрытия: растрескивание, отслаивание, сморщивание. Повреждаемость оценивали таким показателем как площадь разрушенного покрытия [135].

Для оценки повреждаемости покрытия на обработанную механически поверхность покрытия накладывали трафарет (пленку из прозрачного материала, на которую принтером напечатана сетка со стороной квадрата 5 мм). Площадь разрушенного покрытия в процентах оценивали частотным показателем разрушения C по формуле

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

где n_1 – количество квадратов, в которых зафиксировано разрушение покрытия (растрескивание, отслаивание, сморщивание);

n – общее количество квадратов на трафарете.

Наличие трещин, отслаивания, сморщивания покрытия выявляли микроскопом МПБ-2, который обеспечивает 24-х кратное увеличение.

Точность отверстий с полимерным покрытием после калибрования оценивали овальностью отверстий и отклонением диаметра отверстия от заданного размера.

Овальность отверстий с полимерным покрытием определяли как разность диаметров отверстия, измеренных во взаимно-перпендикулярных плоскостях. Измерение диаметра отверстия проводили индикаторным нутромером НИ-100, с индикаторной головкой часового типа ИЧ-1-0,001, у которой цена деления составляет 0,001 мм (ТУ 3942-017-74229882-2014 ЧИЗ).

Отклонение диаметра отверстия с полимерным покрытием после калибрования от заданного размера определили как разность измеренного диаметра отверстия от заданного. Измерения проводили в трехкратной повторности.

3.9 Методика исследования долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом на основе эластомера Ф-40

Исследования долговечности полимерных посадок подшипников проводили на вибростенде, обеспечивающем циклическое нагружение. Вибростенд включает: электромеханический вибратор ИВ-107А, две опорные плиты, плиту-основание и четыре демпфирующие пружины (рисунок 3.19).

Электромеханический вибратор представляет собой ассинхронный короткозамкнутый электродвигатель. На обоих концах вала ротора закреплены сдвоенные дебалансы, которые создают возмущающие колебания. Дебалансы можно разводить на различные углы друг относительно друга, в зависимости от которых радиальная циклическая нагрузка на подшипник будет составлять: 9,9; 15,8 и 20,0 кН [109].

Вибратор крепится болтовыми соединениями к сдвоенным металлическим плитам. Масса одной плиты 50 кг. Габаритные размеры плиты: 500×500×25 мм. К нижней плите сваркой приварены четыре посадочные втулки в которые устанавливаются, при сборке стенда, четыре винтовые пружины. Противоположные концы пружин установлены во втулках металлической плиты-основания. Размеры плиты основания: 500×500×10 мм. Высота пружин составляет 121 мм. Амплитуда колебаний вибратора с плитами, составляет 1,4 мм. При испытаниях каждый подшипник 209 воспринимает радиальную циклическую нагрузку в 20 кН [56]. Частота вращения ротора 3000 мин⁻¹. Количество циклов нагружения регистрировали счетчиком, который соединен с валом-ротором вибростенда.



Рисунок 3.19 – Стенд для испытания подшипниковых узлов при циклическом нагружении

В подшипниковые щиты запрессованы сменные чугунные втулки (СЧ-20 ГОСТ 1412-80). Зазор в сопряжении «подшипник-корпус», имитирующий износ до восстановления, обеспечивали расточкой отверстия втулки под подшипник. Покрытие из нанокompозита наносили на поверхность посадочного отверстия втулки под подшипник, кистью волосяной №4 «Пони», с последующей его термообработкой при температуре 150°C в течение 3 ч. Затем образцы кондиционировали в течение 16 ч при комнатной температуре [127]. Подшипники смазывали пластичной смазкой ВНИИНП-242 (ГОСТ 20241-74).

За базу испытаний приняли $5,76 \times 10^7$ циклов нагружения (330 ч работы стенда). Восстановленные полимерные посадки испытывали при циклическом нагружении до разрушения, момент которого фиксировали по провороту наружного кольца подшипника относительно втулки. При исследовании теплообразования в посадках подшипников, восстановленных эластомером Ф-40 и нанокompозитом на его основе, значения циклической радиальной нагрузки на подшипниковые узлы составляли: $P = 9,9; 15,8$ и $20,0$ кН. Нагрузку изменяли посредством разведения дебалансов на различные углы установки. Перепад температуры определяли измерением температуры наружного кольца подшипника и втулки корпуса инфракрасным пирометром Fluke-62 (рисунок 3.20).



Рисунок 3.20 – Инфракрасный пирометр «Fluke-62»

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Исследование деформационно-прочностных свойств пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40

4.1.1 Исследование и оптимизация состава нанокompозита

Целью исследований являлось изучение деформационно-прочностных свойств пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40, а также определение его оптимального состава.

Оценку механических свойств нанокompозитов проводили по прочности при одноосном растяжении σ_p , деформации ε и удельной работе разрушения α_p .

На начальном этапе исследований провели серию классических экспериментов. Исследовали прочность и деформацию пленок нанокompозитов четырех составов:

Состав №1: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1,6 масс. ч., Cu – 1,4 масс. ч.

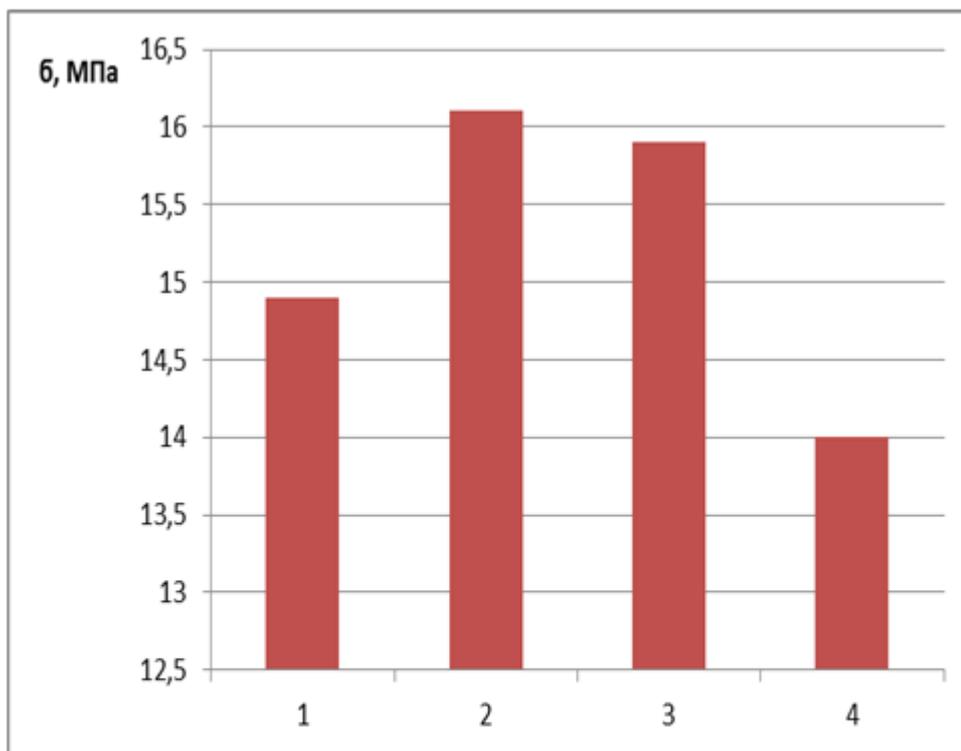
Состав №2: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1,8 масс. ч., Cu – 1,6 масс. ч.

Состав №3: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2,0 масс. ч., Cu – 1,8 масс. ч.

Состав №4: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2,2 масс. ч., Cu – 2,0 масс. ч.

Результаты исследования прочности при одноосном растяжении σ_p показаны на рисунке 4.1. Прочность пленок состава №1 составляет $\sigma_p = 14,8 \text{ МПа}$, что на 13% превышает прочность ненаполненного эластомера (13,1 МПа).

Наибольшая прочность $\sigma_p = 16,11 \text{ МПа}$ наблюдается у состава № 2. В сравнении с составом №1 прочность увеличилась на 8%, а с не наполненным эластомером на 23%.



1 – наночастицы: Al – 1,6 и Cu – 1,4 масс.ч.; 2 – наночастицы: Al – 1,8 и Cu – 1,6; 3 – наночастицы: Al – 2,0 и Cu – 1,8 масс.ч.; 4 – наночастицы: Al – 2,2 и Cu – 2,0 масс.ч.

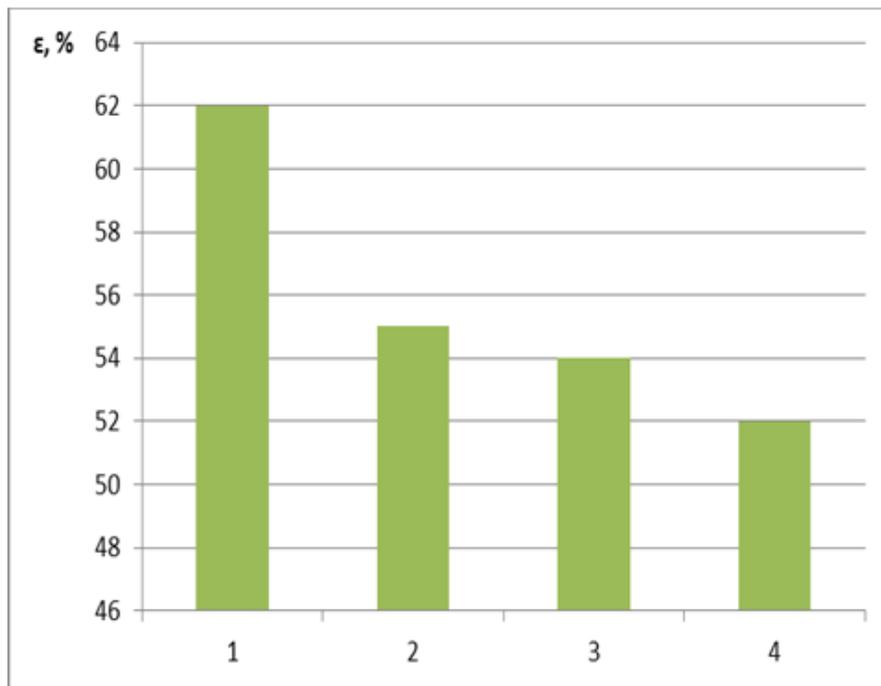
Рисунок 4.1 – Прочность σ_p при одноосном растяжении пленок нанокompозитов на основе эластомера Ф-40

Прочность пленок состава №3 меньше прочности пленок состава №2 на 2% и составляет $\sigma_p = 15,8 \text{ МПа}$, что на 13% превышает прочность ненаполненного эластомера.

Минимальная прочность $\sigma_p = 14,0 \text{ МПа}$ наблюдается у состава №4, что лишь на 7% превышает прочность ненаполненного эластомера.

Исследования показали, что введение металлических наночастиц наполнителей в эластомер Ф-40 понижает деформацию последнего. С увеличением концентрации алюминиевого и медного нанопорошков деформация уменьшается (рисунок 4.2). Максимальную деформацию 62% имеют образцы нанокompозита состава №1. Деформация пленок состава №2 уменьшилась в 1,13 раза и составля-

ет 55%. Деформация пленок состава №3, в сравнении с составом №2 уменьшилась незначительно лишь на 1%, до 54%. В сравнении с составом №1 деформация уменьшилась в 1,15 раза. Наименьшую деформацию имеют пленки состава №4 – 52%. Очевидно, что при наибольшем содержании наночастиц наполнителя, наиболее велика вероятность возникновения их агрегатов, что снижает и прочность и деформацию образцов.



1 – наночастицы: Al – 1,6 и Cu – 1,4 масс.ч.; 2 – наночастицы: Al – 1,8 и Cu – 1,6; 3 – наночастицы: Al – 2,0 и Cu – 1,8 масс.ч.; 4 – наночастицы: Al – 2,2 и Cu – 2,0 масс.ч.

Рисунок 4.2 – Деформация ϵ при одноосном растяжении пленок нанокompозитов на основе эластомера Ф-40

Выносливость материала характеризуется его удельной работой разрушения α_p . Чем выше этот параметр, тем дольше материал противостоит циклическому нагружению, тем более он вынослив [8].

Априорная информация установила нелинейность зависимости параметра α_p от состава нанокompозита. С целью получения регрессионной

модели, адекватно описывающей вышеуказанную зависимость, провели активный эксперимент по композиционному плану B_2 [126].

В качестве функции отклика Y приняли удельную работу разрушения α_p , МДж/м³, а независимыми факторами: X_1 – содержание наночастиц алюминия, масс.ч., X_2 – содержание наночастиц меди, масс.ч.

В таблице 4.1 приведены матрица плана и результаты проведенного эксперимента.

Таблица 4.1 – Матрица плана B_2 и результаты эксперимента

№ п/п	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{y}_g	\hat{y}_i	S_g^2
1	-1	-1	5,30	5,18	5,21	5,23	5,08	0,0039
2	+1	-1	2,25	2,28	2,33	2,29	2,06	0,0033
3	-1	+1	5,43	5,47	5,45	5,45	5,68	0,0008
4	+1	+1	1,87	1,95	1,91	1,91	2,06	0,0032
5	-1	0	9,45	9,57	9,58	9,53	9,46	0,0116
6	+1	0	6,13	6,04	6,03	6,07	6,14	0,0061
7	0	-1	8,25	8,20	8,33	8,26	8,64	0,0086
8	0	+1	9,27	9,41	9,33	9,34	8,95	0,0099

Регрессионный анализ результатов активного эксперимента проведен по методике [129], приложение Б.

В эксперименте реализованы равночисленные опыты, поэтому проверку однородности дисперсий провели по критерию Кохрена.

Результаты расчета дисперсий среднего значения

$$S_1^2 = \frac{(5,30 - 5,23)^2 + (5,18 - 5,23)^2 + (5,21 - 5,23)^2}{3 - 1} = 0,0039;$$

$$S_2^2 = \frac{(2,25 - 2,29)^2 + (2,28 - 2,29)^2 + (2,33 - 2,29)^2}{3 - 1} = 0,0033;$$

$$S_3^2 = \frac{(5,43 - 5,45)^2 + (5,47 - 5,45)^2 + (5,45 - 5,45)^2}{3 - 1} = 0,0008;$$

$$S_4^2 = \frac{(1,87 - 1,91)^2 + (1,95 - 1,91)^2 + (1,91 - 1,91)^2}{3 - 1} = 0,0032;$$

$$S_5^2 = \frac{(9,45 - 9,53)^2 + (9,57 - 9,53)^2 + (9,58 - 9,53)^2}{3 - 1} = 0,0116;$$

$$S_6^2 = \frac{(6,13 - 6,07)^2 + (6,04 - 6,07)^2 + (6,03 - 6,07)^2}{3 - 1} = 0,0061;$$

$$S_7^2 = \frac{(8,25 - 8,26)^2 + (8,20 - 8,26)^2 + (8,33 - 8,26)^2}{3 - 1} = 0,0086;$$

$$S_8^2 = \frac{(9,27 - 9,34)^2 + (9,41 - 9,34)^2 + (9,33 - 9,34)^2}{3 - 1} = 0,0099;$$

$$\sum S_g^2 = 0,0039 + 0,0033 + 0,0008 + 0,0032 + 0,0116 + 0,0061 + 0,0086 + 0,0099 = 0,0474$$

Расчетное значение коэффициента Кохрена G_p

$$G_p = \frac{0,0116}{0,0474} = 0,245$$

Определение табличного значения коэффициента Кохрена

Число степеней свободы:

- числителя $\nu_1 = 3 - 1 = 2$;

- знаменателя $\nu_2 = N = 8$,

N - число строк (опытов), $N = 8$.

Уровень значимости приняли $P = 0,05$.

$$G_m = 0,516, G_p = 0,245 < G_m = 0,516.$$

Гипотеза об однородности и дисперсии принимается, так как экспериментальные данные не отвергают гипотезу ($G_p < G_m$).

Определение дисперсии воспроизводимости эксперимента

$$S_e^2 = \frac{0,0474}{8} = 0,0059$$

Значения коэффициентов регрессии

$$b_0 = 1,25(5,23 + 2,29 + 5,45 + 1,91 + 9,53 + 6,07 + 8,26 + 9,34) - 0,75(30,48 + 32,48) = +12,88;$$

$$b_1 = 0,16667(-5,23 + 2,29 - 5,45 + 1,91 - 9,53 + 6,07) = -1,657;$$

$$b_2 = 0,16667(-5,23 - 2,29 + 5,45 + 1,91 - 8,26 + 9,34) = +0,153;$$

$$b_{12} = 0,25(5,23 - 2,29 - 5,45 + 1,91) = -0,15;$$

$$b_{11} = 0,5 \cdot 30,48 + 0,25(30,48 + 32,48) - 0,75 \cdot 48,08 = -5,08;$$

$$b_{22} = 0,5 \cdot 32,48 + 0,25(30,48 + 32,48) - 0,75 \cdot 48,08 = -4,08;$$

$$b_0 = +12,88; b_1 = -1,657; b_2 = +0,153; b_{12} = -0,15; b_{11} = -5,08; b_{22} = -4,08.$$

Расчет дисперсий оценок коэффициентов регрессии

$$S_{b_0}^2 = 1,25 \cdot \frac{0,0059}{3} = 0,0025;$$

$$S_{b_1}^2 = S_{b_2}^2 = 0,16667 \cdot \frac{0,0059}{3} = 0,0003;$$

$$S_{b_{12}}^2 = 0,25 \cdot \frac{0,0059}{3} = 0,0005;$$

$$S_{b_{11}}^2 = S_{b_{22}}^2 = 0,75 \cdot \frac{0,0059}{3} = 0,0015;$$

Проверку значимости коэффициентов регрессии проводили сравнением их абсолютных значений со значениями соответствующих доверительных интервалов.

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

Значения доверительного интервала для каждого коэффициента регрессии

$$\Delta b_0 = 0,106 \prec b_0 = +12,88; \Delta b_1 = \Delta b_{22} = 0,037 \leq b_1 = -1,657; b_2 = +0,153;$$

$$\Delta b_{12} = 0,047 \prec b_{12} = -0,15; \Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 0,082 \prec b_{11} = -5,08; b_{22} = -4,08.$$

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

Уравнение регрессии в кодированных значениях имеет вид

$$Y = 12,88 - 1,657X_1 + 0,153X_2 - 0,15X_1X_2 - 5,08X_1^2 - 4,08X_2^2$$

После раскодирования уравнения регрессии получено уравнение регрессии в натуральных единицах

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

Расчетные значения отклика в точках плана

$$\hat{y}_1 = 5,08; \hat{y}_2 = 2,06; \hat{y}_3 = 5,68; \hat{y}_4 = 2,06;$$

$$\hat{y}_5 = 9,46; \hat{y}_6 = 6,14; \hat{y}_7 = 8,64; \hat{y}_8 = 8,95.$$

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

$$S^2 = \frac{(5,23 - 5,08)^2 + (2,29 - 2,06)^2 + (5,45 - 5,68)^2 + (1,91 - 2,06)^2 + (9,53 - 9,46)^2 +}{8 - 6}$$

$$\frac{+(6,07 - 6,14)^2 + (8,26 - 8,64)^2 + (9,34 - 8,95)^2}{8 - 6} = 0,040;$$

Проверка адекватности уравнения регрессии проведена по критерию Фишера.

Условие адекватности имеет вид $F_p \prec F_m$.

Табличное значение F - критерия для уровня значимости $P = 0,05$; числа степеней свободы: числителя $v_1 = 4$, знаменателя $v_2 = 16$, составляет $F_m = 3,01$.

Расчетное значение F - критерия

$$F_p = \frac{3 * 0,040}{0,59} = 2,03$$

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

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

$$R^2 = \frac{3((5,23 - 6,01)^2 + (2,29 - 6,01)^2 + (5,45 - 6,01)^2 + (1,91 - 6,01)^2 + (9,53 - 6,01)^2 + (6,07 - 6,01)^2 + (8,26 - 6,01)^2 + (9,34 - 6,01)^2 + (8 - 6) \cdot 0,04)}{3((5,23 - 6,01)^2 + (2,29 - 6,01)^2 + (5,45 - 6,01)^2 + (1,91 - 6,01)^2 + (9,53 - 6,01)^2 + (6,07 - 6,01)^2 + (8,26 - 6,01)^2 + (9,34 - 6,01)^2 + (8 - 6) \cdot 0,04) + 8(3 - 1) \cdot 0,0059} = \frac{3(60,12 + 0,08)}{3(60,12 + 0,0944)} = 0,99$$

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

На рисунке 4.3 показана зависимость удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40 от концентрации алюминиевого и медного нанопорошков (поверхность отклика).

Проведено каноническое преобразование регрессионной модели [101]. Координаты экстремума функции отклика определены взятием из системы уравнений частных производных по каждому фактору, с последующим приравниванием их к нулю

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

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 18,903 - 0,15x_2 - 10,16x_1 = 0; \\ \frac{dy}{dx_2} = 13,509 - 0,15x_1 - 8,16x_2 = 0. \end{cases}$$

После решения системы уравнений определены координаты экстремума $X_{1s} = 1,84$ масс. ч., $X_{2s} = 1,62$ масс. ч. в натуральных единицах. Значение отклика в точке экстремума составляет $y_s = 13,01$ МДж/м³.

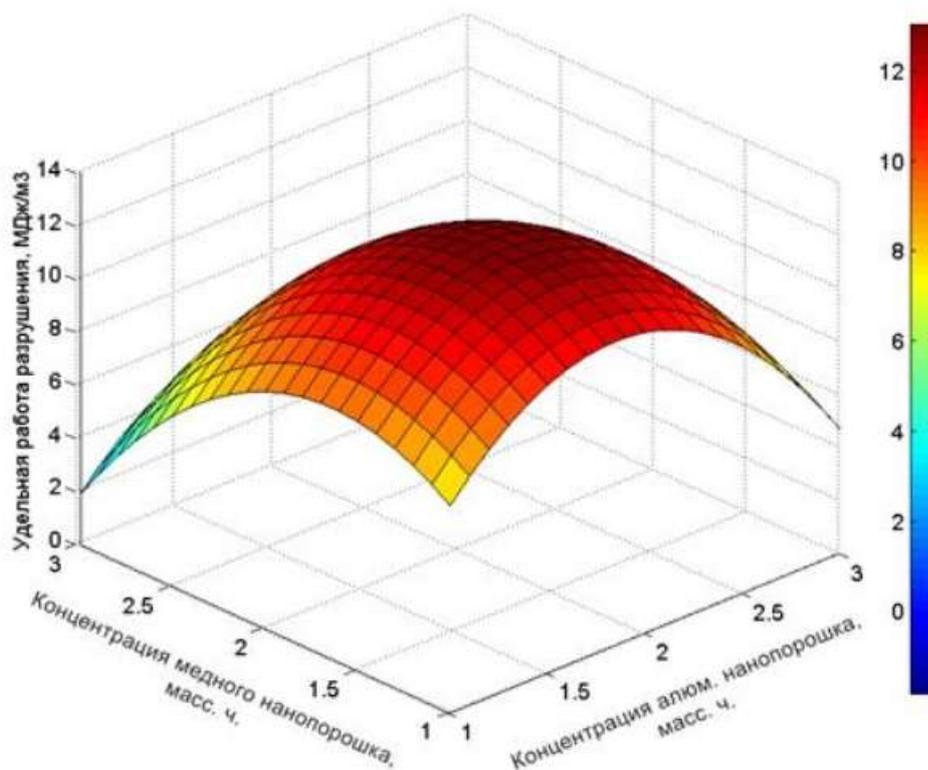


Рисунок 4.3 – Зависимость удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40 от концентрации алюминиевого и медного нанопорошков

Угол поворота новых осей относительно старых

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{-0,15}{-5,08 + 4,08} = 0,15, \quad \alpha = 8,53^\circ$$

Угол поворота положителен, поэтому поворот старых осей относительно новых осуществляем против часовой стрелки.

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

$$f(B) = B^2 + 9,16B + 20,72 = 0,$$

$$B_{11} = -4,58 + \sqrt{-4,58^2 - 20,72} = -4,074;$$

$$B_{22} = -4,58 - \sqrt{-4,58^2 - 20,72} = -5,086;$$

$$B_{11} = -4,074, \quad B_{22} = -5,086.$$

Корректность вычислений оценили, сравнивая суммы коэффициентов при квадратичных членах

$$-4,074 - 5,086 = -9,16,$$

$$-4,08 - 5,08 = -9,16$$

Суммы коэффициентов при квадратичных членах равны, значит расчеты корректны.

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

$$Y - 13,01 = -4,074X_1^2 - 5,086X_2^2$$

Для расчета координат основных точек при построении двумерного сечения поверхности отклика составили вспомогательную таблицу (таблица 4.2).

По результатам анализа двумерного сечения (рисунок 4.4) определили область оптимума критерия оптимизации и выбрали оптимальный состав нанокompозита: раствор эластомера Ф-40 – 100 масс. ч., нанопорошок алюминия – 1,9 масс. ч., нанопорошок меди – 1,7 масс. ч.

Таблица 4.2 – Таблица расчета координат основных точек для построения
двумерного сечения поверхности отклика

Значение отклика Y	Значение фактора X ₁	Значение фактора X ₂
13,01	0	0
12,9	0	±0,147
12,9	±0,164	0
12,8	0	±0,203
12,8	±0,227	0
12,7	0	±0,247
12,7	±0,276	0
12,6	0	±0,284
12,6	±0,317	0
12,5	0	±0,317
12,5	±0,354	0

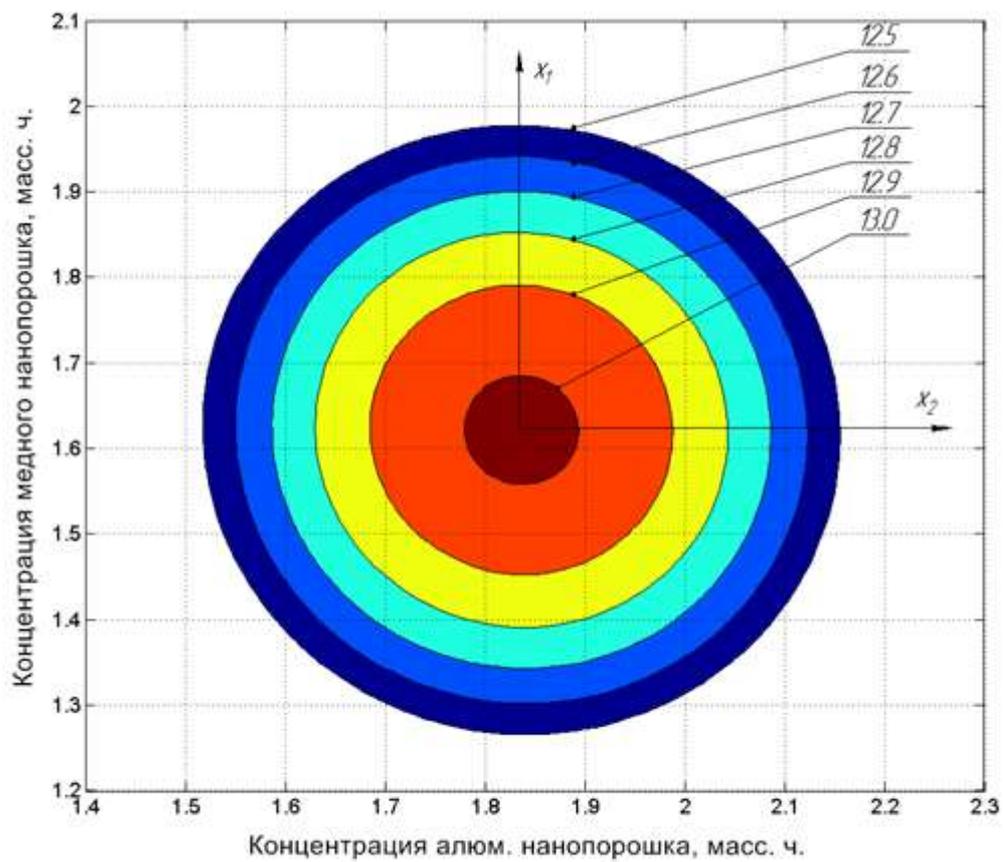


Рисунок 4.4 – Двумерное сечение поверхности отклика

Выводы

- 1) В результате реализации активного эксперимента получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40 от концентрации алюминиевого и медного нанопорошков.
- 2) Определен оптимальный состав нанокompозита на основе эластомера Ф-40. Максимальной удельной работой разрушения $13,0 \text{ МДж/м}^3$ обладают пленки композита, следующего состава: эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., алюминиевого нанопорошка – 1,9 масс. ч. и медного нанопорошка – 1,8 масс. ч.

4.1.2 Исследование модуля упругости нанокompозита

Цель экспериментальных исследований заключалась в определении модуля упругости при растяжении и сжатии эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.

На рисунке 4.5 показаны результаты исследований модуля упругости при растяжении эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе. Как следует из рисунка модуль упругости нанокompозита ($E = 92,7 \text{ МПа}$) превышает в 1,65 раза модуль упругости эластомера Ф-40 ($E = 56,2 \text{ МПа}$).

Затем исследовали модуль упругости E_c эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе. На рисунке 4.6 показаны результаты исследований модуля упругости при сжатии эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.

Как следует из рисунка модуль упругости нанокompозита ($E = 66,7 \text{ МПа}$) превышает в 1,57 раза модуль упругости эластомера Ф-40 ($E = 42,5 \text{ МПа}$).

Выводы

1. Наполнение эластомера Ф-40 алюминиевыми и медными наночастицами увеличивает модуль упругости материала: на растяжение в 1,65, сжатие – 1,57 раза.

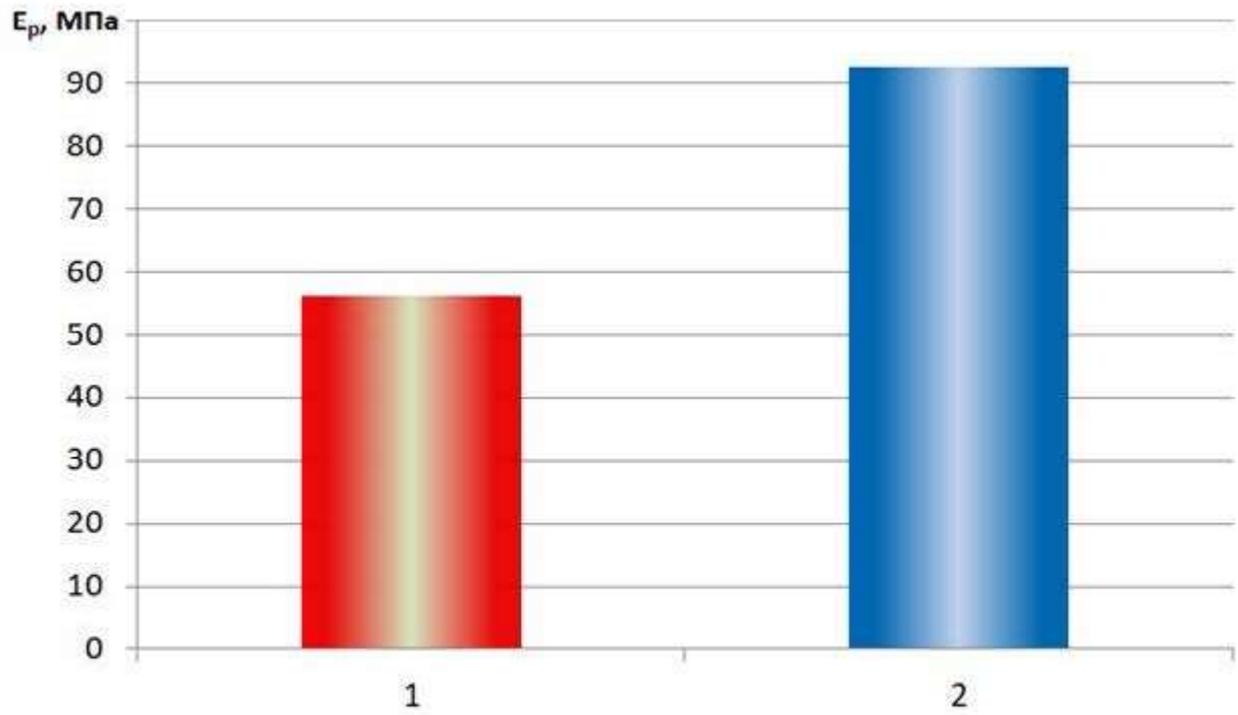


Рисунок 4.5 – Модуль упругости при растяжении E_p эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе

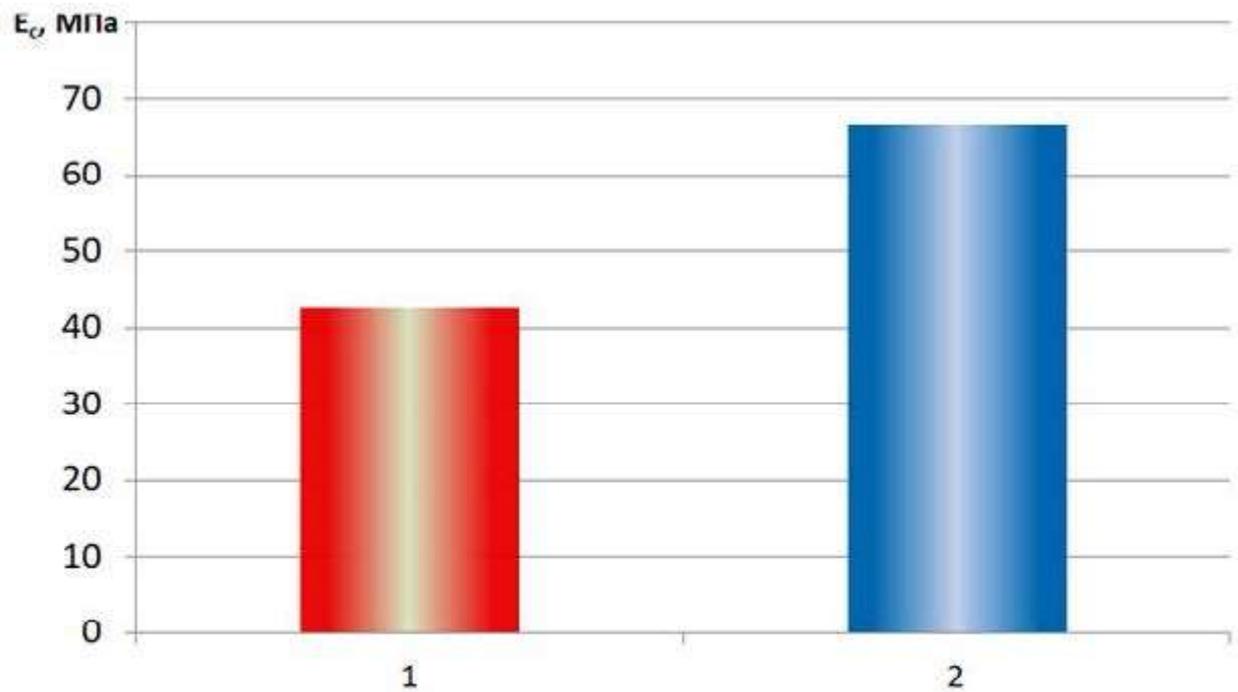


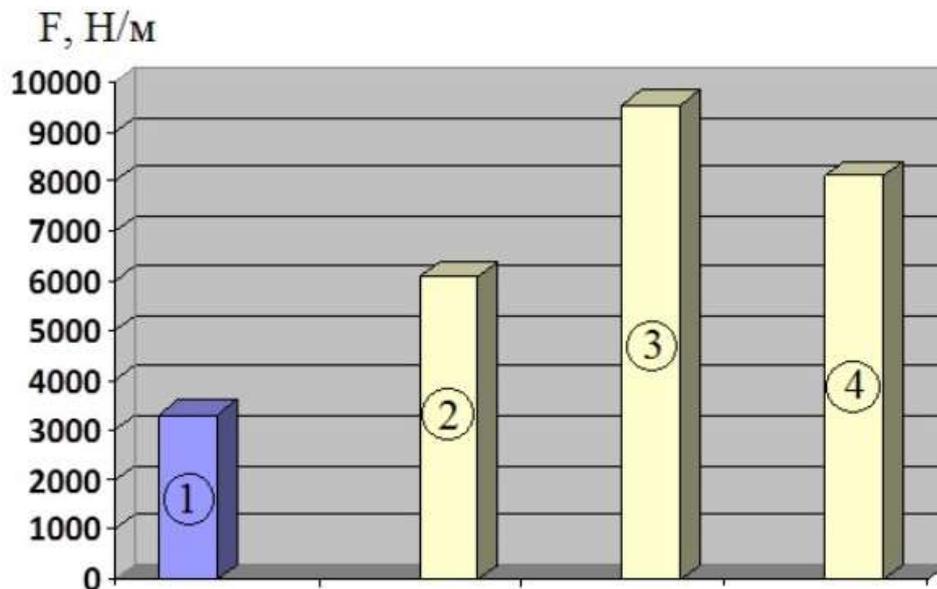
Рисунок 4.6 – Модуль упругости при сжатии E_c эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе

2. Повышение модуля упругости нанокompозита на основе эластомера Ф-40, позволит уменьшить податливость восстановленной опоры при радиальном нагружении подшипника, исключить смещение осей подшипника относительно оси отверстия. полимерных, увеличить предельно допустимую толщину полимерного покрытия при восстановлении корпусных деталей.

4.2 Исследование адгезии нанокompозита на основе эластомера Ф-40

Адгезия полимерного композита относится к важнейшему показателю материала, в виду того, что это свойство характеризует способность сопротивляться отслаиванию полимерного покрытия с подложки, когда подшипник запрессовывают в посадочное отверстие корпусной детали.

Прочность связи покрытий эластомера Ф-40 и его нанокompозитов с металлической подложкой показана на рисунке 4.7.



- 1 – эластомер Ф-40; 2 – Ф-40 – 100 масс.ч., Al – 1 масс.ч., Cu – 0,6 масс.ч.;
 3 – Ф-40 – 100 масс.ч., Al – 2 масс.ч., Cu – 1,6 масс.ч.;
 4 – Ф-40 – 100 масс.ч., Al – 3 масс.ч., Cu – 2,6 масс.ч.

Рисунок 4.7 – Показатель прочности связи с металлом при отслаивании покрытий эластомера Ф-40 и нанокompозитов на его основе

Из рисунка 4.7 следует, что минимальную прочность имеют покрытия эластомера Ф-40, $F = 3310 \text{ Н / м}$.

Более высокую адгезию имеют покрытия состава №1. Показатель адгезии превышает аналогичный параметр не наполненного эластомера в 1,83 раза и составляет $F = 6080 \text{ Н / м}$.

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

Покрытия состава №3 имеют меньшую адгезию в сравнении с составом №2. Показатель адгезии уменьшился в 1,17 раза ($F = 8120 \text{ Н / м}$), но в сравнении с составом №1 и не наполненным эластомером Ф-40 этот показатель больше в 1,33 и 2,45 раза соответственно.

Вывод

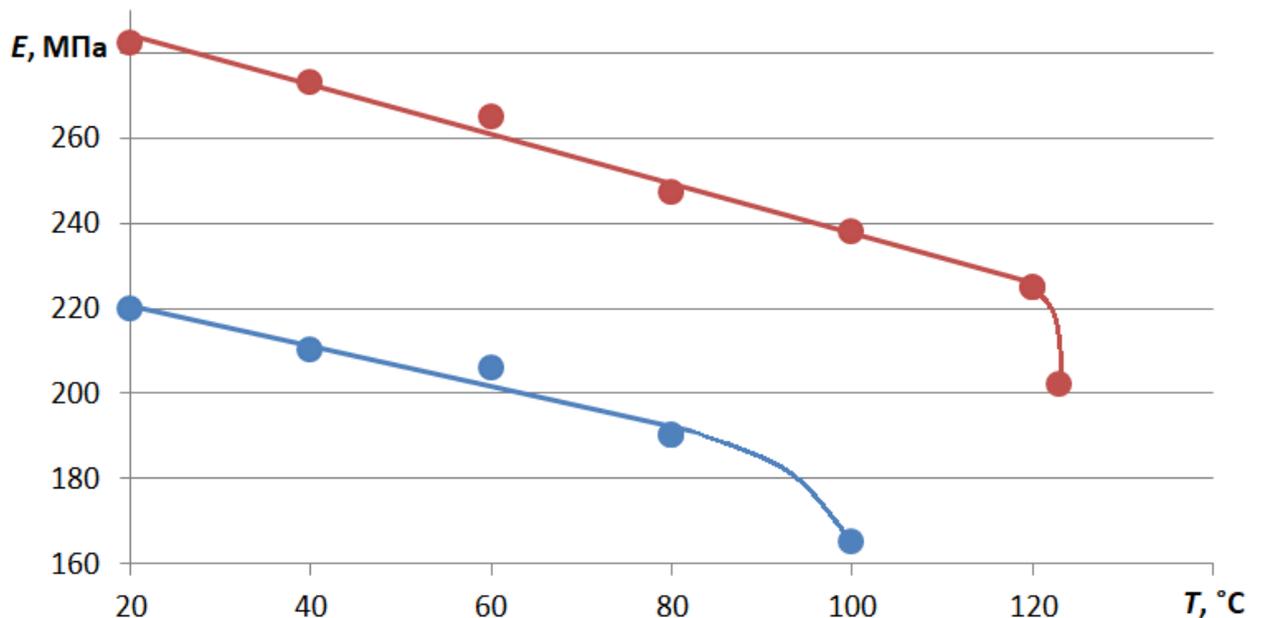
Таким образом, исследования показали, что покрытия состава №2 имеют максимальную адгезию к стали 45. Поэтому, с учетом результатов проведенного активного эксперимента, принят оптимальный состав нанокompозита: раствор эластомера Ф-40 – 100 масс. ч., нанопорошок алюминия – 2,0 масс. ч., нанопорошок меди – 1,6 масс. ч. Этот состав обеспечивает наиболее высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства материала.

4.3 Исследование теплостойкости нанокompозита на основе эластомера Ф-40

Теплостойкость полимера определяет предельную допустимую температуру использования материала в реальных условиях эксплуатации.

На рисунке 4.8 показана зависимость модуля упругости E покрытий эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе от температуры T . Как следует из рисунка 4.8, с увеличением температуры модуль упругости покрытия из нанокompозита уменьшается по линейной зависимости с 282 МПа при температуре 20°C до 225 МПа при температуре 120°C. По достижении 123°C материал переходит в

вязкотекучее состояние, о чем свидетельствует резкое снижение модуля упругости до 202 МПа. Таким образом установлено, что при наполнении эластомера нанопорошками меди и алюминия теплостойкость нанокомпозита повысилась, в сравнении с не наполненным эластомером (100°C), в 1,23 раза и составила 123°C.



1 – эластомер Ф-40; 2 – нанокомпозит на основе Ф-40

Рисунок 4.8 – Зависимость модуля упругости E полимерных покрытий от температуры T

Причины увеличения теплостойкости следующие:

- 1) Металлические наночастицы при вводе в в раствор эластомера взаимодействуют с полимерными цепями и образуют сетчатые образования, в которых узлами являются наночастицы. В результате уменьшается подвижность полимерных цепей, а теплостойкость материала увеличивается [106].
- 2) В нанокомпозитах при взаимодействии полимера с частицей наполнителя на поверхности последней образуется адсорбированный слой (межфазная область), который свойствами существенно отличается от полимерной матрицы. Модуль упругости межфазного меньше аналогичного параметра материала наполнителя, но многократно превышает модуль упругости полимера матрицы. Имеет место «замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях,

т.е. у поверхности наночастиц наполнителя. В виду высокой удельной поверхности наночастиц наполнителя, доля межфазных областей в полимерном нанокомпозите значительно больше, чем в микрокомпозите. «Замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, повышение модуля упругости, являются причиной увеличения теплостойкости нанокомпозита в сравнении с не наполненным эластомером.

Вывод. Наполнение эластомера Ф-40 металлическими наночастицами понижает подвижность полимерных цепей, увеличивает модуль упругости и соответственно теплостойкость материала в 1,23 раза.

4.4 Исследование теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокомпозита на его основе

Полимерные материалы относятся к категории теплоизоляторов, так как их теплопроводность отличается в меньшую сторону от аналогичного параметра черных металлов приблизительно в 100 раз. По этой причине возможно ухудшение теплоотвода в восстановленных подшипниковых узлах в условиях эксплуатации.

В тяжело нагруженных подшипниковых узлах техники увеличение температуры полимерного материала из-за гистерезисных потерь, затрудненный теплоотвод могут стать причиной существенного повышения температуры подшипника и смазочного материала и, при определенных условиях, понижения долговечности подшипникового узла.

Результаты исследований теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокомпозита на его основе показаны на рисунке 4.9. Как видно из рисунка 4.9, у образцов эластомера Ф-40 значение коэффициента теплопроводности составило $\lambda_n = 0,56 \frac{Вт}{м \cdot К}$. Образцы нанокомпозита показали значение коэффициента теплопроводности $\lambda_k = 21,8 \frac{Вт}{м \cdot К}$. Благодаря вводу в эластомер наночастиц алюминия и меди коэффициент теплопроводности увеличился в 38,9 раза.

На рисунке 4.10 показаны теплопроводность эластомера Ф-40С и микрокомпозита на его основе, наполненного алюминиевыми и бронзовыми порошками [55].

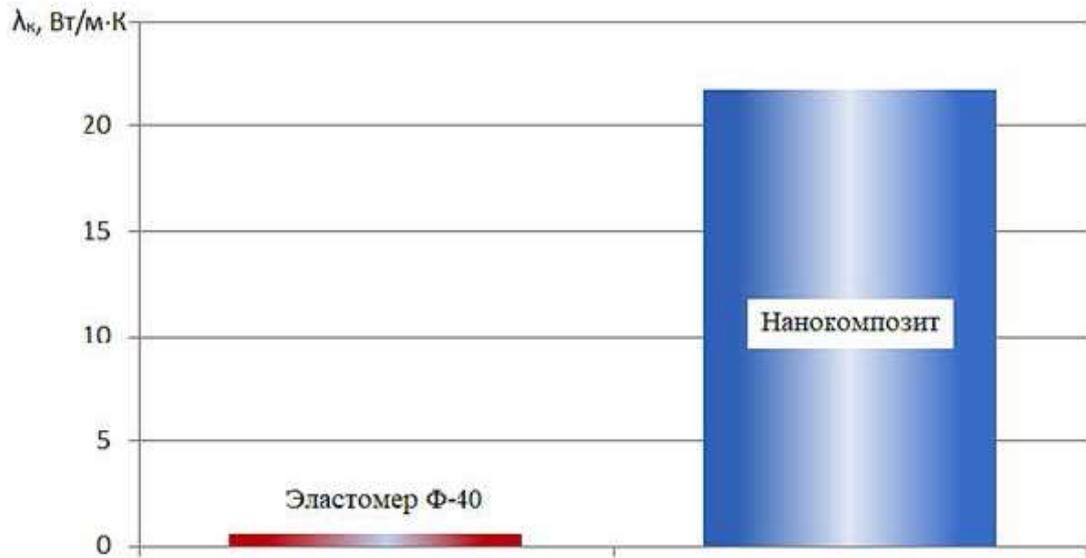


Рисунок 4.9 – Коэффициент теплопроводности эластомера Ф-40 и наноккомпозита на его основе

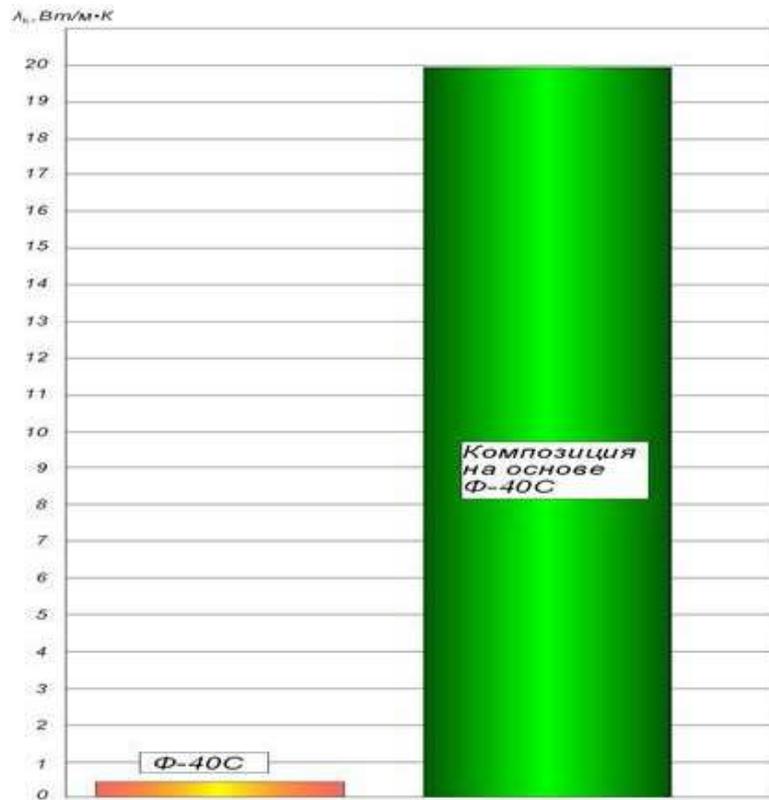


Рисунок 4.10 – Теплопроводность эластомера Ф-40С и микрокомпозита на его основе [55]

Коэффициент теплопроводности эластомера Ф-40С составляет $\lambda_n = 0,27 \frac{Вт}{м \cdot К}$.

После наполнения эластомера микроразмерными частицами алюминиевой пудры и бронзового порошка коэффициент теплопроводности микрокомпозита, в сравнении с эластомером, увеличился в 73,96 раза до $\lambda_k = 19,97 \frac{Вт}{м \cdot К}$.

Не смотря на то, что в микрокомпозите содержание алюминиевой пудры ПАП-1 значительно больше 16 масс.ч., коэффициент теплопроводности микрокомпозита больше аналогичного параметра микрокомпозита на 9% ($\lambda_k = 21,8 \frac{Вт}{м \cdot К}$ и $\lambda_k = 19,97 \frac{Вт}{м \cdot К}$ соответственно).

Как было отмечено в разделе 2.2.3 диссертации на коэффициент теплопроводности полимерных композитов влияют в значительной мере следующие факторы:

- 1) образование агрегатов из частиц наполнителя, что при определенной концентрации приводит к образованию проводящих "мостиков" между частицами и возникновению эффекта прыжковой проводимости;
- 2) взаимодействие частиц полимера с поверхностью частиц наполнителя приводит к образованию граничного слоя, свойства которого существенно отличаются свойств полимерной матрицы;
- 3) пористость полимерной матрицы в композите.

Различие в размерах и форме микро- и наночастиц, концентрации компонентов обуславливают влияние вышеуказанных факторов на разницу в теплопроводности микро- и микрокомпозитов.

Вывод

Наполнение наночастицами алюминия и меди увеличивает коэффициент теплопроводности микрокомпозита на основе эластомера Ф-40 до $\lambda_k = 21,8 \frac{Вт}{м \cdot К}$, что в 38,9 раза превышает значение коэффициента теплопроводности эластомера Ф-40.

4.5 Исследование термостойкости эластомера Ф-40 и нанокомпозита на его основе в условиях ОДКВ

Термостойкость полимера относится к категории важнейших эксплуатационных свойств материала. Повышенная температура в условиях эксплуатации может приводить к термоокислительной деструкции эластомера по причине разрыва химических связей основной цепи макромолекул и образования макрорадикалов $R\cdot$ и радикалов $RO_2\cdot$, являющихся продуктами распада гидропероксидов, возникающих из-за окисления макромолекул полимера [136].

Медь является ингибитором процесса окисления бутадиен-нитрильных каучуков [118], поэтому в нашей работе предложено наполнять эластомер Ф-40 наночастицами меди, что позволит связать свободные радикалы, образующиеся при термораспаде и повысить термостойкость эластомера.

Исследования термостойкости эластомера Ф-40 и нанокомпозита на его основе проводили, измеряя прочность и деформацию образцов материала при одностороннем растяжении до и после старения, которое проводили в условиях ограниченного доступа воздуха кислорода при температуре 250°C в течение 2 ч. В таблице 4.3 показаны результаты испытаний полимерных образцов до и после высокотемпературного старения [137].

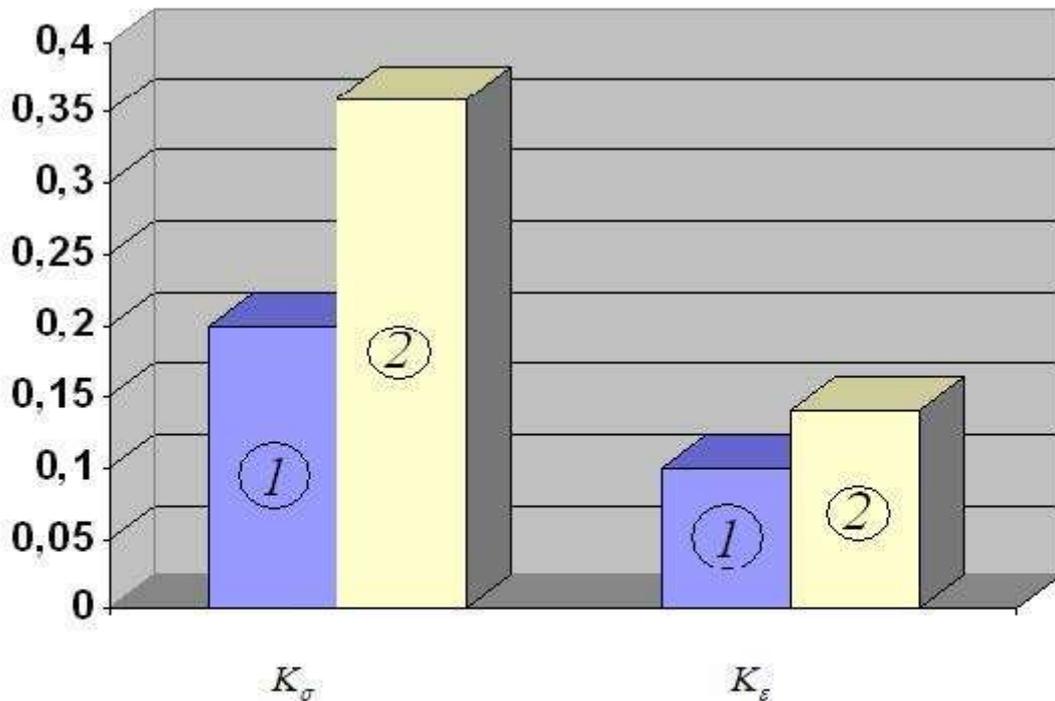
На рисунке 4.11 показаны коэффициенты старения по прочности K и относительному удлинению K_ϵ эластомера Ф-40 и его нанокомпозита.

Как следует из рисунка 4.11 термостойкость нанокомпозита, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40, существенно повысилась. Коэффициенты старения нанокомпозита по прочности в 1,8 раза, а по деформации в 1,4 раза больше аналогичных показателей полимерной матрицы, что является подтверждением увеличения термостойкости нанокомпозита.

Вывод. Наночастицы меди являются ингибиторами процесса термоокисления эластомера Ф-40. Экспериментально подтверждено значительное увеличение термостойкости нанокомпозита в сравнении с не наполненным эластомером.

Таблица 4.3 – Механические свойства эластомера Ф-40 и его нанокомпозита до и после высокотемпературного старения [137]

Наименование показателя	Эластомер Ф-40	Нанокомпозит на основе Ф-40
До старения		
Прочность σ_p , МПа	11,8	15,4
Деформация ε_p , %	194	81
После старения		
Прочность σ_p , МПа	2,4	5,6
Деформация ε_p , %	19	11
Коэффициент старения по прочности K_σ	0,2	0,36
Коэффициент старения по деформации K_ε	0,1	0,14



1 – эластомер Ф-40; 2 – нанокомпозит на его основе

Рисунок 4.11 – Коэффициенты старения по условной прочности K_σ и относительному удлинению K_ε [137]

4.6 Исследование зависимости усилия резания покрытий нанокompозита от переднего угла режущей кромки калибра-резца

При механической обработке полимерного покрытия рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра, обеспечивают заданный размер и высокое качество поверхности восстановленного отверстия.

Экспериментальные исследования процесса калибрования проводили с целью определения рациональных геометрических параметров режущей кромки калибра. Чем меньше усилие резание, тем меньше деформация полимерного покрытия при калибровании, тем меньше повреждаемость покрытия и точнее его размеры.

На рисунке 4.12 показана зависимость усилия резания покрытия нанокompозита эластомера Ф-40 от переднего угла режущей кромки калибра-резца.

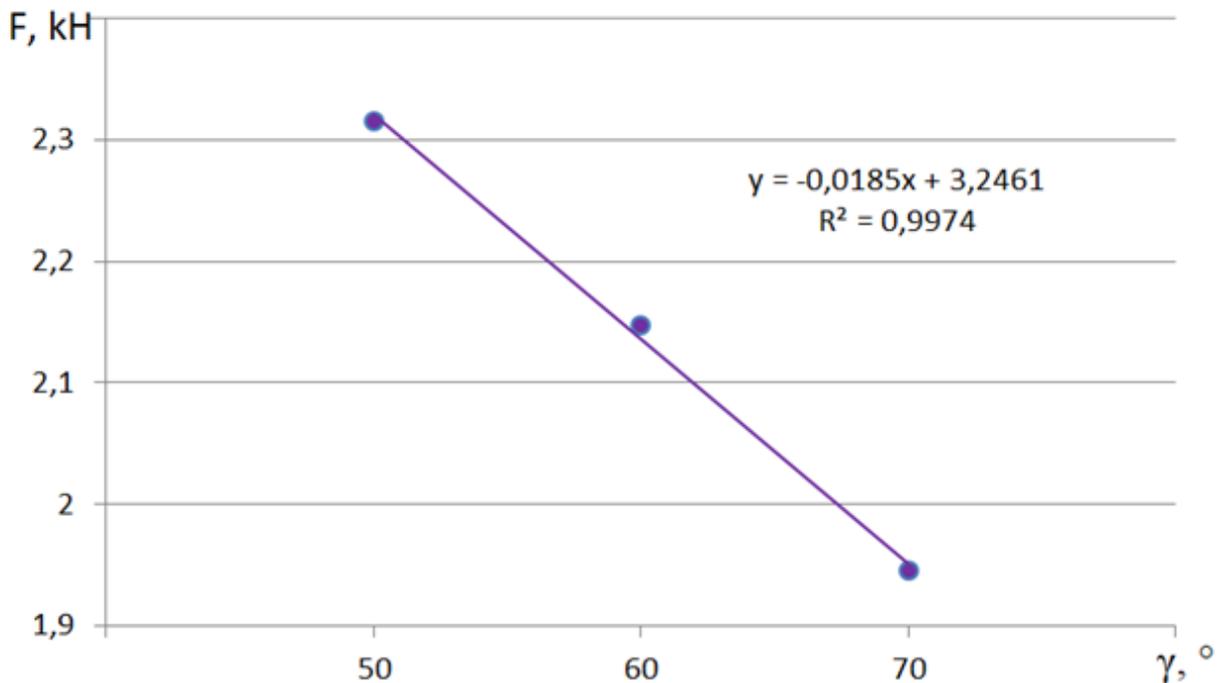


Рисунок 4.12 – Зависимость усилия резания F покрытия нанокompозита эластомера Ф-40 от переднего угла режущей кромки калибра-резца γ

Из рисунка 4.12 видно, что с увеличением переднего угла режущей кромки калибра-резца γ усилие резание F покрытия нанокompозита эластомера Ф-40 снижается по линейной зависимости.

При наименьшем значении переднего угла режущей кромки калибра-резца $\gamma = 50^0$ усилие резание покрытия нанокompозита имеет максимальное значение $F = 2,32 \text{ кН}$. Увеличение переднего угла режущей кромки калибра до значения $\gamma = 60^0$ уменьшает усилие резание покрытия нанокompозита на 8% до значения $F = 2,14 \text{ кН}$. Максимальное значение переднего угла режущей кромки калибра $\gamma = 70^0$ обеспечивает минимальное усилие резания покрытия нанокompозита эластомера Ф-40 $F = 1,94 \text{ кН}$. Усилие резания F , в сравнении с передними углами калибров $\gamma = 50$ и 60^0 уменьшилось на 21 и 10% соответственно.

Необходимо отметить, что в результате механической обработки калибрами с передними углами $\gamma = 50...70^0$ и задним углом $\alpha = 10^0$ образуется сливная стружка, что является непременным условием получения высокого качества обработки поверхности полимерного покрытия. Задний угол режущей кромки $\alpha = 10^0$ является оптимальным для резания полимерных покрытий, так как снижает влияние упругого восстановления материала после прохождения режущего инструмента. В результате исследований определены рациональные геометрические параметры калибра-резца, которые составляют: передний угол $\gamma = 70^0$, задний угол $\alpha = 10^0$.

На рисунке 4.13 показаны результаты исследования зависимости усилия резания F покрытий эластомера Ф-40С от переднего угла калибра-резца γ , которые проведены в работе Кирсанова Ф.А.

Как и в нашем случае, графическая зависимость линейная и с увеличением переднего угла режущей кромки усилие резания уменьшается. Наибольшее значение усилия резания $F = 0,997 \text{ кН}$ полимерного покрытия имеет место при минимальном значении переднего угла калибра-резца $\gamma = 50^0$. При увеличении зна-

чений переднего угла калибра-резца до $\gamma = 60$ и 70° , усилие резания снизилось в 1,26 и 2,88 раза и составило $F = 0,792$ и $0,346$ кН соответственно.

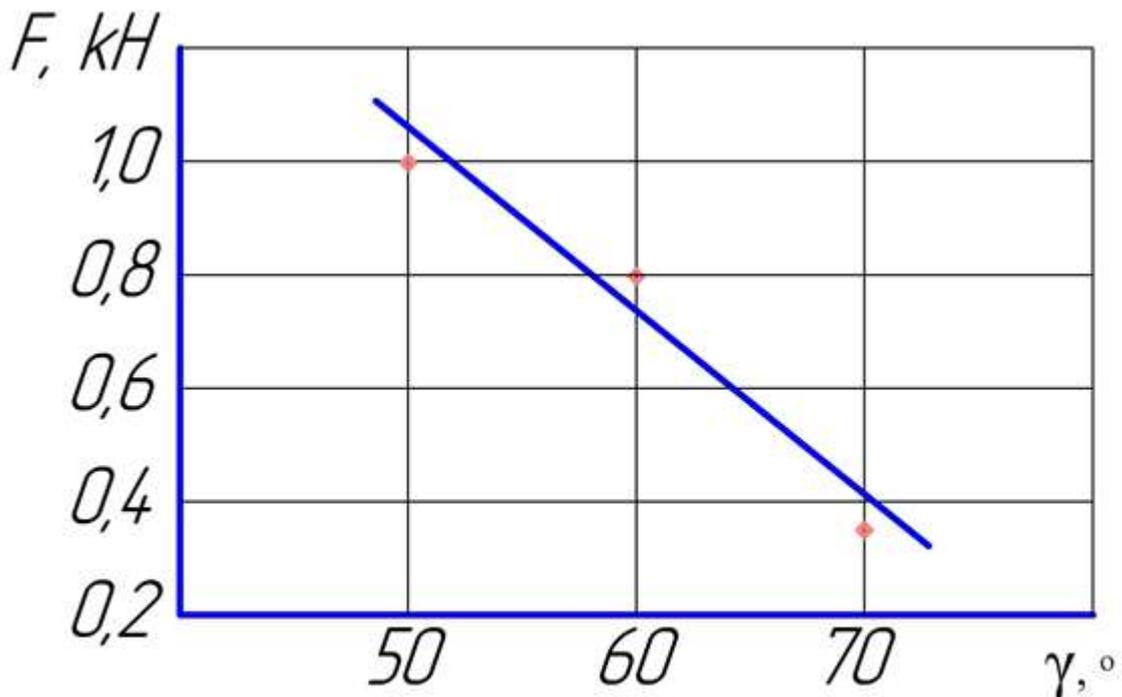


Рисунок 4.13 – Зависимость усилия резания F эластомера Ф-40С от переднего угла калибра-резца γ [123]

Сравнительный анализ рисунков 4.12 и 4.13 показал, что при равных значениях переднего угла режущей кромки калибров значения усилия резания покрытий нанокompозита эластомера Ф-40 значительно больше, чем покрытий не наполненного эластомера Ф-40С. Увеличение усилия резания покрытий составляет от 2,32 до 5,6 раза.

Причины увеличения усилия резания следующие:

- 1) Наполнение эластомера наночастицами алюминия и меди повышает модуль упругости нанокompозита и соответственно усилие резания.
- 2) Влияние масштабного фактора. В работе Кирсанова Ф.А. проводили калибрование отверстий с полимерным покрытием во втулках диаметром отверстий 20 мм, в нашей работе – 52 мм.

Выводы

1) Проведены экспериментальные исследования зависимости усилия резания покрытия нанокompозита эластомера Ф-40 от переднего угла режущей кромки калибра-резца. Определены рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца, которые обеспечивают минимальное значение радиальной составляющей силы резания покрытий нанокompозита эластомера Ф-40: передний угол $\gamma = 70^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$.

2) Калибрование покрытия нанокompозита эластомера Ф-40 калибром-резцом с рациональными геометрическими параметрами режущей кромки приводит к образованию сливной стружки, что является непременным условием обеспечения высокого качества обработки поверхности полимерного покрытия.

3) Усилие резания полимерных покрытий при калибровании зависит от модуля упругости материала и геометрических размеров отверстия. С увеличением модуля упругости и геометрических размеров отверстия усилие резания при калибровании многократно увеличивается от 2,32 до 5,6 раза.

4.7 Исследование повреждаемости и точностных характеристик покрытий нанокompозита после калибрования

Дефекты полимерного покрытия (растрескивание, отслаивание, сморщивание) после калибрования существенно влияют на его долговечность и соответственно ресурс подшипникового узла в эксплуатационный период. Полимерное покрытие после механической обработки калибром-резцом должно иметь минимальные повреждения, а отверстие с полимерным покрытием заданные точностные характеристики.

В данном эксперименте исследовали влияние угла заточки режущей кромки калибра на качество и точность механической обработки поверхности.

Площадь разрушенного покрытия после механической обработки покрытий нанокompозита эластомера Ф-40 калибром-резцом с различными значениями переднего угла показана на рисунке 4.14. Как видно из рисунка, покрытие нанокomp-

позита после калибрования режущим инструментом с передним углом режущей кромки $\gamma = 50^\circ$ имеет максимальные повреждения. Площадь разрушенного покрытия нанокompозита составила 13,28 %.

Увеличение переднего угла режущей кромки калибра до $\gamma = 60^\circ$ уменьшило площадь разрушения покрытия в 1,3 раза и этот показатель составил 10,23 %.

Механическая обработка покрытия нанокompозита калибром, который имеет рациональные геометрические параметры (передний угол $\gamma = 70^\circ$) обеспечивает наиболее высокое качество обработки.

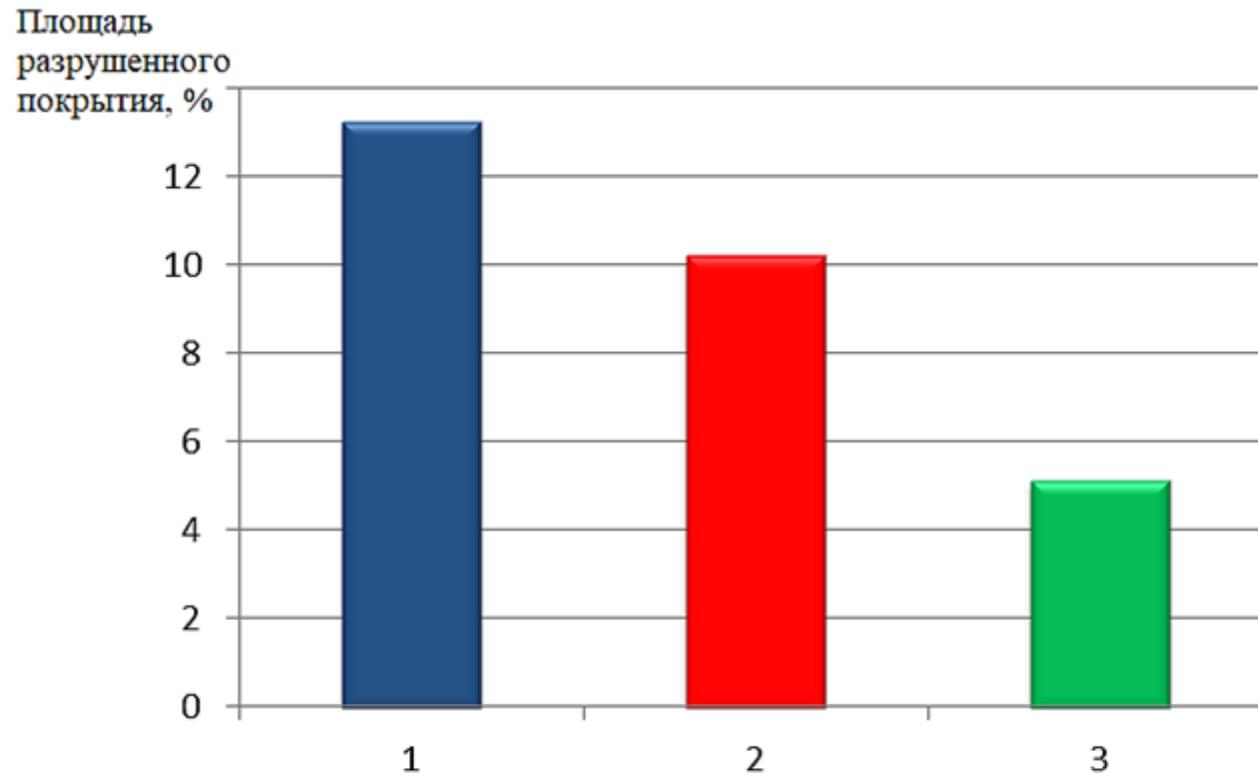
Площадь разрушения покрытия, в сравнении с углами $\gamma = 50$ и 60° , уменьшилась в 2,6 и 2,0 раза и ее значение составило 5,12 %.

На следующем этапе исследовали изменение овальности отверстий с полимерным покрытием в зависимости от переднего угла режущей кромки калибра-резца (рисунок 4.15). Из рисунка следует, что после механической обработки калибром с передним углом режущей кромки $\gamma = 50^\circ$ овальность имеет наибольшее значение и составляет 14 мкм.

При увеличении переднего угла режущей кромки до значения $\gamma = 60^\circ$ овальность отверстия с полимерным покрытием уменьшилась в 1,17 раза и составила 12 мкм.

Наименьшее значение овальности отверстия с полимерным покрытием имеет при обработке покрытия калибром с передним углом режущей кромки $\gamma = 70^\circ$. В сравнении с калибрами с передними углами режущей кромки $\gamma = 50$ и 60° , овальность уменьшилась в 1,75 и 1,5 раза и ее значение составило 8 мкм.

На завершающем этапе исследовали отклонение от заданного размера Δ отверстий с покрытием из эластомера Ф-40 после обработки калибром-резцом с различным передним углом (рисунок 4.16). Из рисунка следует, что после механической обработки калибром с передним углом режущей кромки $\gamma = 50^\circ$ отклонение от заданного размера имеет наибольшее значение и составляет $\Delta = 30$ мкм.



1) передний угол $\gamma = 50^\circ$; 2) передний угол $\gamma = 60^\circ$; 3) передний угол $\gamma = 70^\circ$

Рисунок 4.14 – Площадь разрушенного покрытия нанокompозита эластомера Ф-40
после механической обработки калибром-резцом

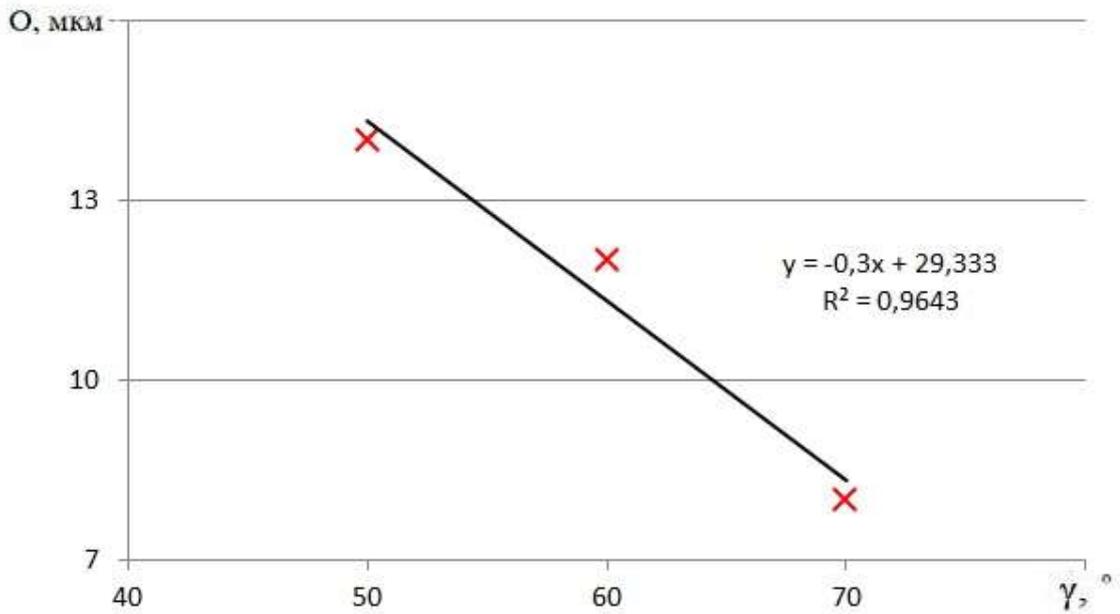


Рисунок 4.15 – Овальность O отверстий с покрытием нанокompозита эластомера Ф-40 после механической обработки калибром-резцом с различным передним углом γ

При увеличении переднего угла режущей кромки до значения $\gamma = 60^{\circ}$ отклонение от заданного размера уменьшилось в 1,2 раза и составило $\Delta = 25 \text{ мкм}$.

Наименьшее значение отклонение от заданного размера отверстия с полимерным покрытием имеет при обработке покрытия калибром с передним углом режущей кромки $\gamma = 70^{\circ}$. В сравнении с калибрами с передними углами режущей кромки $\gamma = 50$ и 60° , параметр Δ уменьшился в 1,67 и 1,39 раза и его значение составило $\Delta = 18 \text{ мкм}$.

Вывод. Рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца (передний угол $\gamma = 70^{\circ}$, задний угол $\alpha = 10^{\circ}$) обеспечивают высокое качество и точностные характеристики покрытий после калибрования. Площадь разрушения покрытия составила около 5 %, овальность отверстия с полимерным покрытием 8 мкм, а отклонение от заданного размера 18 мкм.

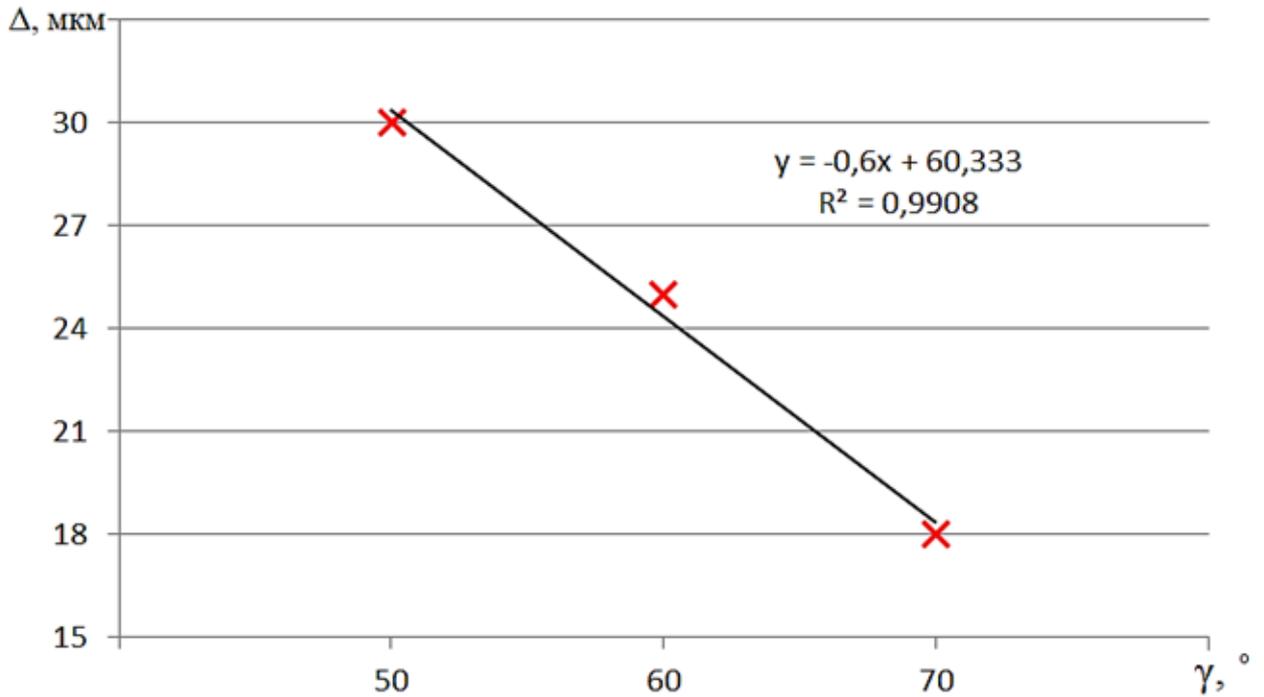


Рисунок 4.16 – Отклонение от заданного размера Δ отверстий с покрытием из эластомера Ф-40 после обработки калибром-резцом с различным передним углом γ

4.8 Исследование долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных нанокompозитом эластомера Ф-40

В ходе данных экспериментальных исследований изучена долговечность восстановленных посадок, определена максимальная допустимая толщина полимерного покрытия из нанокompозита на основе эластомера Ф-40 для восстановления изношенных посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях сельскохозяйственной техники, исследован тепловой баланс восстановленного подшипникового узла.

Многочисленные исследования, результаты которых приведены в работах [8, 14] показывают, что долговечность изношенных посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях сельскохозяйственной техники, восстановленных полимерными материалами в значительной мере зависит от толщины полимерного покрытия. С увеличением последней долговечность резко снижается. Такую гра-

фическую зависимость называют кривой Веллера. Аналогичная зависимость получена в нашем эксперименте.

На рисунке 4.17 представлены результаты исследования долговечности восстановленных посадок подшипников 209 при различной толщине полимерного покрытия нанокompозита на основе эластомера Ф-40, нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН.

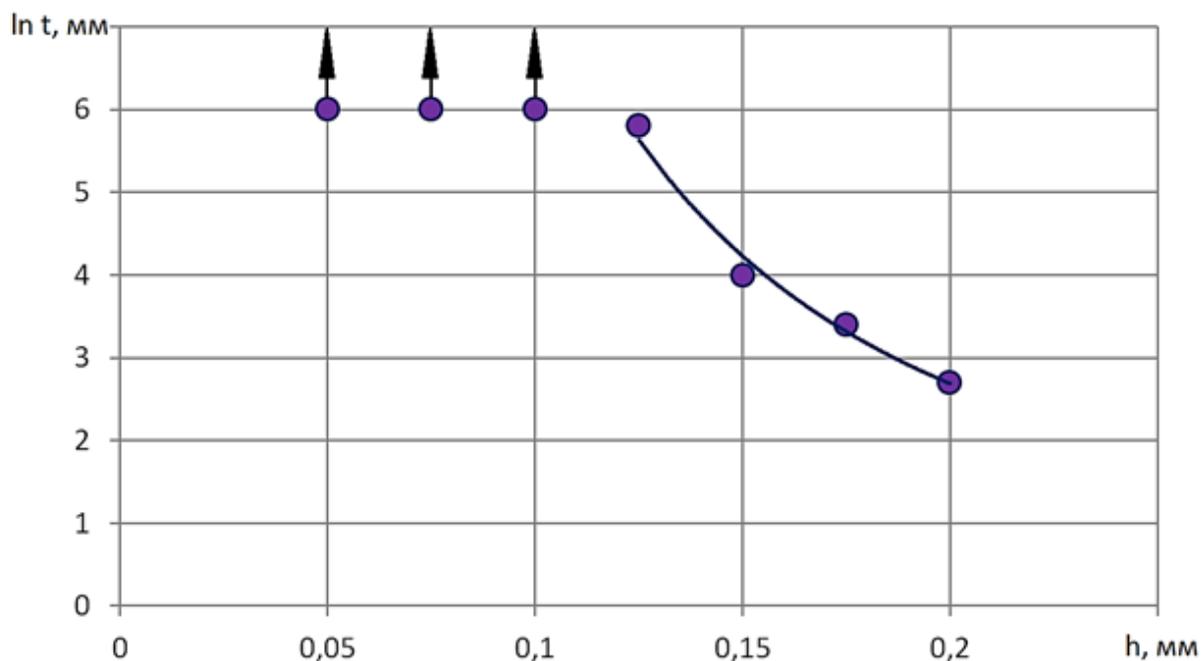


Рисунок 4.17 – Ресурс полимерных посадок t подшипника 209 при различной толщине полимерного покрытия из нанокompозита на основе эластомера Ф-40, нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН

Ресурс полимерной посадки подшипника с максимальной толщиной полимерного покрытия $h = 0,2$ мм, как следует из рисунка, наименьший. Проворот наружного кольца подшипника был зафиксирован через 15 ч работы вибростенда. Долговечность полимерной посадки подшипника с уменьшением толщины полимерного покрытия резко увеличивается. У полимерной посадки подшипника с толщиной полимерного покрытия $h = 0,175$ мм ресурс, в сравнении с предыдущей посадкой, увеличился в 2,13 раза и составил 32 ч. Многократное увеличение ресурса зафиксировано у полимерной посадки подшипника с толщиной полимерно-

го покрытия $h = 0,15 \text{ мм}$. В сравнении с полимерными покрытиями толщиной $h = 0,2$ и $0,175 \text{ мм}$ ресурс увеличился в 3,6 и 1,68 раза и составил 54 ч.

Посадка с толщиной полимерного покрытия 0,125 мм сохранила свою работоспособность в течение всей базы испытаний (330 ч работы стенда). Сдвиг наружного кольца подшипника в отверстии корпусной детали в течение 330 ч ($e^{5,8} = 330$) стендовых испытаний отсутствовал. Стрелки на графике показывают, что полимерные посадки с толщинами полимерного покрытия меньше 0,125 мм, оставались работоспособными в течение всего периода стендовых испытаний.

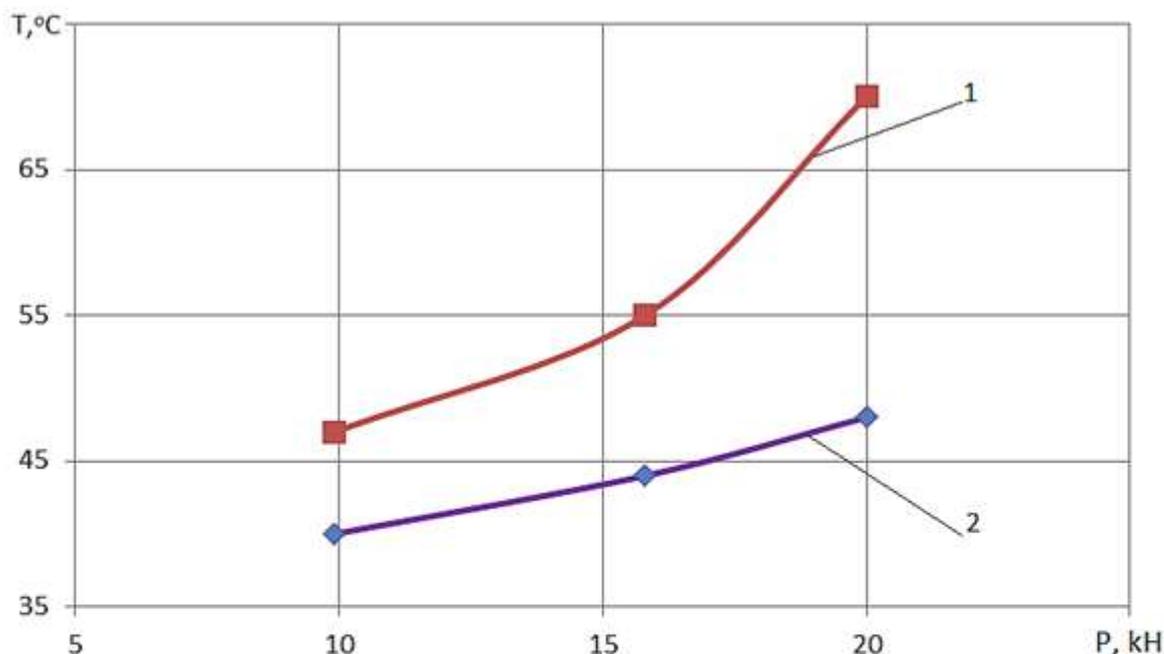
Поэтому значение максимальной допустимой толщины полимерного покрытия нанокompозита на основе эластомера Ф-40 при циклической радиальной нагрузке $P = 20 \text{ кН}$ составляет 0,125 мм. Предельный диаметральный износ посадочных отверстий подшипников в корпусных деталях, подлежащий компенсации при восстановлении нанокompозитом эластомера Ф-40 составляет 0,25 мм.

Следует отметить, что в двухопорных валах, для компенсации температурного расширения деталей, одна опора выполняется «фиксирующей», а другая «плавающей». Для «фиксирующей» опоры необходимо наносить покрытие толщиной, обеспечивающей натяг посадки подшипника 0,03 мм, а для «плавающей» – нулевой натяг посадки подшипника в отверстие с полимерным покрытием.

Затем исследовали зависимость температуры T деталей подшипникового узла, с полимерной посадкой из нанокompозита, от значений циклической радиальной нагрузки P (рисунок 4.18).

Температура втулки подшипникового узла, с посадкой, восстановленной эластомером Ф-40, повышается при увеличении циклической радиальной нагрузки (зависимость 1). При значениях радиальной циклической нагрузки $P = 9,9; 15,8$ и $20,0 \text{ кН}$ температура втулки составила $T = 46, 55$ и 70°C соответственно.

Температура наружного кольца подшипника с посадкой, восстановленной эластомером Ф-40, также повышается при увеличении циклической радиальной нагрузки.



1 – втулка; 2 – наружное кольцо подшипника 209

Рисунок 4.18 – Температура T деталей подшипникового узла с посадкой, восстановленной эластомером Ф-40, при переменной, радиальной циклической нагрузке P

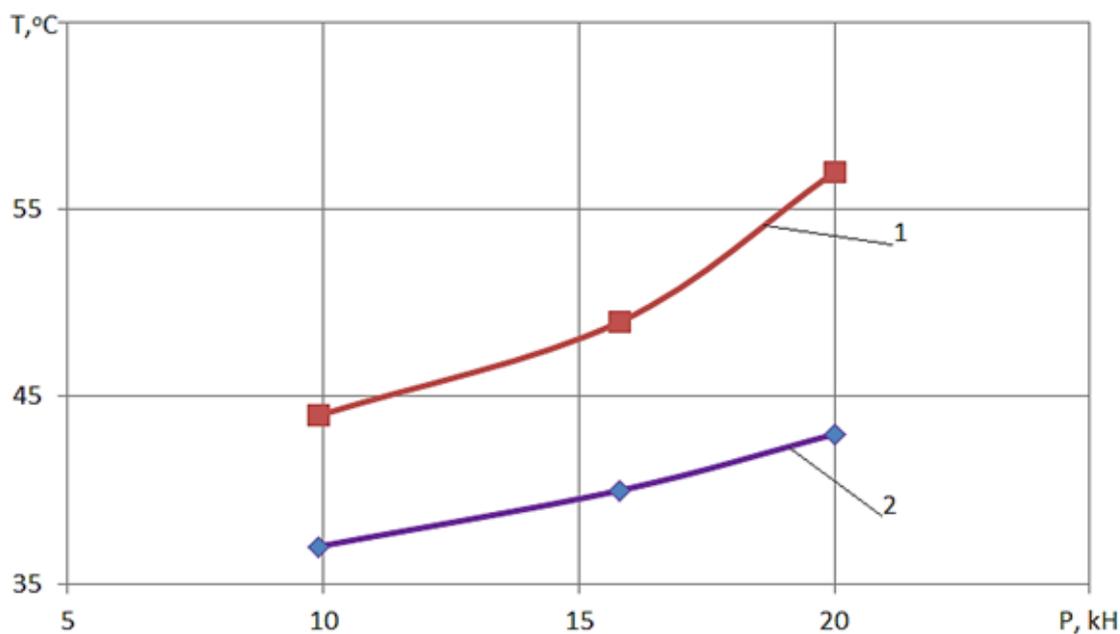
При значениях радиальной циклической нагрузки $P = 9,9; 15,8$ и $20,0$ кН температура наружного кольца подшипника составила $T = 40, 44$ и 48°C соответственно.

Температура втулки подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, составила $44, 49$ и 54°C при значениях циклической радиальной нагрузки $P = 9,9; 15,8$ и $20,0$ кН соответственно, что на $6,4; 10,9$ и $22,8\%$ меньше чем у не наполненного эластомера (рисунок 4.19).

Температура наружного кольца подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, составила $37, 40$ и 43°C при значениях циклической радиальной нагрузки $9,9; 15,8$ и $20,0$ кН соответственно, что на $7,5; 9,1$ и $10,4\%$ меньше чем у не наполненного эластомера.

Наполнение эластомера Ф-40 нанопорошками алюминия и меди существенно повышает теплопроводность полимерного покрытия и увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Это подтверждается более

низкой температурой деталей подшипникового узла в сравнении с не наполненным эластомером.



1 – втулка; 2 – наружное кольцо подшипника 209

Рисунок 4.19 – Температура T деталей подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, при переменной, радиальной циклической нагрузке P

Выводы

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

5 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

5.1 Технологические рекомендации

По результатам обобщения и анализа материала проведенных теоретических и экспериментальных исследований в диссертационной работе разработали технологию и оснастку для восстановления в корпусных деталях посадочных отверстий под подшипники качения нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 (приложение Д).

Технология восстановления состоит из следующих операций:

- 1) механическая очистка поверхности изношенных отверстий в корпусной детали;
- 2) микрометраж посадочных отверстий и определение их износа;
- 3) обезжиривание поверхности посадочных отверстий;
- 4) приготовление нанокompозита на основе эластомера Ф-40, включая ультразвуковое диспергирование (УЗД);
- 5) послойное нанесение покрытия из раствора нанокompозита на изношенную поверхность посадочных отверстий в корпусной детали;
- 6) термическая обработка корпусной детали с нанесенными полимерными покрытиями;
- 7) калибрование полимерных покрытий под заданный размер;
- 8) контроль качества восстановления корпусной детали.

Технология восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 прошла производственную проверку в ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области. Автомобили и трактора, с восстановленными корпусными деталями, в период с марта 2015 по ноябрь 2016 г. проходили в хозяйстве эксплуатационные испытания, ко-

торые показали высокую надежность техники. За указанный период испытаний отказы техники из-за низкого ресурса восстановленных корпусных деталей, отсутствовали (приложения Е...З).

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО МичГАУ при изучении специальных дисциплин профессионального цикла: «Технологические процессы технического обслуживания и ремонта транспортно-технологических машин и оборудования», «Основы технологии производства и ремонта транспортно-технологических машин и оборудования», «Нанотехнологии в техническом сервисе», «Технология ремонта машин», «Монтаж, эксплуатация и ремонт технологического оборудования», «Материаловедение. Технология конструкционных материалов».

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

Себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстия нанокompозитом эластомера Ф-40 рассчитывали по формуле [138...140]

$$C_{\Pi} = 3\Pi + C_{M} + \Pi_{P} + C_{OПУ} + C_{ЭЛ} + A_{OБ}, \quad (5.1)$$

где 3Π – заработная плата рабочих, руб/дм²;

C_{M} – цена ремонтных материалов для восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстия, руб/дм²;

Π_{P} – прочие расходы при производстве продукции, руб.;

$C_{OПУ}$ – накладные расходы на организацию и управление производством, руб.;

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

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

Затраты на заработную плату рабочих определяли по выражению

$$ЗП = ЗП_о + ЗП_д + Н_{сс}, \quad (5.2)$$

где $ЗП_о$ – затраты на основную заработную плату рабочих, руб;

$ЗП_д$ – затраты на дополнительную заработную плату рабочих, руб;

$Н_{сс}$ – затраты на начисления социального страхования, руб.

Основную заработную плату рабочих рассчитали по формуле

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

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

$C_ч$ – часовая тарифная ставка, руб / ч.

Трудоемкость восстановления 1 дм^2 изношенной поверхности отверстия в корпусной детали $T_{об}$, определяли в ходе хронометража, как норму времени на выполнение всех операций при восстановлении (таблица 5.1).

При выполнении операций восстановления корпусной детали приняли четвертый разряд слесаря со сдельной оплатой труда и часовым тарифом в 150 руб/ч (по данным ЗАО «Агрофирма «Русь»)

$$ЗП_о = 150 \cdot 0,21 = 31,5 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Дополнительную заработную плату рабочего определили по формуле

$$ЗП_{д} = ЗП_{о} \cdot K_{д.п.}, \quad (5.4)$$

где $K_{д.п.}$ – коэффициент дополнительной оплаты, который составляет 10 % от основной заработной платы рабочего (по данным ЗАО «Агрофирма «Русь»)

$$ЗП_{д} = 31,5 \cdot 0,1 = 3,15 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Таблица 5.1 – Норма времени на восстановление 1 дм² изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусной детали нанокompозитом на основе эластомера Ф-40

№ 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

$$H_{cc} = (ЗП_{о} + ЗП_{д}) \cdot K_{cc} / 100, \quad (5.5)$$

где K_{cc} - коэффициент начислений социального страхования, который составляет 30,2% от суммы основной и дополнительной зарплаты рабочего.

$$H_{cc} = (31,5 + 3,15) \cdot 0,302 = 10,46 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Заработная плата рабочего при восстановлении 1 дм² изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусной детали

$$ЗП = 31,5 + 3,15 + 10,46 = 45,11 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Цена материалов при восстановлении 1 дм² изношенной поверхности отверстий в корпусной детали

$$C_M = H_M \cdot Ц_M, \quad (5.6)$$

где H_M – норма расхода материалов при восстановлении 1 дм² изношенной поверхности отверстий в корпусной детали, кг / дм²;

$Ц_M$ – удельная цена ремонтных материалов, руб / кг.

Цена ремонтных материалов, используемых при восстановлении изношенных отверстий в корпусной детали, показана в таблице 5.2. Общие удельные затраты на ремонтные материалы при восстановлении

$$C_M = 3,14 + 2,07 + 1,34 + 1,06 = 7,61 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Прочие расходы состоят из расходов на производство единицы i-го вида продукции и их принимают равными 5 % от заработной платы

$$П_p = 0,05 \cdot ЗП_o \quad (5.7)$$

Таблица 5.2 – Цена ремонтных материалов, используемых при восстановлении 1дм^2 изношенной поверхности отверстий в корпусной детали

№ п/п	Наименование материала	Цена руб/кг	Расход, кг/дм ²	Стоимость руб/дм ²
1	Эластомер Ф-40	2615	0,0012	3,14
2	Ацетон технический	138	0,015	2,07
3	Нанопорошок алюминия	33600	0,00004	1,34
4	Нанопорошок меди	35400	0,00003	1,06
	Итого:			7,61

Затраты на организацию и управление производством состоят из командировочных расходов, затрат на амортизацию, электричество, оплату связи, коммунальных и других платежей

$$C_{\text{опу}} = 3\Pi_o \cdot K_{\text{опу}} \quad (5.8)$$

где $K_{\text{опу}}$ - коэффициент, который учитывает затраты на организацию и управление производством, $K_{\text{опу}} = 2$.

$$C_{\text{опу}} = 45,11 \cdot 2 = 90,22 \text{руб}$$

Затраты на электроэнергию определяли по формуле

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

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_{Π} – коэффициент потерь электроэнергии в сети, $K_{\Pi} = 1,05$;

$C_{\text{Э}}$ – стоимость электроэнергии за 1 кВт/ч, р.; $C_{\text{Э}} = 5,03$ р.

$$C_{\text{ЭЛ}} = (0,055 \cdot 0,42 + 3,5 \cdot 3) \cdot 1,05 \cdot 5,03 = 55,58 \text{ руб.},$$

Амортизационные отчисления на оборудование из расчета на восстановление одной корпусной детали:

$$A_{\text{об}} = \frac{0,1 \cdot (C_{\text{Н1}} T_{\text{осн1}} + C_{\text{Н2}} T_{\text{осн2}} + C_{\text{Н3}} T_{\text{осн3}})}{R \Phi_{\text{вР}}}, \quad (5.10)$$

где $C_{\text{Н1}}, C_{\text{Н2}}, C_{\text{Н3}}$ – цена новых: ультразвуковой ванны, сушильного шкафа, весов лабораторных, калибрующей оснастки, руб.;

$T_{\text{осн1}}, T_{\text{осн2}}, T_{\text{осн3}}, T_{\text{осн4}}$ – 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 [Бабусенко].

$$A_{\text{об}} = \frac{0,1 \cdot (5900 \cdot 0,37 + 40400 \cdot 3,0 + 7780 \cdot 0,01 + 19740 \cdot 0,1)}{1971} = 6,36 \text{ руб}$$

Полная себестоимость восстановления 1 дм^2 изношенной поверхности отверстий в корпусной детали нанокompозитом на основе эластомера Ф-40

$$C_{\text{п}} = 45,11 + 7,61 + 2,25 + 90,22 + 55,58 + 6,36 = 207,13 \text{ руб / дм}^2$$

Годовые затраты на восстановление нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 изношенных посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях сельскохозяйственной техники определяли по формуле

$$Z_{\text{н}} = N \cdot C_{\text{п}}, \quad (5.11)$$

где N – годовая программа восстановления (общая суммарная площадь восстановления поверхности посадочных отверстий в корпусных деталях), дм^2 .

В ЗАО «Агрофирма «Русь» в 2016 г корпусные детали не восстанавливали, а заменяли на новые. По результатам выбраковки корпусных деталей общая площадь изношенной поверхности, подлежащей восстановлению, составила $N = 1007,23 \text{ дм}^2$.

Годовые затраты при восстановлении корпусных деталей сельскохозяйственной техники, по новой, разработанной в диссертации технологии, составит

$$Z_H = 580 \cdot 207,13 = 120135,4 \approx 120135 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники составит

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

где Z_2 – годовые затраты на приобретение новых деталей, $Z_2 \approx 482836$ руб.;

Z_1 – годовые затраты на восстановление корпусных деталей по новой технологии, $Z_1 = 120135$ руб.

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

$$C_{\text{год}} = 482836 - 120135 = 362701 \approx 360 \text{ тыс. руб.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

3 Теплостойкость нанокompозита повысилась, в сравнении с не наполненным эластомером, в 1,23 раза и составила 123°С. Наполнение наночастицами алюминия и меди увеличивает коэффициент теплопроводности нанокompозита до $\lambda_k = 21,8 \frac{Вт}{м \cdot К}$, что в 38,9 раза превышает коэффициент

теплопроводности эластомера Ф-40. Коэффициенты старения нанокompозита по прочности в 1,8 раза, а по деформации в 1,4 раза больше аналогичных показателей полимерной матрицы, что является подтверждением увеличения термостойкости нанокompозита.

4 Рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца (передний угол $\gamma = 70^{\circ}$, задний угол $\alpha = 10^{\circ}$) обеспечивают высокое качество и точностные характеристики покрытий после калибрования. Площадь разрушения покрытия составила около 5 %, овальность отверстия с полимерным покрытием 8 мкм, а отклонение от заданного размера 18 мкм. Усилие резания полимерных покрытий при калибровании зависит от модуля упругости материала и геометрических размеров отверстия, с увеличением последних усилие резания многократно увеличивается от 2,3 до 5,6 раза.

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бобович Б.Б. Утилизация автомобилей и автокомпонентов [Текст]: учеб. пособие / Б.Б. Бобович. – М.: Форум, 2011. – 167 с.
- 2 Черноиванов, В. И. Голубев, И. Г. Восстановление деталей машин [Текст] (Состояние и перспективы). – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
- 3 Ли, Р. И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники [Текст]: учеб. пособие / Р. И. Ли – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. – 379 с.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Авдеев, М. В. Повышение эффективности восстановления деталей сельскохозяйственной техники [Текст]: автореф. дис...докт. техн. наук. / Авдеев М.В. – Челябинск, 1987. – 46 с.
- 9 Курчаткин, В. В. Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами [Текст]: дис ... докт. техн. наук. / Курчаткин В.В. – М., 1989, – 407 с.
- 10 Сидоров, А. И. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники плазменной наплавкой [Текст]: автореф. дис...докт. техн. наук. / Сидоров А.И. – М.,

1989. – 34 с.

11 Мошенский, Ю. А. Технологические основы повышения надежности автотракторных валов при восстановлении их наплавкой и термической обработкой [Текст]: автореф. дис...докт. техн. наук. / Мошенский Ю.А. – Пушкин, 1990. – 43 с.

12 Черновол, М.И. Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями [Текст]: автореф. дис...докт. техн. наук. / Черновол М.И. – М., 1992. – 35 с.

13 Мельниченко, И. М. Восстановление и повышение долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов и покрытий / Дис. ...докт. техн. наук. - Гомель, 1991. - 370 с.

14 Котин, А. В. Восстановление точности размерных цепей сборочных единиц применение не жестких компенсаторов износа / Дис. ...докт. техн. наук. - Саранск, 1998. - 358 с.

15 Ли, Р. И. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами [Текст]: дис ... докт. техн. наук. / Ли Р. И. – М., 2001, – 340 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 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.

19 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.

20 Казанцев, С. П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяй-

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

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

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

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

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

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

26 Жачкин, С.Ю. Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий [Текст] / Жачкин С.Ю., Краснова М.Н., Пеньков Н.А., Краснов А.И. Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 120. С. 130-134.

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

28 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.

- 29 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.
- 30 Уотерхауз, Р. Б. Фреттинг-коррозия [Текст] / Уотерхауз Р. Б.; - Л.: Машиностроение. 1976. – 271 с.
- 31 Оноприенко, В. П. Исследование влияния некоторых физико-механических и химических факторов на изнашивание металлов при фреттинг-коррозии [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Оноприенко В. П. – Киев, 1973. – 174 с.
- 32 Айбиндер, С. Б. Влияние полимерных покрытий на развитие фреттинг-коррозии [Текст] / Айбиндер С.Б., Жеглов О.С., Либерман Л.М. // Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия: Тез. докл. - Киев, 1973. – С. 143-144.
- 33 Щербина, Д. А. Исследование структурно-энергетических особенностей изнашивания металлов при фреттинг-коррозии [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Щербина Д. А. – Киев, 1975. – 248 с.
- 34 Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. – М.: «Издво МСХА», 2001. – 616 с.
- 35 Nanostructured Materials and Nanotechnology; Nalwa, H.S. Ed.; Academ. Press: San Diego, CA, 2002.
- 36 <http://www.nanoamor.com/nanopowders>.
- 37 Нанотехнологии и наноматериалы в агроинженерии. Учебное пособие / Под общ. ред. академика Россельхозакадемии М.Н. Ерохина. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2008. – 300 с.
- 38 Гороховский, А.В. Композитные наноматериалы. [Текст]: Учебное пособие / А.В. Гороховский. – Саратов.: ФГОУ ВПО СГТУ, 2008. – 76 с.
- 39 Микитаев А.К., Каладжян А.А., Леднев О.Б., Микитаев М.А. Нанокompозитные полимерные материалы на основе органоглин. Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ» <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/083.pdf>. С. 912 – 922.
- 40 J.-H. Chang, Y.U. An, S.J. Kim, S. Im. Polymer, 2003; 44:5655-5661.

- 41 J.-H. Chang, S.J. Kim, Y.L. Joo, S. Im. *Polymer*, 2004; 45:919-926.
- 42 D.M. Delozier, R.A. Orwol, J.F. Cahoon, N.J. Johnston, J.G. Smith, J.W. Connell. *Polymer*, 2002;43:813-822.
- 43 Kelly P., Akelah A., Moet A.J. *Mater Sci*. 1994. V.29. P.2274-2280.
- 44 J.-H. Chang, Y.U. An, D. Cho, E.P. Giannelis. *Polymer*, 2003; 44:3715-3720.
- 45 Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
- 46 Михайлюк, А. Е. Разработка эластомерных материалов на основе этиленпропиленовых каучуков, модифицированных высокодисперсными частицами металлов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Михайлюк А.Е. – Волгоград, 2014. – 140 с.
- 47 Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – Москва : Химия, 2000. – 672 с.
- 48 Кособудский, И. Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации / И. Д. Кособудский // Известия высших учебных заведений. – 2000. – Т. 43 (4). – С. 3-18.
- 49 Сергеев, Г. Б. Нанохимия металлов / Г. Б. Сергеев // Успехи химии. – 2001. – Т. 70, №10. – С. 915-933.
- 50 Бронштейн, Л. М. Наноструктурированные полимерные системы как нанореакторы для формирования наночастиц / Л. М. Бронштейн, С. Н. Сидоров, П. М. Валецкий // Успехи химии. – 2004. – Т. 73, № 5. – С. 542-557.
- 51 А.В. Елецкий. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 3. – С. 233-274.
- 52 Гороховский А. В. Композитные наноматериалы [Текст] : учебное пособие для студентов всех специальностей / А. В. Гороховский, Н. В. Архипова, В. В. Симанков ; М-во образования и науки Российской Федерации, Саратовский гос. технический ун-т. - Саратов : Саратовский гос. технический ун-т, 2010. - 67 с.
- 53 Zhu ZK, Yang Y, Yin J, Wang X, Ke Y, Qi Z. *J Appl Polym Sci* 1999;3:2063.
- 54 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.

55 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.

56 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.

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

58 Хамидулова З.С., Рогачева И.П., Мурох А.Ф., Аронович Д.А., Синееков А. П. Новые анаэробные герметики для автомобилестроения. Пластические массы, 1999, № 6, с. 40.

59 <http://www.nicp.ru/>

60 <http://loctite.gluesale.ru>

61 <http://www.spmc.ru>

62 Купреев, М. П. Повышение долговечности соединений подшипниковых узлов отремонтированной сельскохозяйственной техники [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Купреев М. П. - М., 1988. – 212 с.

63 Кондрашин, С. И. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники анаэробными герметиками с дисперсными минеральными наполнителями [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Кондрашин С. И. – Мичуринск, 2009. – 118 с.

64 Демин, В. Е. Совершенствование технологии восстановления сопряжений опор корпусных деталей с подшипниками качения применением композиционных анаэробных материалов (на примере корпуса КП трактора Т-150К) [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук. / Демин В. Е. – Саратов, 2007. – 16 с.

65 Щетинин, М. В. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивом Анатерм-105 [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Щетинин М. В. – Мичуринск, 2008. – 146 с.

- 66 Бутин, А. В. Клей для соединения однородных изделий из металла, стекла, пластмасс и керамики [Текст]: Патент на изобретение № 2418025 РФ Заявл. 29.05.2009 / Ли Р. И., Кондрашин С. И., Бутин А. В., Шипулин М. А. // Оpubл. 10.12.2010. – Бюл. № 34.
- 67 Бутин, А.В. Деформационно-прочностные свойства полимер-полимерной композиции для восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники [Текст] / Ли Р. И., Бутин А.В. // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК: сб. науч. тр. Междунар. науч.практ. конф. 13-14 мая 2010 г. – Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ. – 2011. – С. 169 – 174.
- 68 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.
- 69 Шубин, А. Г. Повышение долговечности посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники, восстановленных герметиком 6Ф / Автореф. дис.... канд. техн. наук. - М., 1980. - 16 с.
- 70 Тоиров, И. Ж. Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники анаэробными герметиками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Тоиров И. Ж. - М., 1990. – 172 с.
- 71 Ибилдаев, Б. А. Долговечность подшипников качения сельскохозяйственной техники с посадками, восстановленными герметиком 6Ф [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Ибилдаев Б. А. – М., 1986. – 159 с.
- 72 Аязбаев, М. Д. Долговечность неподвижных соединений типа вал – подшипник качения, восстановленных герметиком 6Ф в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Аязбаев М. Д. - М., 1984. – 193 с.
- 73 Сиднина, Т. И. Восстановление посадок подшипников в щитах асинхронных электродвигателей на ремонтных предприятиях Госагропрома СССР [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Сиднина Т. И. - М., 1986. - 159 с.

74 Аль-Ассех Рашад Фахад Обоснование выбора полимерного материала для восстановления и повышения долговечности неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Аль-Ассех Рашад Фахад. - М., 1989. – 181 с.

75 Машин, Д. В. Исследование деформационно-прочностных свойств композиции на основе эластомера Ф-40 [Текст] / Ли Р. И., Машин Д. В., Колесников А. А., Сафонов В. Н., // Материалы международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии» 20-21 ноября 2012 г. в 2 частях. – Белгород.: Изд-во Бел. ГСХА, 2012. – Часть 2. - С. 86-88.

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

77 Кирсанов, Ф. А. Оптимальный режим термической обработки модификации эластомера Ф-40С для восстановления корпусных деталей [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 3. – С. 80-83.

78 Кирсанов, Ф. А. Деформационно-прочностные и адгезионные свойства эластомера Ф-40С [Текст] / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А. // Бюллетень научных работ. Вып. 34. – Белгород : Изд-во БелГСХА, 2013. - С. 93-97.

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

80 Машин, Д. В. Новый полимерный композиционный материал для восстановления корпусных деталей автотракторной техники [Текст] / Машин Д. В., Ли Р. И. // Особенности технического оснащения современного с.х. производства: [сборник]. Материалы к международной научно-практической конференции 04 - 05 апреля 2013 г. – Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2013 г. С. 319-322.

81 Икрамов, У. Допустимые перекосы и непараллельности осей валов коробки передач //Автомобильный транспорт. - 1962 - № 7.- С. 29-32.

82 Поперена М.Я. Влияние жесткости корпуса на распределение нагрузки по эле-

ментам радиального подшипника [Текст] / Поперена М.Я.– М.: Доклады А.Н. Тадж. ССР. вып. XIV, 1955. – 136 с.

83 Машин, Д. В. Податливость опор качения восстановленных полимерными материалами [Текст] / Ли Р. И., Машин Д. В., Мироненко А. В. // Материалы международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии» 20-21 ноября 2012 г. в 2 частях. – Белгород.: Изд-во Бел. ГСХА, 2012. – Часть 2. - С. 93-95.

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

85 Машин, Д. В. Теоретические аспекты снижения податливости опор качения при восстановлении посадочных отверстий эластомерами [Текст] / Машин Д. В., Ли Р. И. // Особенности технического оснащения современного с.х. производства: [сборник]. Материалы к международной научно-практической конференции 04 - 05 апреля 2013 г. – Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2013 г. С. 314-318.

86 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.

87 Кононенко, А.С. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов. [Текст] / Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. // Международный технико-экономический журнал. – 2015. – № 1. – С. 89-94.

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

89 Тельнов, Н. Ф. Ремонт машин [Текст] / Тельнова Н. Ф.; - М.: ВО «Агропромиздат», 1992. – 560 с.

90 Курчаткин В. В. Надежность и ремонт машин [Текст] / Курчаткин В. В., Тельнов Н. Ф., Ачкасов К. А., Батищев А. Н. и др.; – М.: Колос, 2000, – 776 с.

91 Кричевский, М. Е. Применение полимерных материалов при ремонте сельско-

хозяйственной техники [Текст] / Кричевский М. Е.; - М.: Росагропромиздат, 1988. – 143 с.

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

93 Малюгин, В.А. Технологическое обеспечение восстановления посадок подшипников качения автомобилей полимерным нанокompозитом [Текст] / В.А. Малюгин, Р.И. Ли, Д.Н. Псарев // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – №4 (63). – С. 28-34.

94 Малюгин, В.А. Расчет точностных характеристик технологической оснастки при восстановлении посадок подшипников качения в узлах автомобилей адгезивами [Текст] / В.А. Малюгин, Р.И. Ли // Наука в Центральной России. – 2019. – №3 (39). – С. 36-43.

95 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. : Изд-во Мич. гос. агр-го ун-та, 2007. – 24 с.

96 Мироненко, А. В. Повышение долговечности роликподшипниковых узлов в корпусных деталях автомобилей, восстановленных композицией адгезива АН-110 [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10: / Мироненко А. В. – Орел, 2017. – 179 с.

97 Ли, Р. И. Технологии восстановления деталей металлургических машин и оборудования [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ли Р. И., Жильцов А. П.; М-во образования и науки РФ, Липецк. гос. техн. ун-т – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2007. – 315 с.

98 Ли, Р. И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники [Текст]: учеб. пособие для вузов / Р.И. Ли.; М-во образования и науки РФ, Липецк. гос. техн. ун-т – Липецк: Изд-во ЛГТУ, // Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2014. – 379 с.

99 Кибa, М. Р. Устройство для калибрования посадочных отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях [Текст]: Патент на изобретение РФ № 2604238. Заявл. 05.02.2015 / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А., Кибa М. Р. // Оpubл.

10.12.2016. – Бюл. № 34.

100 Гладышев, Г. П. Стабилизация термостойких полимеров / Г. П. Гладышев, Ю. А. Ершов, О. А. Шустова. – Москва : Химия, 1979. – 272 с.

101 Фойгт, И. Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла : пер. с нем. / И. Фойгт. – Ленинград : Химия, 1972. – 544 с.

102 Брык, М. Т. Деструкция наполненных полимеров / М. Т. Брык. – Москва : Химия, 1989. – 192 с.

103 Пиотровский, К. Б. Старение и стабилизация синтетических каучуков и вулканизатов / К. Б. Пиотровский, З. Н. Тарасова. – Москва : Химия, 1980. – 264 с.

104 Львов, Ю. А. Влияние металлов переменной валентности на стабильность бутадиен-нитрильного каучука в условиях термоокисления / Ю. А. Львов, К. Б. Пиотровский, Т. А. Авдеевич // Каучук и резина. – 1972. – № 9. – С. 18–22.

105 Kablov, V. F. Low Flammability Polymeric Materials / V. F. Kablov, A. N. Gaidadin, I. P. Petryuk. – New York : Nova Science. – 1999. – 281 p.

106 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.

107 Kozlov G V, Yanovskii Yu G, Zaikov G E, in Polymer Yearbook-2011. Polymers, Composites and Nanocomposites (Eds G Zaikov, C Sirghie, R Kozlowski) (New York: Nova Science Publ., 2011) p. 218.

108 Корнеев Ю В и др. Каучук и резина (6) 18 (2008).

109 Козлов Г.В. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокомпозигов. Успехи физических наук. – 2015 – т. 185. – №1. – С. 35-64.

110 Натансон, Э. М. Металлополимеры / Э. М. Натансон, М. Т. Брык // Успехи химии. – 1972. – Т. 41. – № 8. – С. 1465-1493.

111 Долгополова, К. И. Применение высокодисперсных порошков металлов в резиновых смесях / К. И. Долгополова, Г. А. Блох, В. М. Чегорян [и др.] // Известия вузов, серия химическая. – 1968. – № 5. – С. 604–608.

112 Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. – 304 с.

- 113 Беляев, Н.М. Сопротивление материалов [Текст]: - М.: Наука, 1976. - 607 с.
- 114 <http://p-km.ru>
- 115 Воюцкий С.С., Раевский В.Г., Ягнатинская С.М. В кн.: Успехи коллоидной химии. М.: Наука, 1977. С. 330-347.
- 116 Halpin J., J. Appl. Phys. 1964. v. 35, p. 3133-3142.
- 117 Усиление эластомеров. Под ред. Дж. Крауса. М.: Химия. 1968. – 483 с.
- 118 Промышленные полимерные композиционные материалы. Под ред. М. Ричардсона. Пер. с англ. / Под ред. П. Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
119. Новаков, И.А. Использование металлических частиц различной дисперсности в эластомерных композитах [Текст] / Новаков И.А., Каблов В.Ф., Петрюк И.П., Михайлюк А.Е. // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – Том 7, № 2(62). – С. 90-96.
- 120 Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
- 121 R. I. Li, F. A. Kirsanov, M. R. Kiba. Technology and Equipment for High-Precision Polymer Restoration of Fitment Holes in Automotive Housing Parts. . ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2016, Vol. 9, No. 3, pp. 312-316.
- 122 Ли, Р. И. Полимерные композиционные материалы для фиксации подшипников качения в узлах машин [Текст]: монография / Р.И. Ли. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. – 224 с.
- 123 Кирсанов, Ф. А. Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях трансмиссии сельскохозяйственной техники эластомером Ф-40С [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Кирсанов Ф. А. – Мичуринск, 2015. – 181 с.
- 124 <http://instplast.ru/>
- 125 www.nanotc.ru
- 126 R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 128-132.
- 127 ГОСТ 12423-66. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образ-

- цов (проб) [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 6 с.
- 128 Аскадский, А. А. Деформация полимеров [Текст] / Аскадский А.А.; - М.:Химия, 1973. – 448 с.
- 129 Основы научных исследований [Текст] : Учеб. пособие / Р.И. Ли // Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2013. – 190 с.
- 130 ГОСТ 9550-81. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе (проб) [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 7 с.
- 131 ГОСТ 21981-76. Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании (проб) [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
- 132 Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Под ред. А. В. Лыкова – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
- 133 ГОСТ 859-2014. Медь. Марки [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 8 с.
- 134 Михеев, В. А. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями / Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 571–575.
- 135 ГОСТ 9.407-84. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 8 с.
- 136 Ли, Р.И. Теоретические аспекты выбора металлических наноразмерных наполнителей для композиции эластомера Ф-40 [Текст] / Р.И. Ли, Д. Н. Псарев, М.Р. Киба // Клеи. Герметики, Технологии. 2018. № 8. С. 38-43.
- 137 Ли, Р.И. Перспективный нанокompозит на основе эластомера Ф-40 для восстановления корпусных деталей машин [Текст] / Р.И. Ли, Д. Н. Псарев, М.Р. Киба // Клеи. Герметики, Технологии. 2018. № 10. С. 40-44.
- 138 Сергеев, И. В. Экономика предприятия [Текст]/ Сергеев И. В.; – М.: Финансы и статистика, 2000. – 297 с.
- 139 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. – 47с.
- 140 Кравченко, И. Н. Технико – экономическое обоснование инженерных решений по эксплуатации и ремонту машин [Текст] / Кравченко И. Н., Шилина Н. В., Попо-

ва Л. Н., Карцев С. В., Пучин Е. А., Карев А. М.; - МИздательство УМЦ «Триада»,
2006. – 144с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А
(справочное)



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 604 238** (13) **C2**

(51) МПК

B23P 6/00 (2006.01)*B29C* 73/02 (2006.01)*B29C* 41/30 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2015103846/05, 05.02.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
05.02.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.02.2015

(43) Дата публикации заявки: 27.08.2016 Бюл. № 24

(45) Опубликовано: 10.12.2016 Бюл. № 34

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 1632722 A1, 07.03.1991. RU 2360777
C1, 10.07.2009. SU 1712118 A1, 15.02.1992. RU
2010118282 A, 10.11.2011. RU 2521569 C2,
27.06.2014. US 5077882 A, 07.01.1992. US 5201445
A, 13.04.1993.

Адрес для переписки:

398600, г. Липецк, ул. Московская, 30, НИИ
ЛГТУ

(72) Автор(ы):

Ли Роман Иннакентьевич (RU),
Кирсанов Филипп Александрович (RU),
Киба Мария Романовна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Липецкий
государственный технический университет"
(ЛГТУ) (RU)(54) **УСТРОЙСТВО ДЛЯ КАЛИБРОВАНИЯ ПОСАДОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ С ПОЛИМЕРНЫМ
ПОКРЫТИЕМ В КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЯХ**

(57) Формула изобретения

1. Устройство для калибрования посадочных отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях, включающее базирующую деталь и калибр, отличающееся тем, что базирующая деталь выполнена в виде трехступенчатой оси, а калибр - в виде режущей кромки и примыкающего к ней цилиндра с тремя отверстиями.

2. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что ступень максимального диаметра базирующей детали имеет цилиндрическую форму и является опорной, ступень среднего диаметра имеет цилиндрическую форму и поверхность служит для базирования по не изношенной поверхности отверстия сопрягаемой детали, ступень минимального диаметра - хвостовик имеет цилиндрическую форму и является направляющей для калибра.

3. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что наружная часть режущей кромки калибра выполнена конической и является задней поверхностью цилиндрического резца с оптимальным задним углом, примыкающая к ней боковая наружная поверхность калибра имеет цилиндрическую форму постоянного диаметра, внутренняя поверхность режущей кромки выполнена конической и является передней поверхностью цилиндрического резца с оптимальным передним углом, отверстие среднего диаметра имеет цилиндрическую форму и служит для базирования и перемещения по поверхности

RU 2 6 0 4 2 3 8 C 2

Приложение Б
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2635152

**КЛЕЙ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ МЕТАЛЛА, СТЕКЛА, ПЛАСТМАСС И КЕРАМИКИ**

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

Авторы: *Ли Роман Иннакентьевич (RU), Мироненко Александр Вячеславович (RU), Киба Мария Романовна (RU), Сафонов Владимир Николаевич (RU), Гончаров Евгений Юрьевич (RU), Сериков Владислав Вячеславович (RU)*

Заявка № 2016126802

Приоритет изобретения 04 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 09 ноября 2017 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 04 июля 2036 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Иалиев Г.П. Иалиев



Приложение В
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2678063

Композиция для склеивания металлических изделий

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

Авторы: *Ли Роман Иннакентьевич (RU), Псарев Дмитрий Николаевич (RU), Киба Мария Романовна (RU), Малюгин Владимир Андреевич (RU), Быконя Андрей Николаевич (RU)*

Заявка № 2018100453

Приоритет изобретения 09 января 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 22 января 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 января 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Приложение Г
(справочное)

Таблица Г.1 – Технические характеристики весов лабораторных
M-ER 122ACF-3000.05 LCD

№ п/п	Параметр	Размерность	Значение
1	Наибольший предел взвешивания	кг	3
2	Цена деления	г	0,05
3	Тип индикатора		Жидкокристаллический
4	Размер платформы	мм	180×140
5	Класс точности	–	Высокий (второй)
6	Диапазон рабочих температур	°С	10 ...40
7	Габаритные размеры	мм	210×300×100
8	Масса	кг	250
9	Время работы от аккумулятора	ч	100

Таблица Г.2 – Технические характеристики ультразвуковой ванны
«GRAD 0,5 HOME STYLE»

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

**Продолжение приложения Г
(справочное)**

Таблица Г.3 – Технические характеристики пирометра «Fluke-62»

№ п/п	Параметр	Размерность	Значение
1	Диапазон температур	$^{\circ}\text{C}$	от -30 до + 500
2	Точность измерения	$^{\circ}\text{C}$	от 10 до 30 $^{\circ}\text{C}$: $\pm 1^{\circ}\text{C}$
3	Быстродействие	мсек	<500
4	Спектр измерения	мкм	6,5 -18 детектор термоэлемента
5	Коэффициент излучения		0,95
6	Оптическое разрешение		10:1
7	Повторность	% или $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5\%$ от сканируемого или $\leq \pm 1^{\circ}\text{C}$ от максимального
8	Температура окружающей среды	$^{\circ}\text{C}$	от 0 до 50
9	Относительная влажность	%	10-90 , без образования конденсата
10	Температура хранения	$^{\circ}\text{C}$	От -20 до 65 без батареек
11	Масса / Размеры (с батареек)	г/мм	200 / 152x102x38
12	Мощность	В	9
13	Удерживание информации на дисплее	сек	7
14	Стандарты	Соответствует EN 61326-1 Электромагнитное выделение и восприимчивость, EN 61010-1 Общая безопасность, EN 60825-1 Лазерная безопасность	
15	Лазерный целеуказатель		Одна точка
16	Лазер	FDA и IEC Class 2	
17	Сертификат	CE	

Приложение Д
(рекомендуемое)

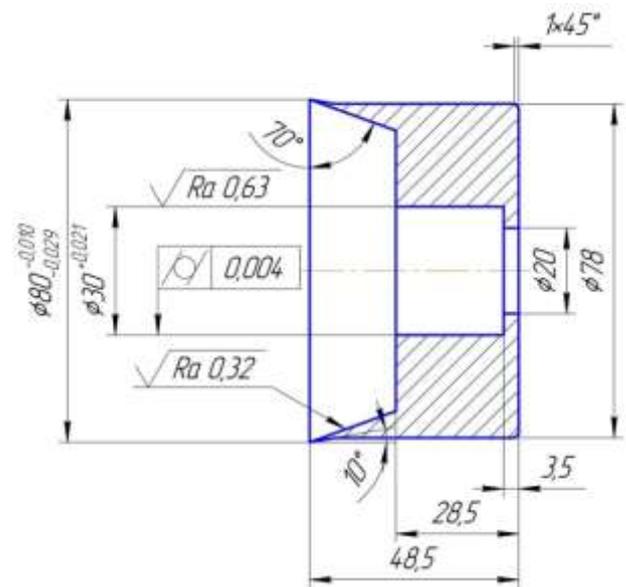
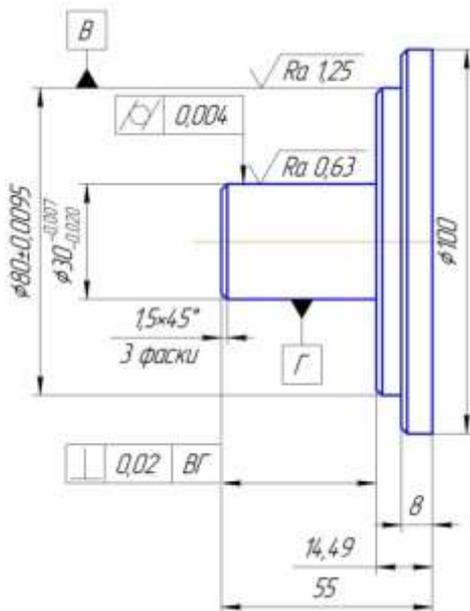
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях нанокompозитом на основе эластомера Ф-40

№ 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 0,25 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.
4	Приготовить нанокompозит на основе эластомера Ф-40	Лак Ф-40 (ТУ 6-06-246-92), нанопорошок алюминия (ТУ 1791-003-36280340-2008), нанопорошок меди (ТУ 1791-003-36280340-2008), весы ВК 3000.1	Состав нанокompозита: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., нанопорошок алюминия – 1,9 масс. ч., нанопорошок меди – 1,7 масс. ч.
5	Провести ультразвуковое диспергирование (УЗД) раствора нанокompозита	Ультразвуковая ванна «GRAD 0,5 HOME STYLE»	Время обработки t = 4 мин. Мощность УЗД, W = 55 Вт. Уровень раствора в ванне h ≤ 14 мм.
6	Нанести послойно покрытие из нанокompозита на посадочные отверстия в корпусной детали	Кисть волосяная №4...5, раствор нанокompозита на основе эластомера Ф-40	Каждый слой сушить 5...10 минут
6	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 3,0 ч
7	Калибровать отверстия с полимерным покрытием	Технологическая оснастка для калибрования	-
8	Провести контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали	Лупа 8-10 кратного увеличения	Визуальный осмотр

Продолжение приложения Д
(рекомендуемое)

Устройство для калибровки отверстий с покрытием из нанокompозита
эластомера Ф-40 в корпусе КП ГАЗ-53А



Приложение Е (справочное)



А К Т

на проведение производственных испытаний

10 марта 2015 г.

с. Слободка, Лебедянский район Липецкая область

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

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

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

Гл. инженер

Жигалев И.И.

Зав. ЦРМ

Поляков А.В.

Д. т. н., профессор

Ли Р.И.

Аспирант

Колесников А.А.

Аспирант

Киба М.Р.

Приложение Ж (справочное)



АКТ эксплуатационных испытаний

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

Таблица – Опытные агрегаты трансмиссии с восстановленными отверстиями под подшипники качения

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

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

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

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

Гл. инженер

Жигалев И.И.

Зав. ЦРМ

Поляков А.В.

Д. т. н., профессор

Ли Р.И.

Аспирант

Колесников А.А.

Аспирант

Киба М.Р.

Приложение 3 (справочное)



Акт внедрения (реализации) результатов НИР

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

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

Экономия материальных ресурсов: экономия запасных частей.

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

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

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

Гл. инженер

Жигалев И.И.

Зав. ЦРМ

Поляков А.В.

Д. т. н., профессор

Ли Р.И.

Аспирант

Колесников А.А.

Аспирант

Киба М.Р.