

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

На правах рукописи

ПСАРЕВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДОК
ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В УЗЛАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ТЕХНИКИ ПОЛИМЕРНЫМИ НАНОКОМПОЗИТАМИ

Специальность 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Мичуринск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	9
1 Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований.....	21
1.1 Способы восстановления посадок подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники.....	21
1.2 Современные полимерные композиты для восстановления посадок подшипников качения.....	28
1.2.1 Полимерные композиты для восстановления посадок подшипников качения.....	28
1.2.2 Расчет механических и теплофизических свойств полимерных композитов.....	40
1.2.3 Наноразмерные частицы для наполнения полимерных материалов.....	43
1.3 Контактные напряжения и долговечность подшипниковых узлов, с посадками восстановленными полимерными материалами.....	64
1.4 Технологическое обеспечение восстановления посадок подшипников качения полимерными композитами.....	82
1.4.1 Ультразвуковое диспергирование полимерных композитов.....	83
1.4.2 Способы термической обработки полимерных покрытий.....	98
1.4.3 Обеспечение точности размеров отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях и соосности при сборке деталей клеевых соединений «вал-подшипник».....	101
1.5 Выводы. Цель и задачи исследований.....	109
2 Методика экспериментальных исследований.....	114
2.1 Общая методика исследований.....	114
2.2 Методика исследования деформационно-прочностных свойств пленок эластомеров и нанокомпозитов на их основе.....	116
2.3 Методика исследования деформационно-прочностных свойств	

клеевых соединений выполненных герметиком АН-111 и нанокompозитом на его основе.....	122
2.4 Методика исследования термостойкости эластомеров Ф-40, Ф-40С и нанокompозитов на их основе.....	125
2.5 Методика исследования теплостойкости эластомеров Ф-40, Ф-40С и нанокompозитов на их основе.....	127
2.6 Методика исследования теплопроводности эластомеров Ф-40, Ф-40С и нанокompозитов на их основе.....	130
2.7 Методика исследования физических свойств растворов эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе.....	131
2.8 Методика исследования режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования растворов эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе.....	135
2.9 Методика исследования дегазации растворов нанокompозитов на основе эластомера Ф-40С при ультразвуковой обработке.....	137
2.10 Методика исследования структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после УЗО.....	139
2.11 Методика исследования эффективности смешения и диспергирования раствора нанокompозита на основе анаэробного герметика Ана-терм 111 механизированным способом.....	139
2.12 Методика исследования параметров инфракрасного нагрева корпусных деталей с полимерными покрытиями.....	140
2.13 Методика исследования усилия резания при калибровании эластомерных нанокompозитных покрытий.....	140
2.14 Методика исследования повреждаемости и точностных характеристик эластомерных нанокompозитных покрытий после ультразвукового диспергирования, инфракрасной обработки и калибрования.....	145
2.15 Методика исследования коэффициента Кирхгофа, коэффициента податливости покрытий из эластомера Ф-40С и нанокompозитов на	

его основе.....	146
2.16 Методика исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения с посадками восстановленными эластомерными нанокompозитами.....	147
2.17 Методика исследования долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных эластомерными нанокompозитами.....	150
3 Научные основы формирования эксплуатационных свойств полимерных нанокompозитов для восстановления посадочных мест подшипников качения в узлах техники.....	152
3.1 Теплофизические свойства полимерных нанокompозитов, наполненных дисперсными металлическими наночастицами.....	152
3.1.1 Термостойкость эластомерных нанокompозитов.....	152
3.1.2 Теплостойкость эластомерных нанокompозитов.....	158
3.1.3 Теплопроводность полимерных нанокompозитов.....	160
3.2 Фрактальный анализ и деформационно-прочностные свойства полимерных нанокompозитов.....	174
3.2.1 Увеличение модуля упругости полимерных нанокompозитов, наполненных дисперсными наночастицами.....	174
3.2.2 Фрактальный анализ поверхности наночастиц и структуры полимерных нанокompозитов.....	180
3.2.3 Исследование текучести эластомерных нанокompозитов с использованием фрактального анализа.....	203
3.2.4 Прочность полимерных нанокompозитов.....	209
3.2.5 Деформация и выносливость полимерных нанокompозитов.....	236
3.3 Регрессионные модели деформационно-прочностных свойств полимерных нанокompозитов.....	251
3.3.1 Оптимизация режима термической обработки эластомера Ф-40С наполненного алюминиевыми наночастицами.....	252

3.3.2 Оптимизация состава эластомерного нанокompозита Ф-40С наполненного алюминиевыми и медными наночастицами.....	258
4 Технологическое обеспечение восстановления посадочных мест подшипников качения полимерными нанокompозитами.....	260
4.1 Диспергирование растворов полимерных нанокompозитов.....	260
4.1.1 Диспергирование растворов эластомерных нанокompозитов ульт- развуковой обработкой.....	260
4.1.1.1 Исследование физических свойств растворов эластомерных нанокompозитов.....	263
4.1.1.2 Исследование режимных и оценочных параметров ультразву- кового диспергирования растворов эластомерных нанокompозитов.....	268
4.1.1.3 Критерий эрозионной активности УЗО растворов эластомер- ных нанокompозитов χ при изменении гидростатического давления и постоянной мощности озвучивания.....	271
4.1.1.4 Дегазация растворов эластомерных нанокompозитов при ультразвуковой обработке и ручном механическом смешении.....	273
4.1.1.5 Изменение остаточной массы растворов эластомерных нано- композитов при УЗО и ручном механическом смешении.....	276
4.1.1.6 Качество покрытий из эластомерных нанокompозитов после УЗО.....	279
4.1.1.7 Исследование структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после УЗО.....	282
4.1.2 Исследование эффективности смешения и диспергирования рас- твора нанокompозита на основе анаэробного герметика Анатерм 111 механизированным способом.....	292
4.2 Математические модели инфракрасного нагрева корпусных дета- лей с полимерными покрытиями.....	294
4.2.1 Математическая модель инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей.....	294

4.2.2 Математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей трансмиссии автотракторной техники.....	310
4.3 Обеспечение точностных характеристик отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях.....	319
4.3.1 Изменение усилия резания покрытий эластомерных нанокompозитов при различных передних углах режущей кромки калибра-резца.....	319
4.3.2 Исследование повреждаемости и точностных характеристик покрытий эластомерных нанокompозитов после калибрования.....	324
4.4 Расчет точностных характеристик центрирующих приспособлений для клеевых соединений типа «вал-подшипник».....	331
4.5 Исследование трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения с посадками восстановленными нанокompозитом эластомера Ф-40С.....	336
4.5.1 Исследование коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С.....	336
4.5.2 Исследование контактных напряжений и долговечности подшипников качения с посадками восстановленными нанокompозитом эластомера Ф-40С.....	339
4.6 Исследование долговечности посадок, восстановленных полимерными нанокompозитами.....	351
5 Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка.....	358
5.1 Технологические рекомендации.....	358
5.2 Расчет экономической эффективности технологий восстановления корпусных деталей нанокompозитами на основе эластомера Ф-40С и АН-111 в ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александро-Невского района Рязанской области, ООО «Сосновка-Зернопродукт» Мичуринского района Тамбовской области и ФГБУ	

«ОС «Мичуринская» Мичуринского района Тамбовской области.....	360
Заключение.....	363
Список литературы.....	369
Приложения	408
Приложение А. Способы восстановления подшипниковых отверстий в корпусных деталях полимерными материалами.....	409
Приложение Б. Устройство и принцип работы установки для исследования теплопроводности полимерных материалов.....	414
Приложение В. Описание и принцип работы электронного микроскопа «Quanta 600 FEG».....	416
Приложение Г. Принцип работы стенда для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения.....	419
Приложение Д. Устройство и принцип работы стенда для испытаний подшипниковых узлов при циклическом нагружении.....	423
Приложение Е. Регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С от концентрации наполнителей.....	424
Приложение Ж. Обоснование выбора методики расчета точностных характеристик центрирующего приспособления. Центрирующее приспособление для сборки деталей клеевого соединения правой опоры ведомого вала с подшипником 50412 коробки передач КАМАЗ-4310. Центрирующее приспособление для сборки клеевого соединения промежуточного вала с подшипником 12213 коробки передач КАМАЗ-4310.....	434
Приложение З. Технологическая карта восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С.....	455
Приложение И. Технологическая карта восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях нанокompозитом на основе герметика	

АН-111.....	456
Приложение К. Акт на проведение производственных испытаний, акт эксплуатационных испытаний, акт внедрения (реализации) результатов НИР в ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО».....	457
Приложение Л. Акт на проведение производственных испытаний, акт эксплуатационных испытаний, акт внедрения (реализации) результатов НИР в ООО «Сосновка-Зернопродукт».....	460
Приложение М. Акт на проведение производственных испытаний, акт эксплуатационных испытаний, акт внедрения (реализации) результатов НИР в ФГБУ «ОС «Мичуринская».....	463
Приложение Н. Акт внедрения (реализации) результатов НИР в ООО «Липецкий механический завод».....	466
Приложение О. Акт внедрения (реализации) результатов НИР в АО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий».....	467
Приложение П. Акт внедрения (реализации) результатов НИР в ООО «ИНОКС РЕМ».....	468
Приложение Р. Расчет себестоимости восстановления изношенной поверхности отверстия нанокompозитом эластомера Ф-40С.....	469
Приложение С. Патент №2678063 «Композиция для склеивания металлических изделий».....	475
Приложение Т. Патент №2719624 «Стенд для испытания подшипников качения на долговечность».....	476
Приложение У. Патент №2751339 «Способ восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях покрытием из раствора полимерного материала».....	477
Приложение Ф. Патент №2757271 «Композиция для покрытия металлических изделий».....	478

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность предприятий агропромышленного комплекса Российской Федерации существенным образом характеризуется не только качеством, но и ценой выпускаемой продукции. Себестоимость сельскохозяйственной продукции включает существенную долю затрат, которая приходится на поддержание сельскохозяйственной техники и технологического оборудования в работоспособном состоянии.

Затраты на ремонт машин и оборудования можно существенно снизить за счет восстановления изношенных деталей, повышая при этом надежность техники. При восстановлении расходуется в «20-30 раз меньше металла, в сравнении с изготовлением новых деталей. За счет исключения металлургического цикла производства в ходе восстановления 1 т стальных деталей потребляется до 0,8 т угля, менее 180 кВт/ч электроэнергии, 0,5 т известняка, 175 м³ природного газа [1].» [2]

Объемы восстановления деталей из года в год увеличиваются во всем мире. Большой объем деталей восстанавливается в Северной Америке и Европе. Восстановление изношенных деталей наложено в США с 1940 г., в Англии с 1945 г., в Германии с 1947 г. По данным ГОСНИТИ, в настоящее время в США и Японии из общего потребления запасных частей на восстановленные детали приходится 35-40%. Для сравнения, доля восстановленных деталей в расходе запасных частей в СССР 1986 г. достигала 19,5%, а в современной России составляет лишь 8...9% [3, 4].

Российская Федерация развивается в настоящее время в условиях санкций стран ЕС, США и других стран. С учетом того, что значительная доля сельскохозяйственной техники, а также технологическое оборудование перерабатывающих предприятий импортного производства, вопрос ее ремонта приобретает особую актуальность.

К достижениям отечественных ученых следует отнести разработку перспективных технологий эффективно устраняющих износ и увеличивающих при этом долговечность деталей [3..32].

Подшипники качения относятся к типовым, наиболее многочисленным деталям в конструкции сельскохозяйственной техники. В этой связи долговечность подшипников существенным образом влияет на ее надежность. Основной из причин отказа подшипниковых узлов является износ из-за фреттинг-коррозии посадочных мест подшипников качения [33...48].

«Для восстановления посадочных мест подшипников используют большое количество способов восстановления: установку дополнительной детали, электродуговую и газовую наплавку, различные способы металлизации, гальванические покрытия (осталивание и железнение), электроконтактную приварку стальной ленты и др.» [49] К общим недостаткам этих способов следует отнести: сложное технологическое оборудование, требуется персонал высокой квалификации, необходима механическая обработка деталей до и после наращивания, высокие потребление электроэнергии и затраты, низкая фреттингостойкость посадочных мест после восстановления [4, 25, 50].

Способы восстановления посадок подшипников качения полимерными материалами отличаются простотой технологии, не требуют высокой квалификации персонала, не потребляют большого количества электроэнергии и имеют низкую себестоимость восстановления. Наличие упругого полимерного слоя исключает фреттинг-коррозию посадочных мест, понижает контактные напряжения и многократно увеличивает ресурс подшипниковых узлов [10, 14...18].

Государственной программой Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации», утвержденной правительством Российской Федерации от 29 марта 2019 года №377 (с изменениями на 22 октября 2021 года), предусмотрена система приоритетов в которой к магистральным направлениям развития относятся:... технологии производства и использования новых материалов и веществ, включая редкие и редкоземельные материалы, полимерные композитные материалы, аддитивные технологии [51, 52].

«Исследования и разработка полимерных композитов является основным направлением в повышении эффективности восстановления посадок подшипников в узлах сельскохозяйственной техники.» [53] После наполнения полимерной

матрицы частицами наполнителей значительно улучшаются потребительские свойства и снижается цена материала [10, 14...16]. В настоящее время особое внимание уделяется исследованиям и последующей разработке новых полимерных нанокомпозитов. Потребителю отечественными товаропроизводителями предлагается большая номенклатура наночастиц различной формы и материалов. Это создает благоприятные условия для исследования и разработки новых перспективных полимерных нанокомпозитов, высокоэффективных технологий и технических средств для восстановления посадок подшипников качения.

Степень разработанности темы. Решению вопросов и проблем технологии ремонта техники и восстановления изношенных деталей посвящены «труды Ачкасова К.А., Агеева Е.В., Батищева А.Н., Бугаева В.А., Голубева И.Г., Ерохина М.Н., Жачкина С.Ю., Карагодина В.И., Лялякина В.П., Новикова А.Н., Пучина Е.А., Тельнова Н.Ф., Черноиванова В.И. и многих других отечественных ученых.» [54]

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., Зорина В.А., Котина А.В., Кононенко А.С., Курчаткина В.В., Ли Р.И., Михальченкова А.М., Родионова Ю.В. и многих других отечественных ученых.» [54]

Анализ литературных источников показал, что «в настоящее время посадки подшипников качения восстанавливают анаэробными герметиками, акриловыми адгезивами, эластомерами и композитами на их основе.» [2] Для наполнения композитов используют микроразмерные частицы органического и неорганического происхождения [55...60].

Перспективным направлением в повышении эффективности полимерных композитов является использование наночастиц в качестве наполнителей. Наноразмерные наполнители значительно повышают механические и теплофизические свойства материала. Необходимо теоретическое обоснование выбора наночастиц, обеспечивающее улучшение механических и теплофизических свойств новых, перспективных нано-композитов на основе реактопластов и эластомеров.

«Ультразвуковая обработка (УЗО) полимерных композитов является перспективным способом смешения и диспергирования компонентов, однако вопрос влияния режимных параметров УЗО на качество диспергирующего смешения растворов эластомерных нанокомпозитов исследован не в полной мере и требует дальнейшего развития.» [61] Ультразвуковое диспергирование анаэробных нанокомпозитов экономически нецелесообразно из-за относительно высокой цены анаэробных герметиков и больших потерь раствора нанокомпозита при диспергировании. Механизированное диспергирование не требует сложного технологического оборудования и потери раствора нанокомпозита, в сравнении с ультразвуковым диспергированием, минимальные. Необходимы экспериментальные исследования, которые позволят обосновать рациональные режимные, технологические параметры ультразвуковой обработки растворов эластомерных нанокомпозитов и механизированного смешения анаэробных нанокомпозитов, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения компонентов.

Проведенный анализ литературных источников выявил отсутствие информации об обработке терморационным способом отверстий с нанесенными полимерными покрытиями при восстановлении корпусных деталей сельскохозяйственной техники. Математическое моделирование инфракрасного нагрева корпусных деталей позволит разработать метод и программное обеспечение расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки. Термическая обработка инфракрасным нагревом «позволит повысить качество полимерных покрытий и существенно снизить энергозатраты при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники.» [61]

«Точностные характеристики отверстий с полимерным покрытием в восстановленных корпусных деталях в значительной мере зависят от усадки полимерного материала после отверждения.» [2] Профессор Ли Р.И. и сотрудники ЛГТУ разработали способ калибрования отверстий с полимерным покрытием, исключая влияние усадки [62], однако отсутствуют рекомендации по калиброванию покрытий из эластомерных нанокомпозитов.

Работоспособность клеевого соединения «вал-подшипник» существенным образом зависит от соосности сопрягаемых деталей. Для центрирования сопрягаемых деталей и обеспечения соосности при склеивании необходимо использовать центрирующие приспособления. Перечень деталей типа «вал» в узлах сельскохозяйственной техники отличается большим разнообразием по номенклатуре, конфигурации и типоразмерам. Для эффективного восстановления посадок подшипников этих деталей адгезивами необходимо разработать метод расчета точностных характеристик деталей центрирующих приспособлений, что позволит оперативно и с достаточной точностью их определять для изготовления.

Наличие полимерного слоя в сопряжении «вал-подшипник» или «корпус-подшипник» снижает контактные напряжения при нагружении подшипников и повышает многократно ресурс подшипниковых узлов [63]. Необходимы исследования трибологических параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадками, восстановленными полимерными нанокompозитами, а также выносливости при циклическом нагружении посадок из полимерных нанокompозитов.

Исследование вышеописанных научных вопросов позволит комплексно, системно решить научную проблему: исследование и разработка полимерных нанокompозитов, способов и технических средств их обработки.

Решение данной научной проблемы позволит разработать технологические основы, обеспечивающие улучшение эксплуатационных свойств полимерных нанокompозитов, повышение качества восстановления посадок и увеличение ресурса подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники.

Настоящая работа посвящена повышению эффективности восстановления посадок подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники нанокompозитами на основе эластомеров и реактопластов за счет улучшения теплофизических и механических свойств, уменьшения дефектности нанокompозитов, снижения контактных напряжений и увеличения ресурса подшипников с полимерными посадками, которые обеспечиваются путем исследования, разработки и использо-

вания новых полимерных нанокомпозитов, перспективных способов и технических средств их обработки.

Научную новизну диссертации составляют:

- методология исследования и выбора, на основе фрактального анализа, наночастиц наполнителей, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов;

- результаты экспериментальных исследований теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов, регрессионные модели зависимости удельной работы разрушения от состава и режима термической обработки эластомерных нанокомпозитов;

- результаты экспериментальных исследований ультразвукового диспергирования и дегазации растворов эластомерных нанокомпозитов, дефектности и структуры полимерных покрытий после УЗО, рациональные режимы УЗО нанокомпозитов и механизированного диспергирования анаэробного нанокомпозита;

- математические модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и корпусных деталей автотракторной техники, методы и компьютерные программы расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях, дефектность эластомерных нанокомпозитных покрытий после термической обработки конвективным и терморadiационным способами;

- экспериментальные зависимости усилия резания покрытий эластомерных нанокомпозитов от переднего угла режущей кромки калибра, рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра, качество и точностные характеристики покрытий эластомерных нанокомпозитов;

- метод расчета точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник»;

- результаты экспериментальных исследований податливости опор на полимерных посадках, трибологические параметры, контактные напряжения и долговечность подшипников с посадками из полимерных нанокомпозитов;

- результаты экспериментальных исследований долговечности посадок подшипников при циклическом радиальном нагружении, восстановленных полимерными нанокомпозитами.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методологии исследования и выбора наночастиц наполнителей для полимерных материалов, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов; математических моделей инфракрасного нагрева корпусных деталей техники, методах расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях; методе расчета точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал- подшипник».

Практическая ценность заключается в новых нанокомпозитах на основе эластомеров Ф-40, Ф-40С и герметика АН-111, компьютерных программах расчета конструктивных и технологических параметров установок инфракрасного нагрева, технологиях восстановления с использованием ультразвукового и механизированного диспергирования растворов нанокомпозитов, технологической оснастке в виде калибрующего инструмента и центрирующих приспособлений.

Объект исследований. Пленки и полимерные покрытия, подшипники качения, посадки «вал-подшипник» и «корпус-подшипник», восстановленные нанокомпозитами на основе эластомеров Ф-40, Ф-40С и анаэробного герметика АН-111.

Предмет исследования. Деформационно-прочностные, адгезионные и теплофизические свойства нанокомпозитов на основе эластомеров Ф-40, Ф-40С и анаэробного герметика АН-111, режимы УЗО растворов эластомерных нанокомпозитов и механизированного диспергирования анаэробного нанокомпозита, параметры инфракрасного нагрева корпусных деталей техники, зависимости усилия резания, повреждаемости и отклонений размеров эластомерных нанокомпозитных покрытий от геометрических параметров режущей кромки калибра, трибологические параметры, контактные напряжения и долговечность подшипников с посад-

ками из полимерных нанокомпозитов; долговечность посадок подшипников при циклическом нагружении, восстановленных полимерными нанокомпозитами.

Методология и методы исследования. Методологическая, теоретическая и эмпирическая базы исследований представлены теоретическими исследованиями на основе теории перколяции и фрактального анализа структуры полимерных нанокомпозитов, теории тепло- и массообмена, регрессионным и дисперсионным анализом, экспериментальными исследованиями механических и теплофизических свойств полимерных нанокомпозитов, их ультразвуковой, механизированной и инфракрасной обработки, обработки резанием эластомерных покрытий, исследованием трибологических параметров и ресурса подшипников с посадками из полимерных нанокомпозитов, долговечности посадок подшипников при циклическом нагружении, восстановленных полимерными нанокомпозитами.

В диссертации разработаны два эластомерных и один анаэробный нанокомпозиты оригинального состава, технологии их применения, технологическое оборудование и оснастка для восстановления посадок «вал-подшипник», «корпус-подшипник» в подшипниковых узлах сельскохозяйственной техники. Технологии восстановления внедрены в ЗАО «Агрофирма «Русь» с. Слободка Лебедянского района Липецкой области, ФГБУ «ОС «Мичуринская» Мичуринского района Тамбовской области, ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» п. Каширин, Александро-Невский район, Рязанская область, ООО «Сосновка-Зернопродукт» с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовская область, ООО «Липецкий механический завод» г. Липецк, АО «Центра технологической компетенции аддитивных технологий» г. Воронеж, ООО «ИНОКС РЕМ» г. Воронеж.

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», конкурса Управления и образования Тамбовской об-

ласти «Гранты для поддержки прикладных исследований молодых учёных 2018 года» по теме «Разработка технологии и оборудования для восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники полимерными материалами», РФФИ и Администрации Тамбовской области в рамках научного проекта №17-48-680702/17 по теме «Оценка модифицирующего действия углеродных нанотрубок (УНТ) на физико-механические свойства полимерных композиционных материалов» и планом госбюджетных научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ на 2015-2023 годы по теме №14 «Разработка технологий восстановления и упрочнения деталей с/х. техники и технологического оборудования по переработке и хранению с/х. продукции» на кафедре стандартизации, метрологии и технического сервиса инженерного института.

Материалы диссертационной работы прошли апробацию и обсуждение на:

- научных конференциях сотрудников ФГБОУ ВО Мичуринского ГАУ в 2015...2023 гг.;
- Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные технологии и техника в АПК», ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ (г. Мичуринск), 2016 г.;
- Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвященной 100-летию академика Д.К. Беляева «Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России», ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА (г. Иваново), 2017 г.;
- XIX международной научно-практической конференции, посвященной году экологии в России и 80-летию Тамбовской области «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства», ГНУ ВНИИТИН. (г. Тамбов), 2017 г.;
- XII международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления». ЛГТУ (г. Липецк), 2017 г.;
- Всероссийской научно-методической конференции с международным участием, посвященной 100-летию высшего аграрного образования в Ивановской об-

ласти «Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК», ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА (г. Иваново), 2018 г.;

– Международной научно-практической конференции «Наука сегодня: теория и практика», г. Вологда, 2018 г.;

– I международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте», ЛГТУ (г. Липецк), 2018 г.;

– Международной научно-практической конференции «Технические и технологические основы инновационного развития», г. Саратов, 2019 г.;

– Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития», г. Челябинск, 2019 г.;

– XX международной научно-практической конференции «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для АПК», ФГБНУ ВНИИТИН, (г. Тамбов), 2019 г.;

– Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК», ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ (г. Мичуринск), 2019, 2020 г.;

– Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные подходы к разработке технологий производства, хранения и переработки продукции растениеводческого кластера», ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ (г. Мичуринск), 2020 г.;

– 2-ой Международной конференции по системам управления, математическому моделированию, автоматизации и энергоэффективности, ЛГТУ (г. Липецк), 2020 г.;

– Международной конференции «CAMSTech-2020: Современные достижения в области материаловедения и технологий», г. Красноярск, 2020 г.;

– VI Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Шестакова «Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные

технологии», ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина» (г. Елец), 2020 г.;

– II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ «Современные проблемы материаловедения», Липецкий государственный технический университет (г. Липецк), 2021 г.;

– 3 Международной конференции по системам управления, математическому моделированию, автоматизации и энергоэффективности, ЛГТУ (г. Липецк), 2020 г.;

– Международной конференции по сельскохозяйственной науке и технике, ASAE 2021, ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ (г. Мичуринск), 2021 г.;

– заседании кафедры «Стандартизация, метрология и технический сервис» ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ в 2023 г.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 74 печатных работах, в том числе 17 публикаций в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 21 публикация в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки, и 4 патента на изобретение РФ.

Диссертационная работа содержит: введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Объем работы 478 страниц машинописного текста. Диссертация включает 215 рисунков, 47 таблиц, 20 приложений на 70 страницах и список литературы из 280 наименований.

На защиту выносятся:

- методология исследования и выбора, на основе фрактального анализа, наночастиц наполнителей, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов;

- математические модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и корпусных деталей автотракторной техники, методы и компьютерные программы расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях;

- регрессионные модели зависимости удельной работы разрушения от состава и режима термической обработки эластомерных нанокомпозитов;

- рациональные режимы УЗО растворов эластомерных нанокомпозитов и механизированного диспергирования анаэробного нанокомпозита, теплофизические и механические свойства полимерных нанокомпозитов, дефектность эластомерных нанокомпозитных покрытий после термической обработки конвективным и терморadiационным способами, рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца, качество и точностные характеристики покрытий эластомерных нанокомпозитов;

- метод расчета точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник»;

- результаты экспериментальных исследований трибологических параметров, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадками из полимерных нанокомпозитов, долговечность посадок подшипников при циклическом радиальном нагружении, восстановленных полимерными нанокомпозитами;

- технологии восстановления посадок подшипников качения на деталях типа «вал» и в корпусных деталях полимерными нанокомпозитами и оценка их технико-экономической эффективности.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Способы восстановления посадок подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники

Опоры качения – это один из наиболее часто встречаемых элементов в конструкции сельскохозяйственной техники. По этой причине износ посадочных мест подшипников на валах и в корпусных деталях является одним из наиболее многочисленных дефектов, подлежащих устранению при ремонте техники. На рисунке 1.1 показаны способы восстановления посадок подшипников качения.

Способ восстановления установкой дополнительной детали является наиболее известным и наиболее распространенным при ремонте техники [3, 4]. Посадочное отверстие растачивают для устранения следов износа, восстановления геометрии и запрессовывают в него предварительно изготовленную дополнительную деталь в виде втулки или кольца. В заключении посадочное отверстие под подшипник растачивают под номинальный размер.

Для снижения материалоемкости взамен втулок изготавливают кольца или свертные втулки. Для запрессовки кольца используют специальный кондуктор и комплект сборочных оправок. Для увеличения усилия страгивания, наружную поверхность кольца перед запрессовкой в расточенное отверстие, покрывают адгезивом на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Свертные втулки изготавливают из стальной рулонной ленты. После запрессовки ленту раскатывают [3, 4].

К недостаткам способа следует отнести сложность, высокую материалоемкость и трудоемкость технологии, потребность в сложном металлообрабатывающем оборудовании, снижении прочности корпусных деталей после расточки.

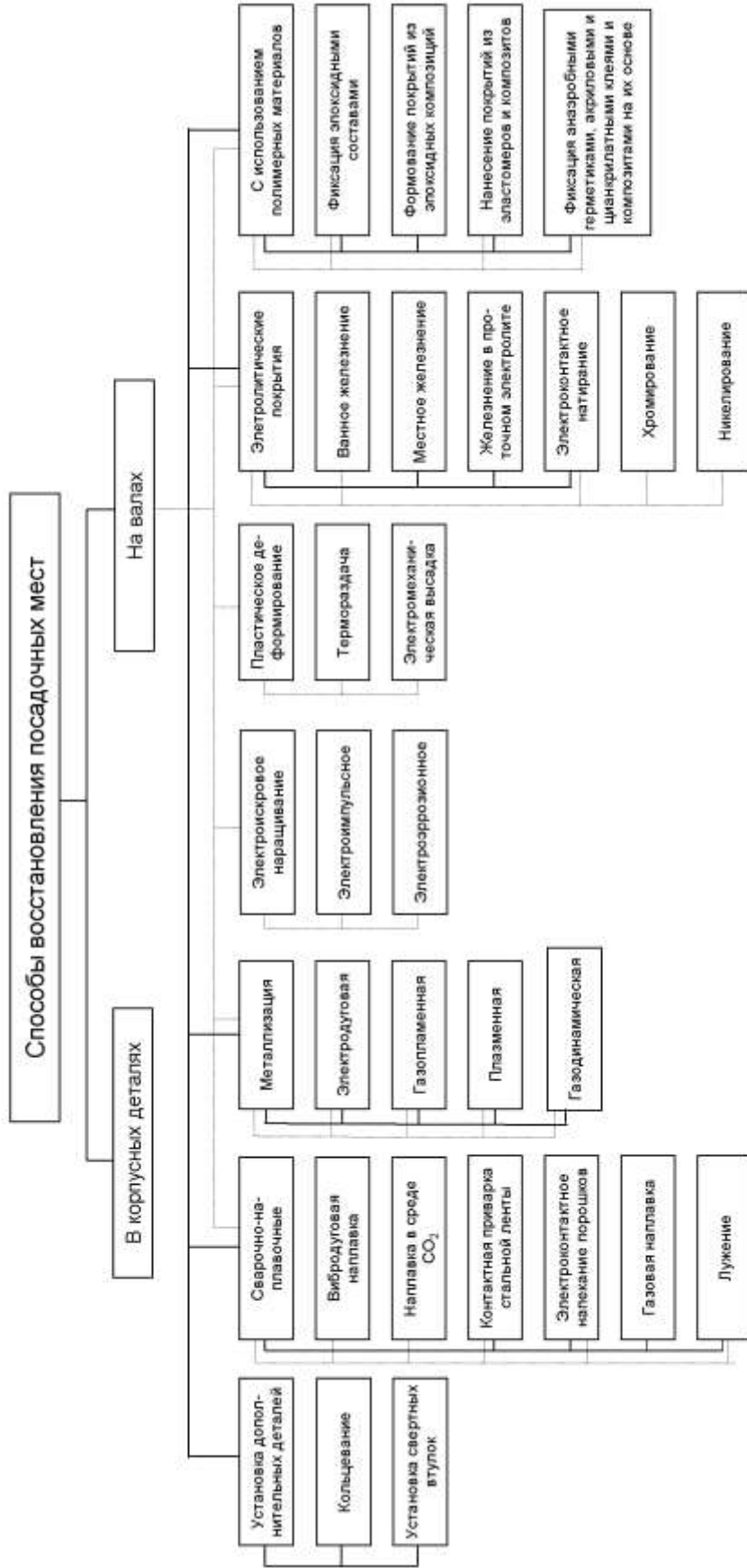


Рисунок 1.1 – Способы восстановления посадок подшипников качения

Сварочно-наплавочные способы отличаются универсальностью применения, позволяют восстанавливать как корпусные, так и детали типа «вал», наносить на них покрытия из различных металлов с заданными механическими свойствами [3, 5, 6, 12, 64].

К недостаткам следует отнести высокотемпературный нагрев, который может привести к изменению структуры металла деталей, их короблению. Наплавочные покрытия могут иметь дефектность в виде пор, раковин и трещин. Значительная доля наплавленного металла удаляется в виде припуска на механическую обработку после наплавки, что повышает себестоимость восстановления [64].

Наиболее предпочтительным из этих способов является электроконтактная приварка стальной ленты [3, 5, 22]. Способ не приводит к изменениям в металле детали (глубина термического воздействия при охлаждении зоны сварки водой составляет не более 2 мм), ее короблению, позволяет исключить механическую обработку ленты после приварки за счет регулирования припуска при предварительной механической обработке. Восстановление способом электроконтактной приварки стальной ленты приводит к снижению расхода металла в 3...4 раза и повышению производительности труда в 2...3 раза, в сравнении с наплавкой [22, 65]. К недостаткам способа следует отнести сложность и высокую энергоемкость технологического оборудования, низкую долговечность медных контактных роликов.

Способы восстановления металлизацией выгодно отличаются простотой и высокой производительностью. Нагрев детали в ходе металлизации не более 100...150 °С, поэтому коробление и изменение структуры металла исключаются [66].

Существенным недостатком является низкая сцепляемость металлизационных покрытий с подложкой, их пористость и хрупкость. В настоящее время активно развиваются способы сверхзвуковой электродуговой и газодинамической металлизации [4, 32].

При газодинамическом способе покрытие формируется благодаря кинетической энергии твердых частиц [20, 26]. Этот способ разработан в 80-х годах прошлого столетия. Суть способа в фиксации твердых частиц, летящих с сверх-

звуковой скоростью, на поверхности подложки после удара с ней. Сцепление частиц с подложкой происходит благодаря их высокой кинетической энергии [20].

Иной механизм частиц порошка с подложкой наблюдается в случае наращивания поверхности детали двухкомпонентным порошком, где первая компонента – это частицы пластичного металла, вторая – частицы керамики.

Благодаря высокой твердости керамические частицы керамики при ударе о подложку действуют на ее поверхность как абразив, очищая ее от окисных пленок и следов коррозии, различных загрязнений органического и не органического происхождения, повышая шероховатость поверхности и активируя ее. При этом часть частиц отскакивает от поверхности, а другая внедряется в нее сцепляясь с подложкой (рисунок 1.2).

В случае удара металлических частиц о поверхность подложки, они пластически деформируются и образуют химические связи в пятне контакта. Керамических частицы, ударяя по внедренным в поверхность подложки частицам металла, дополнительно их деформируют и уплотняют покрытие, что снижает его пористость и увеличивает когезионную прочность. Внедрение следующих металлических частиц формирует последующие слои покрытия. В итоге получается композитное покрытие, состоящее из металлической матрицы и включенных в нее отдельных керамических частиц. При этом пористость покрытий составляет 3...7 %, что значительно меньше пористости покрытий, нанесенных традиционными способами металлизации. К недостаткам способа следует отнести сложность механической обработки после наращивания поверхности детали [20].

Восстановление электроискровым наращиванием можно проводить без предварительной обработки поверхности детали. Нагрев при восстановлении практически отсутствует, а зона термического воздействия несущественна [66]. Наряду с достоинствами следует отметить недостатки: пористость покрытия, наличие в нем раковин, сложность механической обработки.

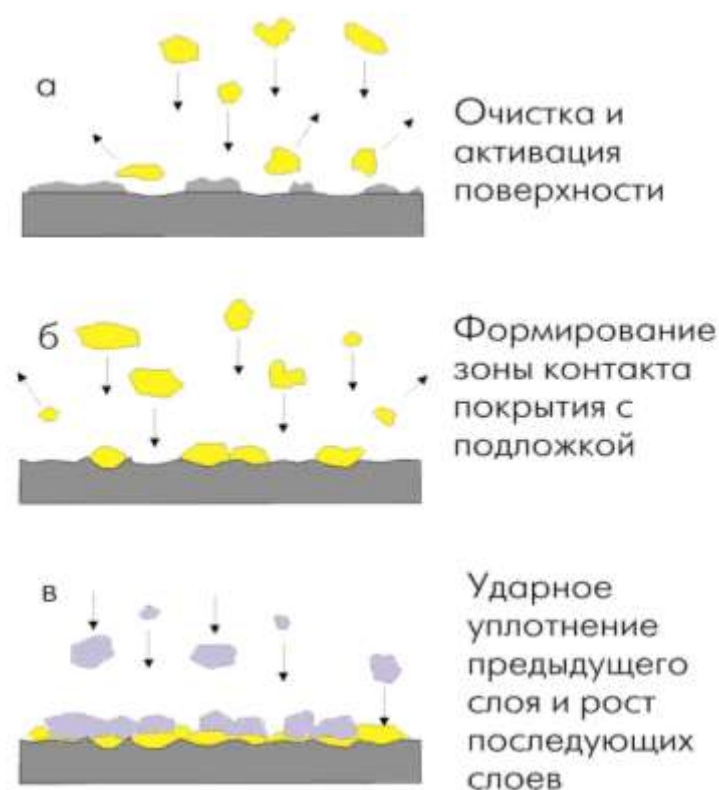


Рисунок 1.2 – Этапы формирования покрытия газодинамическим способом

Восстановление пластическим деформированием не требует присадочного материала. Износ компенсируется за счет того, что металл детали перераспределяется из одного объема в другой. Это приводит к уменьшению длины вала. К прочим недостаткам следует отнести высокую энергоемкость способов из-за необходимости высокотемпературного нагрева детали, потребность в нагревательном, кузнечно-прессовом и металлообрабатывающем оборудовании [3, 4, 66].

После электромеханической высадки повышаются механические свойства. Однако этот способ уменьшает площадь контакта сопрягаемых деталей, что снижает ресурс посадки [66].

Способы восстановления нанесением гальванических покрытий имеют определенные преимущества в сравнении с рассмотренными выше способами восстановления [27, 66], одно из которых возможность автоматизации процесса.

При восстановлении изношенных деталей из гальванических покрытий чаще всего применяют железнение, реже – хромирование [3, 4, 66].

При восстановлении подшипниковых отверстий в корпусных деталях используются местным электроосаждением, посадочных мест под подшипники на валах – ванным электроосаждением, электроосаждением в проточном электролите, электроконтактным натиранием [3, 4].

Имеется ряд существенных недостатков: низкая производительность и высокая трудоемкость, низкая экологичность из-за токсичности электролитов, большой расход чистой воды и ее загрязнение токсичными веществами [3, 4, 25, 50].

В таблице 1.1 приведены характеристики способов восстановления посадок подшипников качения [67]. Способы восстановления имеют свои достоинства и недостатки. Следует отметить общие недостатки этих способов восстановления: сложный и трудоемкий технологический процесс и т.д. Трудоемкость восстановления колеблется от 10 до 120 ч/м, расход материала от 1,5 до 50 кг/м, энергоемкость от 100 до 256 кВт·ч/м².

Анализ коэффициентов износостойкости, выносливости, сцепляемости и долговечности показывает, что способы восстановления посадок не обеспечивают ресурс деталей на уровне 80 % от ресурса новых деталей. Например, коэффициент выносливости колеблется от 0,55 до 1,0, сцепляемости – от 0,2 до 1,0, долговечности – от 0,13 до 1,35.

Существенным недостатком, рассмотренных выше способов восстановления, является то, что они не исключают фреттинг-коррозию – основную причину изнашивания посадочных мест подшипников.

Способы восстановления посадок подшипников полимерными материалами и композитами на их основе лишены вышеуказанных недостатков. Они отличаются простотой технологии, не требуют сложного технологического оборудования и высокой квалификации ремонтного персонала, имеют небольшие затраты электроэнергии и низкую себестоимость восстановления [10, 16-18, 55-60].

По данным Малоярославецкого филиала ГОСНИТИ износ деталей колеблется в диапазоне 0,01...10 мм. Около 80% деталей имеют износ до 0,6 мм. Износ распределяется следующим образом: 0,1 мм – 60%; 0,2 мм – 12%; 0,4 мм – 3%; 0,5 мм – 6%; 0,6 мм – 4% [1,3,4].

Таблица 1.1 – Характеристика способов восстановления посадок подшипников качения

Способы восстановления	Толщина покрытия, мм		Коэффициенты				Удельная трудоемкость восстановления, ч/м ²	Удельный расход материала, кг/м ²	Удельная энергоемкость, кВт*ч/м
	минимальная	максимальная	износостойкости	выносливости	сцепляемости	долговечности			
Установка дополнительной детали	-	-	1,0	0,8	1,0	0,8	48...65	-	-
Вибродуговая наплавка: в жидкой среде под флюсом	0,5	3,0	0,85	0,62	0,75...1,0	0,4...0,53	33,3...36	35...40	234
	0,5	4,0	0,85	0,62	0,9...1,0	0,48...0,53	33,3...36	39...50	234
Наплавка в среде CO ₂	0,8	3,0	1,3...1,6	0,7	1,0	0,9...1,0	17,3...21,4	31...45	256
Железнение: вневанное	-	0,8	0,9...1,3	0,3	0,65...0,8	0,5...0,85	26...33	4,7...9,4	100
Железнение: проточное ванное	-	0,8	1,0...1,6	0,8	0,75...1,0	0,6...1,25	22...25	4,7...9,4	150
	-	2,0	0,9...1,3	0,88	0,7...0,9	0,6...1,0	15...17	4,7...9,4	150
Хромирование	-	0,3	1,67	0,55...0,9	0,9	0,9...1,35	72...129	1,5...4,5	224
Металлизация: плазменная газопламенная электродуговая	0,03	15,0	1,1...1,3	0,7...1,3	0,4...0,5	0,31...0,86	22,7...24	16...24	117...175
	0,4	15,0	1,1...1,3	0,6...1,1	0,3...0,4	0,20...0,57	22,7...24	16...24	117...175
	0,4	15,0	1,1...1,3	0,6...1,1	0,2...0,3	0,13...0,43	22,7...24	16...24	117...175
Пластическое деформирование	-	-	1,0	1,0	1,0	1,0	10-25	-	-

Таким образом, большая часть деталей, т.е. 72% деталей имеют износ до 0,2 мм. Посадочные места под подшипники в деталях с износом до 0,2 мм можно эффективно восстанавливать полимерными материалами [56, 57, 59, 60, 62].

Исследования в многочисленных работах [10, 16-18, 23, 24, 55-60, 67-72] показали, что восстановление посадок подшипников полимерами полностью исключает фреттинг-коррозию, увеличивает ресурс полимерных посадок, в сравнении со стандартными посадками «металл-металл», до 3,6 раз, ресурс подшипников качения до 8,5 раз, в сравнении с расчетной долговечностью. Основным направлением в повышении эффективности восстановления посадок подшипников в корпусных деталях и на валах является исследование и разработка новых полимерных материалов с заданными потребительскими свойствами и технологий их применения при ремонте техники.

1.2 Современные полимерные композиты для восстановления посадок подшипников качения

1.2.1 Полимерные композиты для восстановления посадок подшипников качения

Отечественные анаэробные герметики [58-60, 73, 74] представлены марками «Анатерм» и «Унигерм», большой перечень которых выпускает НИИ полимеров им. Каргина в г. Дзержинск [75], немецкие Loctite 620 и Loctite 638 [76]. Аналогичное назначение имеет анаэробный герметик марки ТВ1324 компании Three Bond (Япония) [77].

К основному недостатку, сдерживающему широкое применение анаэробных герметиков, следует отнести относительно высокую цену материалов. Поэтому для снижения цены, повышения экономической эффективности восстановления в герметики вводят различные наполнители. В таблице 1.2 представлены композиты на основе реактопластов и эластомеров, предназначенные для восстановления посадок подшипников качения [2, 15, 53, 55, 56, 58, 60, 78, 79].

Прочность клеевых соединений нанокompозита состава №1, по сравнению с полимерной матрицей возросла в 1,22 раза, от 23 до 28,2 МПа. К недостаткам этого состава следует отнести излишне высокие требования к точности концентрации наполнителей. По этой причине увеличивается трудоёмкость операции приготовления композита, повышается его цена [15].

Прочность клеевого соединения композита состава №2 при равномерном отрыве по сравнению с полимерной матрицей возросла от 18,6 до 21,8 МПа, т.е. в 1,17 раза (рисунок 1.3). Вследствие наполнения органическим наполнителем тальком композит имеет склонность к старению в условиях длительных повышенных температур эксплуатации [78].

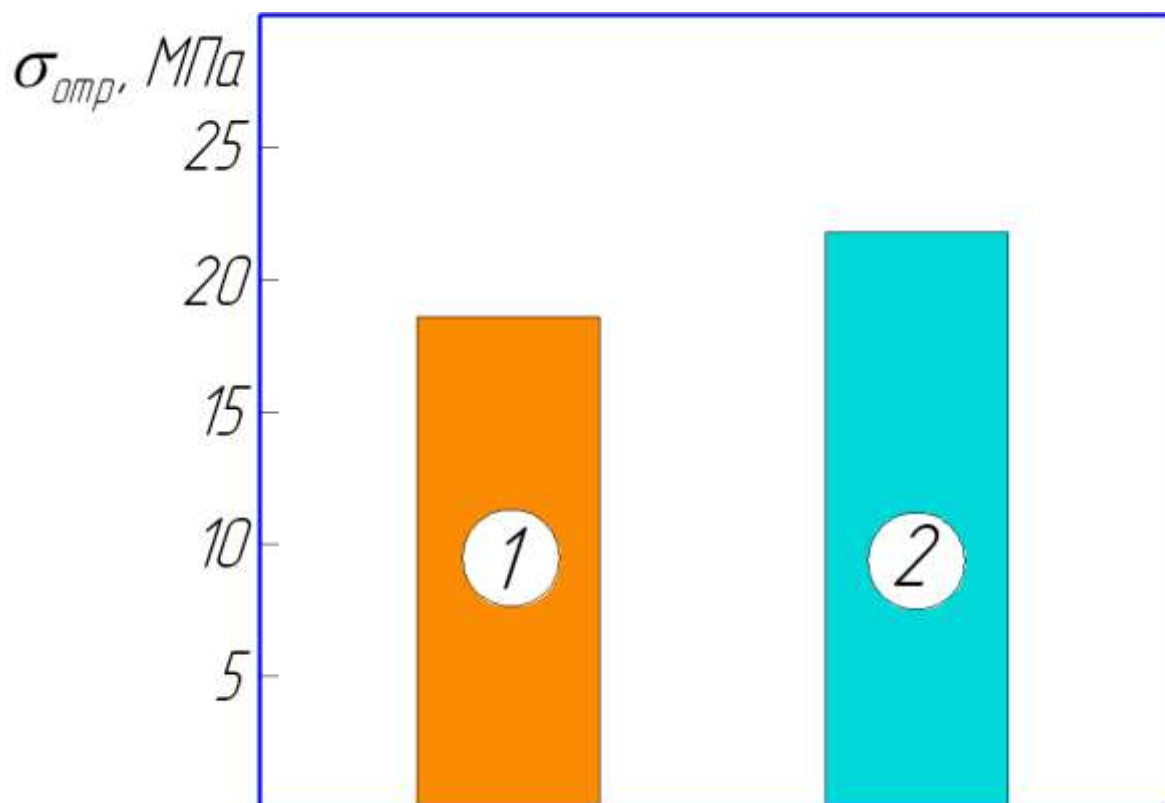


Рисунок 1.3 – Прочность клеевого соединения, выполненного анаэробным герметиком АН-111 (1) и композитом на его основе (2) [78]

«Композит состава №3 предназначен для восстановления посадок подшипников в тяжело нагруженных подшипниковых узлах, работающих при повышенных температурах эксплуатации» [2]. После наполнения анаэробного герметика

АН-112 дисперсными частицами меди и алюминия прочность клеевых соединений нанокompозита состава №3, по сравнению с полимерной матрицей увеличилась в 1,12 раза, от 33 до 37 МПа. После введения металлических наполнителей теплопроводность композита повысилась [58].

Коэффициент теплопроводности композита, по сравнению с анаэробным герметиком АН-112 увеличился 0,44 до 10,06 $\frac{Вт}{м \cdot К}$, т.е. в 23 раза, (рисунок 1.4).

По этой причине повысился теплоотвод и температура нагрева подшипниковых узлов уменьшилась на 12°C [58].

Экспериментальные исследования показали значительное повышение деформационно-прочностных свойств композита. Удельная работа разрушения композита, по сравнению с матрицей, возросла в 1,33 раза, что привело к увеличению ресурса восстановленных полимерных посадок подшипника до 30% [58].

«Исследования Щетинина М.В. показали более высокие деформационно-прочностные свойства АН-105, в сравнении с анаэробными герметиками АН-6, АН-6В и АН-6К» [2] (рисунок 1.5). В сравнении с герметиками АН-6 и АН-6К удельная работа разрушения выше у АН-105 в 1,72 и 1,24 раза соответственно [59].

Бутин А.В. провел исследования и разработал в итоге «полимер-полимерный композит на основе акрилового клея АН-105» [2] с добавлением раствора эластомера Ф-40 [60, 79].

Прочность пленок композита, по сравнению с матрицей, увеличилась от 11,3 до 16,2 МПа, т.е. на 43,3 %, деформация от 17,6 до 23,3%, т.е. в 1,32 раза, удельная работа разрушения от 3,21 до 4,62 МДж/м³, что на 43,9% больше [60, 80].

Таблица 1.2 – Композиты на основе реактопластов и эластомеров

№ п/п	Разработчик	Состав, масс.ч	Прочность, МПа	Деформация, %	Удельная работа разрушения, Мдж/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К
1	Котин А.В. , МГУ им. Н.П. Огарева	Анаэробный герметик Анатерм-6В – 100 масс.ч., тальк – 20 масс.ч., микроразмерные частицы бронзы – 1...2 масс.ч. [15]	–	–	–	–
2	Демин В.Е. Саратовский ГАУ	Состав №1: анаэробный герметик АН-111 – 78,08%; акриловый лак АК-506 – 21,7%; наночастицы сплава железа с никелем – 0,22% [78]	28,2	–	–	–
3	Кондрашин С.И. МичГАУ	Состав №2: анаэробный герметик АН-111 – 100; микротальк Талькон Т-20 – 9,6; микроразмерные частицы бронзы БПП-1 – 1,2 [58]	21,8	11,5	–	–
4	Бочаров А.В. ЛГТУ	Состав №3: анаэробный герметик АН-112 – 100%, микроразмерные частицы алюминия ПАП-1 – 12%; микроразмерные частицы алюминия бронзы БПП-1 – 0,35% [55]	37,0	11,0	12,5	10,06
5	Бутин А.В. ЛГТУ	Состав №4: акриловый адгезив АН-105 – 100 масс.ч.; эластомер Ф-40 – 12 масс.ч. [60, 79]	19,6	23,3	4,76	–
6	Машин Д.В. МичГАУ	Состав №5: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; алюминиевая пудра ПАП-1 – 16 масс.ч.; бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 масс.ч. [56]	10,3	77	12,93	19,97
7	Малюгин В.А. ЛГТУ	Состав №6: анаэробный герметик АН-111 – 100 масс. ч., наночастицы алюминия – 1,0 масс. ч., наночастицы меди – 0,25 масс. ч. [53]	18,5	18,1	90,0	2,16
8	Киба М.Р. МичГАУ	Состав №7: эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., нанопорошок алюминия – 1,9 масс. ч., нанопорошок меди – 1,7 масс. ч. [2]	16,11	55	13,01	21,8

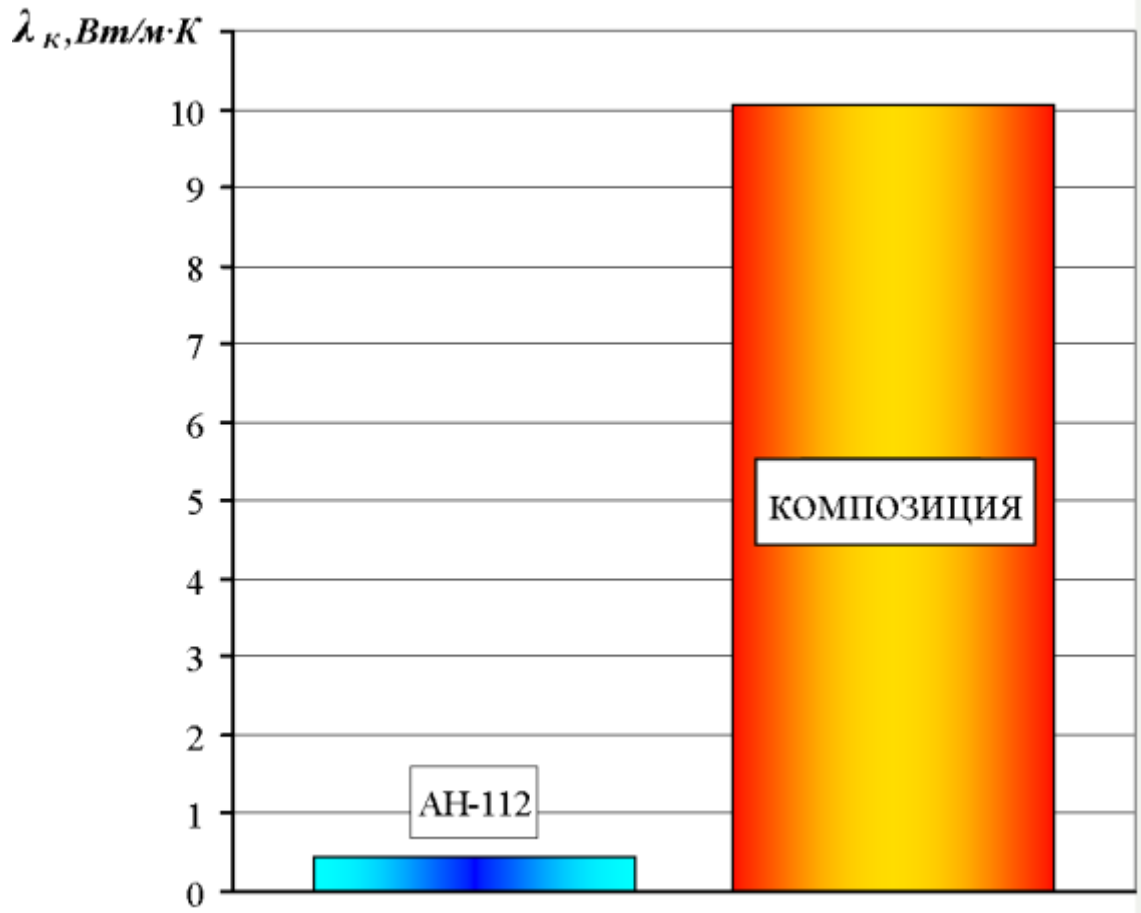


Рисунок 1.4 – Теплопроводность анаэробного герметика АН-112 и композита на его основе [58]

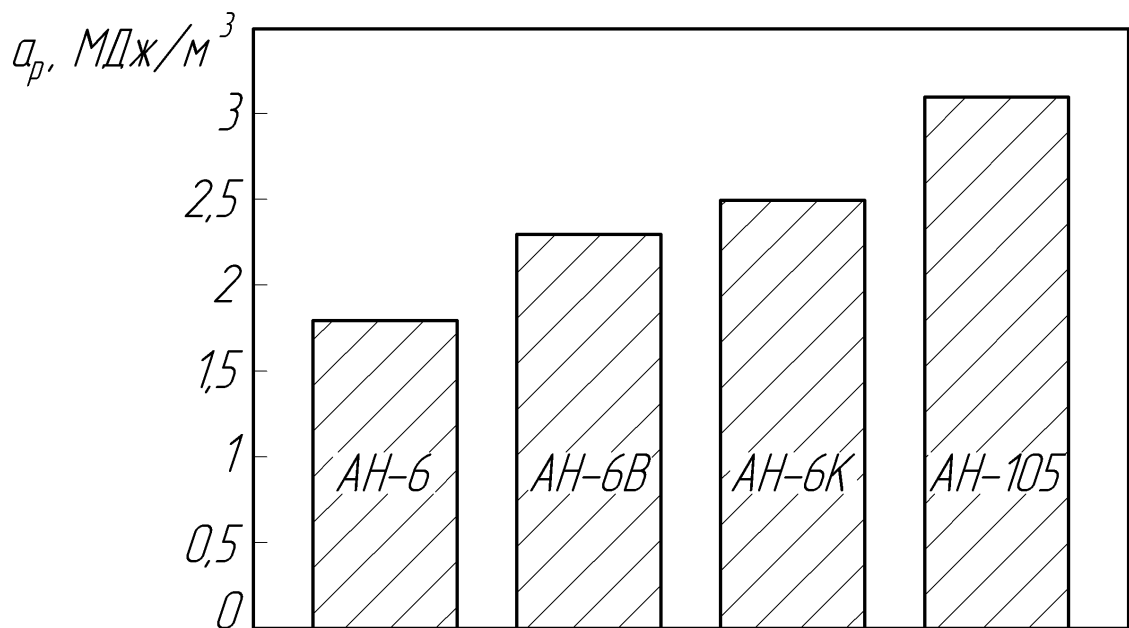
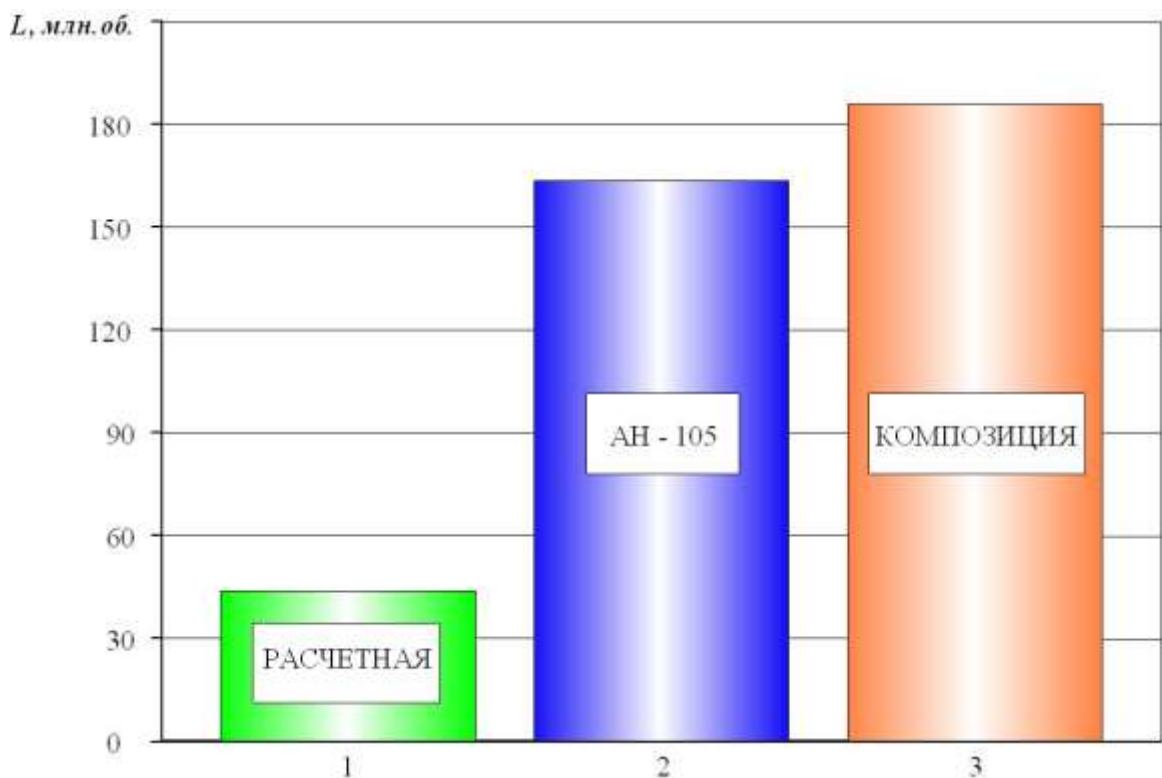


Рисунок 1.5 – Удельная работа разрушения анаэробных герметиков и акрилового адгезива АН-105 [59]

Эластичность композита увеличилась на 54%, о чем свидетельствует уменьшение модуля механических потерь с 2,313 до 1,067 МПа [80]. Благодаря повышению эластичности, уменьшилось теплообразование в подшипниковом узле при циклическом нагружении. Температура подшипникового узла уменьшилась на 7°C, в сравнении с посадкой из адгезива АН-105. Снизилась вибронагруженность подшипникового узла, о чем свидетельствует уменьшение амплитуды вибрации на 9%. В итоге ресурс подшипника с посадкой из композита увеличился на 15% до 186,72 млн.об. В сравнении с расчетной долговечностью стандартного подшипника, ресурс повысился в 4,4 раза (рисунок 1.6) [60].



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

Рисунок 1.6 – Долговечность L подшипника 209 при циркуляционном нагружении наружного кольца [60]

«Высокую эффективность восстановления подшипниковых отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники показали отечественные эла-

стомеры: ГЭН-150(В), герметик 6Ф, лаки Ф-40 и Ф-40С [10, 16, 72-77, 81].» [2] Герметик 6Ф, лаки Ф-40 и Ф-40С имеют в своей основе синтетический бутадиен-нитрильный каучук СКН-40 и модифицированную смолу ФКУ. Герметик 6Ф выпускался сухим веществом в виде рулонов. Материал перед применением нарезали в виде кусочков с последующим растворением в ацетоне на протяжении суток. Лаки Ф-40 и Ф-40С выпускаются готовыми к применению в виде раствора эластомера. Разница в маркировке лаков Ф-40 и Ф-40С обусловлена тем, что СКН-40 в лаках выпускается разными производителями. Поэтому механические свойства лаков Ф-40 и Ф-40С несколько отличаются.

Выпуск эластомеров ГЭН-150(В) и герметик 6Ф настоящее время прекращен.

«Теплопроводность полимерных материалов ниже теплопроводности черных металлов около 100 раз, поэтому их относят к теплоизоляторам» [61]. Вследствие этого в тяжело нагруженных подшипниковых узлах с восстановленными полимерными посадками, при эксплуатации в условиях повышенных температур окружающей среды, возможен затрудненный теплоотвод, что в ряде случаев может привести к снижению ресурса подшипникового узла.

Машин Д.В. исследовал влияние дисперсных алюминиевых и медных частиц на теплопроводность микрокомпозита на основе эластомера Ф-40С. «Коэффициент теплопроводности микрокомпозита, в сравнении с не наполненным эластомером, повысился в 73,96 раза, от 0,27 до 19,97 Вт/м*К» [2] (рисунок 1.7) [56, 82-85].

Увеличить предельную толщину полимерного покрытия и тем самым компенсируемый износ можно, повышая модуль упругости материала за счет наполнения дисперсными металлическими порошками. «В работе Машина Д.В. разработан микрокомпозит на основе эластомера Ф-40С с оптимальным составом, обеспечивающим высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства: Ф-40С – 100 масс.ч.; ПАП-1 – 16 масс.ч.; БПП-1 – 1,8 масс.ч. Исследования показали, что модуль упругости композита на 25 % выше модуля упругости эластомера Ф-40 и на 11 % - эластомера Ф-40С. [85, 86]» [2] (рисунок 1.8).

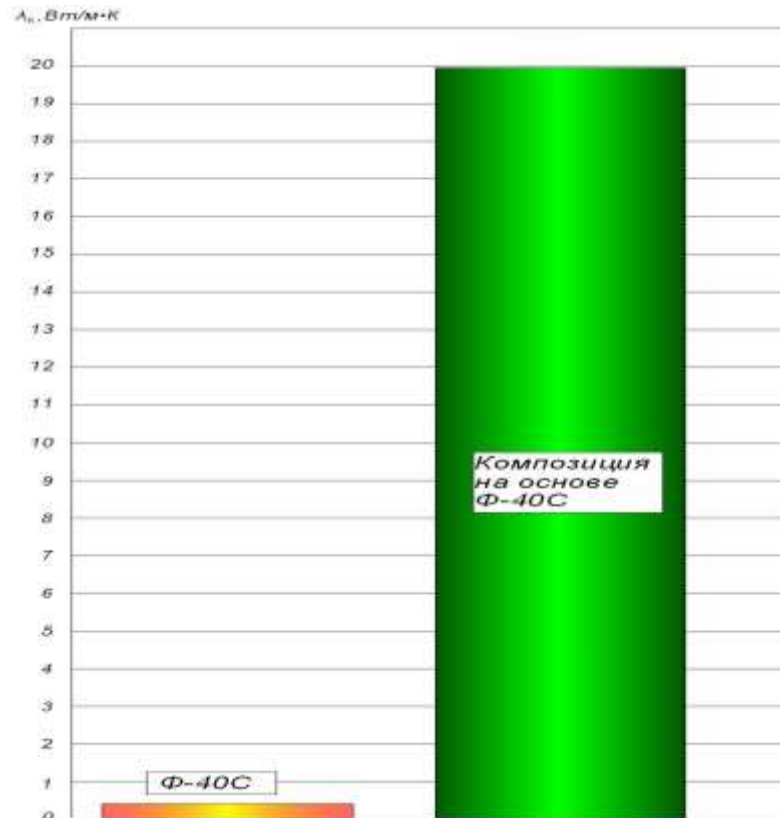


Рисунок 1.7 – Теплопроводность эластомера Φ-40С и композиции на его основе

[82]

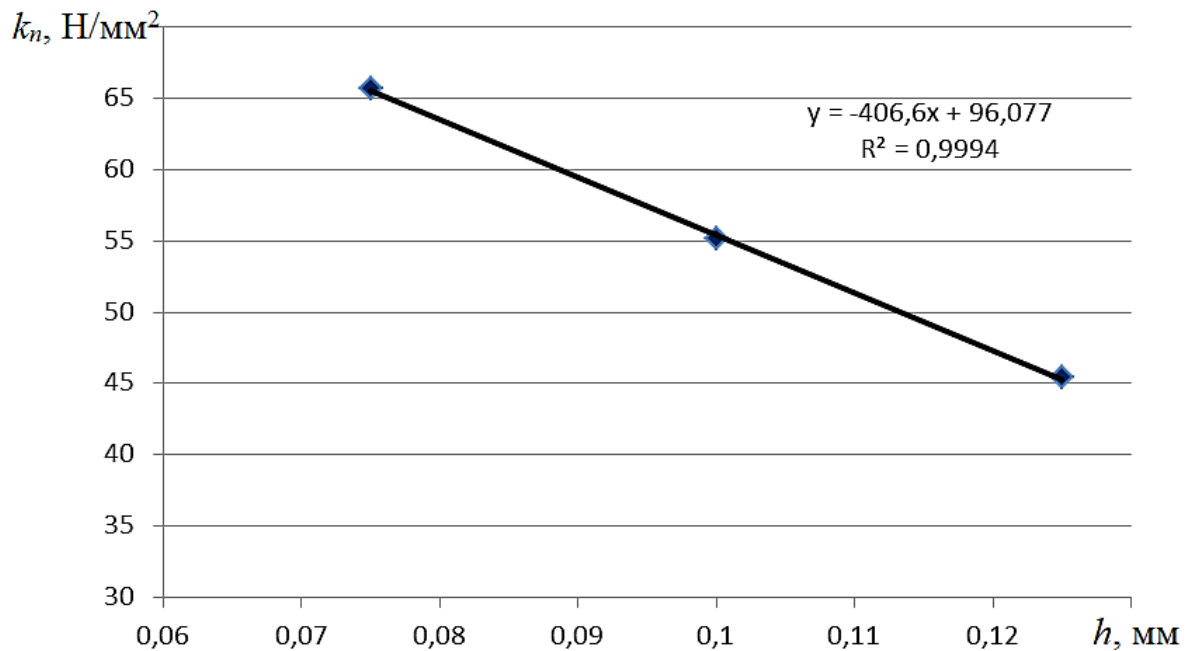


Рисунок 1.8 – Изменение коэффициента податливости k_n при различной толщине h полимерной подложки из композиции эластомера Φ-40С [86]

«В виду того, что подшипники обычного исполнения нагреваются при эксплуатации до температуры 70...90°C, необходимо добиться того, чтобы нанокomпозиты на основе эластомеров имели широкий температурный запас по теплоустойчивости» [2] (рисунок 1.9).

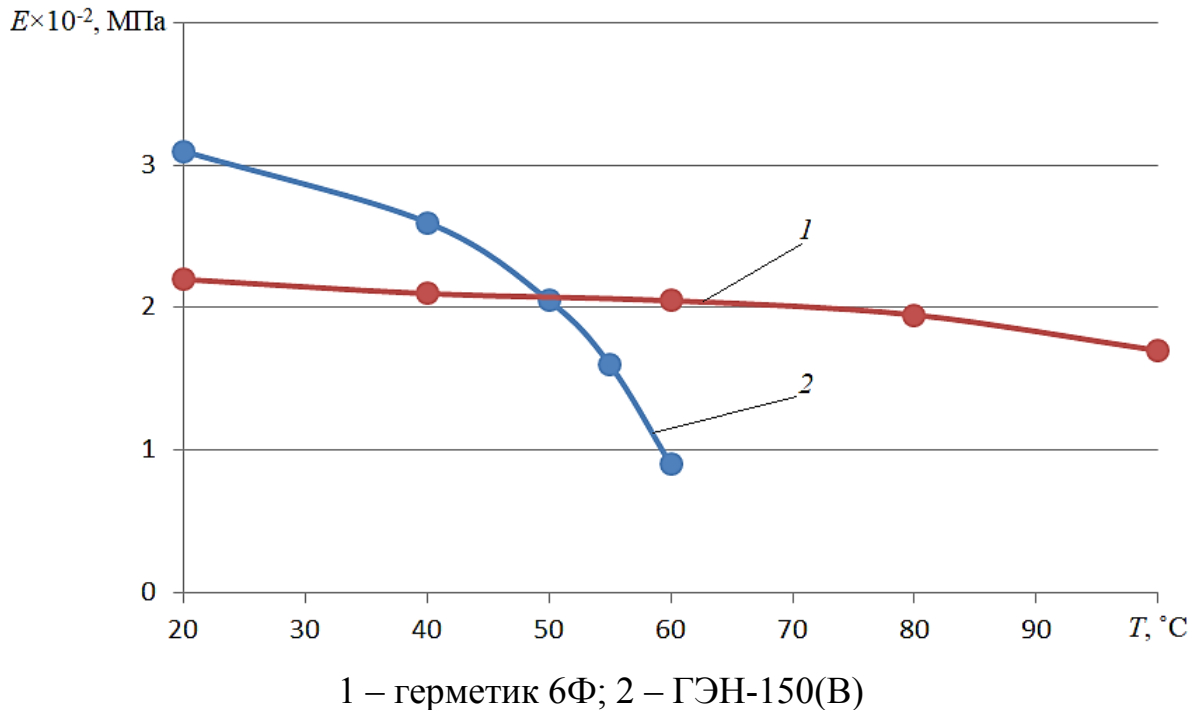


Рисунок 1.9 – Зависимость модуля упругости E покрытий герметика 6Ф и эластомера ГЭН-150(В) от температуры T [10]

В работе Киба М.Р. предложен нанокomпозит на основе эластомера Ф-40, наполненный дисперсными нанопорошками алюминия и меди. Прочность пленок нанокomпозита, в сравнении с не наполненным эластомером, увеличилась от 13,1 до 16,11 МПа, т.е. в 1,23 раза, деформация уменьшилась с 62 до 55%, т.е. в 1,13 раза, удельная работа разрушения повысилась в 1,17 раза, от 11,12 до 13,04 МДж/м³ (таблица 1.2) [2, 87].

Наполнение металлическими нанопорошками повысило коэффициент теплопроводности материала нанокomпозита в 38,9 раза, от 0,56 до 21,8 Вт/м*К (таблица 1.2) [2].

Авторами в работах [88, 89] дано обоснование выбора дисперсных алюминиевых и медных наночастиц для наполнения анаэробного герметика АН-111. «Проведен активный эксперимент и получена регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения нанокompозитов от содержания наполнителей. В результате оптимизации регрессионной модели получен оригинальный состав нанокompозита: АН-111 – 100 масс.ч., Al – 1,0 масс.ч., Cu – 0,25 масс.ч.» [2] Прочность клеевых соединений, деформация и удельная работа разрушения, выполненных нанокompозитом, повысились, в сравнении с не наполненным герметиком (рисунки 1.10...1.12) [53].

Наполнение металлическими нанопорошками повысило коэффициент теплопроводности материала нанокompозита в 5,26 раза, от 0,41 до 2,16 Вт/м*К (рисунок 1.13) [53].

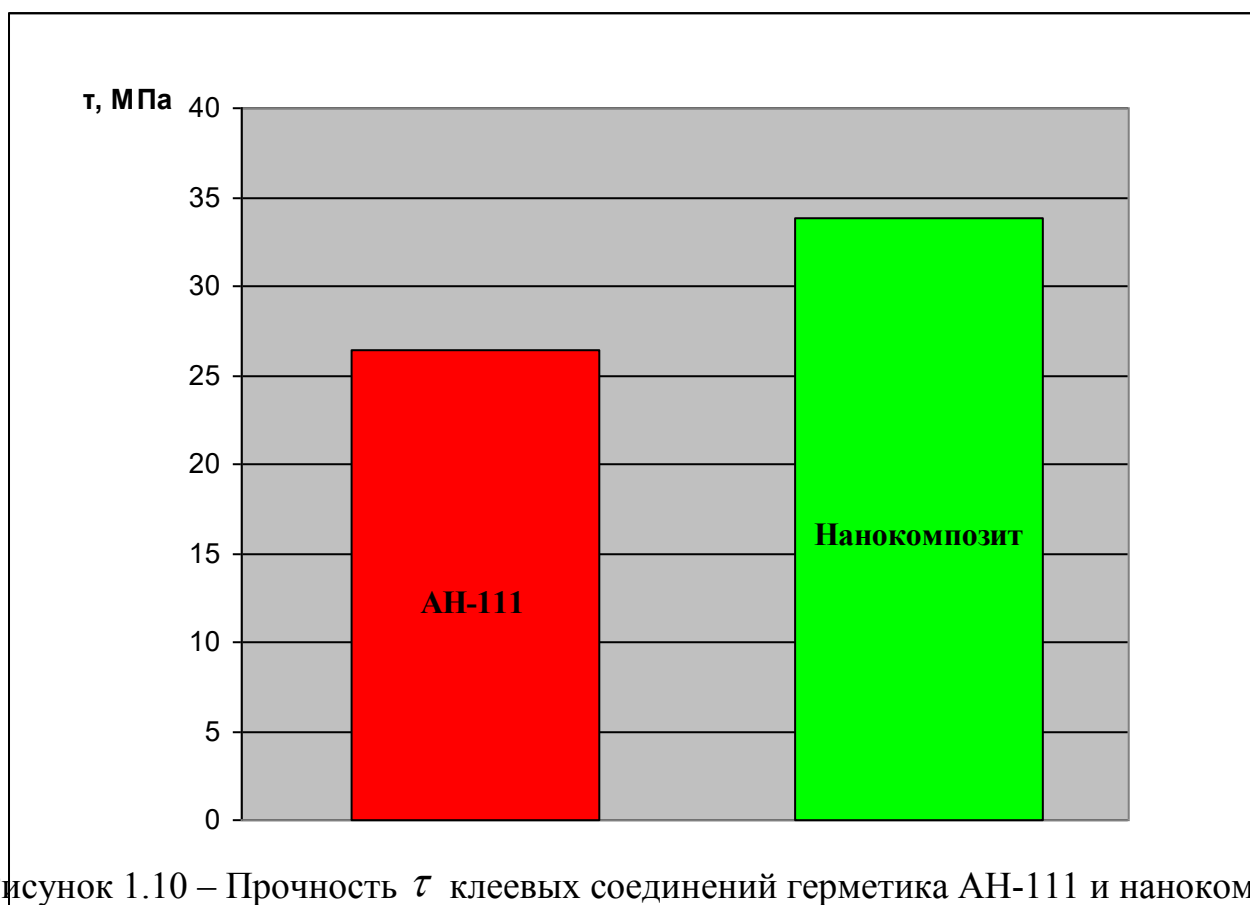


Рисунок 1.10 – Прочность τ клеевых соединений герметика АН-111 и нанокompозита на его основе [53]

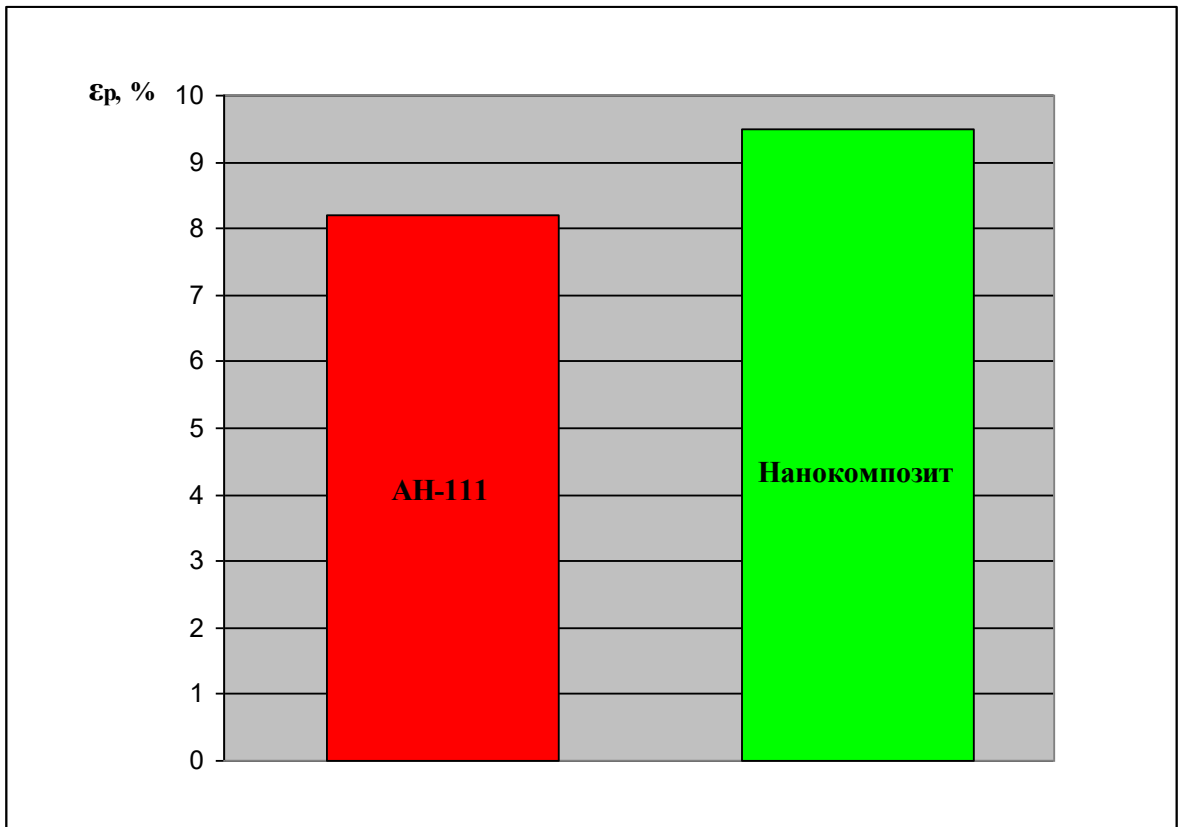


Рисунок 1.11 – Относительное удлинение ϵ_p клеевого шва соединений герметика

АН-111 и нанокompозита на его основе [53]

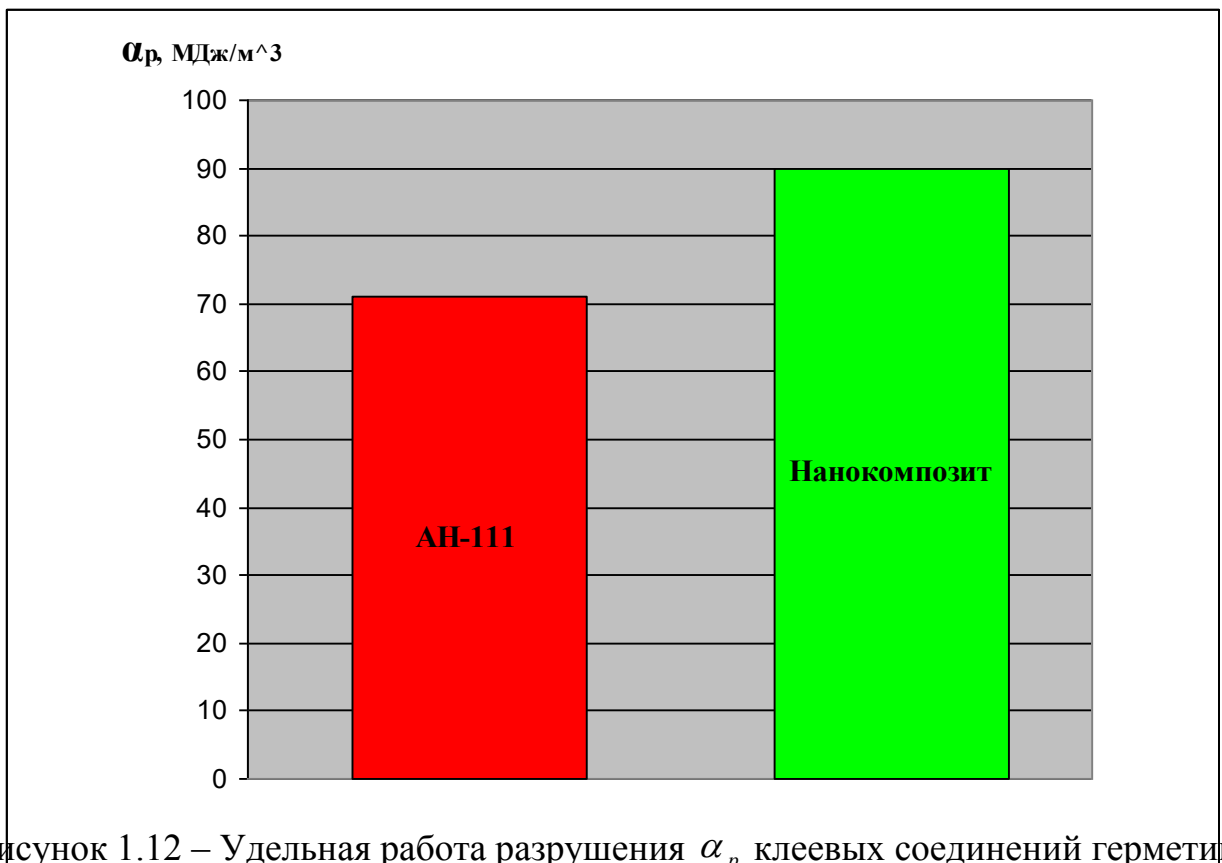


Рисунок 1.12 – Удельная работа разрушения α_p клеевых соединений герметика

АН-111 и нанокompозита на его основе [53]

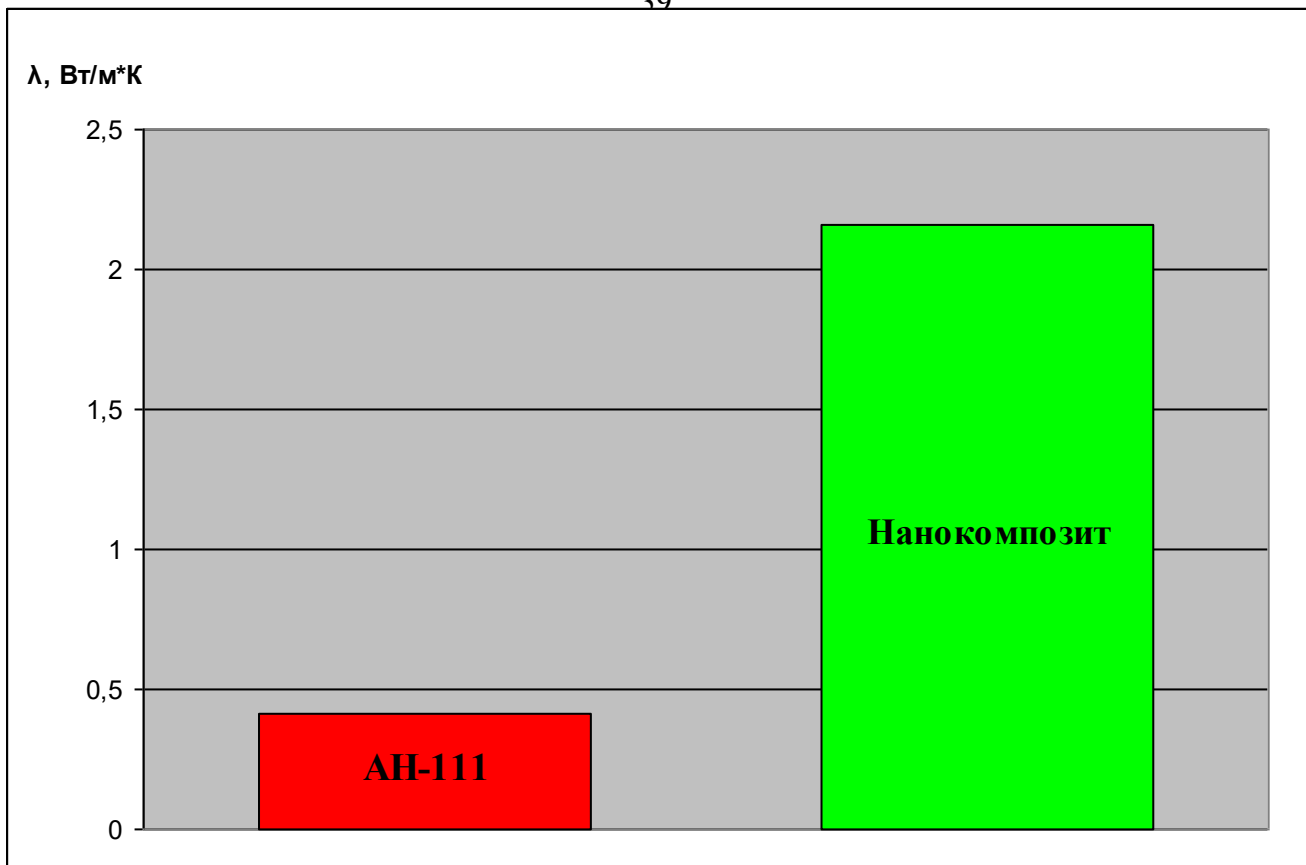


Рисунок 1.13 – Коэффициент теплопроводности герметика АН-111 и нанокompозита на его основе [53]

«Коэффициент старения по относительному удлинению K_{ε} нанокompозита увеличился 1,11 раза, от 0,86 до 0,96» [2], что является свидетельством повышения его термостойкости [53].

Таким образом, из рисунков 1.10...1.13 следует, что весьма перспективным направлением в повышении эффективности композитов является использование наночастиц в качестве наполнителей. Наноразмерные наполнители значительно повышают механические и теплофизические свойства материала. Представляют научный и практический интерес исследования и разработка новых, перспективных нанокompозитов на основе реактопластов и эластомеров, которые позволят повысить эффективность восстановления посадок подшипников качения на деталях типа «вал» и корпусных деталях сельскохозяйственной техники.

1.2.2 Расчет механических и теплофизических свойств полимерных композитов

Объемный модуль упругости многокомпонентного гетерогенного композита K_c можно определить по формуле Кернера [90]

$$K_c = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i K_i}{K_1 + \beta_1 K_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{K_1 + \beta_1 K_i}}, \quad (1.1)$$

где φ_i – объемная доля i -го компонента; K_i – объемный модуль упругости i -й компоненты гетерогенной композиции; β_1 – функция коэффициента Пуассона компоненты 1 изотропной гетерогенной композиции, описываемая формулой $\beta_1 = 2(1 + \mu_1)/(1 - 2\mu_1)$; μ_1 – коэффициент Пуассона компоненты 1 (полимерной матрицы).

Модуль упругости бинарного гетерогенного композита можно рассчитать по обобщенному уравнению Нильсена [90]

$$E_{нк} = E_n \left(\frac{1 + ABV_f}{1 - B\psi V_f} \right), \quad (1.2)$$

$$A = k_E - 1, \quad B = \frac{\frac{E_{nan}}{E_n} - 1}{\frac{E_{nan}}{E_n} + A}, \quad \psi = 1 + \left(\frac{1 - P_f}{P_f^2} \right) V_f,$$

где $E_{нк}$, E_n , E_{nan} – модули упругости полимерной композиции, полимера (матрицы) и наполнителя соответственно; A , B и ψ – коэффициенты; k_E – коэффициент Эйнштейна, зависящий от формы и ориентации частиц

наполнителя; V_f – объемная доля наполнителя; P_f – максимальная объемная доля частиц наполнителя при заданном типе упаковки.

Как видно из формул 1.1 и 1.2 при расчете модуля упругости композита учитывается модуль упругости наполнителя. Эти формулы полностью согласуются с микромеханической моделью усиления полимерных композитов.

В настоящее время усиление полимерных нанокомпозитов, в сравнении с не наполненными полимерами, описывают тремя видами моделей: традиционные микромеханические [91-93], перколяционные [94] и фрактальные [25, 95-97]. Если в микромеханических моделях при расчете модуля упругости композита учитывается модуль упругости наполнителя, в перколяционных и фрактальных его не учитывают. В перколяционных и фрактальных моделях наночастицы наполнителя видоизменяют и фиксируют структуру полимерной матрицы. Отсутствие модуля упругости наполнителя в вышеупомянутых моделях объясняется многократным различием модулей упругости наполнителя и полимерной матрицы. Например, у нанокомпозитов на основе полиэтилена низкой плотности, наполненных частицами карбоната кальция (ПЭНП/ CaCO_3) модули упругости наполнителя и полимерной матрицы отличаются более чем на два порядка. У ПЭНП модуль упругости составляет 85 МПа [93], а наночастиц наполнителя CaCO_3 – порядка десятков ГПа [98]. Поэтому при деформации нанокомпозита частица наполнителя фактически не деформируется, и деформация материала обусловлена деформацией полимерной матрицы [99].

В настоящее время активно развивается теория усиления полимерных нанокомпозитов на основе теории перколяции и фрактального анализа структуры наночастиц наполнителя и структуры нанокомпозита [94-97, 99-104]. Представляют научный и практический интерес теоретические исследования механических свойств, оценки прочности полимерных нанокомпозитов на основе фрактального анализа.

Теплопроводность полимерного композита можно рассчитать, используя множество различных зависимостей [105]:

Формула Максвелла [22, 105]

$$\lambda_k = \lambda_n \left[\frac{\lambda_n + 2\lambda_n - 2\varphi_n(\lambda_n - \lambda_n)}{\lambda_n + 2\lambda_n + \varphi_n(\lambda_n - \lambda_n)} \right], \quad (1.3)$$

где λ_n и λ_n – коэффициенты теплопроводности полимерной матрицы и наполнителя.

Формула Оделевского [21, 105]

$$\lambda_k = \lambda_n \left[1 - \frac{\varphi_n}{\left(\frac{1}{1-\nu}\right) - \left(\frac{1-\varphi_n}{3}\right)} \right], \quad (1.4)$$

где $\nu = \lambda_n / \lambda_n$.

Формула Дульнева Г.Н. [105]

$$\lambda_k = \lambda_n \left[\frac{\nu - (\nu - 1)(1 - \varphi_n^{2/3})\varphi_n^{1/3}}{\nu - \varphi_n^{1/3}(\nu - 1)} \right] \quad (1.5)$$

Авторы в работах [106, 107] исследовали теплопроводность композитов на основе диметилсилоксанового каучука СКТН-А и полиуретана Сурэл-7, которые были наполнены кварцем молотым пылевидным SiO₂, алюминий нитридом чистым (серый) AlN: SiO₂+AlN+СКТН-А и SiO₂+AlN+Сурэл-7. Расчет теплопроводности композитов по формулам Оделевского и Миснара показал заниженные результаты, отличающиеся от фактических на 20...60%. Требуют всестороннего исследования вопросы пригодности вышеприведенных формул для оценки теплопроводности полимерных нанокомпозитов, разработки метода расчета теплопроводности полимерных нанокомпозитов и выбора наночастиц наполнителя.

1.2.3 Наноразмерные частицы для наполнения полимерных материалов

В качестве наполнителей в настоящее время используют наночастицы металлов, неметаллов, сплавов, оксидов, нитридов, карбидов, силикатов и др. [108-110].

Нанотрубки и нановолокна [108]

Виды нанотрубок и нановолокон представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Нанотрубки и нановолокна [98]

Виды нанотрубок и нановолокон	Состав	Длина	Наружный диаметр	Внутренний диаметр
Металлические нанотрубки	B_4C , BN, LaF_3 , SiC, TiS_2 , MoS_2 , ZrS_2	от 3 до 30 мкм	от 25 до 100 нм	от 10 до 80 нм
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 , $Ni(OH)_2$	от 0,2 до 20 мкм	от 40 до 200 нм	от 15 до 150 нм
Короткие нановолокна и наностержни	металлические Ag, Bi, In, Si; полупроводниковые GaP, InP; нитридные Si_3N_4 ; оксидные TiO_2			

Наночастицы сферической или нерегулярной формы

Виды наночастиц сферической и нерегулярной формы представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Наночастицы сферической и нерегулярной формы [98]

Материал наночастиц	Состав
Металлы и сплавы	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
Неметаллы	B, Si
Нитриды	AlN, BN, CrN, Si_3N_4 , TiN, ZrN
Карбиды	B_4C , Mo_2C , TiO_2 , SiC, TiC
Бориды	TiB_2 , NbB_2
Сложные компаунды	$Si_3(C_{0.5}N_{0.5})_4$, $TiC_{1-x}N_x$

Слоистые неорганические структуры

В настоящее время выполняется достаточно много работ, посвященных исследованию и разработке нанокompозитов полимер/органоглина [99, 111, 112].

Проведем анализ свойств нанокомпозитов, наполненных органоглинами, на предмет их применения при восстановлении посадок подшипников.

«Основной проблемой при создании композита является несовместимость его неорганических и органических компонентов. Подобная проблема возникает при наполнении полимеров слоистыми неорганическими структурами.» [56] В данном случае проблема успешно решается модификацией глины органическим веществом [111]. В сравнении с простой глиной модифицированные глины (органоглины) активно взаимодействуют с цепочкой полимера и хорошо диспергируются в растворе (расплаве) полимерного нанокомпозита [99].

Неорганические слои формируют скопления с зазорами между ними. Эти зазоры называют прослойки или галереи. При модификации глины неорганические катионы внутри галерей замещают ионными и не ионными модификаторами. К ионным модификаторам относят катионные поверхностно-активные вещества. Они раздвигают слои, увеличивая пространство между ними, уменьшают поверхностную энергию глины и придают поверхности глины гидрофобный характер. Модифицированные таким образом глины хорошо совмещаются с полимерами, образуя слоисто-полимерные нанокомпозиты [99].

Не ионные модификаторы образуют с поверхностью глины водородные связи. В сравнении с органоглинами, полученными с использованием катионных модификаторов, такие органоглины имеют более высокую химическую стабильность, благодаря водородным связям. Не ионные модификаторы более относительно устойчивы к десорбции [103, 104].

«Наполнение полимера органоглиной повышает термическую стабильность и механические свойства материала.» [99] Причиной является сочетание свойств органического и неорганического компонентов: органического (легкость, гибкость, пластичность) и неорганического (прочность, теплостойкость, химическая устойчивость) [99, 102].

В статье [113], опубликованной в 1961 г., впервые описано повышение термической стабильности полимерных нанокомпозитов, наполненных органоглиной.

«В нанокompозите на основе ПММА, интеркалированный между слоями монтмориллонита, полимер имеет более высокую термостабильность по сравнению с матричным полимером, полная деструкция которого происходит при температуре 488 К в атмосфере азота в течение 48 ч. Установлено, что температура термической деструкции интеркалированного в Na^+ -монтмориллоните ПММА на 40-50 К выше, чем ПММА, полученного обычными методами.» [99]

Блюмштейн объясняет это «увеличением относительного числа макромолекул, заканчивающихся двойными связями» [96].

Позже в 1974 г. авторы работы [114] «охарактеризовали отдельные пластины глины как идеальный усиливающий наполнитель, потому что они имеют отношение сторон и нанометровый масштаб толщины сравнимый с масштабом структуры полимерной цепи» [99].

«Ученые концерна «Toyota» в 1993 г. синтезировали нанокompозиты нейлон-6/органоглина методом полимеризации *in situ*.» [2] Модуль упругости и прочности, по сравнению с полимерной матрицей, увеличились до 2 раз при содержании органоглины менее 4,5 масс.ч. [115-118].

В нанокompозитах полимер/органоглина имеет место интеркаляция (рисунок 1.14). В этом случае небольшое количество полимера просачивается в галереи между пластинами силиката, и тем самым разделяют их. Толщина пластин при этом достигает около 2-3 нм. [99].

Эсфолиация (расслоение) имеет место, когда расстояние между пластинами составляет около 8-10 нм. Это расстояние называют интервалом d_{001} . При хорошем расслоении и диспергировании нанокompозит содержит отдельные пластины органоглины, равномерно распределенные по объему полимерной матрицы. Электронные микрофотографии интеркалированного и эсфолированного Na^+ -монтмориллонита показаны на рисунке 1.15 [99].

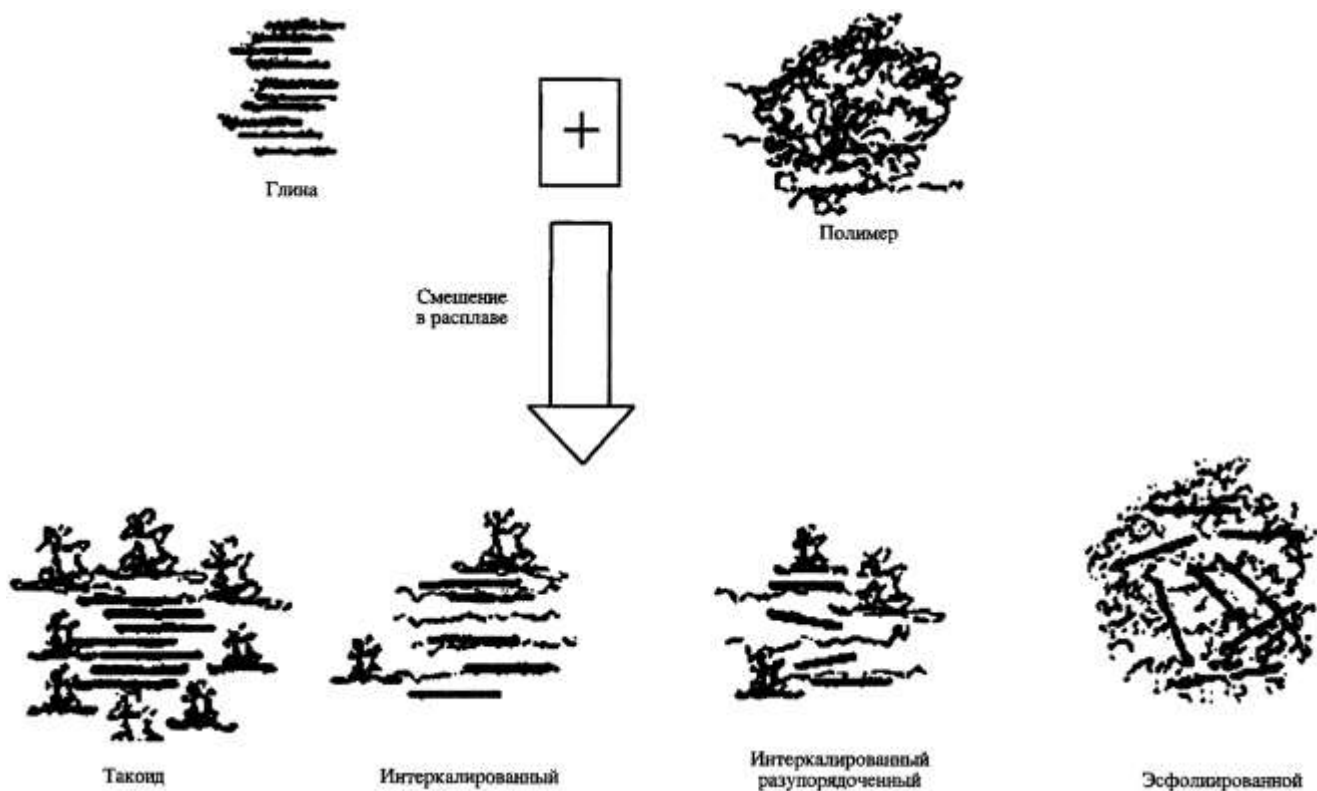


Рисунок 1.14 – Схематическая иллюстрация терминологии, применяемой при описании структуры нанокompозитов полимер/органоглина [118]

В настоящее время в нанокompозитах полимер/органоглина в качестве матрицы используют самые различные полимеры:

- полиэтилены [119, 120];
- полипропилен [121];
- полибутилентерефталат [122, 123];
- полиэтилентерефталат [124];
- полиамиды [118, 125];
- поликарбонат [126, 127];
- полиимиды [128-134];
- термотропный жидкокристаллический полиэфир [135];
- эпоксидный полимер [136, 137];
- каучуки [138, 139].

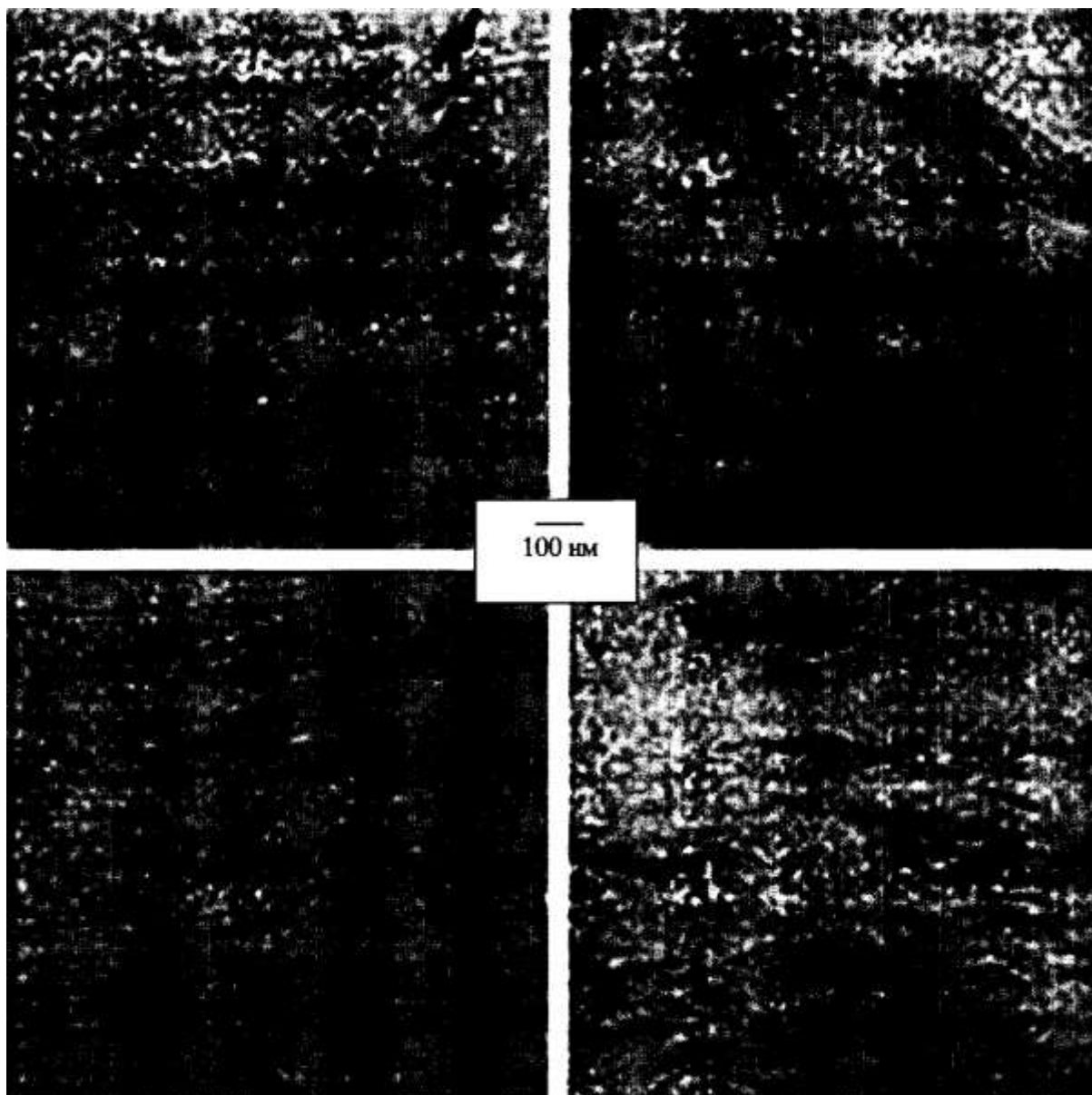


Рисунок 1.15 – Электронные микрофотографии нанокompозита полибутилентерефталат-монтмориллонит, иллюстрирующие эсфолированную (а) и интеркалированную (б, в, д) структуры. Увеличение 30000 [119]

Интеркалирование в нанокompозитах осуществляют следующими способами [120]:

- смешение в расплаве;
- полимеризация *in situ*;
- интеркаляция в растворе;
- золь-гель-процесс;
- прививка мономера/полимера на пластину силиката.

Наибольшее распространение получили смещение в расплаве и полимеризация *in situ*.

Наполнение полимеров органоглинами приводит к повышению механических свойств материалов. Увеличение модуля упругости и прочности нанокомпозита обусловлено образованием межфазных слоев на границе полимер-наполнитель [140].

«На степень упрочнения нанокомпозитов оказывает влияние большое количество факторов, которые условно делят на три группы:

- совместные параметры;
- уровень адгезии;
- структурные параметры каждой фазы (для наполнителя: форма (степень анизотропии или отношение сторон) частиц, структура поверхности частиц и степень их агрегации, для полимерной матрицы – жесткость его цепи).» [99]

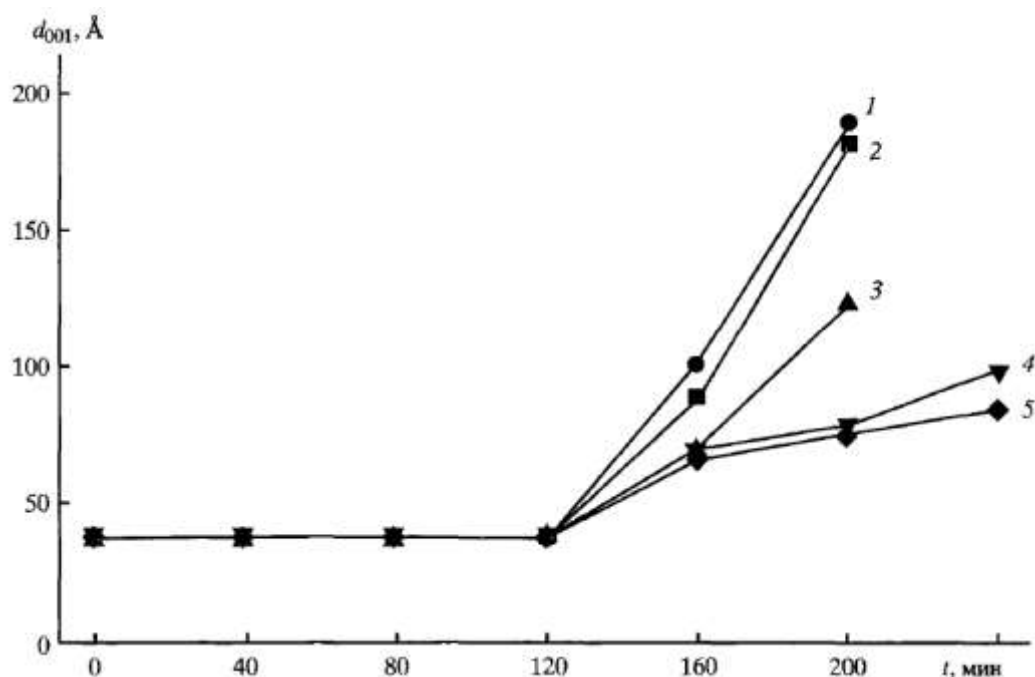
В настоящее время, в ряде работ, сделано предположение, что к наиболее важным структурным характеристикам нанокомпозитов полимер/органоглина следует отнести расстояние между пластинами силиката или интервал d_{001} [113]. По одним источникам увеличение величины d_{001} является положительным фактором. При этом идеальным вариантом является эсфолиированный нанокомпозит [136]. По другим источникам [121] оптимальной структурой нанокомпозитов полимер/органоглина является интеркалированная структура.

Зависимость интервала d_{001} для нанокомпозитов на основе эпоксиполимера от времени реакции сшивания показан на рисунке 1.16.

При небольшом содержании наполнителя до 5 масс.ч. имеет место высокая скорость увеличения интервала d_{001} между пластинами. При большем содержании скорость заметно снижается. Примечательно при содержании монтмориллонита 15 и 20 масс.ч. величина d_{001} выходит на плато со значением составляющим 250% от исходного значения. Установлено, что монтмориллонит является катализатором многократно ускоряющим процесс сшивания эпоксиполимера [137]. Определены условия формирования структуры нанокомпозитов на основе эпоксиполимеров: если скорость сшивания полимера внутри галереи монтмориллонита

больше, формируется эсфолиированный нанокомпозит, а если меньше, нежели вне наполнителя – интеркалированный [136, 137].

В ряде работ пытались установить зависимость между интервалом d_{001} и степенью упрочнения нанокомпозитов [99, 126, 137]. Однако исследования показали, что такая корреляция отсутствует.



Концентрация монтмориллонита, масс.ч.: 1 - 5, 2 - 1, 3 - 10, 4 - 15, 5 – 20

Рисунок 1.16 – Зависимость межслоевого интервала d_{001} монтмориллонита в эпоксидной матрице от продолжительности реакции сшивания t [136]

Наиболее высокое упрочнение наблюдается в нанокомпозитах, наполненных слоистыми наполнителями, с матрицей из жестко-цепных полимеров. На рисунке 1.17 показаны зависимости степени усиления E_k/E_m от содержания монтмориллонита φ_n для нанокомпозитов на основе полибутилентерефталата [122] и термотропного жидкокристаллического полиэфира. Из рисунка следует, что с увеличением содержания наполнителя степень усиления E_k/E_m растет. В работе [131] установлено, что нанокомпозит на основе полиамида имеет рекордную степень усиления $E_k/E_m = 3,7$ при содержании монтмориллонита 3 масс.ч

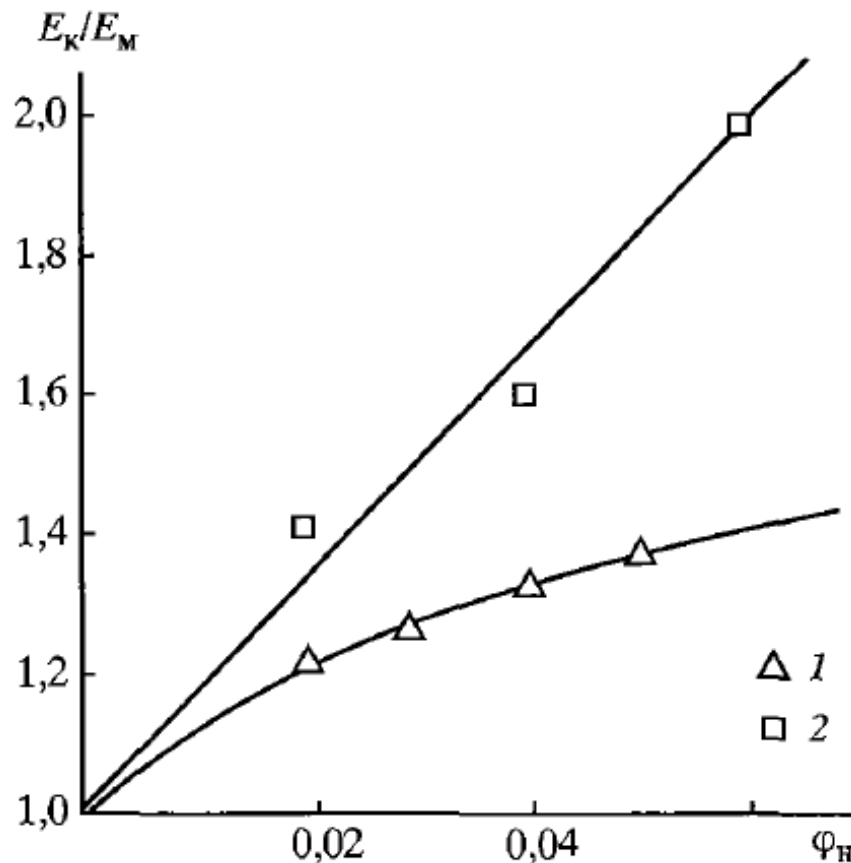


Рисунок 1.17 – Зависимости степени усиления E_k/E_M от содержания монтмориллонита φ_n для нанокompозитов на основе полибутилентерефталата (1) [122] и термотропного жидкокристаллического полиэфира (2)[135]

Введение слоистого наполнителя в полиимид повышает деформационные свойства материала (таблица 1.5). При содержании монтмориллонита $\varphi_n = 5 \text{ мас.}\%$ деформация нанокompозита составляет 30%, что в 2 раза превышает деформацию не наполненного полиимида (15%). С увеличением содержания слоистого наполнителя до $\varphi_n = 5 \text{ мас.}\%$ прочность также повышается от 78,0 до 105,4 МПа, т.е. в 1,35 раза [128].

Значительное влияние на механические свойства нанокompозитов оказывает агрегация частиц наполнителя. С увеличением содержания наполнителя φ_n до 3 масс.ч. модуль упругости резко возрастает (рисунок 1.18).

Таблица 1.5 – Механические свойства нанокompозитов на основе полиимида [128]

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

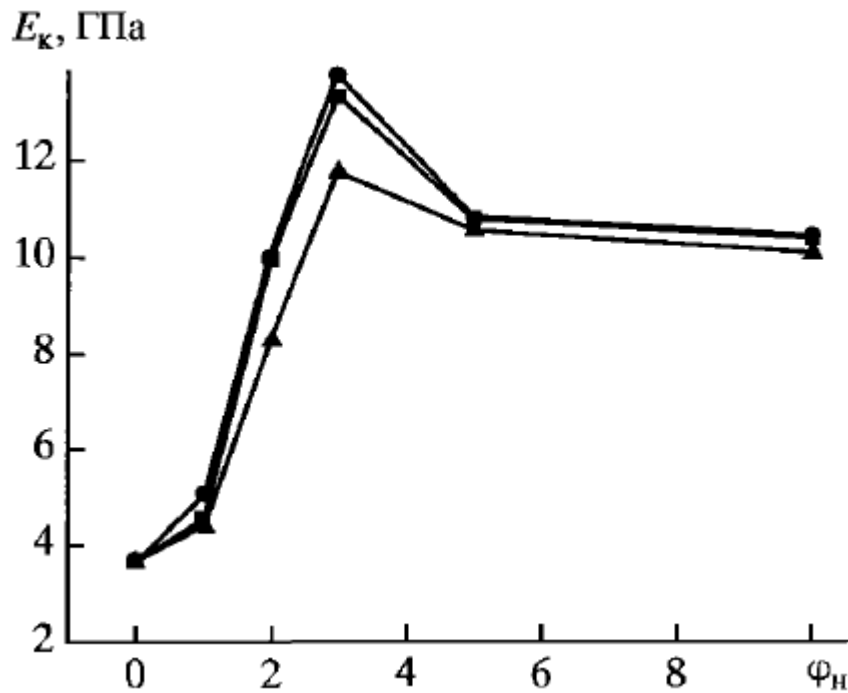


Рисунок 1.18 – Зависимости модуля упругости E_k от содержания монтмориллонита φ_n для трех нанокompозитов на основе полиимида с разными модификаторами [131]

Однако с увеличением содержания слоистого наполнителя более 3-5 масс.ч. наблюдается снижение механических свойств материала, что обусловлено агрегацией наночастиц. Подобная картина наблюдается в нанокompозите на основе полиимида (таблица 1.5). При содержании монтмориллонита $\varphi_n = 10$ масс.% прочность нанокompозита уменьшается с 10,5 до 65,0 МПа, а деформация с 30 до 10%. Снижение механических свойств материала обусловлено агрегацией наночастиц [99].

Как упоминалось ранее, определенной проблемой в металлополимерных подшипниковых узлах является теплоотвод из зоны трущихся деталей из-за низкой теплопроводности полимерных материалов. В таблице 1.6 показана теплопроводность минеральных наполнителей.

Таблица 1.6 – Теплопроводность минеральных наполнителей

№ п/п	Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/м*К
1	Мел	0,8 – 2,2
2	Слюда	0,46 – 0,6
3	Глина	0,1 – 0,2

Как видно из таблицы 1.6 глины обладают наименьшей теплопроводностью из рассматриваемых минеральных наполнителей. В соответствии с правилом смесей наполнение полимерных материалов органоглиной не приведет к повышению теплопроводности нанокомпозитов.

Проведенный анализ применения органоглин в качестве наполнителей нанокомпозита позволяет сделать следующие выводы:

1. Наполнение полимерных материалов органоглиной повышает механические свойства материала: модуль упругости, прочность и деформация. При превышении определенной оптимальной степени наполнения наночастицами органоглины эти свойства снижаются из-за агрегации наночастиц.

2. Вследствие низкой теплопроводности наночастицы органоглины не следует использовать для наполнения полимерных материалов, предназначенных для восстановления посадок подшипников качения.

Нанокомпозиты, наполненные углеродными нанотрубками

Углеродные нанотрубки получают в основном тремя способами: дуговым способом, способом лазерной абляции и пиролизом углеводородов [141].

Благодаря наличию в УНТ двойных углеродных связей наполнение ими полимерной матрицы может приводить к удлинению полимерных цепочек и повышению деформационно-прочностных свойств (таблица 1.7) [142].

Таблица 1.7 – Деформационно-прочностные свойства композитных нитей с различным содержанием УНТ [141, 142]

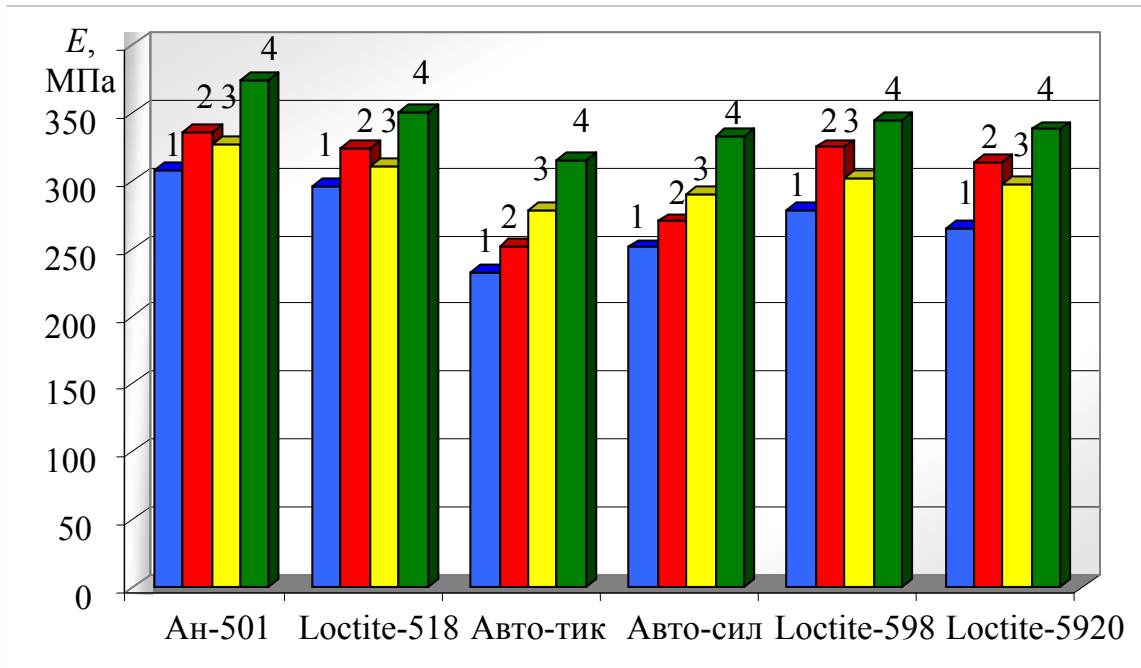
№ п/п	Содержание УНТ в композите, мас.%	0	1	5
1	Прочность при разрыве, МПа	570	620	850
2	Модуль упругости, ГПа	34	41	78

Авторы в работе [99] объясняют повышение модуля упругости и прочности образованием в нанокompозите межфазных слоев с механическими свойствами, отличными от полимерной матрицы. Увеличение деформации нанокompозита объясняется тем, что полимерные цепи вытягиваются на гладкой поверхности нанотрубок и образуют при этом плотноупакованные слои.

В работе Кононенко А.С. [24] исследованы механические и теплофизические свойства полимерных нанокompозитов, наполненных различными наночастицами: УНТ, дисперсные наночастицы оксида алюминия (Бемит), наночастицы серебра.

На рисунке 1.19 показано изменение модуля упругости герметиков, наполненных различными наночастицами. Наполнение наночастицами однозначно повышает, по сравнению с не наполненными герметиками, модуль упругости материалов. Из рисунка видно, что наполнение герметиков УНТ обеспечивает, в сравнении с дисперсными наночастицами, наиболее высокий прирост модуля упругости.

Наполнение анаэробных и силиконовых герметиков наночастицами серебра (НС) и оксида алюминия (Бемит) различным образом повышает модуль упругости нанокompозитов. При введении в анаэробные герметики АН-501, Loctite-518, Loctite-598, Loctite-5920 Бемита формируются нанокompозиты, модуль упругости которых выше модуля упругости анаэробных нанокompозитов, наполненных наночастицами серебра. Наполнение силиконовых герметиков Автогерметик, Автогермесил наночастицами серебра формирует нанокompозиты с модулем упругости выше аналогичного параметра у силиконовых нанокompозитов, наполненных Бемитом.



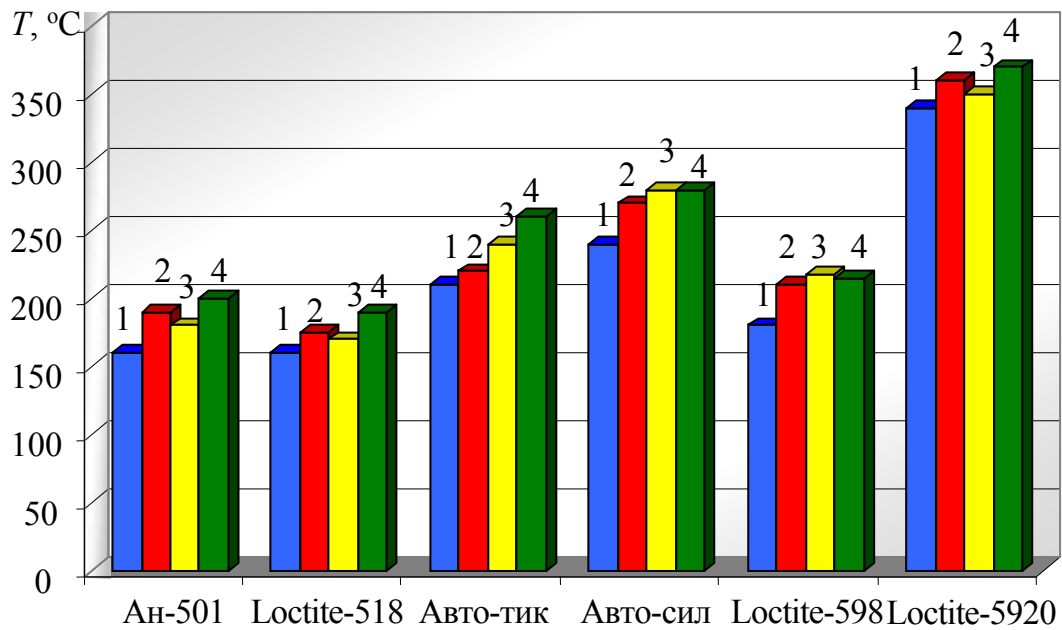
1 – ненаполненный герметик; 2 – герметик + Бемит; 3 – герметик + НС; 4 – герметик + УНТ

Рисунок 1.19 – Влияние наполнителей на модуль упругости E герметиков

[24]

Герметики, после наполнения наночастицами, значительно меняют теплофизические свойства: теплостойкость, теплопроводность. В виду того, что между модулем упругости и теплостойкостью полимерного материала существует корреляция характер изменения теплостойкости нанокомпозиов (рисунок 1.20) подобен изменению модуля упругости (рисунок 1.19).

Максимальную теплостойкость имеют нанокомпозиы, наполненные УНТ. Теплостойкость анаэробных нанокомпозиов, наполненных Бемитом, выше теплостойкости нанокомпозиов с аналогичной матрицей, наполненных НС. Силиконовые нанокомпозиы, наполненные НС, имеют более высокую теплостойкость, чем наполненные Бемитом.

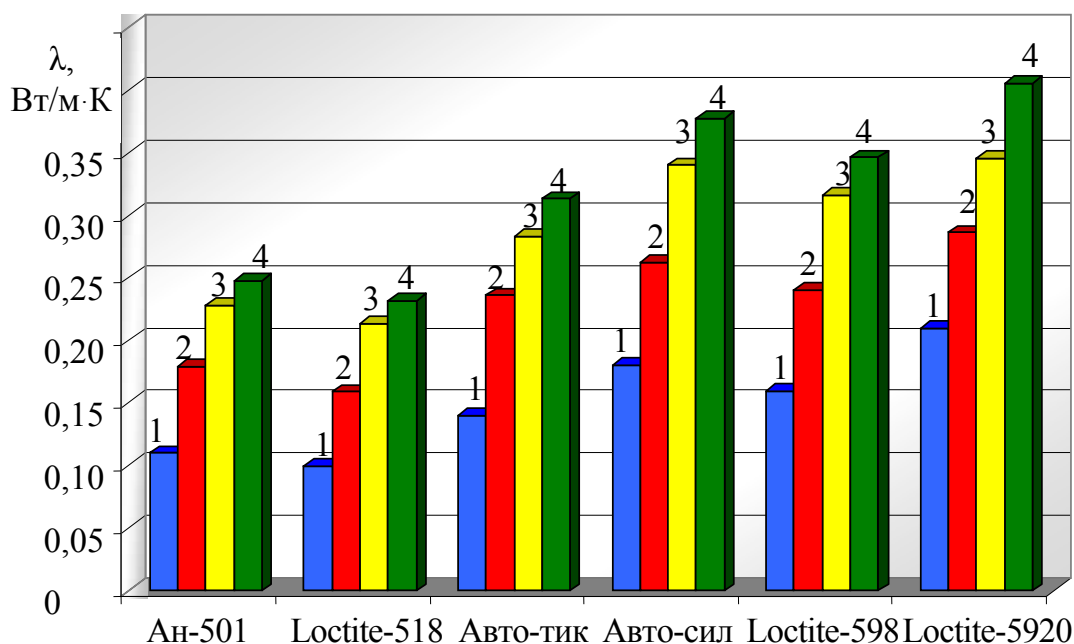


1 – ненаполненный герметик; 2 – герметик + Бемит; 3 – герметик + НС; 4 – герметик + УНТ

Рисунок 1.20 – Влияние наполнителей на теплостойкость T герметиков [24]

На рисунке 1.21 показана теплопроводность герметиков и нанокомпозитов на их основе, наполненных различными наночастицами [24]. Наиболее высокую теплопроводность имеют нанокомпозиты, наполненные УНТ. Это обусловлено тем, что среди рассматриваемых наночастиц, УНТ имеют наиболее уникальный, высокий коэффициент теплопроводности $\lambda_{УНТ} = 6600 \text{ Вт} / \text{м} \times \text{К}$.

Коэффициент теплопроводности наночастиц серебра $\lambda_{НС} = 429 \text{ Вт} / \text{м} \times \text{К}$, а оксида алюминия $\lambda_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 20...25 \text{ Вт} / \text{м} \times \text{К}$ [143]. Поэтому, в соответствии с правилом смесей, теплопроводность наименьшая у нанокомпозитов, наполненных наночастицами Бемита, а нанокомпозиты, наполненные НС, имеют промежуточные значения теплопроводности среди нанокомпозитов.

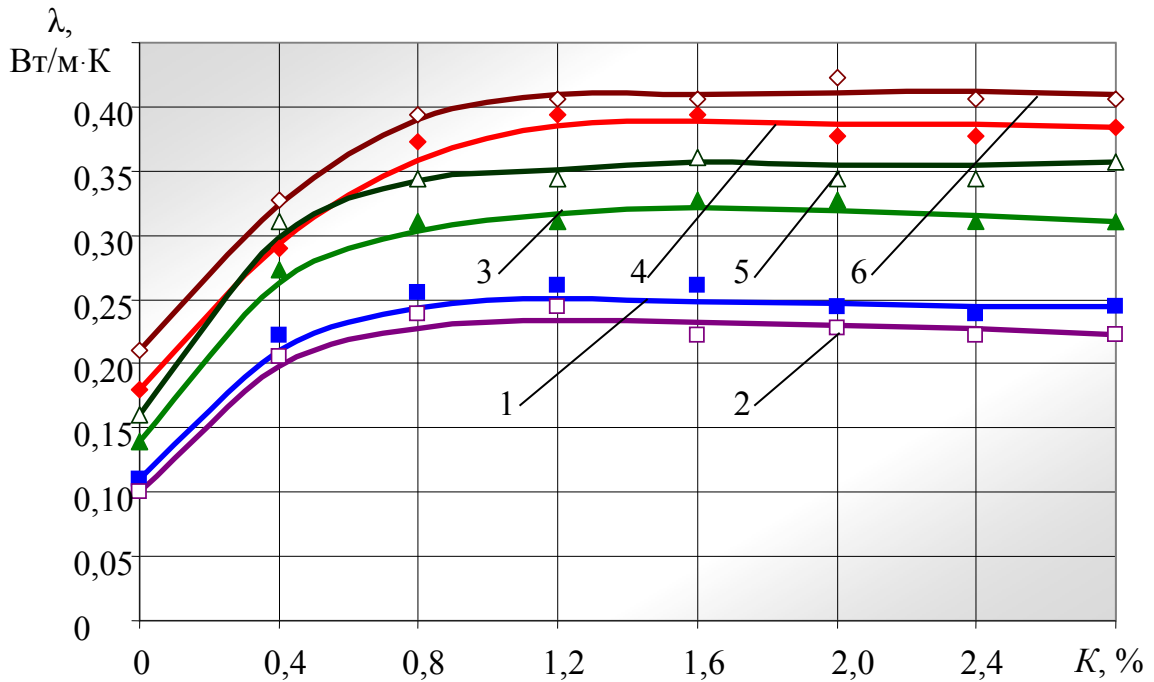


1 – незаполненный герметик; 2 – герметик + бемит; 3 – герметик + НС; 4 – герметик + УНТ

Рисунок 1.21 – Влияние наполнителей на изменение коэффициента теплопроводности λ герметиков [24]

На рисунке 1.22 показаны зависимости коэффициента теплопроводности нанокompозитов от содержания УНТ [24].

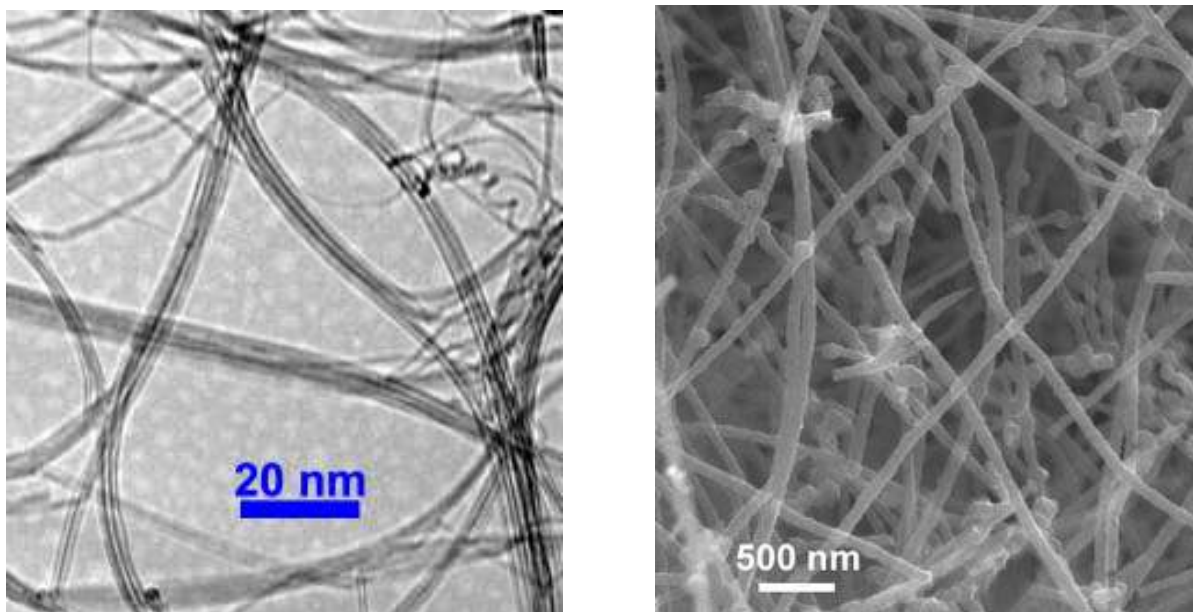
Активный рост теплопроводности у всех нанокompозитов фиксируется с повышением содержания наночастиц до 0,8...1,0 % по массе. У нанокompозитов на основе герметиков Автогермесил и Loctite-5920 теплопроводность повысилась, в сравнении с не заполненными герметиками, в 2,19 и 1,99 раза, Автогерметик и Loctite-598 – в 2,33 и 2,28 раза, Анатерм-501 и Loctite-518 – в 2,4 и 2,38 раза. При повышении содержания УНТ до 2,8 % наблюдается стабилизация и далее не значительное уменьшение теплопроводности.



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

Рисунок 1.22 – Зависимости коэффициента теплопроводности λ герметиков от содержания K УНТ [24]

Однако, столь существенные изменения механических и теплофизических свойств будут получены при однородном заполнении матрицы УНТ. Иначе формируются жгуты, состоящие примерно из сотни плотноупакованных индивидуальных УНТ (рисунок 1.23). Между жгутами с различной пространственной ориентацией в полимерной матрице формируются области, заполненные полимером и пустоты, представляющие собой продольные эллиптические разломы. Для отделения нанотрубок друг от друга суспензию УНТ в этаноле на протяжении 2 ч диспергируют в ультразвуковом поле. Далее суспензию УНТ и эпоксидную смолу подвергают механизированному смешению с последующей термической обработкой в вакууме при температуре 50°C на протяжении 10 ч. На заключительном этапе в смесь добавляют отвердитель и удаляют сорбированный воздух в вакуумной камере в течение 10...15 [141].



1)

2)

1 – индивидуальные (единичные); 2 – переплетение нанотрубок

Рисунок 1.23 – Нанотрубки [141]

Наиболее высокий прирост механических и теплофизических свойств обеспечивает наполнение полимеров углеродными нанотрубками [144-147]. Однако необходимость однородного заполнения полимерной матрицы нанотрубками усложняет и удорожает технологию приготовления и применения нанокompозита по назначению.

Нанокompозиты, наполненные дисперсными наночастицами

В работах [148, 149] авторы исследовали деформационно-прочностные и трибологические свойства 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.

После наполнения ПТФЭ дисперсными наночастицами оксида алюминия, оксида хрома и кордиерита получили нанокompозиты с деформационно-прочностными свойствами близкими к не наполненному полимеру (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Деформационно-прочностные и трибологические свойства ПТФЭ и композитов на его основе [149]

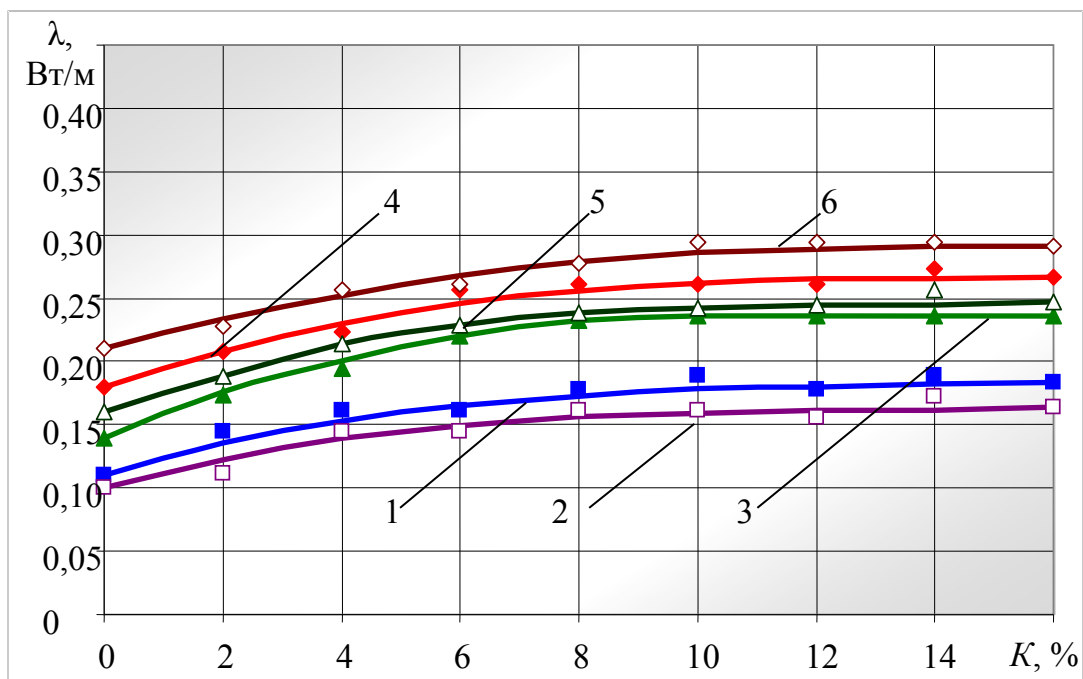
Состав	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Скорость изнашивания, мг/ч	Коэффициент трения
ПТФЭ	20-22	300-320	70-75	0,04
ПТФЭ + кокс	16-18	290-300	12-16	0,15-0,30
ПТФЭ + MoS ₂	18-20	160-180	40-45	0,20-0,30
ПТФЭ + 2 мас.% Al ₂ O ₃	20-25	300-320	0,4-1,2	0,18-0,20
ПТФЭ + 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	4,6-4,8	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

После ввода шпинелей получен нанокompозит с более высокими деформационными свойствами и не значительной прочностью. Остальные нанокompозиты имеют пониженные, по сравнению с матрицей, деформационно-прочностные свойства. Высокая твердость надмолекулярных сферолитов простых и сложных оксидных нанопорошков обеспечивает повышение износостойкости и снижение коэффициента трения нанокompозитов, по сравнению с ПТФЭ, однако применительно к композитам, предназначенным для восстановления посадок подшипников, данные характеристики не являются основными [10, 16, 55, 56].

Более выраженный положительный эффект получен Кононенко при наполнении анаэробных и силиконовых герметиков наночастицами оксида алюминия (Бемитом) [24]. Модуль упругости у всех нанокompозитов, по сравнению с матрицами, однозначно увеличился (рисунок 1.19). Наполнение анаэробных герметиков АН-501, Loctite-518, Loctite-598, Loctite-5920 Бемита формирует нанокompозиты,

модуль упругости которых выше модуля упругости анаэробных нанокомпозитов, наполненных наночастицами серебра. Введение Бемита в анаэробные и силиконовые герметики повышает теплостойкость материала (рисунок 1.20). Теплостойкость нанокомпозитов, наполненных Бемитом, в сравнении с УНТ и НС, была рассмотрена ранее.

Влияние содержания Бемита на теплопроводность нанокомпозитов на основе герметиков показано на рисунке 1.24. С повышением содержания Бемита до 10...11 % по массе у нанокомпозитов на основе герметиков Loctite-5920 и Автогермесил наблюдается плавное увеличение теплопроводности в 1,38 и 1,48 раза соответственно. Далее теплопроводность нанокомпозитов практически не меняется.



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

Рисунок 1.24 – Зависимости КТ λ герметиков от концентрации K бемита

[24]

С повышением содержания Бемита до 9...10 % по массе у нанокомпозитов на основе герметиков Loctite-598 и Автогерметик наблюдается плавное увеличение теплопроводности в 1,54 и 1,68 раза, у нанокомпозитов на основе герметиков Анатерм-501 и Loctite-518 – соответственно 1,66 и 1,64 раза при содержании наполнителя до 8...9 % по массе. Далее теплопроводность нанокомпозитов практически не меняется.

Таким образом, в сравнении с УНТ и дисперсными металлическими наночастицами, дисперсные наночастицы оксидов металлов обеспечивают наименьший прирост металлических и теплофизических свойств полимеров (их применение можно считать допустимым, но не предпочтительным).

Методы получения наночастиц металлов представлены на рисунке 1.25 [90, 99, 102, 141, 150-152].

Влияние содержания НС на теплопроводность нанокомпозитов на основе герметиков показано на рисунке 1.26.

С повышением содержания НС до 2,0 % по массе у нанокомпозитов на основе герметиков Loctite-5920 и Автогермесил наблюдается плавное увеличение теплопроводности в 1,68 и 1,92 раза соответственно. С повышением содержания НС до 1,6...2,0 % по массе у нанокомпозитов на основе герметиков Loctite-598 и Автогерметик наблюдается плавное увеличение теплопроводности в 2,0 и 2,05 раза, у нанокомпозитов на основе герметиков Анатерм-501 и Loctite-518 – соответственно 2,12 и 2,2 раза. Далее теплопроводность нанокомпозитов практически не меняется.

Наполнение эластомеров металлическими наночастицами не однозначно влияет на термостойкость композиций, которая зависит в этом случае от вида металла наночастиц и каучука входящего в состав эластомера [153]. Один и тот же металл для одних каучуков является катализатором, а для других – ингибитором термоокисления полимера.

Поэтому необходимы исследования и обоснование выбора дисперсных металлических наночастиц, которые обеспечат повышение термостойкости нанокомпозитов на основе эластомеров Ф-40 и Ф-40С.

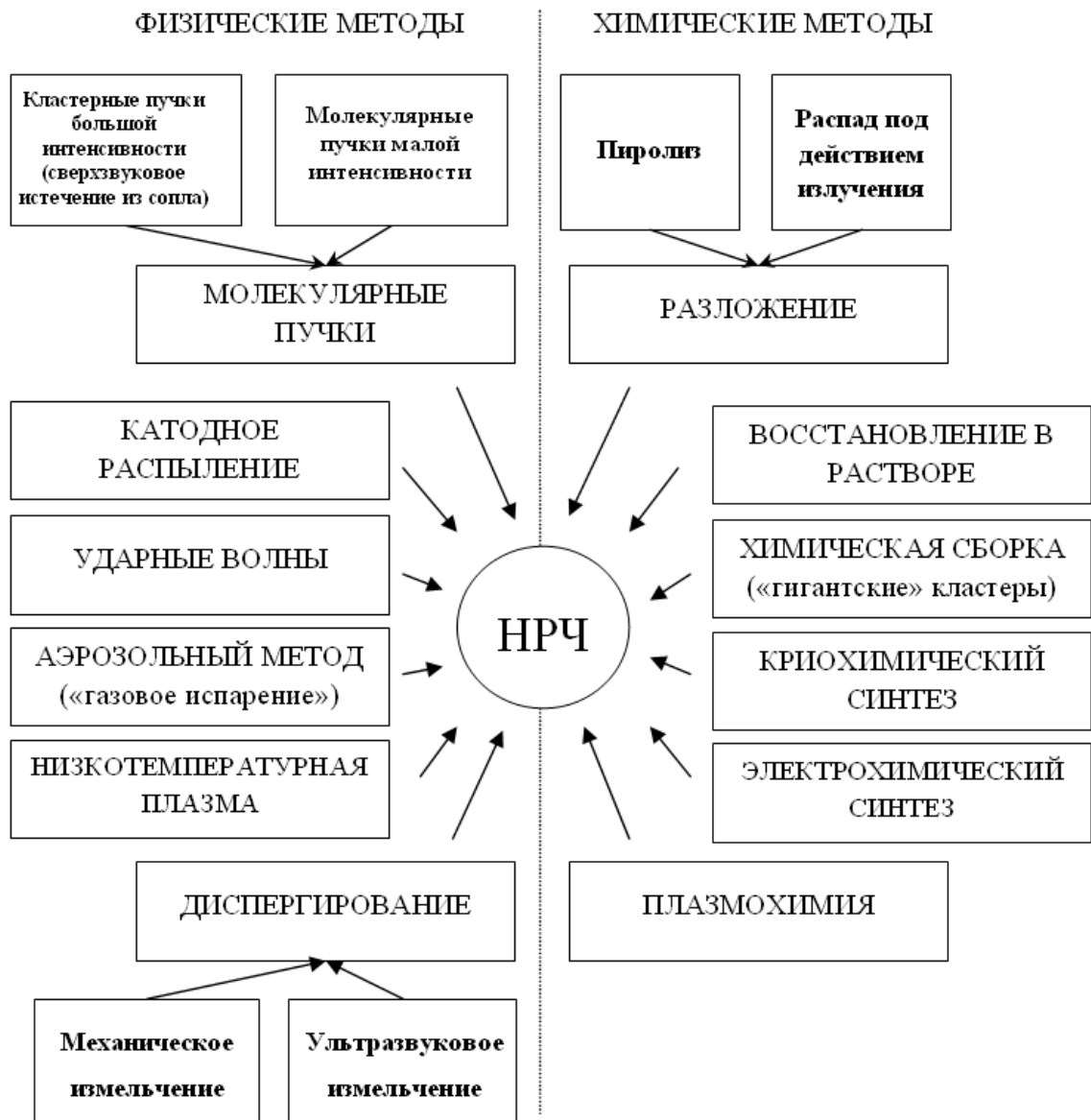
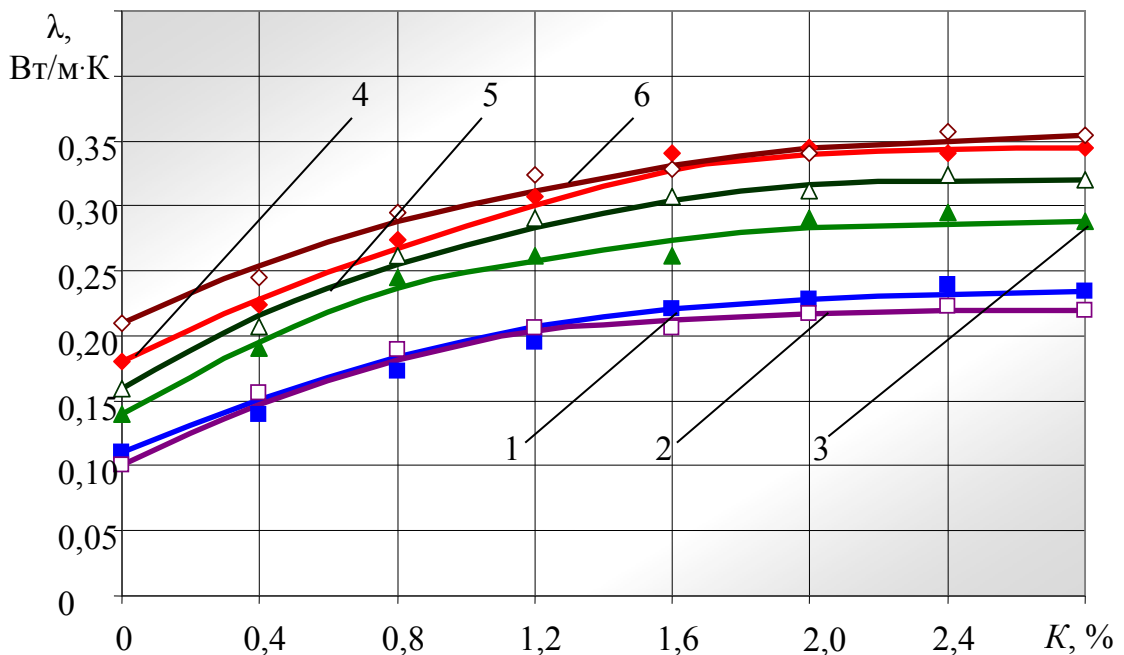


Рисунок 1.25 – Способы получения наноразмерных частиц металлов [150]

Наноразмерные частицы, благодаря высокой активности поверхности, склонны к агрегированию. Агрегаты частиц существенно ухудшают механические и теплофизические свойства полимерных композитов. Дисперсные металлические наночастицы, в сравнении с УНТ, благодаря своей форме лучше диспергируются. Значительный положительный эффект достигается при относительно простых методах обработки: механизированном и ультразвуковом диспергировании [24, 154-156]. Поэтому наиболее перспективными для наполнения реактопластов и эластомеров являются дисперсные металлические наночастицы.



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

Рисунок 1.26 – Зависимости коэффициента теплопроводности λ герметиков от концентрации K НС [24]

Выводы

1. Перспективным направлением в повышении эффективности композитов является использование наночастиц в качестве наполнителей. Наноразмерные наполнители значительно повышают механические и теплофизические свойства материала. Представляют научный и практический интерес исследования и разработка новых, перспективных нанокомпозитов на основе реактопластов и эластомеров, которые позволят повысить эффективность восстановления посадок подшипников качения на деталях типа «вал» и корпусных деталях сельскохозяйственной техники.

2. В настоящее время активно развивается теория усиления полимерных нанокомпозитов на основе теории перколяции и фрактального анализа структуры наночастиц наполнителя и структуры нанокомпозита. Представляют научный и

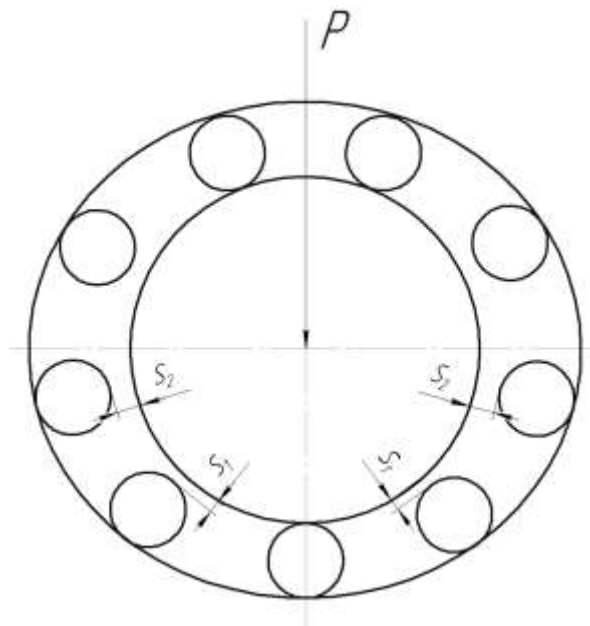
практический интерес теоретические исследования механических свойств, оценки прочности полимерных нанокомпозитов на основе фрактального анализа. Требуется всестороннее исследование вопроса пригодности традиционных формул для оценки теплопроводности полимерных нанокомпозитов, разработки метода расчета теплопроводности полимерных нанокомпозитов.

3. Наиболее высокий прирост механических и теплофизических свойств обеспечивает наполнение полимеров углеродными нанотрубками. Однако необходимость однородного заполнения полимерной матрицы нанотрубками усложняет и удорожает технологию приготовления и применения нанокомпозита по назначению.

4. Дисперсные металлические наночастицы, в сравнении с УНТ, благодаря своей форме лучше диспергируются. Значительный положительный эффект достигается при относительно простых методах обработки: механизированном и ультразвуковом диспергировании. Поэтому наиболее перспективными для наполнения реактопластов и эластомеров являются дисперсные металлические наночастицы и представляют большой научный и практический интерес исследования влияния нанопорошков из металлов на механические и теплофизические свойства нанокомпозитов на основе реактопластов и эластомеров.

1.3 Контактные напряжения и долговечность подшипниковых узлов, с посадками восстановленными полимерными материалами

«Формирование трибологических параметров и напряжений в зоне контакта нагруженных тел с дорожками качения в подшипнике в значительной мере определяется деформацией колец подшипника» [157] при его нагружении [158] (рисунок 1.27).



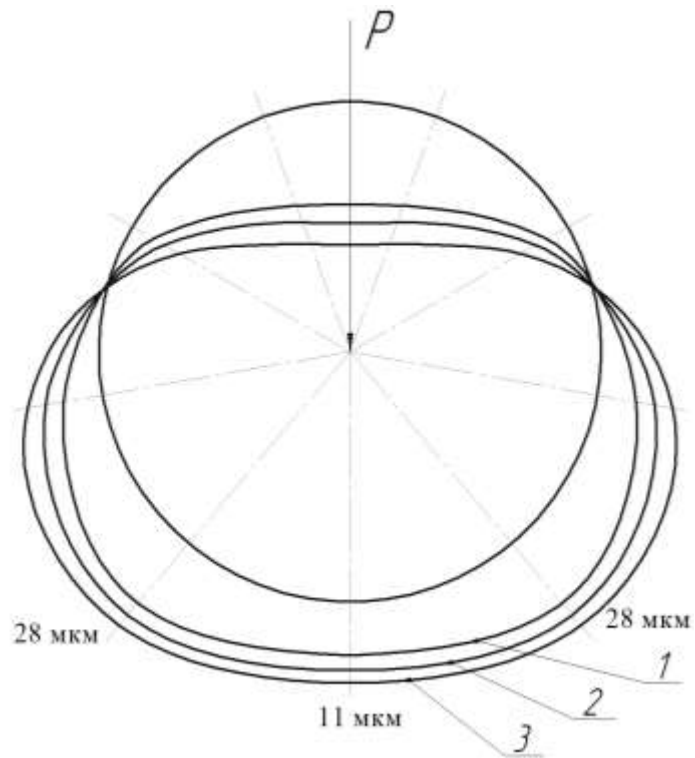
S_1, S_2 – зазоры между внутренним кольцом и боковыми телами качения
 Рисунок 1.27 – Деформация наружного кольца подшипника при радиальной нагрузке при посадке в корпус с зазором

На рисунке 1.28 показана деформация наружного кольца подшипника под действием радиальной нагрузки при посадках с зазором и натягом [10, 17, 63].

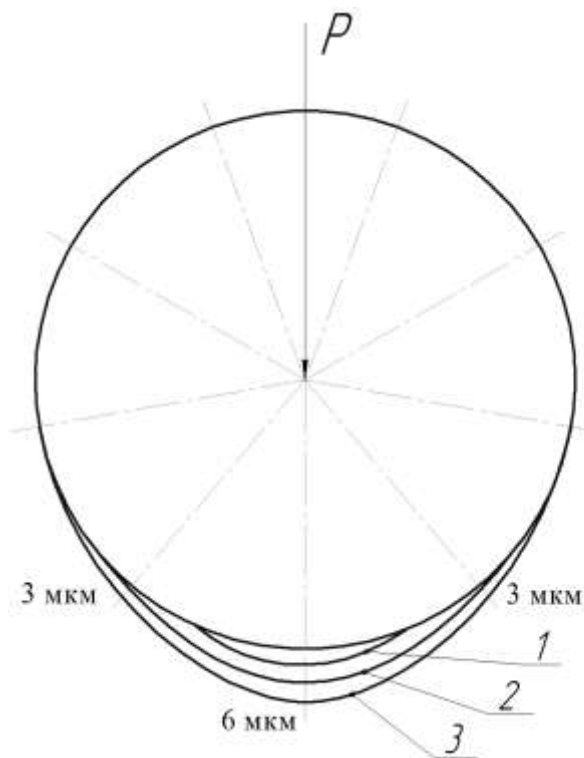
В подшипнике с посадкой с зазором 0,395 мм под действием радиальной нагрузки 9 кН деформация наружного кольца составляет 7 мкм (рисунок 1.28, а). С повышением нагрузки до 12 и 15 кН деформация кольца увеличивается и составляет 9 и 11 мкм соответственно.

В подшипнике с посадкой с натягом 0,005 мм деформация наружного кольца под действием радиальной нагрузки существенно меньше (рисунок 1.28, б). В сравнении с посадкой с зазором 0,395 мм деформация кольца уменьшилась в 3,5 раза. С повышением нагрузки до 12 и 15 кН деформация кольца увеличивается и составляет 4 и 6 мкм соответственно. В сравнении с посадкой с зазором 0,395 мм деформация кольца уменьшилась в 2,25 и 1,83 раза соответственно.

Различный характер деформации наружного кольца при посадках с зазором и натягом обуславливает отличие в распределении нагрузки между телами качения в подшипнике (рисунок 1.29).



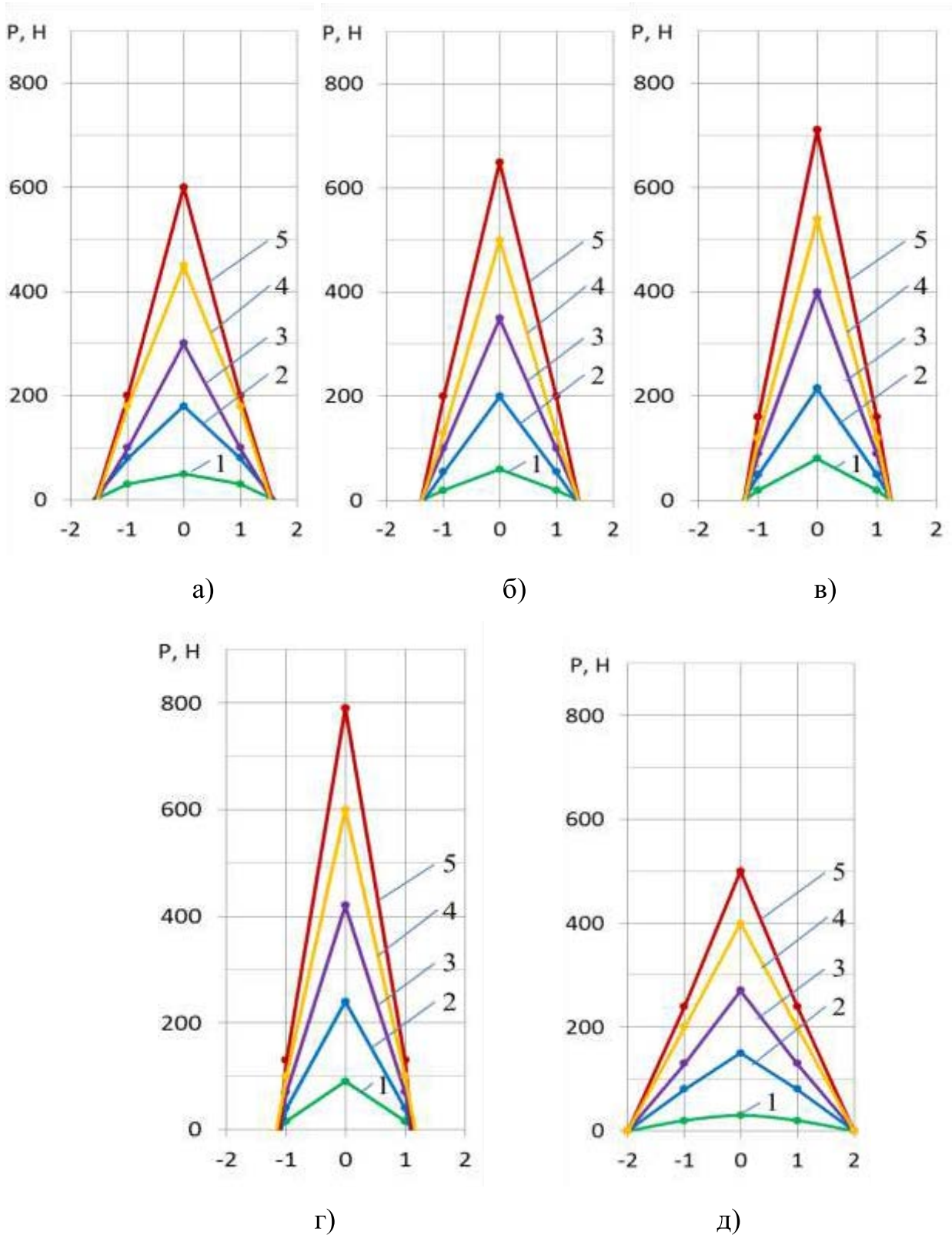
а)



б)

1, 2, 3 – нагрузка на подшипник 9, 12 и 15 кН, соответственно

Рисунок 1.28 – Деформация наружного кольца подшипника 208 при посадке с зазором 0,395 мм (а) и натягом 0,005 мм (б) [17]

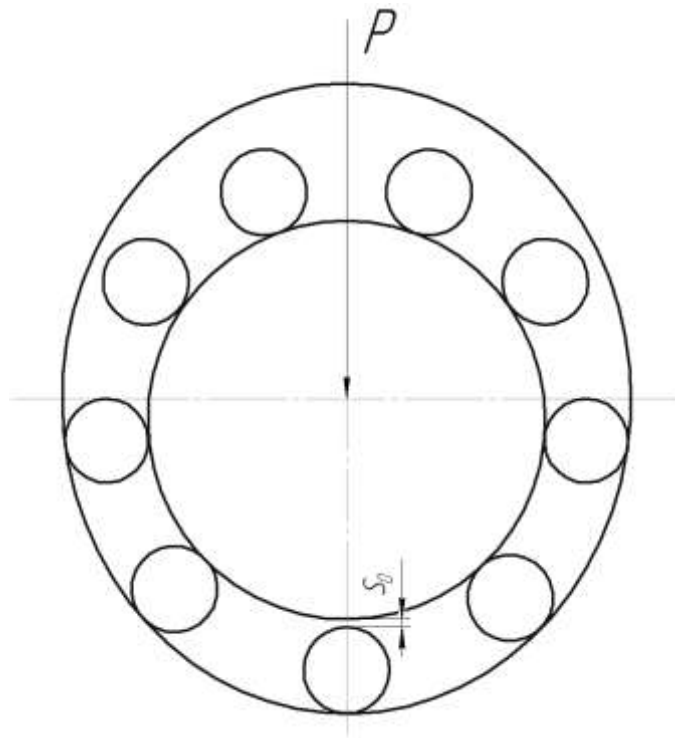


1, 2, 3, 4, 5 – радиальная нагрузка на подшипник 143, 406, 619, 831, 1044Н;
 0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения;

Рисунок 1.29 – Распределение нагрузки между телами качения при посадках с зазором 0,057 (а), 0,123 (б), 0,236 (в), 0,335 мм (г) и натягом 0,005мм (д) [10, 17]

Нагруженность центрального тела качения, в сравнении с подшипником с посадкой с зазором, ниже. Разница в меньшую сторону с подшипниками с посадкой с зазором 0,057; 0,123; 0,236 и 0,335мм составляет 90, 140, 200 и 270 Н соответственно.

Наружное кольцо подшипника с полимерной посадкой под воздействием радиальной нагрузки деформируется в виде эллипса, с большой осью совпадающей с направлением нагрузки (рисунок 1.30). При такой деформации происходит более «ранняя выборка зазоров между боковыми телами и дорожкой качения в сравнении с посадкой подшипника, что приводит к снижению нагрузки на центральное тело и увеличению нагрузки на боковые тела качения» [56].

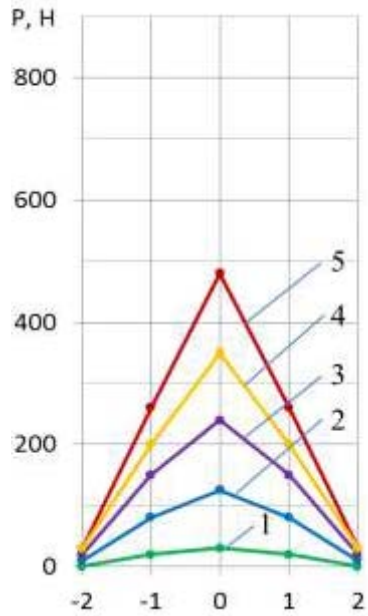


S_0 – зазор между внутренним кольцом и центральным телом качения

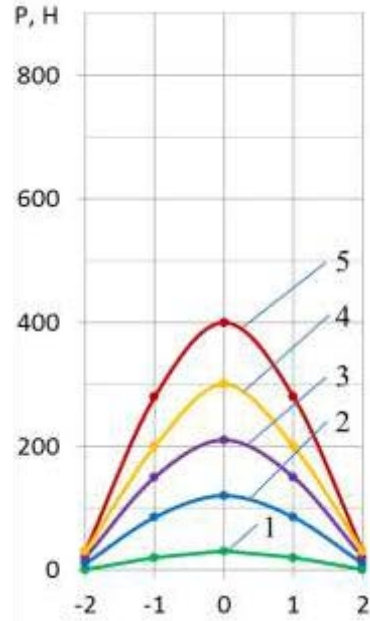
Рисунок 1.30 – Деформация наружного кольца подшипника при радиальной нагрузке с посадкой, восстановленной полимерным материалом

«С увеличением толщины полимерного покрытия нагрузка на центральное тело уменьшается, а на боковые тела качения увеличивается в большей степени»

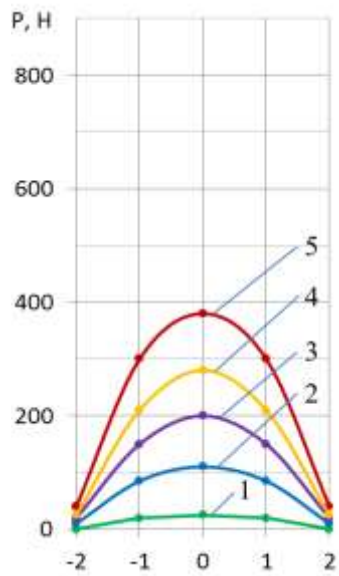
[2] (рисунок 1.31). То есть имеет место перераспределение радиальной нагрузки с центрального тела на боковые тела качения.



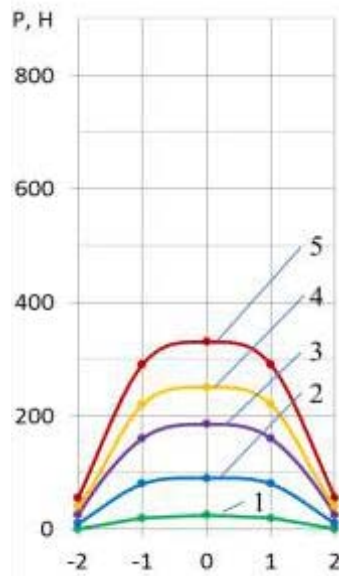
а)



б)



в)

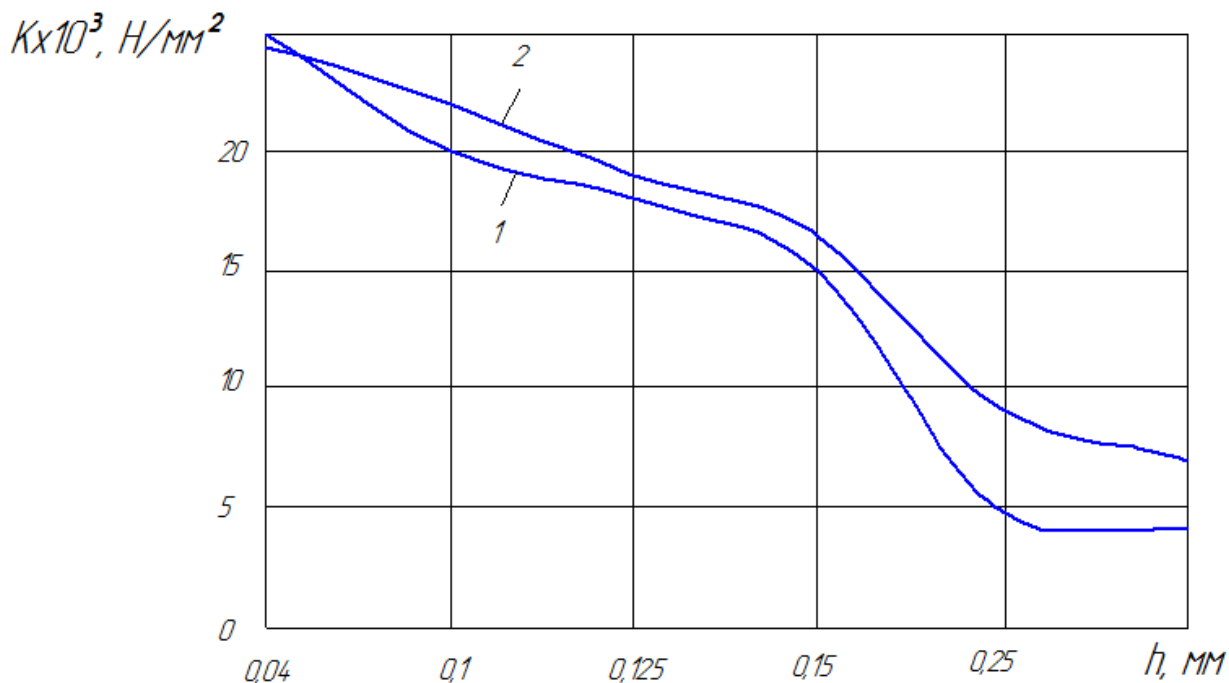


г)

1, 2, 3, 4, 5 – радиальная нагрузка на подшипник 143, 406, 619, 813, 1044 Н;
0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения.

Рисунок 1.31 – Распределение нагрузки между телами качения при толщине полимерного покрытия 0,053 (а), 0,098 (б), 0,139 (в) и 0,182мм (г) [63]

Характер распределения нагрузки между телами качения зависит от коэффициента постели (рисунок 1.32). Чем он меньше, тем больше деформация кольца подшипника [25].



1, 2 – подложка из герметика 6Ф и ВК-50

Рисунок 1.32 – Коэффициент постели K при различной толщине полимерной подложки h на стальных пластинах [25]

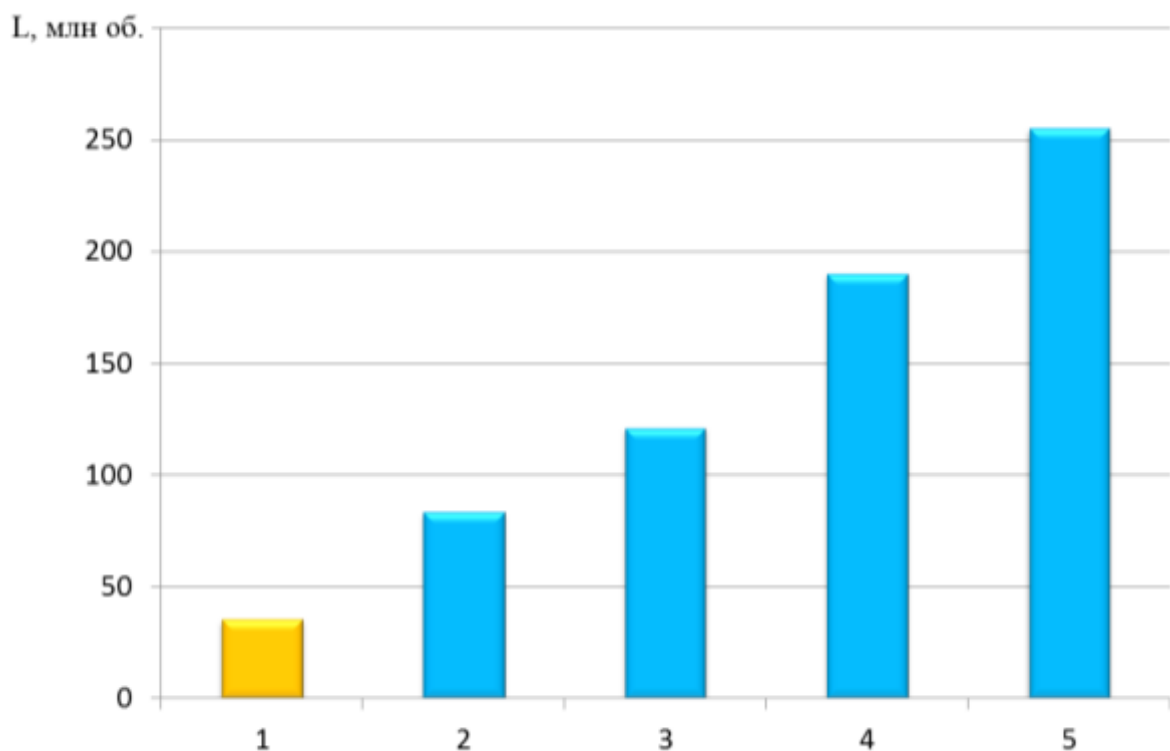
Между долговечностью подшипника и нагрузкой на центральное тело качения установлена следующая зависимость [63]

$$L = \frac{\left(\frac{C}{z}\right)^{3,33} * \frac{1}{n}}{P_0^{3,33}}, \quad (1.6)$$

где C – коэффициент работоспособности подшипника; n – частота вращения подшипника; z – число тел качения; P_0 – нагрузка на наиболее нагруженное тело качения.

«Благодаря степени 3,33, не значительное уменьшение нагрузки на центральное тело качения приведет к существенному увеличению ресурса подшипника» [16]. Поэтому перераспределение нагрузки с центрального тела на боковые тела качения является причиной повышения ресурса подшипника с полимерной посадкой.

На рисунке 1.33 показаны результаты стендовых испытаний на долговечность подшипников качения с восстановленными посадками из различных полимеров. Из рисунка следует, что ресурс подшипников с полимерной посадкой многократно превышает ресурс стандартного подшипника: от 2,4 (посадка из герметика АН-6К) до 7,3 раз (посадка из герметика 6Ф).



1 – расчетная; 2 – герметик АН-6К; 3 – герметик АН-103; 4, 5 – герметик 6Ф при толщине 0,14 и 0,18мм соответственно

Рисунок 1.33 – Долговечность подшипников качения L с посадками, восстановленными различными полимерными материалами при местном нагружении наружного кольца [63]

Профессором Ли Р.И. [24] установлены две причины повышения ресурса подшипника с полимерной посадкой: «повышение коэффициента распределения нагрузки и уменьшение контактных напряжений» [159].

В подшипнике с полимерной посадкой под действием радиальной нагрузки происходит не только перераспределение нагрузки между телами качения. «Под действием радиальной нагрузки в подшипнике деформация поверхности дорожки качения наружного кольца больше, чем в стандартном подшипнике» [157]. По этой причине площадь пятна контакта шарика с поверхностью беговой дорожки увеличивается, благодаря чему снижаются контактные напряжения (рисунок 1.34).

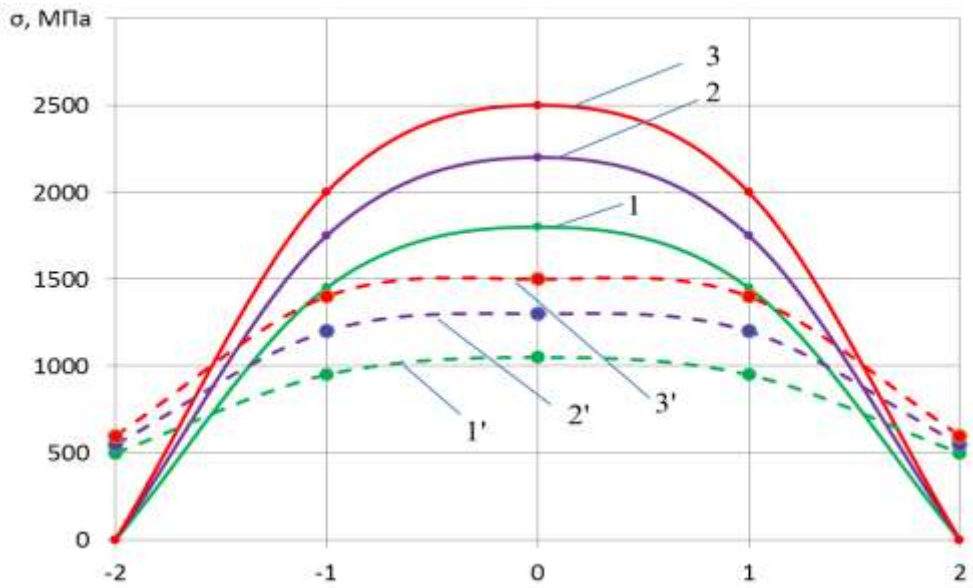
Между ресурсом подшипника и контактными напряжениями существует зависимость [25]

$$L \approx \frac{1}{\sigma^6} \quad (1.7)$$

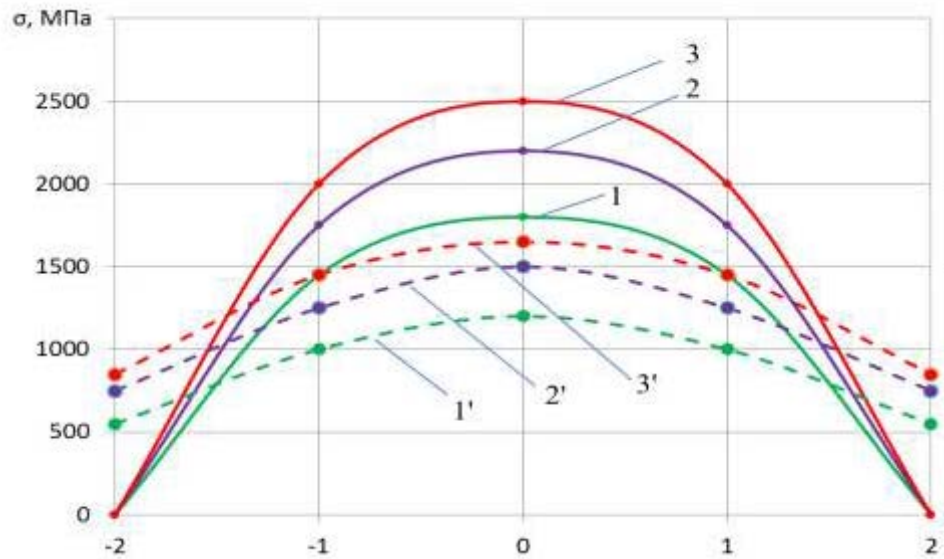
«Стендовыми испытаниями установлено, что ресурс подшипника с посадкой из герметика 6Ф, составляет 220 млн об., что в 5,4 раза больше расчетного, с посадкой, из ВК-50 составляет 168 млн об., что в 4,1 раза выше расчетного» [157] (рисунок 1.35).

Исследования Мироненко А.В. [49, 160-162] показали, что «увеличение толщины покрытия композита АН-110 от 0,05 до 0,15 мм уменьшает коэффициент податливости упругого основания от 180,4 до 62,3 Н/мм³» [49], т.е. в 2,9 раза [162].

На рисунке 1.36 показано распределение нагрузки между телами качения в стандартном подшипнике и подшипнике с посадкой из композита АН-110. Увеличение натяга посадки приводит к повышению равномерности распределения нагрузки (рисунок 1.36, б).



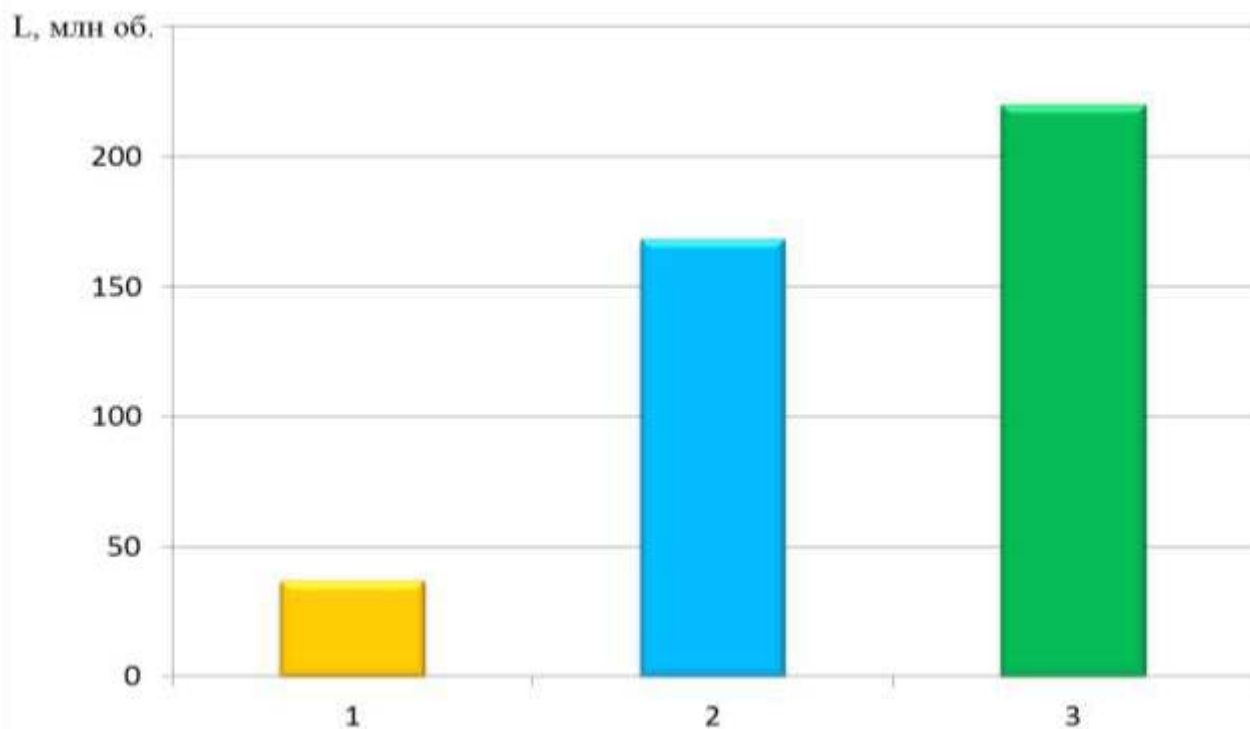
а)



б)

0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения;
 1, 2, 3 – напряжения в стандартном подшипнике под радиальной нагрузкой
 $P = 3479$; 6958 и 10437Н; 1', 2', 3' – напряжения в подшипнике с полимерным
 покрытием при $P = 3479$; 6958 и 10437Н

Рисунок 1.34 – Контактные напряжения в шарикоподшипнике 205 с посадкой, восстановленной герметиком 6Ф (а) и адгезивом ВК-50 (б) [18]



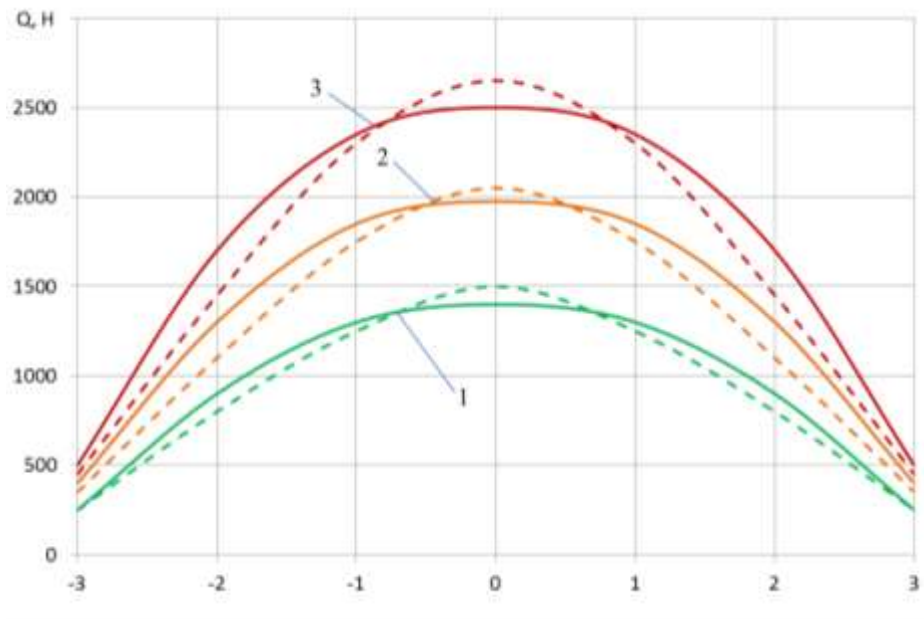
1 – расчетный ресурс; 2 – покрытие из клея ВК-50 толщиной 0,09 мм; 3 – покрытие из эластомера 6Ф толщиной 0,125 мм

Рисунок 1.35 – Ресурс L подшипника 205 с посадкой, восстановленной полимерными материалами при местном нагружении наружного кольца [18, 63]

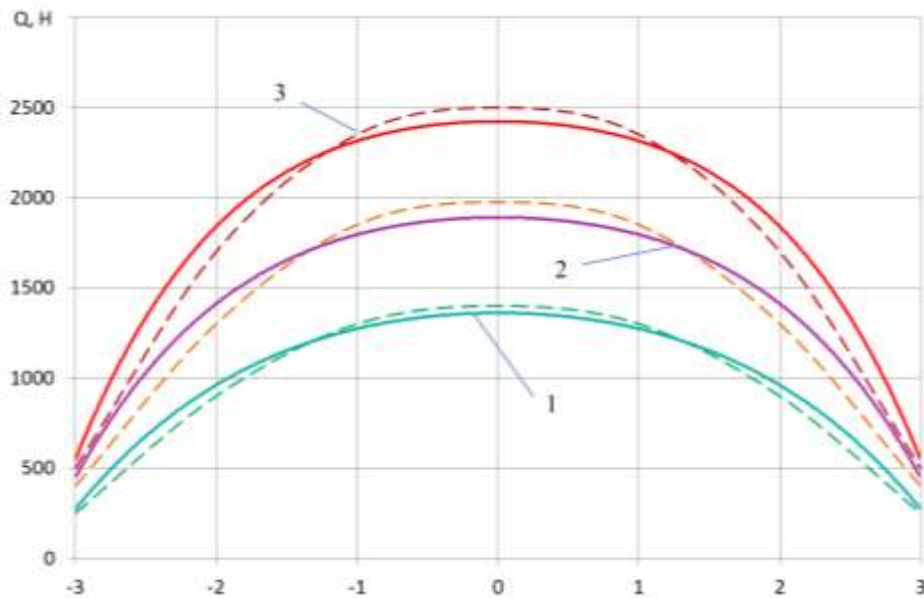
На рисунке 1.37 показана зависимость ширины пятна контакта ролика с дорожкой качения от нагрузки на ролик. В подшипнике 42209 с посадкой из композита АН-110 ширина пятна контакта, в сравнении со стандартным и подшипником, выше в зависимости от нагрузки на ролик в 1,05...1,07 раза.

Благодаря упругой подложке, наружное кольцо роликоподшипника под действием радиальной нагрузки деформируется, что приводит к увеличению ширины и, соответственно площади пятна контакта ролика с дорожкой качения.

Уменьшение нагрузки на центральное тело качения и увеличение площади пятна контакта снижает контактные напряжения. В подшипнике с полимерной посадкой, напряжения в зоне контакта центрального ролика с дорожкой качения, снизились до 17...18%.



а)



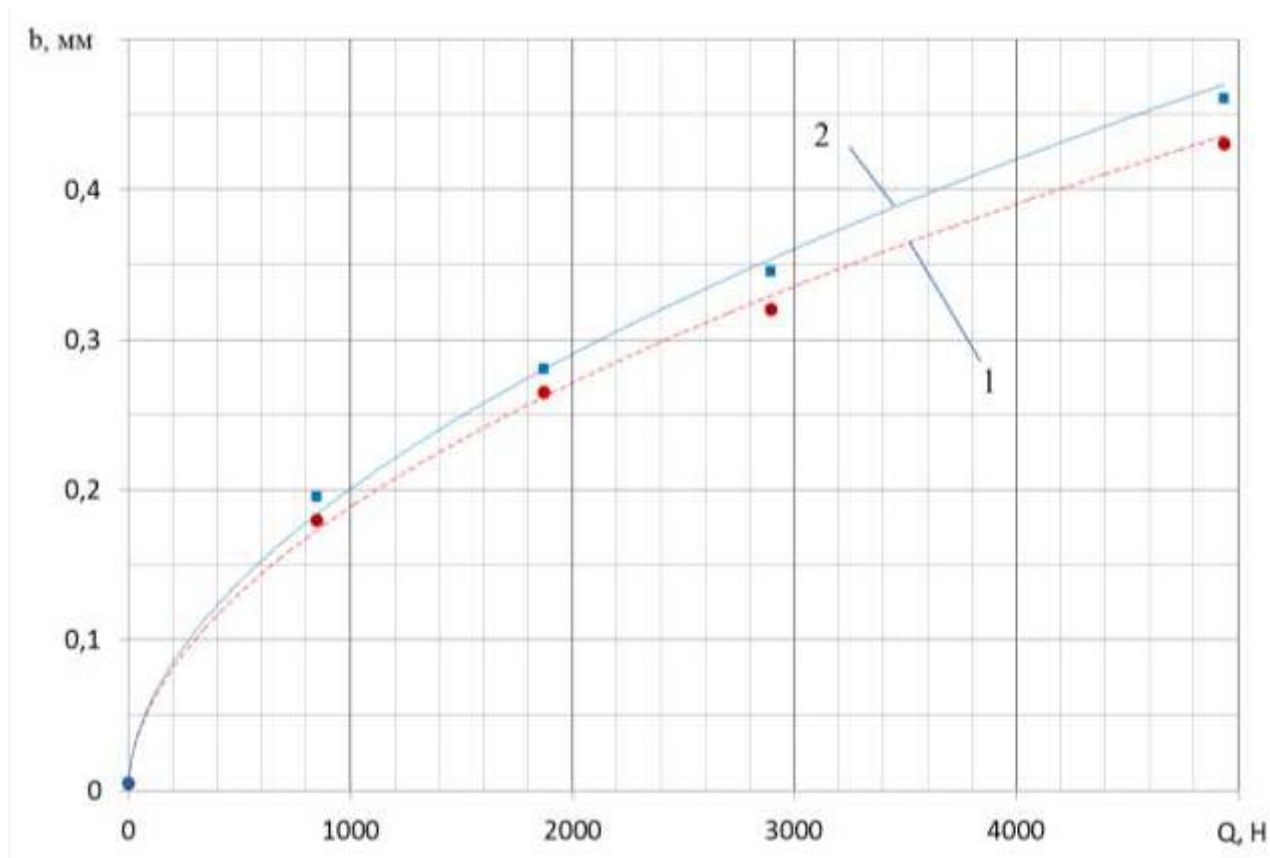
б)

а) стандартный подшипник (пунктирные линии) и подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм (сплошные линии);

б) подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 0,015 мм (пунктирные линии) и 0,04 мм (сплошные линии);

0; ± 1 ; ± 2 ; ± 3 – центральное, первые, вторые и третьи боковые тела качения соответственно

Рисунок 1.36 – Распределение нагрузки между телами качения при радиальной нагрузке 4940Н (1), 6980Н (2) и 9010Н (3) [162]



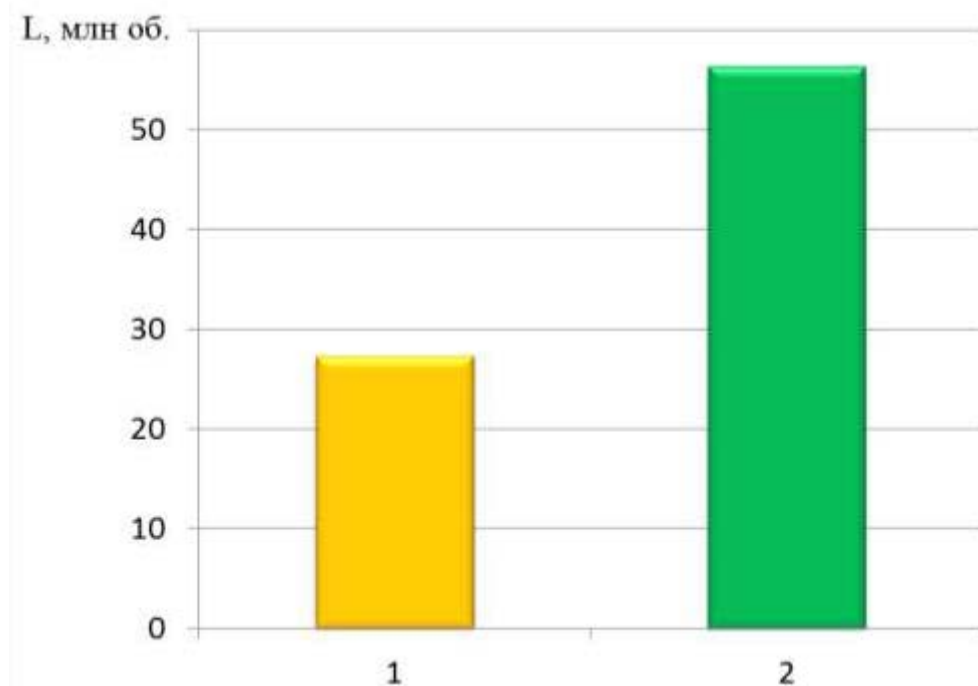
1 – стандартный подшипник; 2 – подшипник с полимерным покрытием

Рисунок 1.37 – Зависимость ширины пятна контакта b между телом и дорожкой качения наружного кольца подшипника 42209 от нагрузки Q на тело качения [49]

В ходе стендовых испытаний [49] установлено, что ресурс роликоподшипников с посадкой из нанокompозита АН-110 увеличился до 2,1 раза по сравнению с расчетным (рисунок 1.38).

В работе Кузнецова М.М. [159] «исследованы распределение нагрузки между телами качения, параметры контакта нагруженных тел с дорожками качения, долговечность подшипников с клеевыми соединениями «вал-подшипник» [159] (рисунки 1.39 и 1.40).

Исследованиями установлено однозначное увеличение долговечности (рисунки 1.41, 1.42, 1.43 и 1.44).



1 – стандартный подшипник; 2 – подшипник с полимерным покрытием из композиции на основе акрилового адгезива АН-110

Рисунок 1.38 – Долговечность подшипника 42209 при радиальной нагрузке 13070 Н [49]

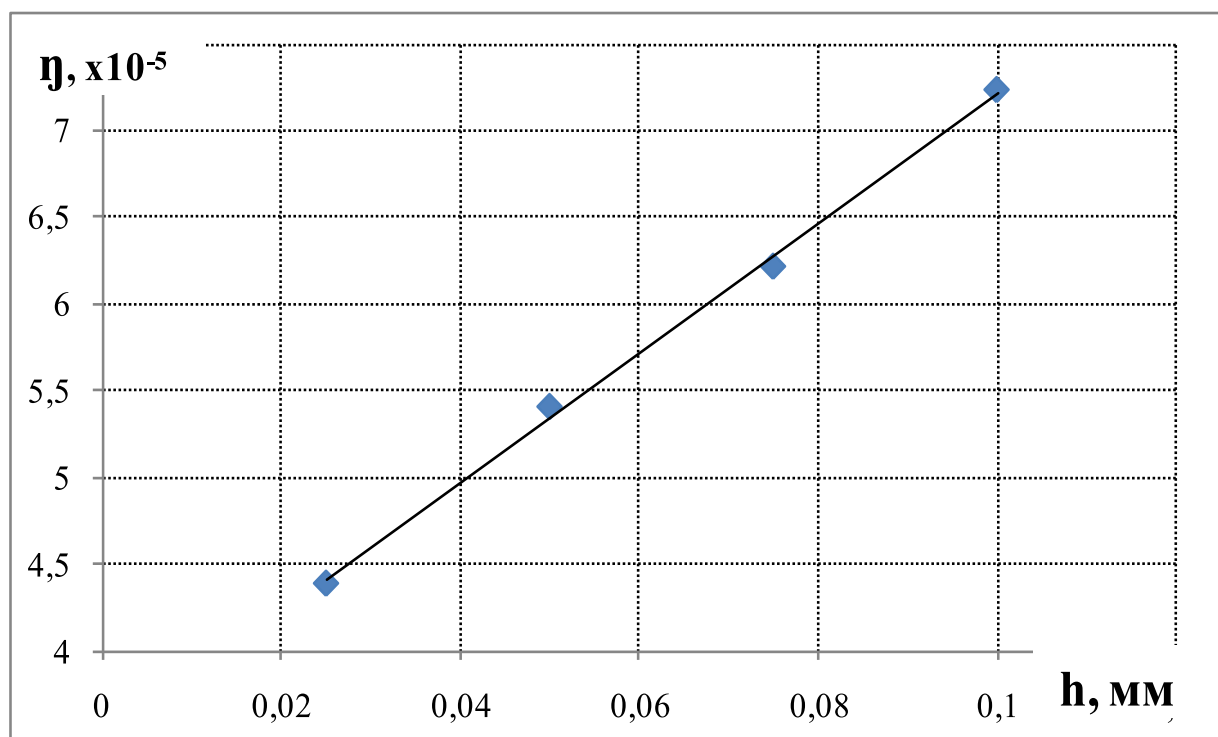


Рисунок 1.39 – Зависимость коэффициента Кирхгофа η от толщины полимерной подложки h адгезива ТК-200 [159]

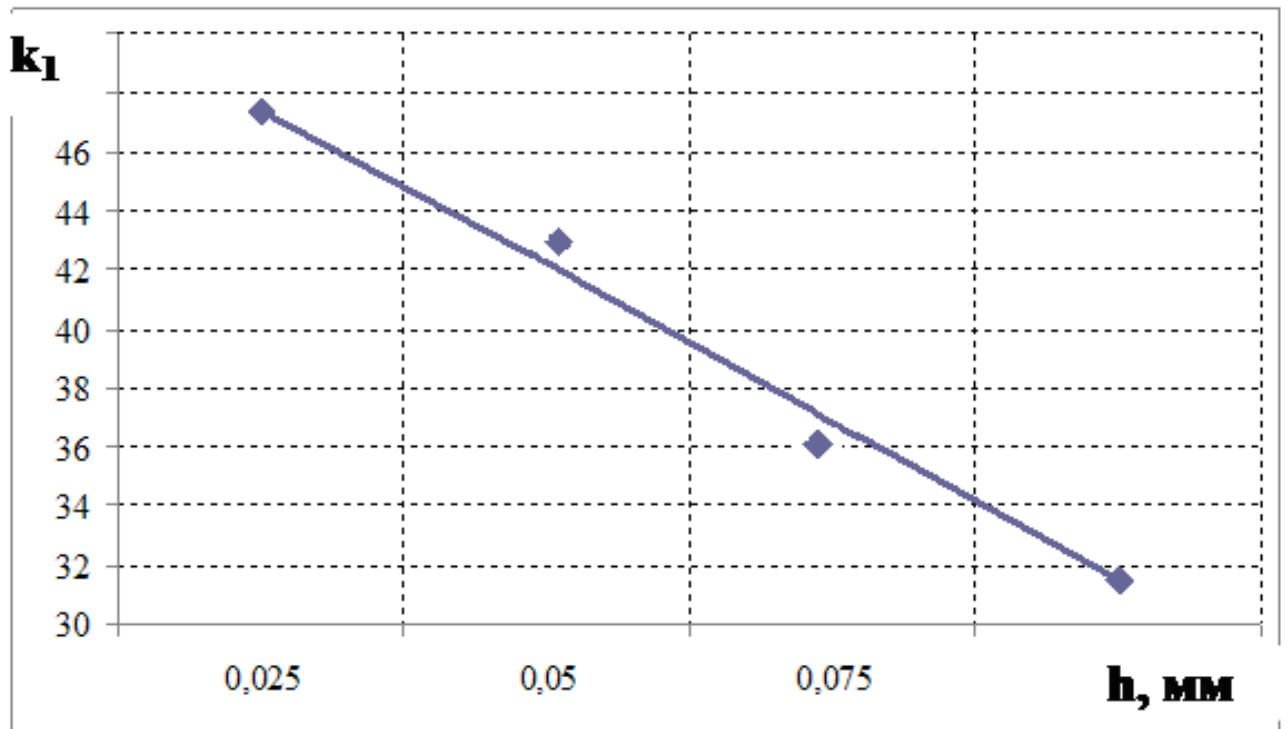
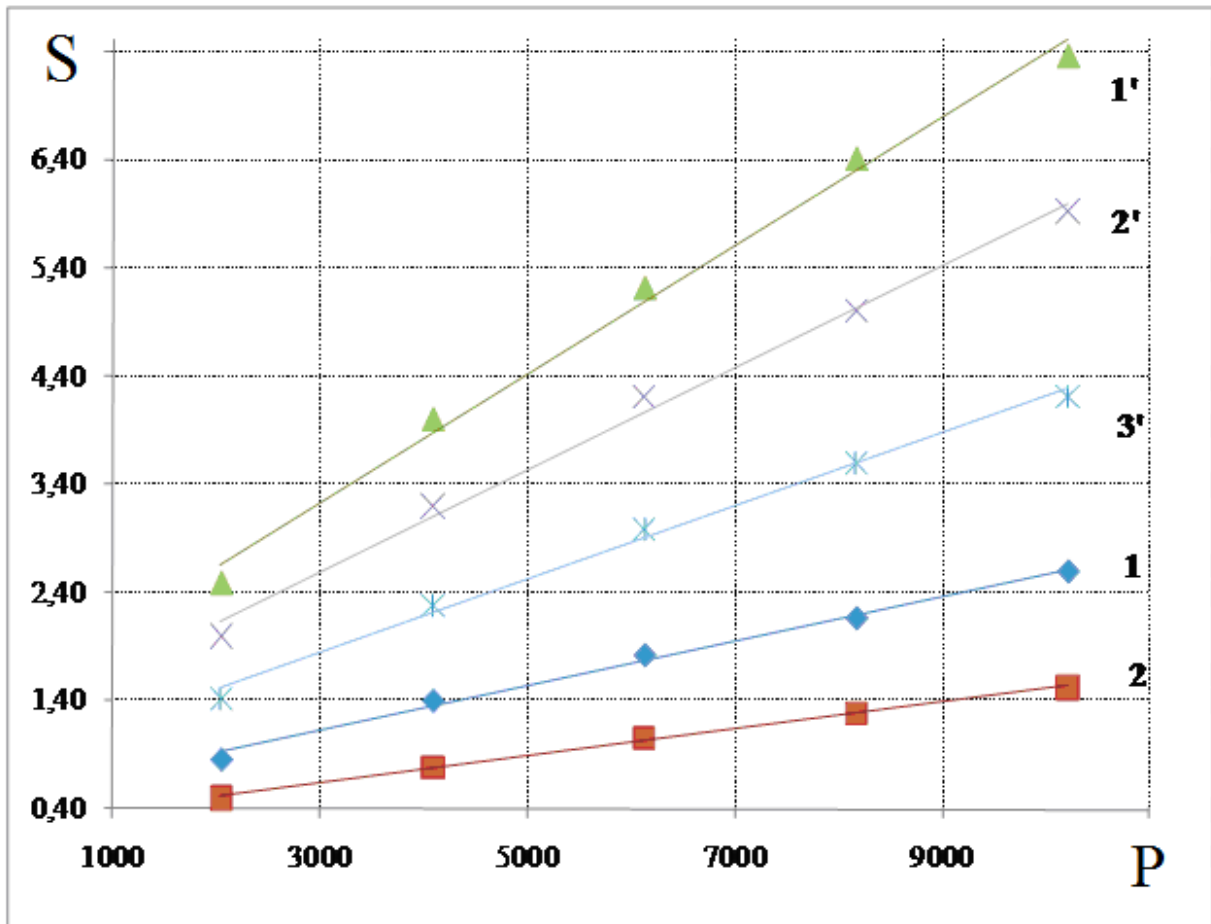


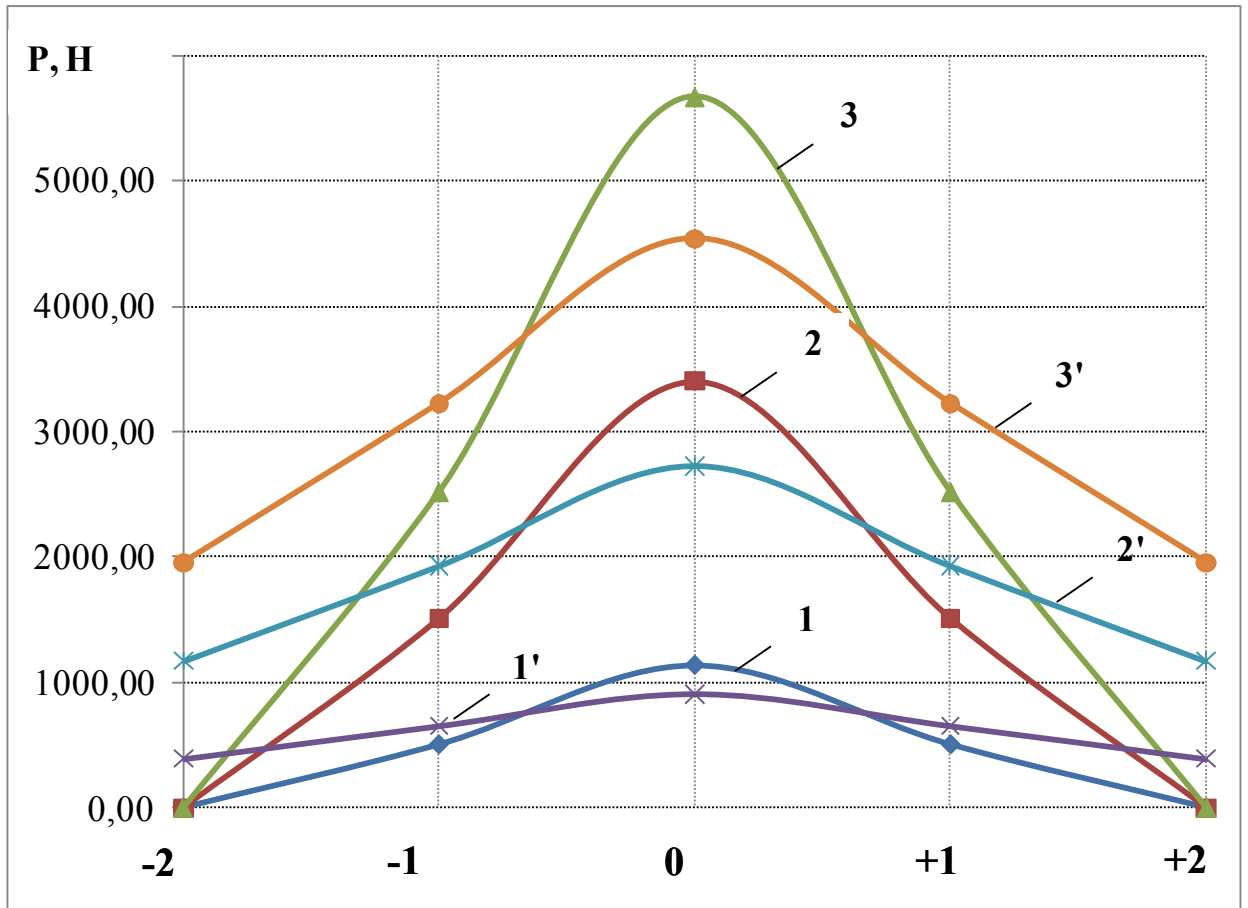
Рисунок 1.40 – Зависимость коэффициента податливости упругого основания k_1 от толщины полимерной подложки h адгезива ТК-200 [159]

Таким образом, наличие полимерного слоя в сопряжении «вал-подшипник» или «корпус-подшипник» снижает контактные напряжения при нагружении подшипника и повышает многократно ресурс подшипников. Исследования трибологических параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадками, восстановленными полимерными нанокомпозитами, представляют научный и практический интерес.



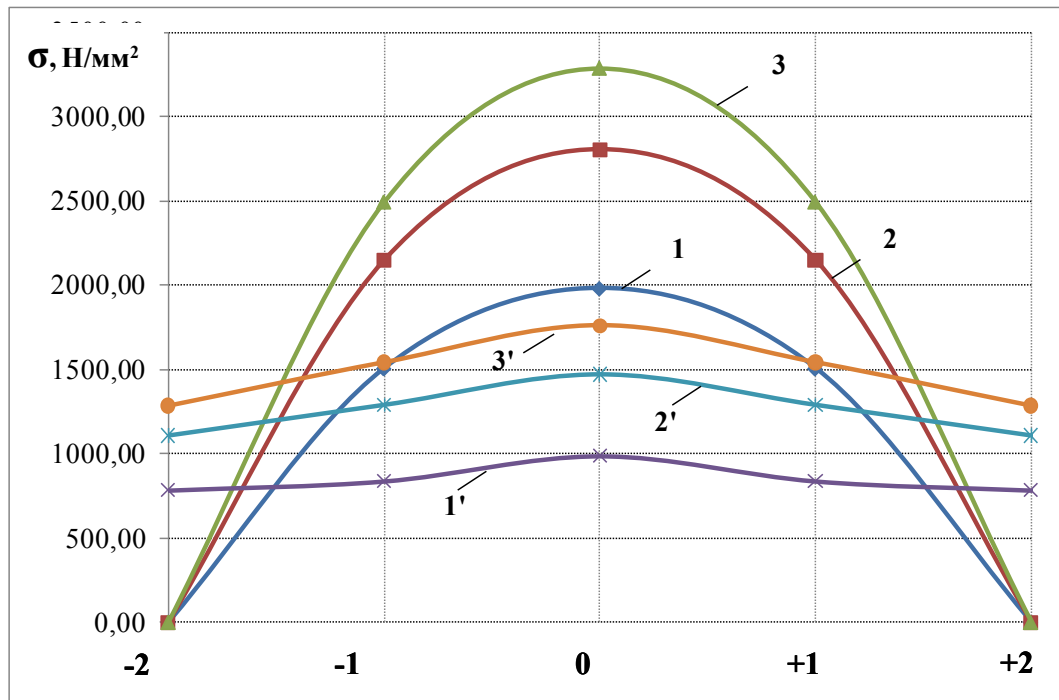
1, 2 – площадь пятна контакта желоба внутреннего кольца с центральным и первым боковым телами качения в подшипнике 209 (расчетные значения); 1', 2', 3' – площадь пятна контакта желоба внутреннего кольца с центральным, первым и вторым боковыми телами качения в подшипнике 209 склеенного с валом адгезивом ТК-200

Рисунок 1.41 – Изменение площади пятна контакта S желоба внутреннего кольца с нагруженными телами качения в подшипнике 209 при различных нагрузках P [159]



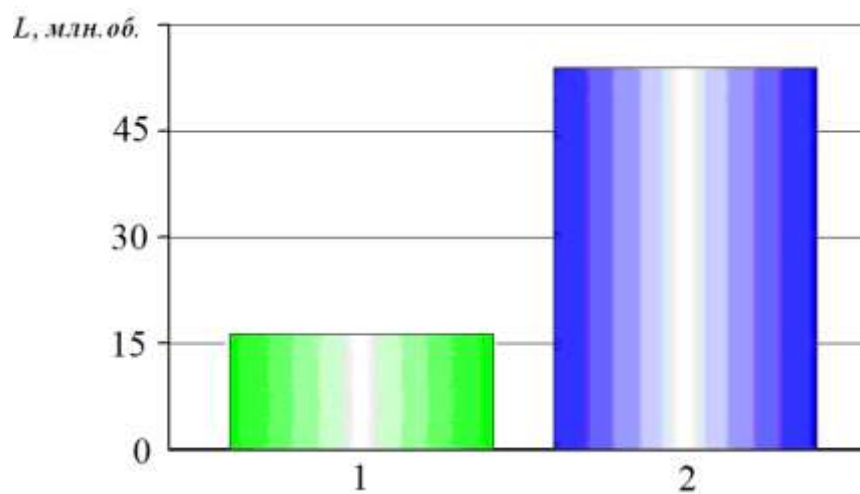
0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения; 1, 2, 3 – нагрузка на тела в стандартном подшипнике под радиальной нагрузкой $P = 2042$; 6127 и 10212 Н, соответственно; 1', 2', 3' – соответственно, нагрузка на тела в подшипнике с клеевым швом толщиной 0,05 мм под радиальной нагрузкой $P = 2042$; 6127 и 10212 Н

Рисунок 1.42 – Нагруженность тел качения в подшипнике 209 с клеевым соединением ТК-200 [159]



0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения, соответственно; 1, 2, 3 – распределение напряжений в стандартном подшипнике 209 при радиальной нагрузке $P = 2042$; 6127 и 10212 Н; 1', 2', 3' – распределение напряжений в подшипнике с клеевым швом толщиной 0,05 мм при $P = 2042$; 6127 и 10212 Н, соответственно

Рисунок 1.43 – Распределение контактных напряжений в подшипнике 209 с клеевым соединением ТК-200 [159]



1 – расчетная; 2 – восстановленного адгезивом ТК-200

Рисунок 1.44 – Долговечность L подшипника 209 при циркуляционном нагружении внутреннего кольца [159]

1.4 Технологическое обеспечение восстановления посадок подшипников качения полимерными композитами

Значительное влияние на формирование полимерного покрытия в отверстиях корпусной детали или клеевого шва в соединении «вал-подшипник» оказывает качество подготовки поверхности субстрата к нанесению полимера [163]. Низкое качество подготовки поверхности понижает адгезию. Поэтому детали первоначально подвергают очистке с использованием растворов синтетических моющих средств. Далее механической обработкой зачищают (шлифуют) поверхность субстрата. При этой операции удаляют следы коррозии, задиры и забоины. Для этого используют металлические щетки, шлифовальную шкурку, насадки с металлической проволокой. Обработку выполняют до появления металлического блеска на поверхности субстрата. Удаление поверхностного дефектного слоя повышает активность поверхности в образовании адгезионных связей с молекулами полимера.

«При механической обработке формируется поверхность увеличивающая площадь контакта полимерного покрытия с субстратом, что повышает адгезионные и когезионные свойства покрытия» [61].

Обработанную поверхность обезжиривают. В ходе обезжиривания поверхность субстрата протирают марлевым тампоном или ветошью, смоченными в растворителе. Адгезия полимерного покрытия зависит от качества обезжиривания, поэтому необходимо его тщательное выполнение.

Металлические порошки для наполнения полимеров обладают специфическими особенностями и поэтому перед использованием требуют определенной подготовки. Медные и алюминиевые частицы покрываются оксидной пленкой, иногда покрыты специфической смазкой, используемой при изготовлении [164, 165]. По этим причинам затрудняется адгезионный контакт частиц наполнителей с молекулами полимера и снижается прочность материала.

Наличие влаги является причиной слипания частиц, ухудшения сыпучести, увеличения пористости, снижения механических свойств материала. Для предотвращения таких явлений, адсорбции влаги и увеличения адгезии металлические

порошки тщательно просушивают или отжигают. Допускается после сушки влажность порошков, используемых в качестве наполнителей, не более 0,01...0,2% [165].

1.4.1 Ультразвуковое диспергирование полимерных композитов

Важную роль при изготовлении полимерного композита играет способ совмещения компонентов (смешения).

Механизм смешения может быть простым и диспергирующим. «При простом смешении частицы наполнителя случайным образом распределяются в объеме полимерной матрицы без изменения их начальных размеров.» [61] В ходе диспергирующего смешения уменьшаются начальные размеры частиц наполнителя по причине их дробления, разрушения агрегатов, деформирования и распада дисперсной фазы [166].

Различают два способа смешения компонентов: механическое смешение (ручное или механизированное) и ультразвуковое [166].

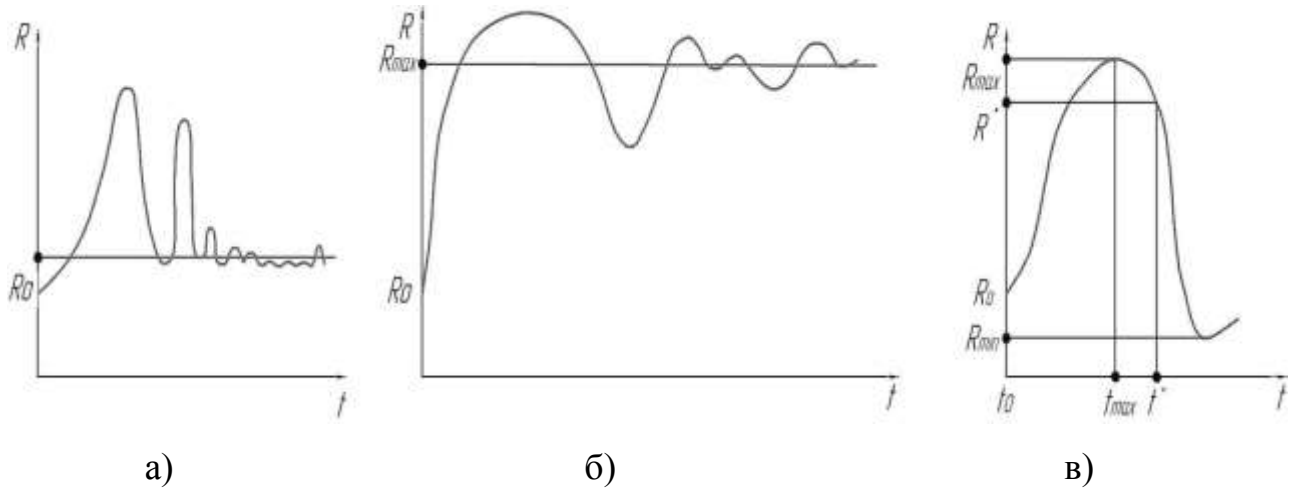
В жидкостях, обрабатываемых в ультразвуковом поле, возникает кавитация.

Одиночная кавитационная полость развивается в три этапа. На первом этапе начальный парогазовый зародыш расширяется в кавитационную полость. Таких зародышей в жидкости множество. «Второй этап представляет собой захлопывание сформированной кавитационной полости в ходе положительной фазы звукового давления (фаза сжатия, компрессия). На третьем этапе мгновенное вторичное расширение кавитационной полости со скоростью 250 м/с из-за действия парогазовой смеси, которая сжата внутри полости под давлением в несколько тысяч атмосфер.» [61] Возникает точечный микровзрыв, который разрушает и диспергирует твердые тела. Благодаря вторичному расширению полости возникает микроударное действие кавитации, успешно используемое при ультразвуковом диспергировании [167].

В процессе кавитации возможно образование трех групп полостей. за счет местного снижения давления. Соотношение амплитуды звукового P_A и гидроста-

тического P_0 давлений определяет какая группа полостей образуется. Первая группа полостей «пульсирующая» образуется при соотношении $P_A \ll P_0$ (рисунок 1.45, а).

«К второй группе относятся пульсирующие полости, начальный размер которых R_0 больше резонансного R_r ($P_A \gg P_0$)» [61] (рисунок 1.45, б).



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

Рисунок 1.45 – Характерные пульсации полостей, формирующихся в акустическом поле [167]

При значениях амплитуды звукового давления равном или больше гидростатического ($P_A \geq P_0$) образуются полости третьей группы (рисунок 1.45, в). «Они существенно растут в размерах в фазе расширения и успевают захлопнуться в фазе сжатия.» [61]

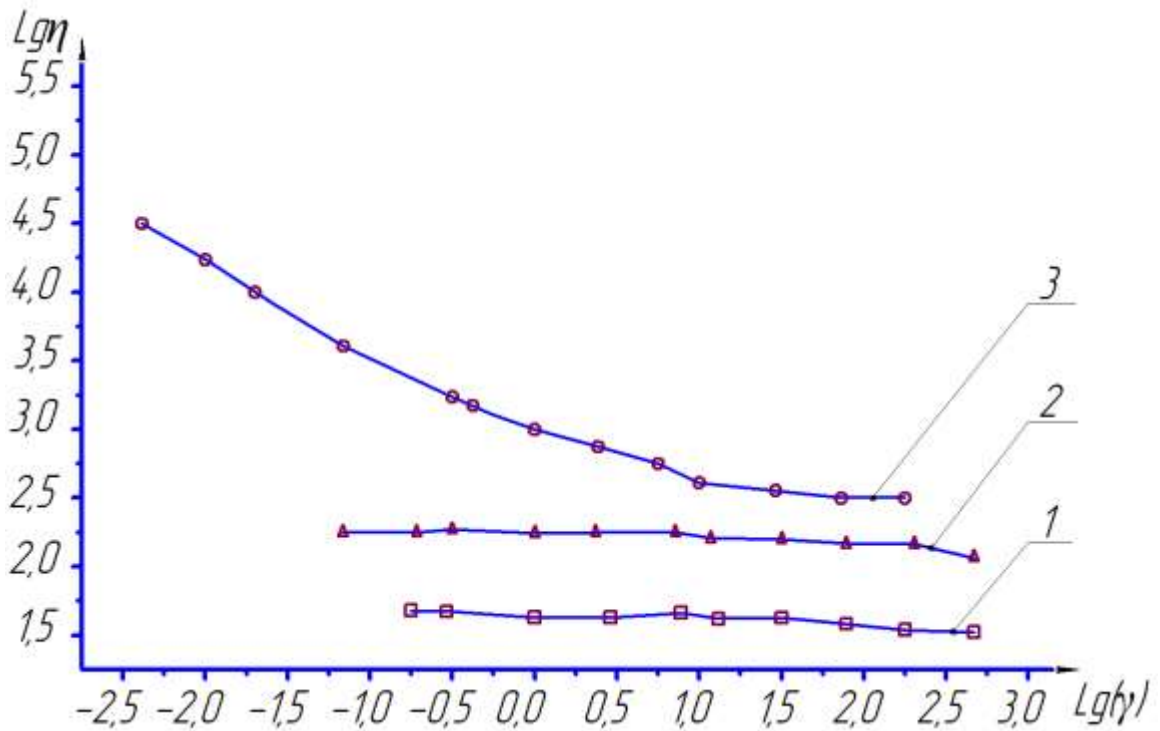
Эффективно диспергировать наполнитель возможно при соблюдении условия $P_A \geq P_0$.

При захлопывании полости возможно образование мощных микропотоков типа кумулятивных струй [168, 169].

Ударное действие кумулятивных струй (превышает силы Ван-дер-Ваальса и их значения изменяются в диапазоне $10^{-5} \dots 10^{-2}$ Па) разрушает поверхности твердых тел, которые находятся в зоне захлопывания кавитационных пузырьков.

Диспергирование агломерата из частиц в ультразвуковом поле обусловлено кавитацией и действием ударных волн, возникающих при захлопывании пузырьков и кумулятивных струй жидкости, образующихся при захлопывании вытянутых кавитационных пузырьков.

«В работе Тренисовой А.Л. исследовано смешение композита на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, наполненного глиной Cloisite 30В, различными способами: механическое смешение, ультразвуковая обработка (УЗО) в установке «Ванна»; УЗО погружным волноводом.» [61] Оценочным критерием качества диспергирующего смешения частиц глины в полимерной матрице использовали вязкость композитов (рисунок 1.46) [112].



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

Рисунок 1.46 – Зависимость вязкости η от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ для системы ЭД-20 + ДАДФС, содержащей 5 масс.ч. Cloisite 30В [112]

Наиболее низкую вязкость и соответственно эффективность диспергирования имеет раствор композита после механического смешения. После УЗО в уста-

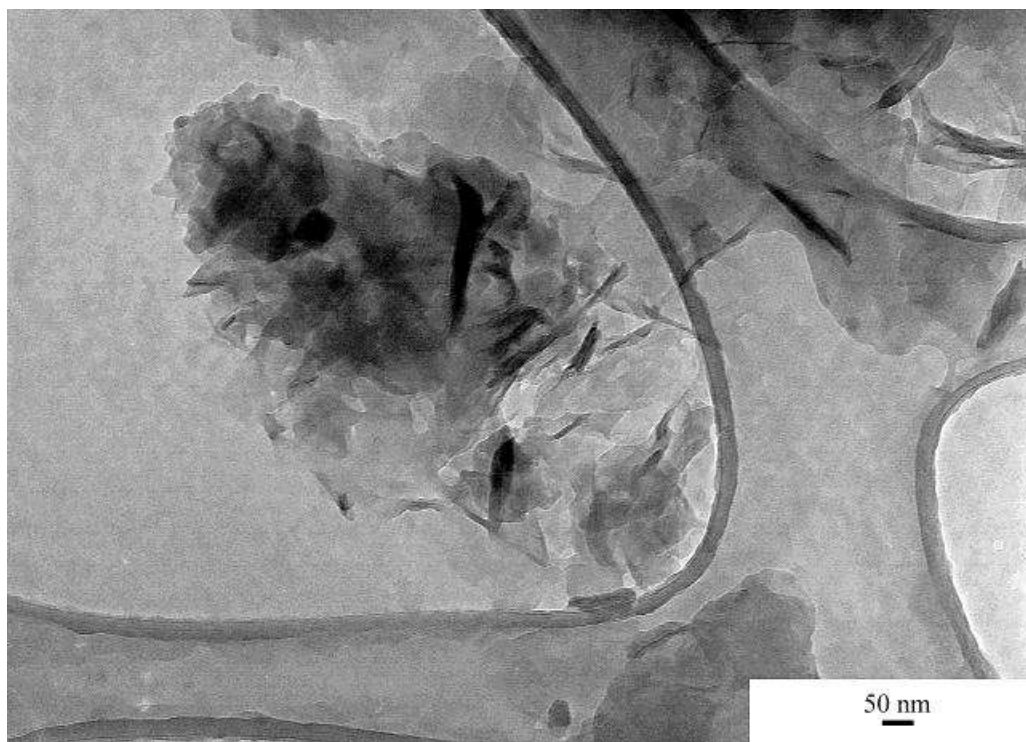
новке типа «Ванна» вязкость раствора композита увеличилась примерно в 1,3 раза, что свидетельствует о повышении качества диспергирования. «Применение погружного волновода с повышенной мощностью УЗО до 100 Вт, увеличило до максимума вязкость и соответственно качество диспергирования» [61].

«В работе Ахматовой О.В. исследовали структуру и механические свойства композитов на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, наполненных глиной Cloisite 30В, после механического (ручное и механизированное) смешения и УЗО» [61]. Армирующим наполнителем использовали стекловолокно, для отверждения композитов – диаминдифенилсульфон (ДАДФС) [94].

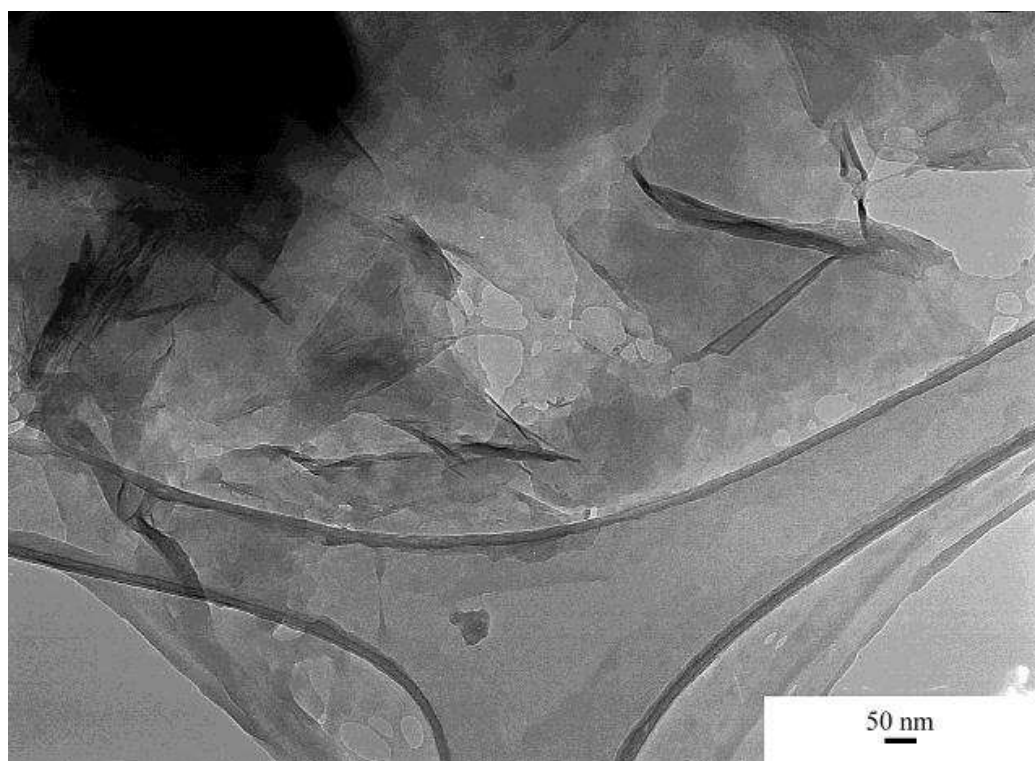
На рисунке 1.47 показаны микрофотографии после механического и ультразвукового диспергирования эпоксидного олигомера, модифицированного органоглиной. Из рисунка видно, что наилучший результат получен после УЗО.



а)



б)

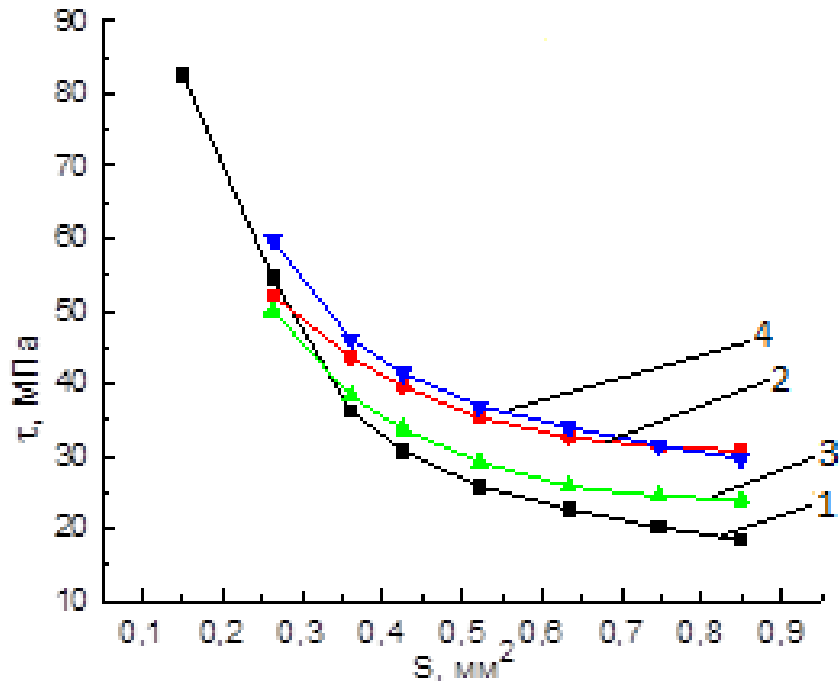


в)

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

Рисунок 1.47 – Микрофотографии ПКМ на основе ЭД-20, содержащей 5 масс.ч. глины Cloisite 30B [94]

Способ смешения влияет на механические свойства композитов (рисунок 1.48) [94]. «Наиболее высокую адгезионную прочность имеет композит на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, наполненный глиной Cloisite 30В, после УЗО» [61].

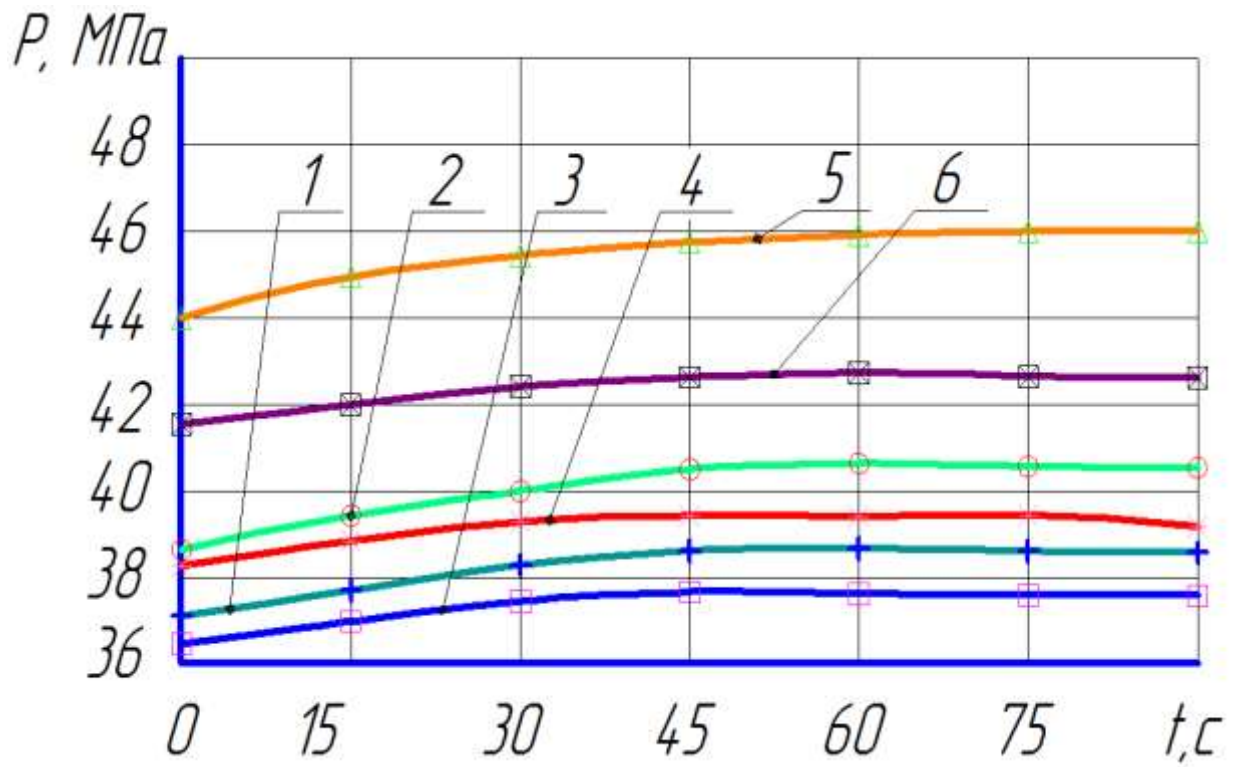


1 – ЭД-20 + 30 масс.ч. ДАДФС; 2 – ЭД-20 + 30 масс.ч. ДАДФС + 0,5 масс.ч. Cloisite 30В (смешение вручную); 3 – ЭД-20 + 30 масс.ч. ДАДФС + 0,5 масс.ч. Cloisite 30В (смешение на высокоскоростной мешалке); 4 – ЭД-20 + 30 масс.ч. ДАДФС + 0,5 масс.ч. Cloisite 30В (12 мин. УЗО)

Рисунок 1.48 – Зависимость адгезионной прочности τ от площади соединения S [94]

В работе Кононенко А.С. [24] исследовано изменение герметизирующей способности нанокompозитов в зависимости от времени УЗО. Из рисунка 1.49 следует, что увеличение герметизирующей способности P нанокompозитов, наполненных Бемитом, наблюдается в первые 15...45 с. УЗО, затем значения P стабилизируются. В сравнении с ручным смешением, герметизирующая способ-

ность нанокompозитов на основе анаэробных составов повысилась на 5,2...5,4 %, у силиконовых – на 3,1...4,3 %.

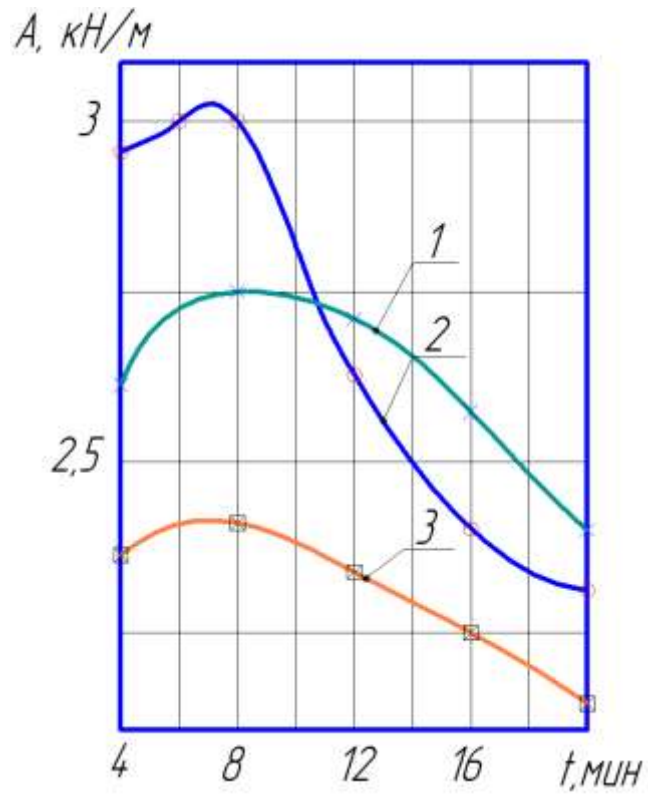


1 – Анатерм-501; 2 – Loctite-518; 3 – Автогерметик; 4 – Автогермесил; 5 – Loctite-598; 6 – Loctite-5920

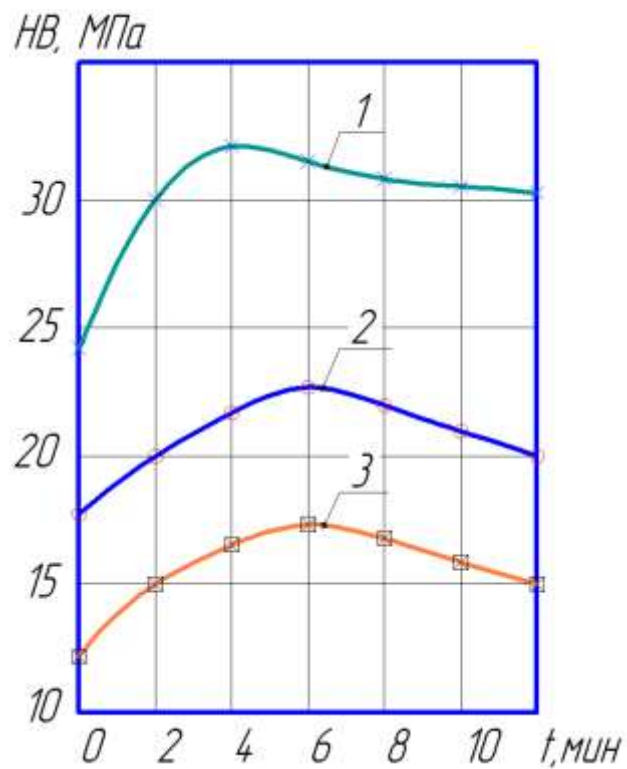
Рисунок 1.49 – Зависимости герметизирующей способности P композиций с наполнителем Бемит от времени смешения t в ультразвуковом поле [24]

Изменение после УЗО механических свойств композитов (ЭД-16+АСТ-Т), эластифицированных герметиком 6Ф, исследовано в работе Гаджиева А.А. (рисунок 1.50) [18].

Ультразвуковое диспергирующее смешение, в сравнении с ручным, повышает твердость композита в 1,7 раза [18]. Рекомендуемый режим УЗО композитов: мощность ультразвука 150 Вт, время обработки – 10...20 мин.



а



б

а – адгезионная прочность; б – твердость

Рисунок 1.50 – Зависимости адгезионной прочности A и твердости HB эпоксидных композиций от времени ультразвукового воздействия t

В работах Ли Р.И. и Колесникова А.А. [61, 91, 92, 170-171] определены основные параметры УЗО. Предложена формула для расчета амплитуды звукового давления P_A по мощности УЗО

$$P_A = \sqrt{\frac{2W}{S_t}} \sqrt[4]{\frac{\rho}{\beta_{ad}}}, \quad (1.8)$$

где W – мощность УЗО; S_t – площадь поверхности преобразователя; ρ и β_{ad} – плотность и коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

Сформулированы условия эффективного диспергирования раствора полимерного композита [61]:

$$2,0P_{атм} \leq P_A < 10P_{атм}, \quad (1.9)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление.

$$H_{дон} \leq N \quad (1.10)$$

где N – естественный фокус преобразователя [172].

$$N = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (1.10)$$

где D – диаметр излучателя; λ – длина волны.

Для эффективного диспергирования уровень раствора в ультразвуковой ванне не должен превышать естественного фокуса N (рисунок 1.51).

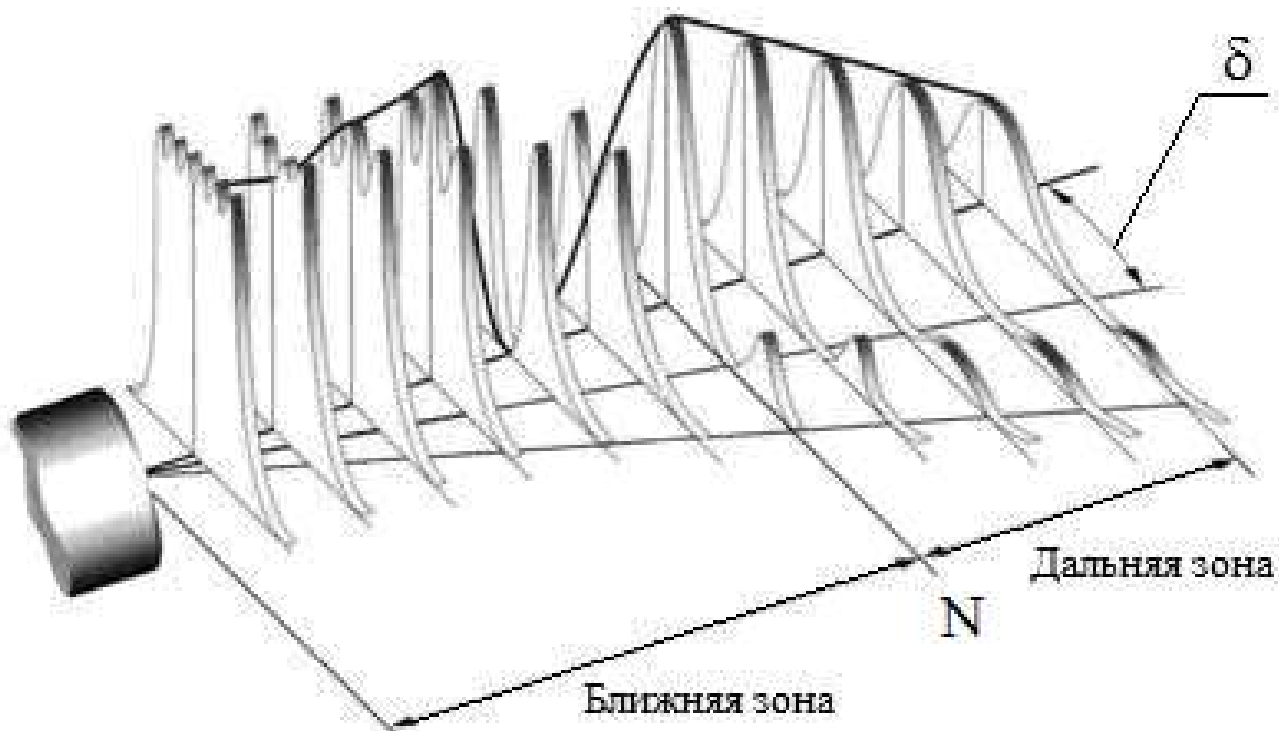


Рисунок 1.51 – Ближняя и дальняя зоны звукового поля

Допускаемый уровень раствора композита в ультразвуковой ванне предложено определять по зависимости

$$H_{\text{доп}} = \frac{\pi D^4}{16\lambda LB}, \quad (1.11)$$

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

На рисунке 1.52 показано изменение звукового давления P_A с ростом мощности W озвучивания. Зависимость линейная. Условие (2) будет соблюдаться при значениях звукового давления P_A , которые обеспечиваются при УЗО мощностью 45 Вт и более. [61]

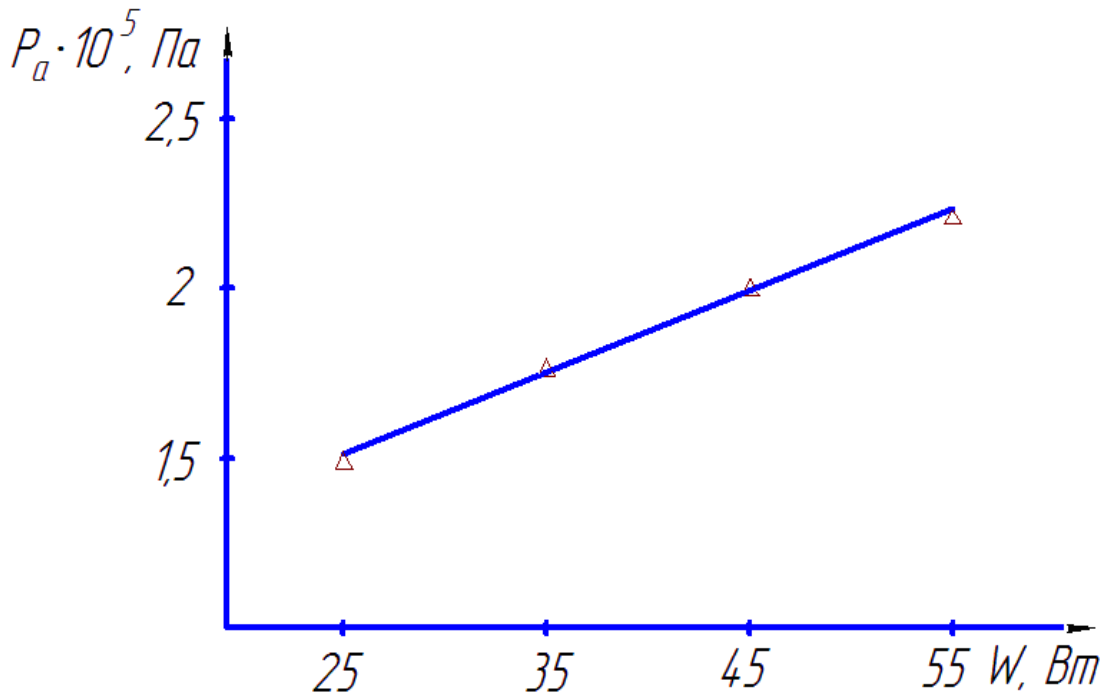


Рисунок 1.52 – Зависимость звукового давления P_A в растворе композита на основе эластомера Ф-40 от мощности ультразвуковой обработки W [61]

Эффективность ультразвукового диспергирования раствора композита эластомера Ф-40 оценивали критерием эрозионной активности [172]

$$\chi = \frac{8,14(P_A - P_0)^5 (0,2P_A + P_0)^7}{P_A^3 P_{II}^3} \quad (1.12)$$

где P_{II} – давление насыщенного пара жидкости; P_0 – гидростатическое давление, в нашем случае $P_0 = P_{\text{атм}}$.

Чем больше величина χ , тем выше эффективность ультразвукового диспергирования.

Из рисунка 1.53 видно, что с увеличением мощности ультразвуковой обработки W повышается критерий эрозионной активности χ , т.е. эффективность диспергирования.

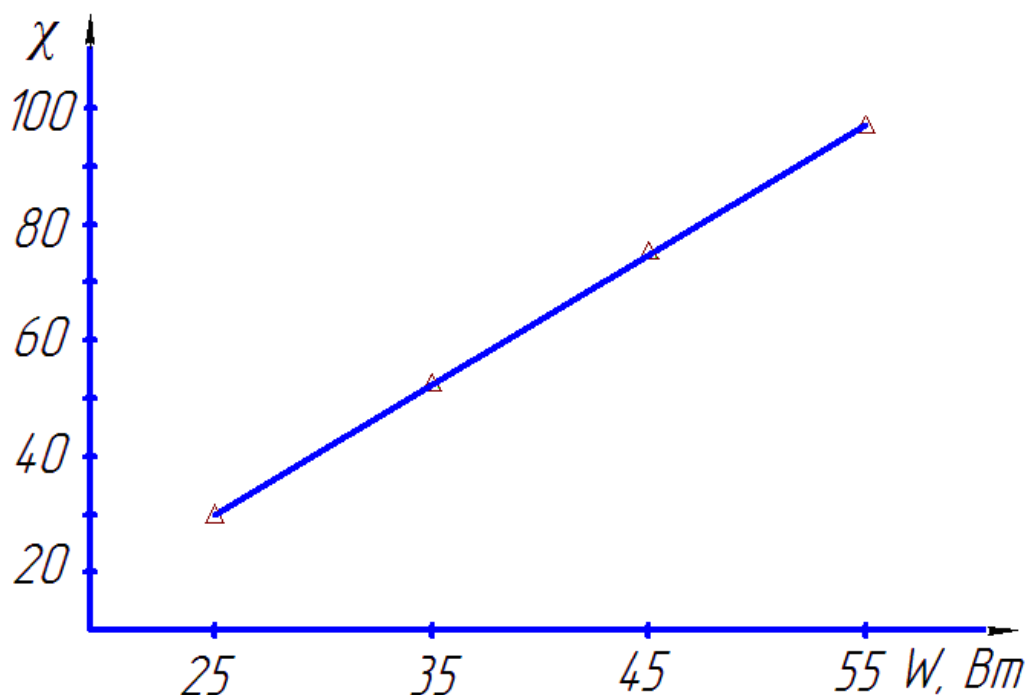


Рисунок 1.53 – Зависимость критерия эрозионной активности χ раствора композита на основе Ф-40 от мощности ультразвукового излучения W [61]

Пористость полимерного покрытия является одной из основных причин снижения его долговечности. Поры появляются при выделении пузырьков газа из жидкого полимера в процессе отверждения, и разработка способов снижающих пористость покрытия представляет актуальную технологическую задачу.

На первой стадии дегазации пузырьки газа увеличиваются из-за диффузии в них растворенного газа. Вторая стадия дегазации примечательна тем, что по достижении определенного размера пузырьки газа всплывают на поверхность жидкости и выделяются в атмосферу (окружающую среду).

Условие всплытия пузырька газа в жидком металле [166, 167]

$$P_{H_2} > P_0 + h\rho + \frac{2\sigma}{r}, \quad (1.13)$$

где P_{H_2} – давление газа в пузырьке, P_0 – давление атмосферы на поверхность ванны с раствором, h – высота столба раствора над пузырьком, ρ – плотность рас-

плава, σ – поверхностное натяжение расплава, r – радиус пузырька.

Скорость всплытия пузырька на поверхность предлагается рассчитывать по уравнению Стокса

$$g = \frac{2}{9} g \frac{r^2}{\mu} (\rho - \gamma), \quad (1.14)$$

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

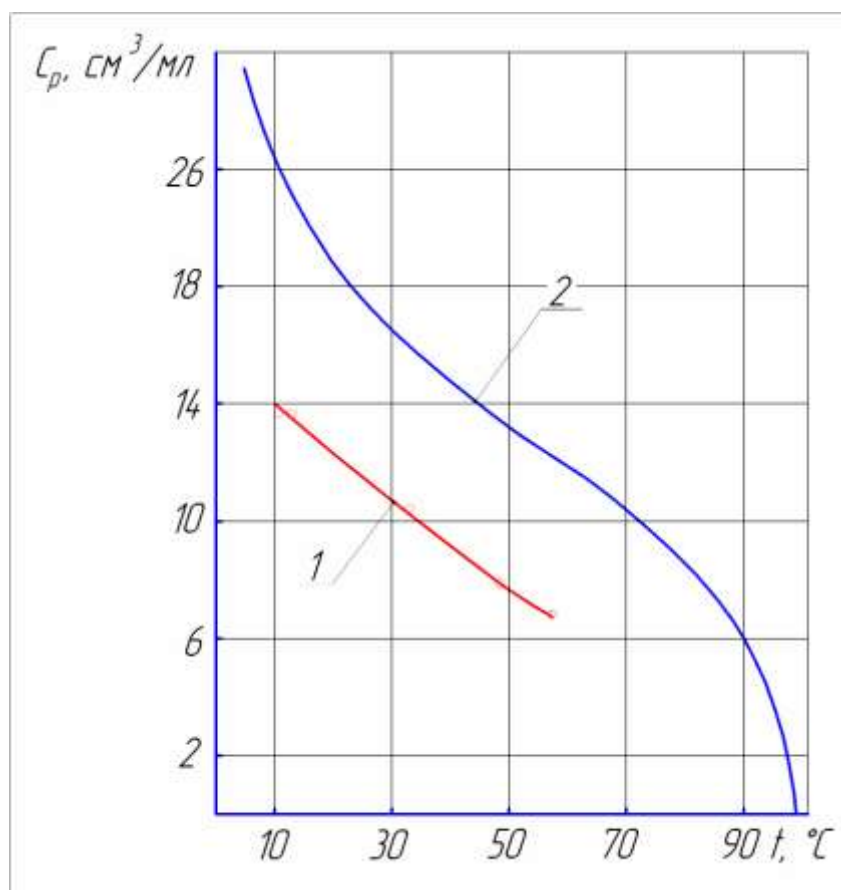
Изменение концентрации газа в жидкости в акустическом поле за время облучения определяется выражением [166, 167, 172]

$$C = C_p' + (C_0 - C_p') e^{-\beta t}, \quad (1.15)$$

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

Исследования показали: чем выше температура жидкости, тем меньше значение квазиравновесной концентрации, устанавливающейся под действием УЗО (рисунок 1.54).

Кавитация при УЗО раствора композита увеличивает температуру и уменьшает значение квазиравновесной концентрации C_p' , т.е. снижает концентрацию пузырьков газа в растворе, в сравнении со стандартной температурой. По этой причине ультразвуковое диспергирование раствора композита приводит к дегазации и последующему снижению пористости отвержденных покрытий композита.



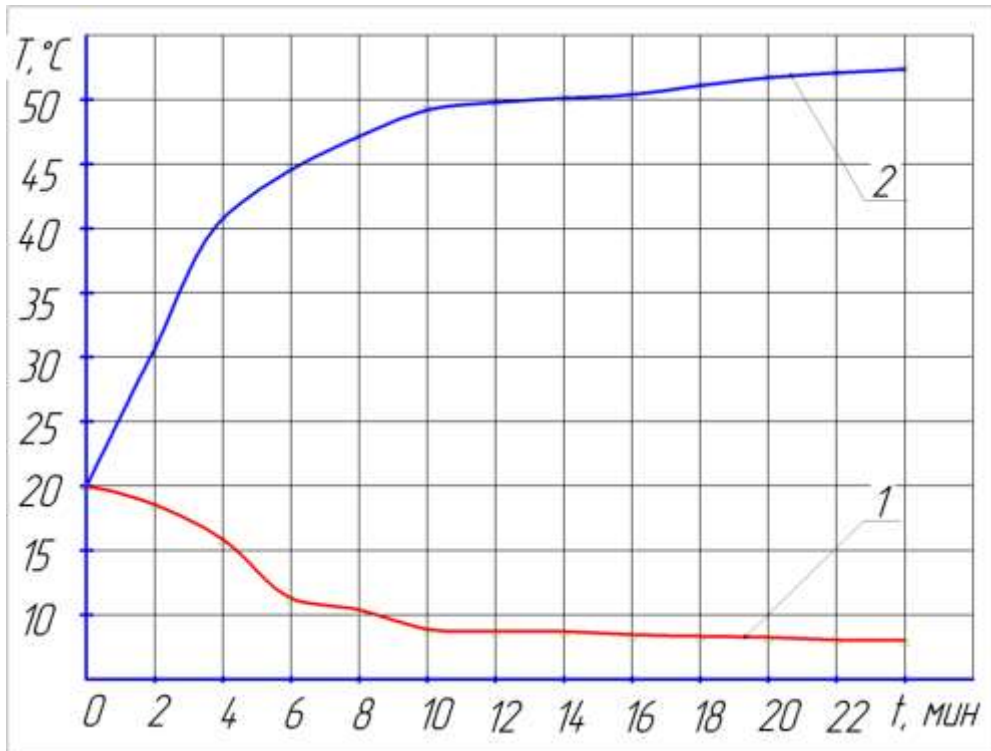
1 – ручное механическое смешение; 2 – УЗ обработка

Рисунок 1.54 – Зависимость равновесной концентрации воздуха в воде от температуры при статическом давлении 0,1 МПа [61]

Из рисунка 1.55 видно, что в ходе ручного механического смешения температура раствора композита эластомера Ф-40 понижается.

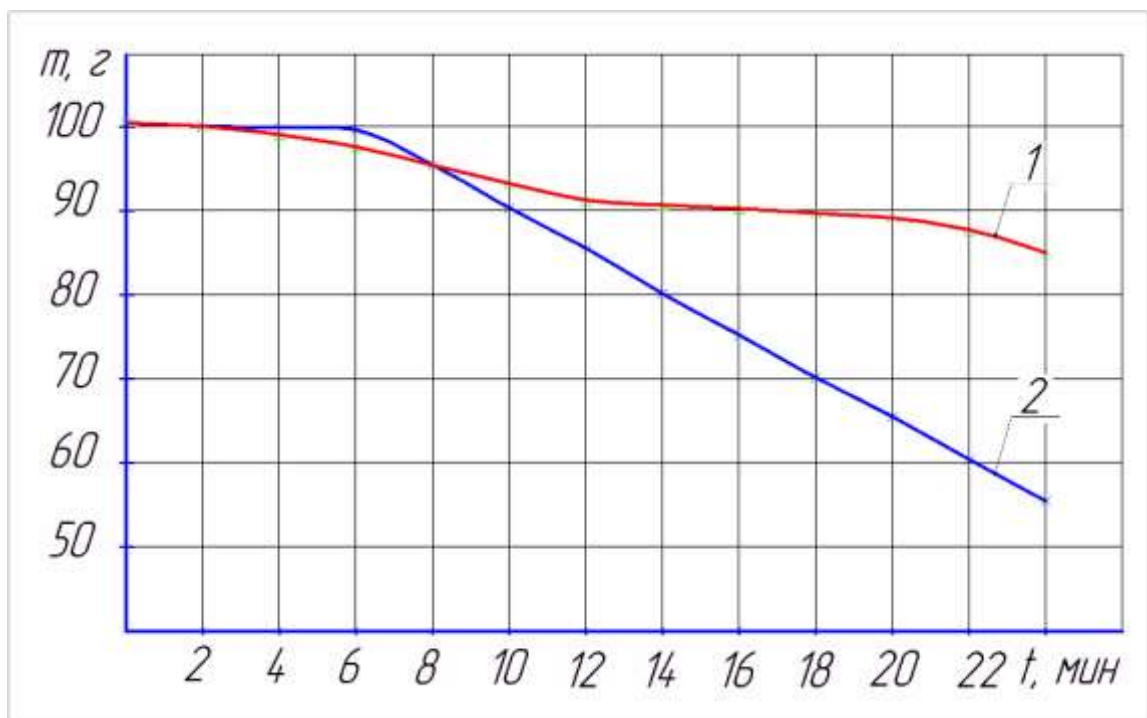
Дегазацию оценивали по остаточной массе раствора композита (рисунок 1.56). Чем меньше остаточная масса m раствора композита, тем больше растворителя испарилось [61].

В первые 4...6 мин смешения ручным способом и УЗО испарение растворителя отличается не значительно. При дальнейшей обработке разница увеличивается. При ручном смешении остаточная масса раствора композита уменьшается с 101,5 до 83,4 г. После УЗО количество испарившегося растворителя уменьшается до 56,8 г. Количество испарившегося ацетона после УЗО раствора композита эластомера Ф-40 в 2,5 раза больше, чем после ручного смешения.



1 – ручное механическое смешение; 2 – УЗ обработка

Рисунок 1.55 – Зависимость температуры раствора композита эластомера Φ -40 Т от времени смешения t [61]



1 – ручное механическое смешение; 2 – УЗ обработка

Рисунок 1.56 – Зависимость остаточной массы m раствора композита эластомера Φ -40 от времени смешения t [61]

Выводы

1. Ультразвуковая обработка позволяет существенно повысить качество смешения и улучшить физико-механические свойства полимерных микрокомпози́тов. Ультразвуковое диспергирование растворов полимерных микрокомпози́тов способствует их эффективной дегазации, последующему снижению пористости и повышению качества отвержденных покрытий компози́тов.

2. Вопрос влияния режимных параметров УЗО на качество диспергирующего смешения растворов полимерных микрокомпози́тов исследован не в полной мере и требует дальнейшего развития.

1.4.2 Способы термической обработки полимерных покрытий

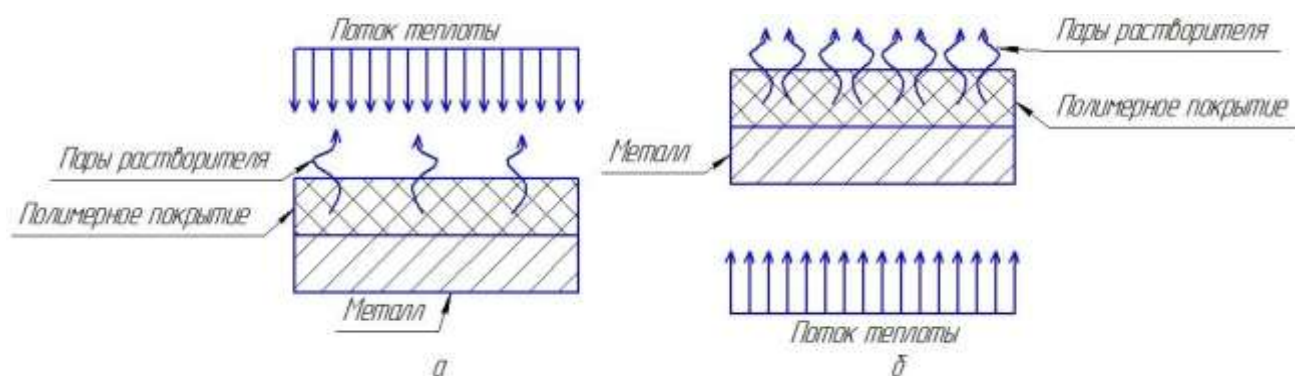
Чтобы повысить механические свойства эластомерных покрытий проводится термическая обработка, как правило конвективным способом. При конвективном способе затрачивается энергия на обогрев воздуха, который затем нагревает корпусную деталь. Крупногабаритные корпусные детали греют в специальных сушильных камерах. По этим причинам конвективный способ отличается значительными энергетическими и финансовыми затратами.

Полимерное покрытие после термической обработки конвективным способом отличается пористостью. Это существенная технологическая проблема [173, 174]. Тепло от нагретого воздуха поступает снаружи, поэтому в первую очередь отверждаются верхние слои полимерного покрытия [175].

Далее происходит отверждение нижних слоев покрытия, прилегающих к металлической подложке. При этом пары растворителя стремятся наружу, разрушая при этом вышележащие, ранее отвержденные слои полимерного покрытия, образуют тем самым поры (рисунок 1.57, а). Пористость покрытия – это дефект снижающий ресурс посадки подшипника и всего подшипникового узла в эксплуатационный период [173].

Терморadiационный способ кардинально отличается механизмом нагрева. Инфракрасные волны от излучателя не нагревают воздух, беспрепятственно про-

ходя через полимерное покрытие, нагревают металлическую подложку (корпусную деталь). Вследствие этого, в первую очередь отверждаются нижние слои полимерного покрытия [175]. Пары растворителя при этом беспрепятственно выходят наружу. По завершении отверждения нижних слоев происходит отверждение верхних слоев полимерного покрытия, по этой причине пористость при терморadiационном способе существенно меньше (рисунок 1.57, б).



а – конвективный способ сушки; б – терморadiационный (инфракрасный) способ сушки

Рисунок 1.57 – Процесс сушки полимерного покрытия при различных способах подвода тепла

В сравнении со стационарными сушильными камерами, установки инфракрасного излучения являются компактными и мобильными. В виду того, что они не нагревают воздух потребляется значительно меньше электроэнергии.

При ремонте и производстве автомобилей и тракторов терморadiационный способ используют преимущественно для сушки лакокрасочных покрытий нанесенных при окрашивании кузовных деталей. В таблице 1.9 представлены инфракрасные сушки, предлагаемые на отечественном рынке [176-178].

В рекомендациях производителей предписан контроль температуры нагрева осуществлять инфракрасными датчиками, а расстояние от излучателей до кузовной детали и время нагрева определять опытным путем. Применение при этом полученных экспериментальных данных носит ограниченный характер.

Таблица 1.9 – Инфракрасные сушишки

Компания	Ограничения по площади, мм	Технические характеристики
«NORDBERG AUTOMOTIVE» (рисунок 1.58)	500×800, 800×800, 1000×1200	мощность от 1,1 до 3,3 кВт, температура нагрева от 45 до 75 градусов
«WiederKraft» (рисунок 1.59)	1200×1000, 1800×1000	мощность от 3,0 до 6,0 кВт, температура нагрева от 35 до 100 градусов
ООО «Евростор»	1200×1000, 1800×1000	мощность от 1,0 до 6,0 кВт, температура нагрева от 90 до 140 градусов

Требуется метод расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушишки для нагрева корпусных деталей с применением математического моделирования.

Проведенный анализ литературных источников выявил отсутствие информации об обработке терморadiационным способом отверстий с нанесенными полимерными покрытиями при восстановлении корпусных деталей сельскохозяйственной техники.



Рисунок 1.58 – Инфракрасные сушишки компании «NORDBERG AUTOMOTIVE» (Германия) [176]

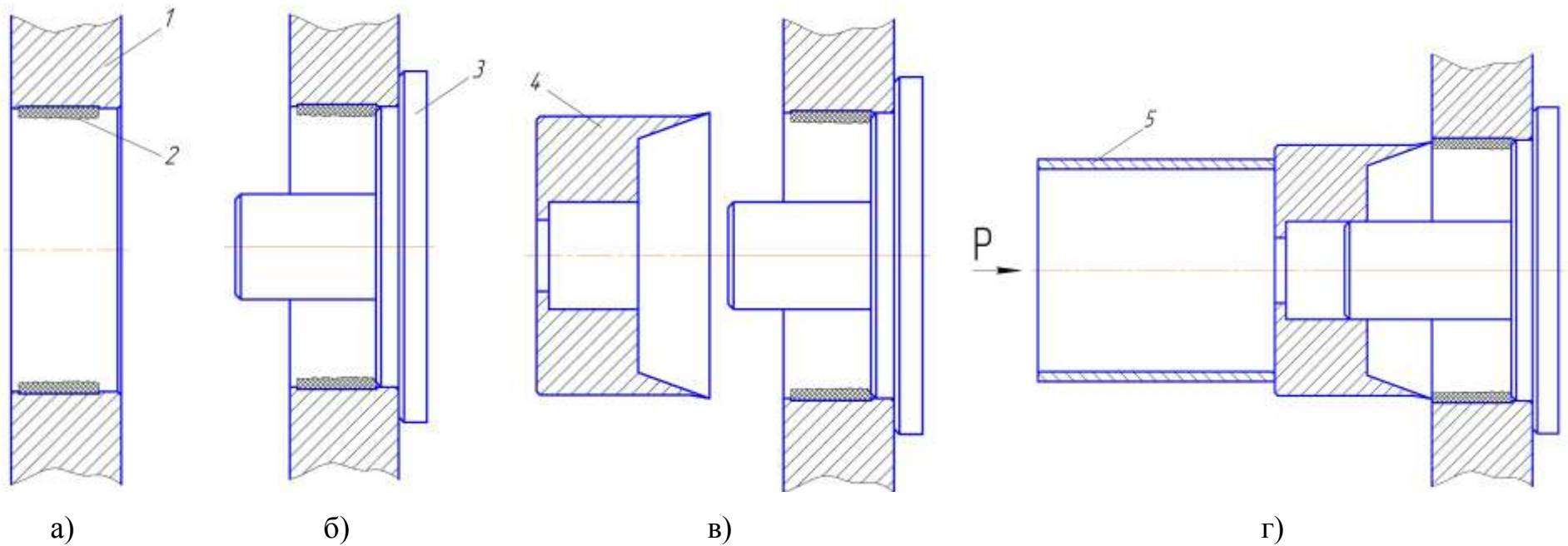


Рисунок 1.59 – Инфракрасные сушки компании «WiederKraft» (Германия) [177]

1.4.3 Обеспечение точности размеров отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях и соосности при сборке деталей клеевых соединений «вал-подшипник»

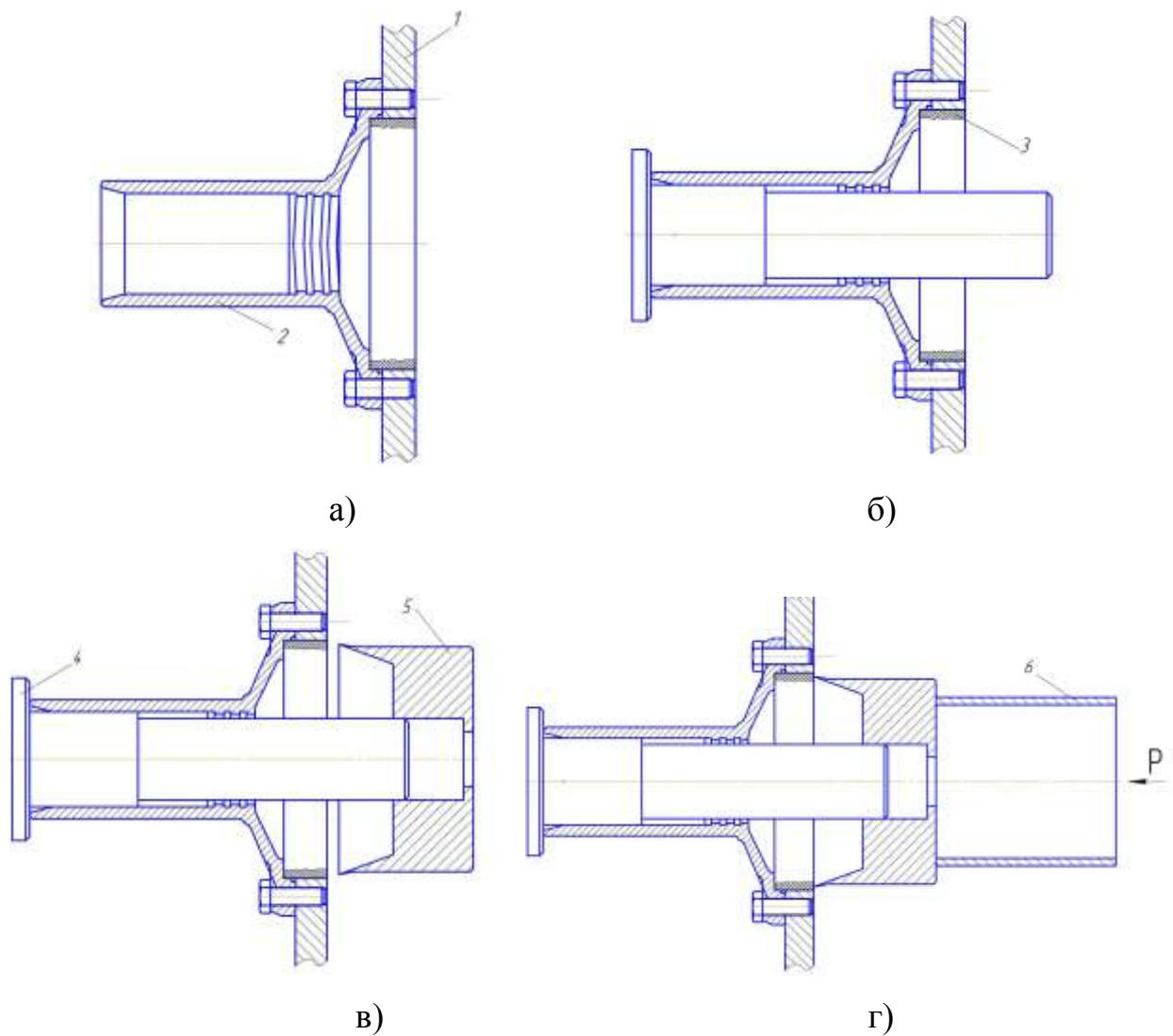
Для восстановления подшипниковых отверстий в корпусных деталях полимера пользуются различными способами [10, 14, 16, 18, 55-60]. Общеизвестные способы [15, 16, 67, 179] восстановления справочно представлены в приложении А.

«Профессор Ли Р.И. и сотрудники ЛГТУ разработали способ восстановления изношенных подшипниковых отверстий в корпусных деталях полимерным покрытием включающий подготовку поверхности отверстий, нанесение полимерного покрытия, его термическую обработку и последующее калибрование под заданный размер» [2] (рисунки 1.60 и 1.61) [62, 180-189]. Так как калибрование отверстий с полимерным покрытием выполняется после термической обработки, влияние усадки полимера на размер восстановленного отверстия полностью исключается (что является не стабильной величиной и трудно поддающейся учету для других способов).



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; 5 – монтажная труба

Рисунок 1.60 – Схема последовательности этапов получения отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали (подшипниковый щит электродвигателя) калиброванием [189]



а – изношенные отверстия в корпусной детали и в крышке подшипника с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирющей детали в не 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

Рисунок 1.61 – Схема последовательности этапов получения отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали (корпус коробки передач, водяного насоса двигателя) калиброванием [189]

«В работе Кирсанова Ф.А. разработана методика расчета точностных характеристик деталей устройства для калибрования отверстий с полимерным покрытием на примере корпуса коробки передач 52-1701015А автомобиля ГАЗ-53» [54].

Исходным звеном принят зазор в сопряжении наружного кольца подшипника с посадочным отверстием в корпусе коробки передач (рисунок 1.62).

Усилие резания покрытия максимальное $F = 0,997$ кН при обработке с минимальным значением переднего угла $\gamma = 50^\circ$ (рисунок 1.63). При обработке калибром с углом $\gamma = 60^\circ$ покрытия снижается усилие резания до 1,26 раза, $F = 0,792$ кН. Минимальное усилие резания $F = 0,346$ кН наблюдается при обработке калибром с максимальным передним углом режущей кромки $\gamma = 70^\circ$ [189].

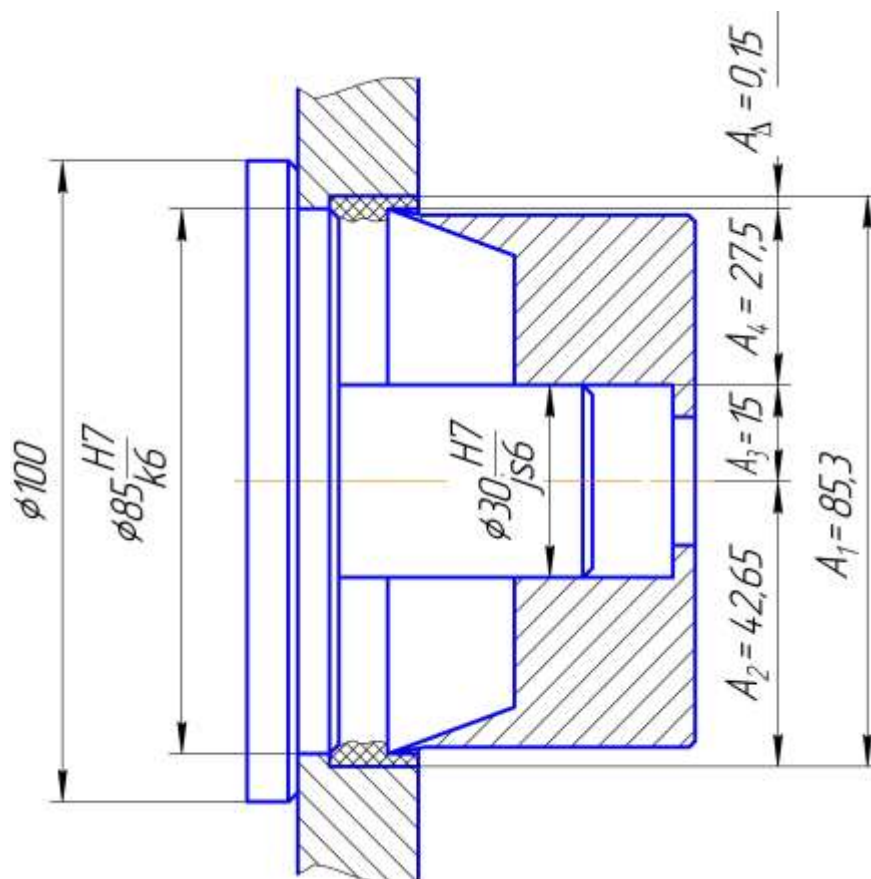


Рисунок 1.62 – Сборочная размерная цепь [189]

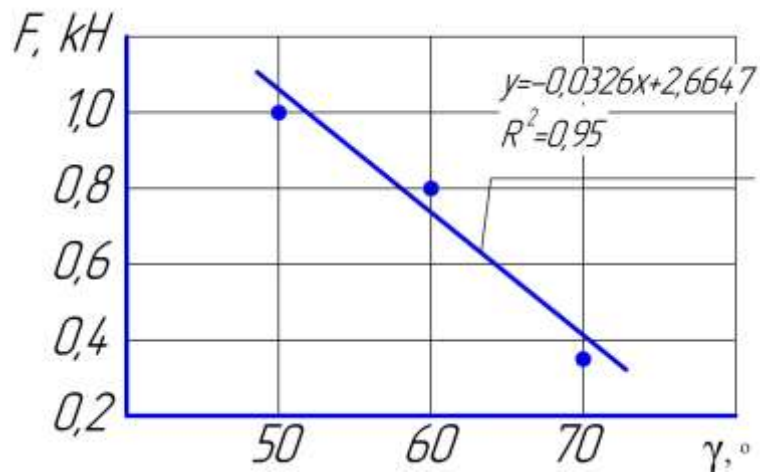
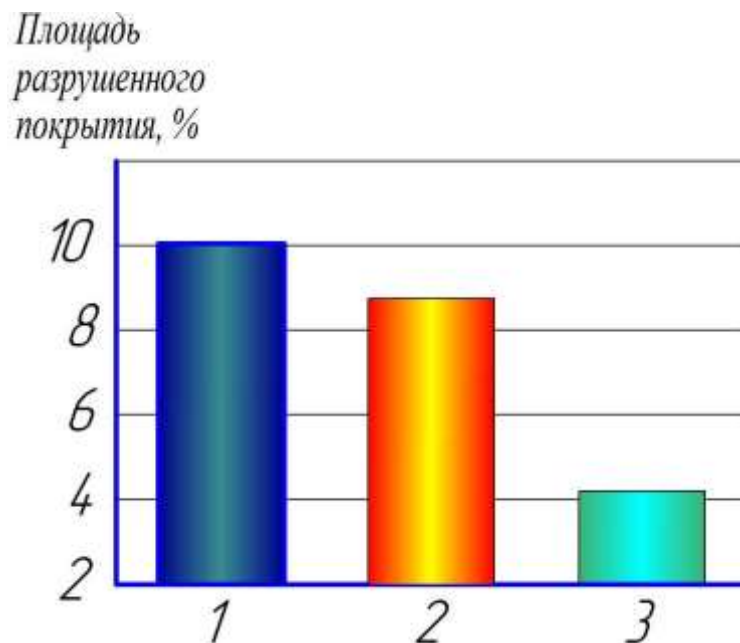


Рисунок 1.63 – Зависимость усилия резания F эластомера Ф-40С от переднего угла калибра-резца γ [189]

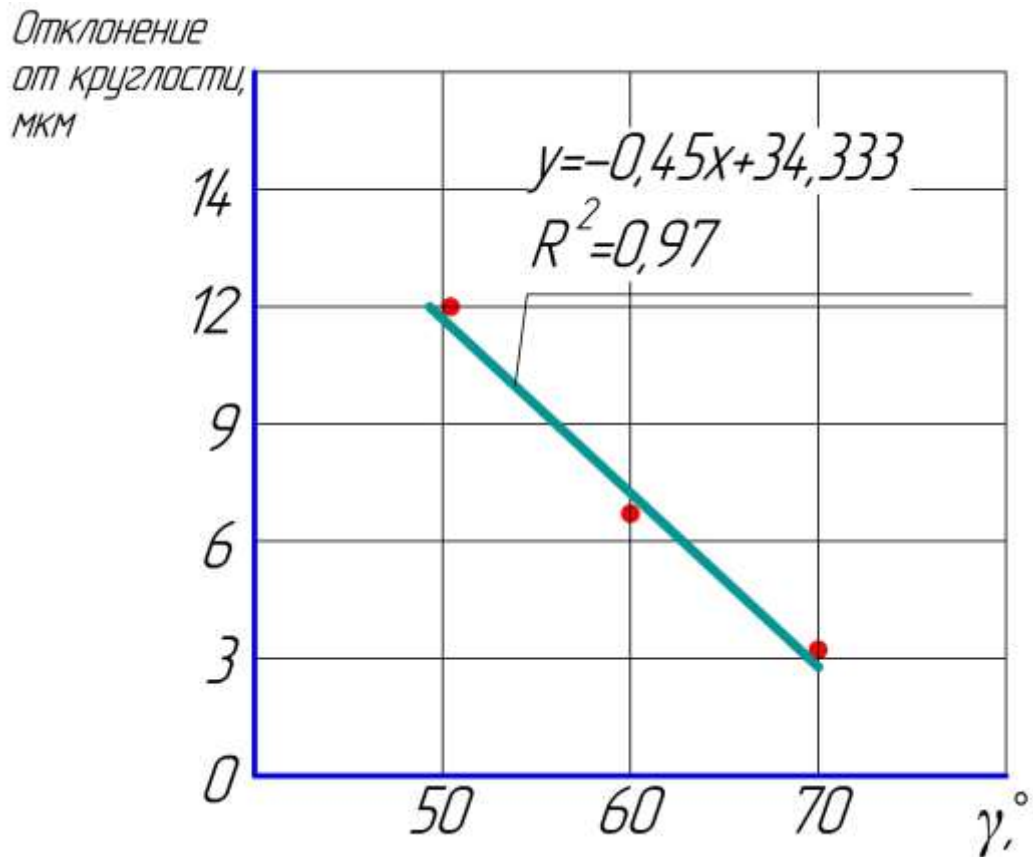
Качество покрытий после механической обработки напрямую связано со значением переднего угла калибра-резца (рисунок 1.64). Наиболее высокое качество покрытий получено при механической обработке калибром с максимальным передним углом $\gamma = 70^\circ$.



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

Рисунок 1.64 – Площадь разрушенного покрытия после механической обработки эластомера Ф-40С калибром-резцом [189]

Калибр с наибольшим передним углом $\gamma = 70^\circ$ обеспечивает минимальное отклонение от круглости в 3 мкм (рисунок 1.65).



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

Рисунок 1.65 – Отклонение от круглости отверстий с покрытием из эластомера Ф-40С после обработки калибром-резцом [189]

Посадочные места подшипников качения на деталях типа «вал» восстанавливаются двумя способами:

1 – нанесение полимерного покрытия на изношенное посадочное место подшипника на валу [70];

2 – склеивание внутреннего кольца подшипника с посадочным местом на детали типа «вал» [10, 16, 69, 159].

В работе Аязбаева М.Д. разработана технология восстановления посадочных мест подшипников на валах герметиком 6Ф [70]. Технология обеспечивает

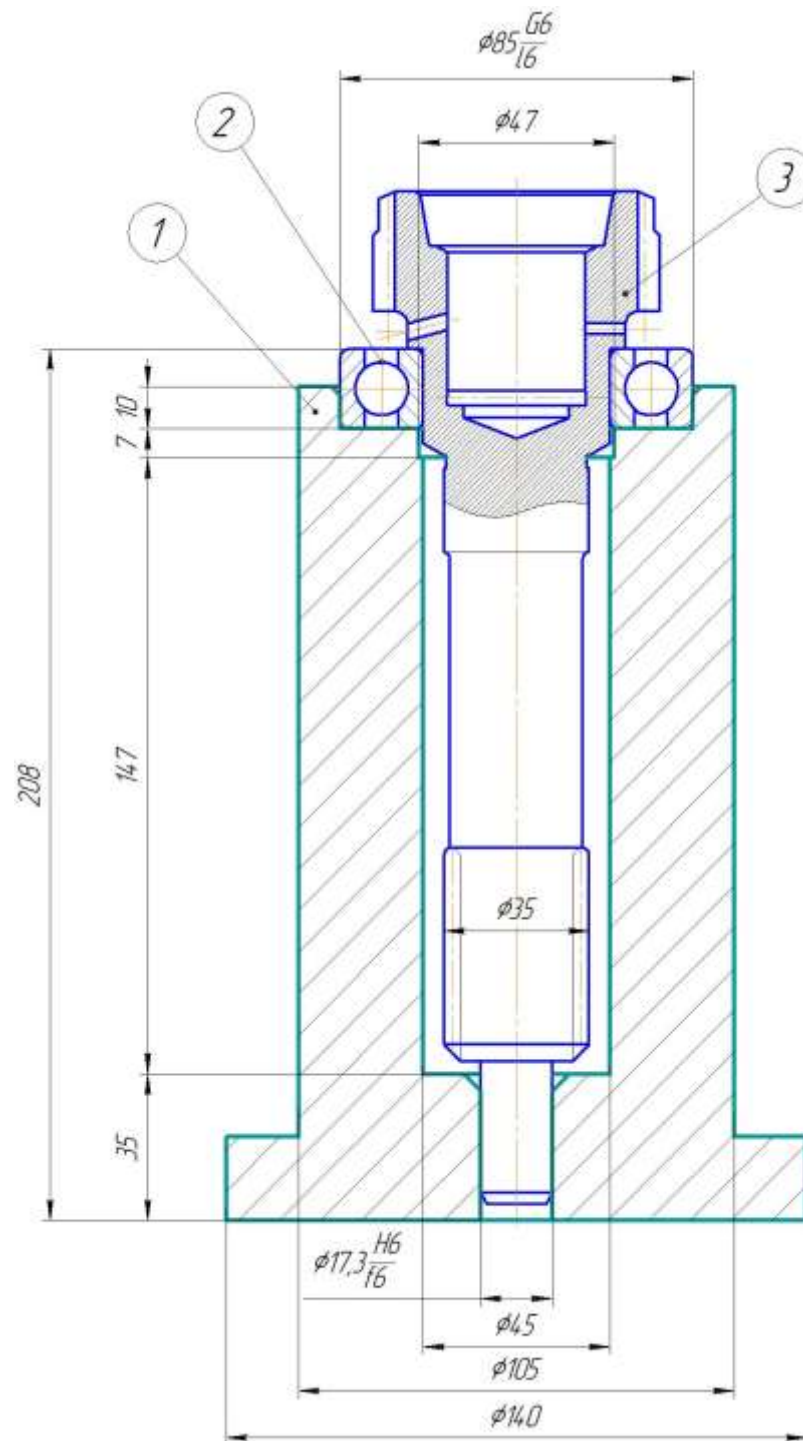
фреттингостойкость посадок подшипников и повышение долговечности восстановленных подшипниковых узлов. К основным недостаткам следует отнести: 1) необходимость послойного нанесения полимерного покрытия с просушиванием каждого слоя, что повышает трудоемкость операции; 2) потребность в термической обработке нанесенного покрытия, что повышает затраты электроэнергии на восстановление.

Более технологичным является второй способ, т.к. он лишен недостатков, описанных выше. Однако этот способ требует обеспечения соосности склеиваемых деталей при диаметральном зазоре в сопряжении до склеивания более 0,05 мм.

В работах Малюгина В.А. [190-192] разработана «методика расчета точностных параметров (применен вероятностный метод одного качества) приспособлений для центрирования деталей при сборке клеевых соединений типа «вал-подшипник» на примере коробки передач ГАЗ-3307» [53] (рисунок 1.66).

Посадку «вал-подшипник» восстанавливают следующим образом. На внутреннее кольцо подшипника 50209 наносят нанокompозит на основе герметика АН-111 и затем подшипник 2 устанавливают в посадочное отверстие приспособления. Далее адгезивом покрывают поверхность изношенного посадочного места вала и собирают приспособление.

Расчет точностных характеристик центрирующих приспособлений требует определенных затрат времени, а номенклатура деталей типа «вал» в узлах сельскохозяйственной техники отличается широчайшим разнообразием по номенклатуре, конфигурации и типоразмерам. Следует разработать метод расчета точностных характеристик деталей центрирующих приспособлений, что позволит оперативно и с достаточной точностью их определять, разрабатывать технологическую документацию для изготовления.



1 – центрирующее приспособление; 2 – подшипник; 3 – ведущий вал

Рисунок 1.66 – Центрирующее приспособление для сборки клеевого соединения «ведущий вал-подшипник» коробки передач ГАЗ-3307

Выводы

1. Представляют научный и практический интерес всесторонние исследования процесса калибрования, качества и точности отверстий с покрытиями, выпол-

ненными нанокompозитами на основе эластомеров Ф-40 и Ф-40С, с целью определения рациональных геометрических параметров режущей кромки калибра.

2. Номенклатура деталей типа «вал» в узлах сельскохозяйственной техники отличается большим разнообразием по номенклатуре, конфигурации и типоразмерам. Для эффективного восстановления посадочных мест подшипников этих деталей адгезивами необходимо разработать метод расчета точностных характеристик деталей центрирующих приспособлений, что позволит оперативно и с достаточной точностью их определять для изготовления.

1.5 Выводы. Цель и задачи исследований

Литературный обзор и анализ априорной информации показали, что большая часть, порядка 72% деталей имеют износ до 0,2 мм. Посадочные места под подшипники в деталях с износом до 0,2 мм можно эффективно восстанавливать полимерами и композитами на их основе.

Перспективным направлением в повышении эффективности полимерных композитов является применение наночастиц в качестве наполнителей. Наноразмерные наполнители значительно повышают механические и теплофизические свойства материала. Разработка новых, перспективных нанокompозитов на основе реактопластов и эластомеров, позволит повысить эффективность восстановления посадок подшипников качения на деталях типа «вал» и корпусных деталях сельскохозяйственной техники.

Теплостойкость эластомеров Ф-40 и Ф40С не превышает 100°C. При дальнейшем росте температуры материалы переходят в вязкотекучее состояние. Необходимо более широкий температурный запас по теплостойкости.

Расчет теплопроводности микрокомпозитов по формулам Оделевского и Миснара показал заниженные результаты, отличающиеся от фактических на 20...60%. Требуется всестороннее исследование вопроса пригодности традиционных формул для оценки теплопроводности полимерных

нанокompозитов, разработки метода расчета теплопроводности полимерных нанокompозитов и выбора наночастиц наполнителя.

Усиление полимерных нанокompозитов описывают тремя видами моделей: традиционные микромеханические, перколяционные и фрактальные. В настоящее время активно развивается теория усиления полимерных нанокompозитов на основе теории перколяции и фрактального анализа структуры наночастиц наполнителя и структуры нанокompозита. Необходимы теоретические исследования механических свойств, оценки прочности полимерных нанокompозитов на основе фрактального анализа.

Наиболее высокий прирост механических и теплофизических свойств обеспечивает наполнение полимеров углеродными нанотрубками. Однако необходимость однородного заполнения полимерной матрицы нанотрубками усложняет и удорожает технологию приготовления и применения нанокompозита по назначению. Дисперсные металлические наночастицы, в сравнении с УНТ, благодаря своей форме лучше диспергируются. Значительный положительный эффект достигается при относительно простых методах обработки: механизированном и ультразвуковом диспергировании. Поэтому наиболее перспективными для наполнения реактопластов и эластомеров являются дисперсные металлические наночастицы и необходимы исследования влияния нанопорошков из металлов на механические и теплофизические свойства нанокompозитов на основе реактопластов и эластомеров.

Ультразвуковая обработка полимерных композитов является перспективным способом совмещения компонентов. Ультразвуковое диспергирование анаэробных нанокompозитов экономически нецелесообразно из-за относительно высокой цены анаэробных герметиков и больших потерь раствора нанокompозита при диспергировании. При механизированном диспергировании потери раствора нанокompозита, в сравнении с ультразвуковым диспергированием, минимальные.

Необходимы экспериментальные исследования, которые позволят обосновать рациональные режимные, технологические параметры ультразвуковой обработки растворов эластомерных нанокompозитов и механизированного смешения

анаэробных нанокompозитов, обеспечивающие повышение эффективности диспергирующего смешения компонентов.

В сравнении со стационарными сушильными камерами, установки инфракрасного излучения являются компактными и мобильными, значительно меньше потребляют электроэнергии. Проведенный анализ литературных источников выявил отсутствие информации об обработке терморadiационным способом отверстий с нанесенными полимерными покрытиями при восстановлении корпусных деталей сельскохозяйственной техники. Математическое моделирование инфракрасного нагрева корпусных деталей позволит разработать метод и программное обеспечение расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки. Термическая обработка инфракрасным нагревом позволит повысить качество полимерных покрытий и существенно снизить энергозатраты при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники.

Точность отверстий после восстановления обеспечивают калиброванием. Необходимы всесторонние исследования процесса калибрования, качества и точности отверстий с покрытиями, выполненными нанокompозитами на основе эластомеров Ф-40 и Ф-40С, с целью определения рациональных геометрических параметров режущей кромки калибра.

Номенклатура деталей типа «вал» в узлах сельскохозяйственной техники отличается большим разнообразием по номенклатуре, конфигурации и типоразмерам. Для эффективного восстановления посадочных мест подшипников этих деталей адгезивами необходимо определить рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра и разработать метод расчета точностных характеристик деталей центрирующих приспособлений, что позволит оперативно и с достаточной точностью их определять для изготовления.

Наличие полимерного слоя в сопряжении «вал-подшипник» или «корпус-подшипник» снижает контактные напряжения при нагружении подшипников и повышает многократно ресурс подшипниковых узлов. Необходимы исследования трибологических параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, контактных напряжений и долговечности подшипников с посадками, восстанов-

ленными полимерными нанокомпозитами, а также выносливости при циклическом нагружении посадок из полимерных нанокомпозитов.

Целью настоящей работы – повышение качества восстановления и увеличение ресурса подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники путем разработки технологических основ восстановления посадок подшипников качения полимерными нанокомпозитами, включающие научно-обоснованный выбор наноразмерных наполнителей, исследование и разработку перспективных способов и технических средств обработки материалов.

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

1. Разработать методологию исследования и выбора, на основе фрактального анализа, наноразмерных частиц наполнителей для полимерных композитов, предназначенных для восстановления посадок подшипников качения, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов.

2. Исследовать теплопроводность, тепло- и термостойкость, деформационно-прочностные и адгезионные свойства полимерных нанокомпозитов. Оптимизировать состав и режим термической обработки эластомерных нанокомпозитов.

3. Исследовать физические свойства растворов эластомерных нанокомпозитов и определить рациональный режим ультразвуковой обработки. Исследовать дегазацию растворов эластомерных нанокомпозитов, дефектность и структуру полимерных покрытий. Определить рациональный режим механизированного диспергирования анаэробного нанокомпозита.

4. Разработать математические модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и корпусных деталей автотракторной техники, и на их основе методы и компьютерные программы расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в корпусных деталях. Исследовать, в сравнении с конвективным способом, дефектность эластомерных нанокомпозитных покрытий после инфракрасной сушки.

5. Провести экспериментальные исследования зависимости усилия резания покрытий эластомерных нанокомпозитов от переднего угла режущей кромки ка-

либра-резца. Определить рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца и исследовать качество и точностные характеристики покрытий эластомерных нанокompозитов.

6. Разработать метод расчета точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник».

7. Исследовать податливость опор на полимерных посадках, трибологические параметры, контактные напряжения и ресурс подшипников с посадками из полимерных нанокompозитов, долговечность посадок подшипников при циклическом радиальном нагружении, восстановленных полимерными нанокompозитами.

8. Разработать технологии, технологическое оборудование и оснастку для восстановления посадок подшипников качения полимерными нанокompозитами, а также оценить их технико-экономическую эффективность.

2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Общая методика исследований

Цель и задачи исследований, сформулированные в диссертационной работе, послужили основанием для разработки общей схемы проведения теоретических и экспериментальных исследований, представленной на рисунке 2.1

«Лаки Ф-40 и Ф-40С поставляются в виде раствора композита бутадиен-нитрильного каучука и модифицированной фенольной смолы в ацетоне. Разработчиком и производителем материала является АО «Институт масс имени Г.С. Петрова» (г. Москва). Эластомеры в виде раствора поступают к потребителю, в удобных для использования, пластиковых емкостях различного объема» [2,81].

Разница лаков Ф-40 и Ф-40С заключается в производителях каучука СКН-40С: в лаке Ф-40 каучук отечественного производства, Ф-40С – китайского производителя.

В АО «Научно-исследовательский институт химии и технологии полимеров имени академика В.А. Каргина с опытным заводом» (г. Дзержинск, Нижегородской области), разработан и выпускается анаэробный герметик Анаерм-111 (ТУ 2257-274-00208947-96). Адгезив относится к высокопрочным герметикам и предназначен для склеивания металлических изделий. Материал разливают в воздухопроницаемые полиэтиленовые флаконы емкостью 50, 100 и 200 г. В таблице 2.1 представлены характеристики анаэробного герметика АН-111 [75].

Для наполнения лаков Ф-40 и Ф-40С использовали наноразмерные алюминиевые и медные порошки.

В качестве наполнителя анаэробного герметика АН-111 использовали наночастицы алюминия.

В таблицах 2.2 и 2.3 представлены параметры нанопорошков алюминия [73] и меди [193].



Рисунок 2.1 – Общая схема теоретических и экспериментальных исследований

Таблица 2.1 – Характеристики анаэробного герметика АН-111 [75]

№ п/п	Наименование показателя	Значения
1	Кажущаяся вязкость по Брукфилдью при температуре 25° С, А/2/10, Мпа*с	2000 - 3000
2	Момент отвинчивания образцов из конструкционной стали резьба М10*1,5 после выдержки при (23 ± 2)° С в течение 1 часа и 3 часов, Н*м, не менее	20
3	Момент отвинчивания образцов из оцинкованной стали резьба М10*1,5 после выдержки при (23 ± 2)° С в течение 1 часа и 3 часов, Н*м, не менее	15
4	Предел прочности при аксиальном сдвиге через 24 часа при (23 ± 2)° С, МПа, не менее	20

Таблица 2.2 – Параметры нанопорошка алюминия [73]

№ 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

Таблица 2.3 – Параметры нанопорошка меди [193]

№ 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

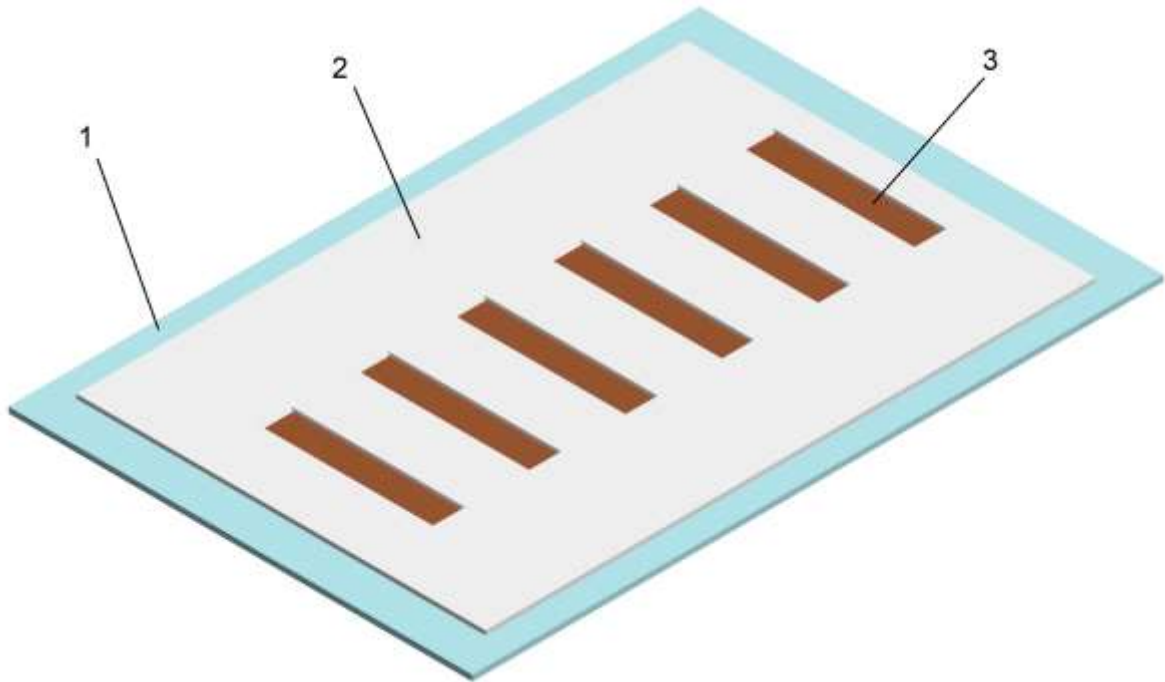
Эксперименты проводили по частным методикам, приведенным далее в этой главе.

2.2 Методика исследования деформационно-прочностных свойств пленок эластомеров и нанокompозитов на их основе

Механические свойства пленок эластомеров Ф-40 и Ф-40С и нанокompози-

тов на их основе оценивали по прочности образцов при одноосном растяжении σ_p , относительному удлинению ε_p и удельной работе деформации при разрушении пленок α_p [194].

Рамка изготовлена из ст3 и имеет шесть фрезерованных окон с размерами: 60×15 мм (рисунок 2.2).



1 – опорная пластина из фторопласта ($200 \times 160 \times 4$ мм); 2 – рамка-трафарет ($180 \times 140 \times 0,8$ мм); 3 – пленка ($50 \times 10 \times 0,15$ мм)

Рисунок 2.2 – Форма-оснастка для получения пленок

«Предельное отклонение размеров образцов по длине и ширине не превышало $\pm 0,1$ мм» [61].

«Механические свойства образцов исследовали с помощью разрывной машины ИР 5082-50» [61] (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Разрывная машина ИР 5082-50

«Образцы при испытаниях нагружали со скоростью 50 мм/мин» [61].

«Волны распространяются в высокоэластическом полимерном материале со скоростью 30...50 м/с» [61], поэтому выбранная скорость нагружения обеспечивала равномерное распределение напряжений по объему образца [195].

Прочность пленок σ_p рассчитывали по выражению [196]

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_H}, \quad (2.1)$$

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

Относительное удлинение пленок ε_p определяли по формуле [196]

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta l_o}{l_o} \cdot 100, \quad (2.2)$$

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

«Работу деформации, затрачиваемой на растяжение образцов А, определяли измеряя площадь на диаграмме, которая ограничена кривой "нагрузка-деформация" и осью абсцисс.

Удельную работу деформации при растяжении образцов α_p определяли деля значение работы деформации А на объем полимерной пленки $V = 180 \times 10^9 \text{ м}^3$.» [2]

Для определения оптимального состава нанокompозита проведен многофакторный эксперимент по композиционному плану В₂ [197-201].

Функцией отклика Y приняли удельную работу разрушения α , МДж/м³, а независимыми факторами: X₁ – содержание алюминиевых наночастиц (ТУ 1791-003-36280340-2008), масс.ч., X₂ – медных наночастиц (ТУ 1791-003-36280340-2008), масс.ч. [198] (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервалы варьирования фактора
		нижний	нулевой	верхний	
Концентрация: алюминированного нанопорошка	X ₁	0,05	0,09	0,13	0,04
медного нанопорошка	X ₂	0,01	0,03	0,05	0,02

«Для определения оптимального режима термической обработки эластомерного нанокompозита проведен активный эксперимент по композиционному плану В₂. Функция отклика Y – удельная работа разрушения образцов нанокompозита α_p , МДж/м³, независимые факторы: X₁ – температура, °С, X₂ – время, ч. нагрева конвективным способом» [157]. В таблице 2.5 представлены факторы, уровни и интервалы их варьирования.

Таблица 2.5 – Факторы с уровнями и интервалами их варьирования

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервалы варьирования фактора
		нижний	нулевой	верхний	
Температура, °С;	X ₁	130	140	150	10
Время, ч.	X ₂	2	3	4	1

Модуль упругости при растяжении E_p , МПа рассчитывали по формуле [202]

$$E_p = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_0}{A_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)}, \quad (2.3)$$

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.

Равномерное нагружение образцов при сжатии обеспечивали при помощи специального приспособления, изготовленного из стали 40Х (рисунок 2.4).

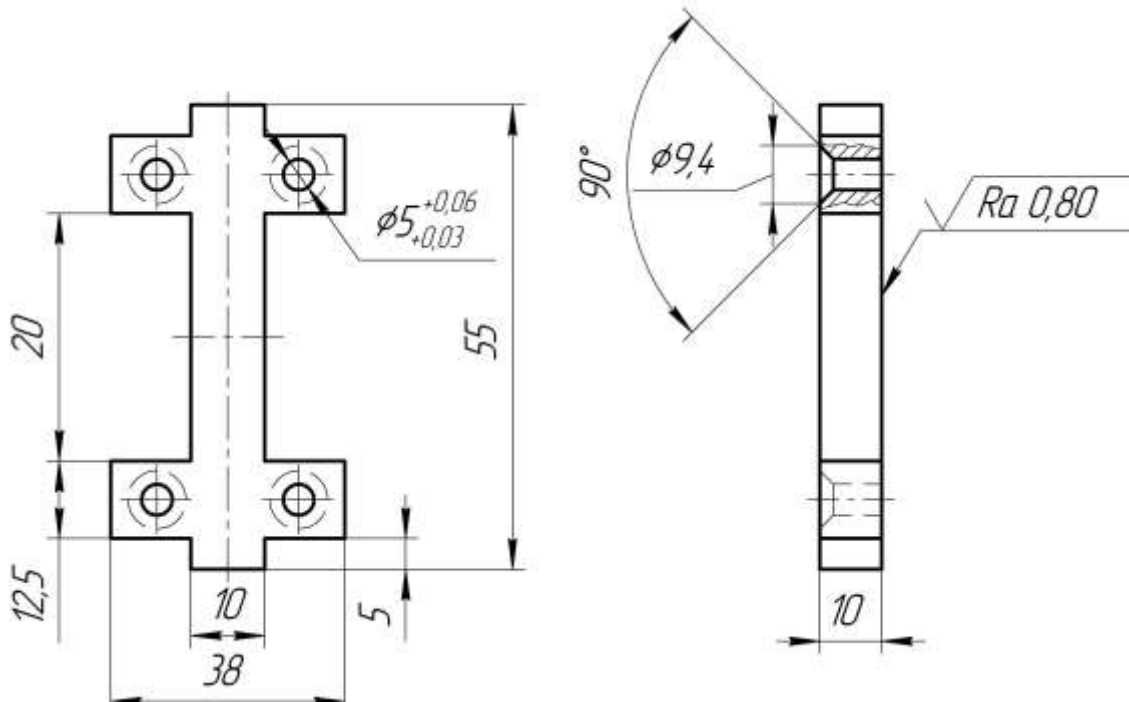


Рисунок 2.4 – Приспособление для равномерного нагружения полимерных пленок при испытаниях на сжатие [202]

Модуль упругости при сжатии E_c , МПа рассчитывали по формуле [202]

$$E_c = \frac{(F_2 - F_1) \cdot h_0}{A_0 \cdot (\Delta h_2 - \Delta h_1)}, \quad (2.4)$$

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;

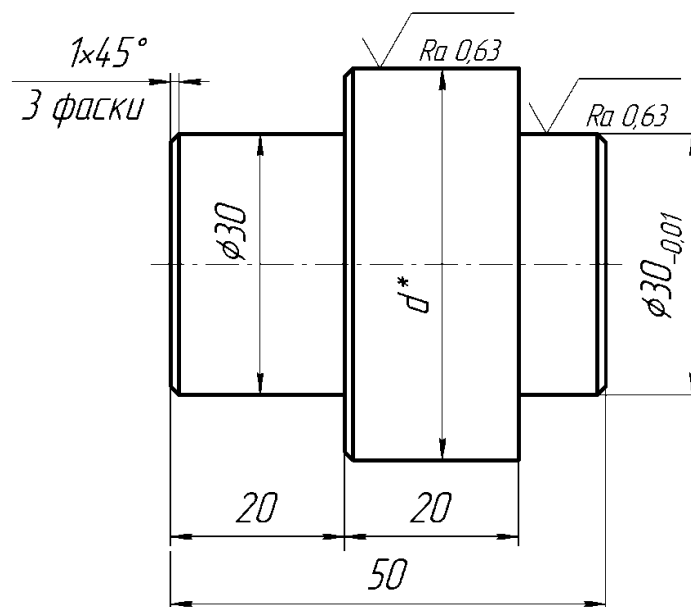
Δh_2 – изменение высоты или базы, соответствующее нагрузке F_2 , мм;

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

2.3 Методика исследования деформационно-прочностных свойств клеевых соединений выполненных герметиком АН-111 и нанокompозитом на его основе

«При исследовании механических свойств образцами являлись клеевые соединения «вал-подшипник 207» выполненные герметиком АН-111 и нанокompозитом на его основе» [49]. Валы изготовлены из стали 45 ГОСТ 1050-88 (рисунок 2.5) [203].

Зазор в соединении до склеивания, имитирующий износ, обеспечивали шлифованием валов. Соосность деталей клеевого соединения обеспечивали их центрированием при сборе в специальном центрирующем приспособлении (рисунок 2.6). Приспособление позволяет центрировать подшипники 207 и 209 с валами при склеивании.



d^* - диаметр склеиваемой поверхности

Рисунок 2.5 – Вал-образец для клеевых соединений с подшипником 207

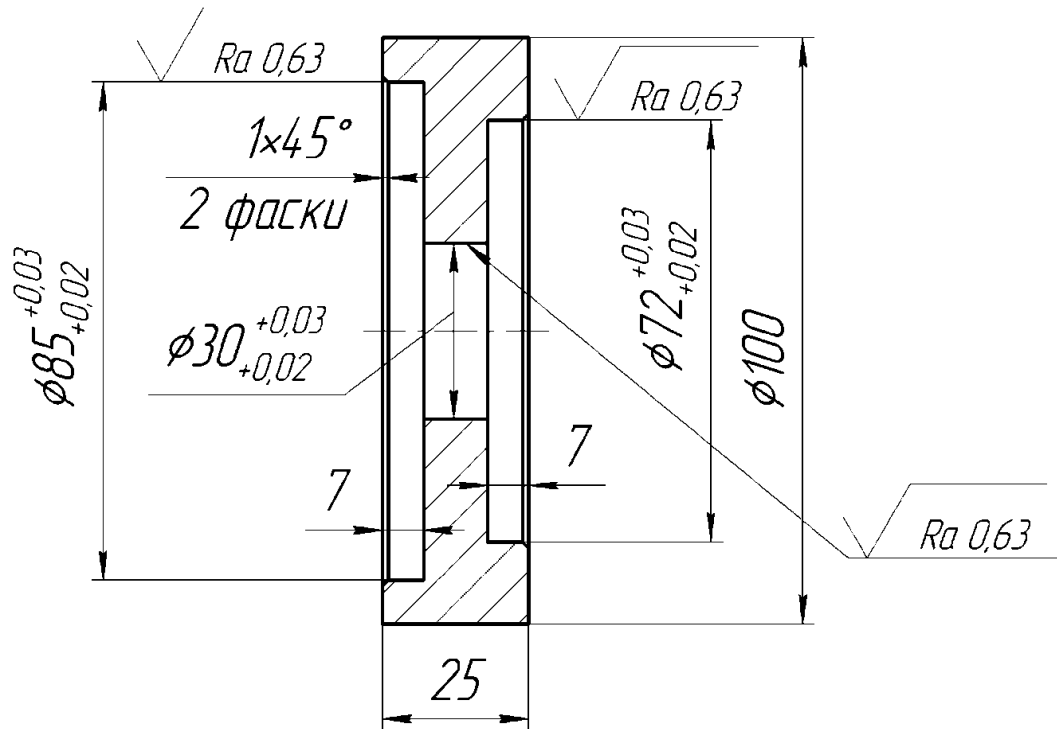


Рисунок 2.6 – Центрирующее приспособление для сборки клеевого соединения «вал-подшипник»

Адгезив наносили на подготовленные к склеиванию поверхности вручную с помощью кисти. Далее выполняли сборку подшипника с валом в центрирующем приспособлении (рисунок 2.7). После отверждения в течение 1 часа клеевое соединение «вал-подшипник» вынимали из центрирующего приспособления и выдерживали до полного отверждения.

Механические свойства (τ , ϵ_p и α_p) образцов исследовали с помощью разрывной машины ИР 5082-50 (по методике описанной в п.2.2).

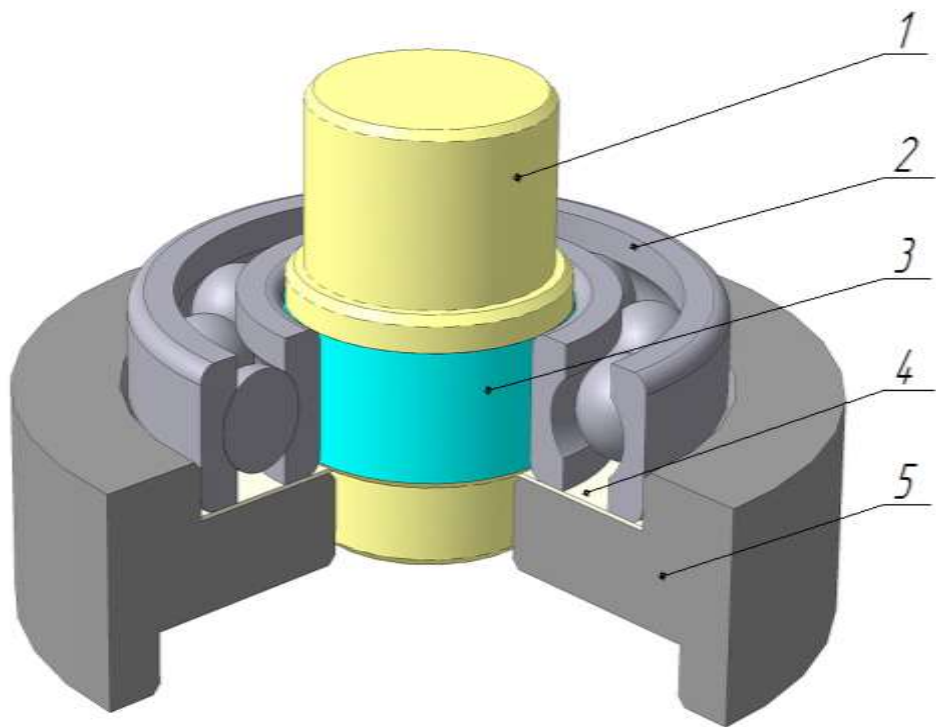
Касательное напряжение τ рассчитывали по формуле [196]

$$\tau = \frac{F_c}{A_H}, \quad (2.5)$$

где F_c – усилие сдвига, Н; A_H – площадь клеевого шва, m^2 .



a)



б)

1 – вал-образец; 2 – подшипник 207; 3 – адгезив; 4 – прокладка;

5 – центрирующее приспособление

Рисунок 2.7 – Клеевое соединение (а) и схема сборки (б)

Относительное удлинение клеевого шва при сдвиге ε_p определяли по формуле [196]

$$\varepsilon_p = 100 \times \frac{\Delta l_0}{l_0}, \quad (2.6)$$

где l_0 – начальная длина клеевого шва, мм; Δl_0 – изменение длины клеевого шва до момента сдвига, мм.

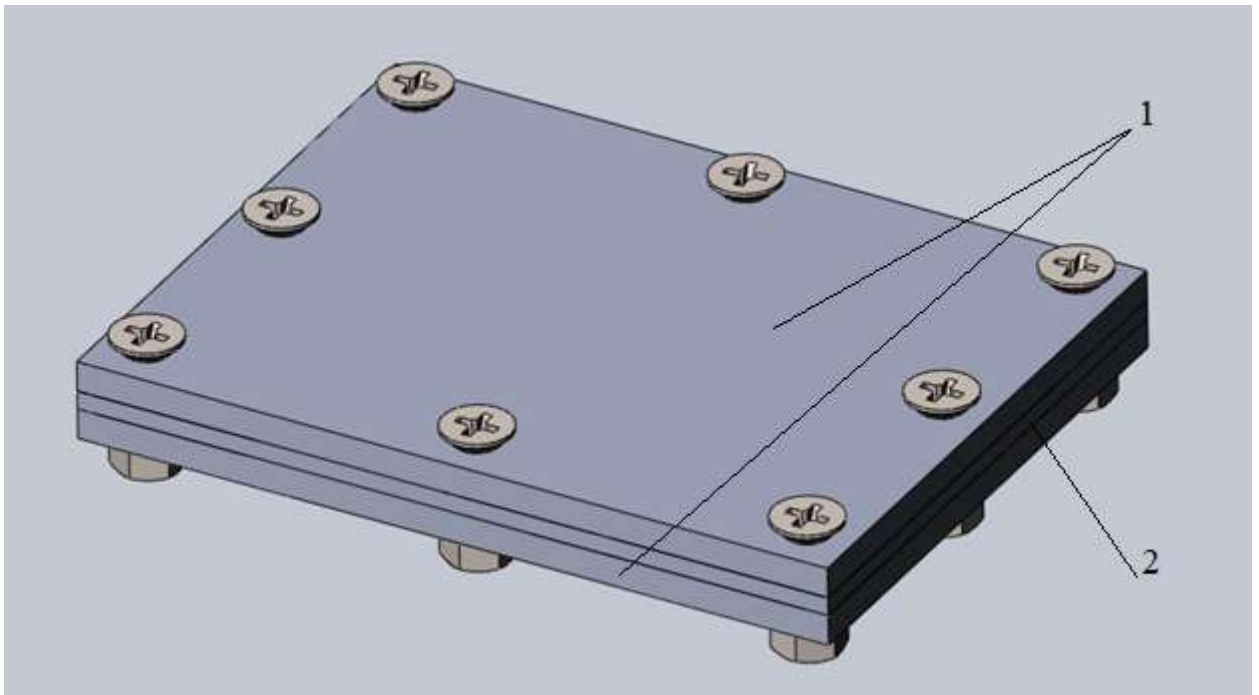
2.4 Методика исследования термостойкости эластомеров Ф-40, Ф-40С и нанокompозитов на их основе

«Термостойкость эластомеров и нанокompозитов на их основе оценивали по изменению прочности и относительного удлинения образцов, которые были подвергнуты термическому старению в условиях ограниченного доступа кислорода воздуха (ОДКВ)» [2, 149]. Термическое старение образцов проводили в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3. Режим обработки: температура 200°C, время выдержки 2 ч. Образцы изготовили в виде полимерных пленок размерами 50×10×0,15 мм. Для ограничения доступа кислорода воздуха образцы помещали в специальную форму-оснастку (рисунок 2.8).

«Для ограничения доступа кислорода воздуха к пленкам, опорные пластины и рамку-трафарет с пленками, стягивают с помощью восьми болтов» [2] (рисунок 2.9).

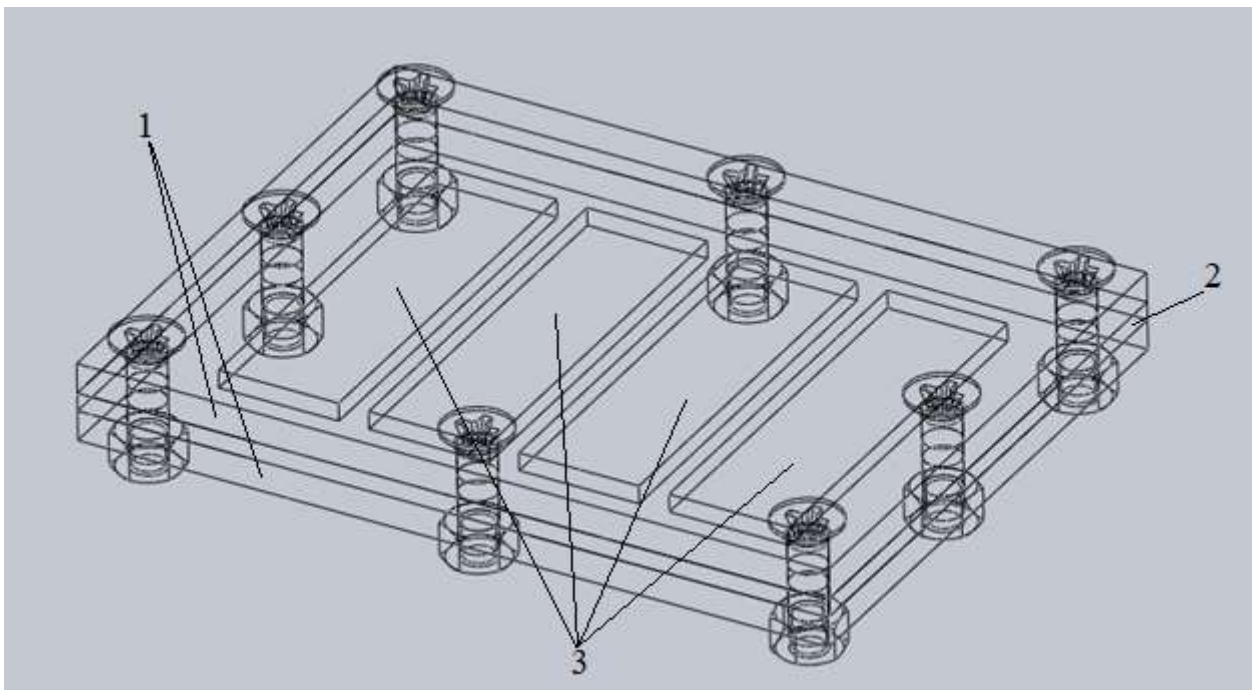
После сборки форма-оснастка помещается в сушильный шкаф, в котором проводят старение образцов.

По завершении высокотемпературного старения образцы подвергают кондиционированию при стандартной температуре на протяжении 16 ч.



1 – опорная пластина; 2 – рамка-трафарет (рисунок 2.2)

Рисунок 2.8 – Форма-оснастка для высокотемпературного старения пленок в условиях ОДКВ



1 – опорная пластина; 2 – рамка-трафарет; 3 – пленки; 4 – болт стяжной
Рисунок 2.9 – 3D-Сборка формы-оснастки для высокотемпературного старения пленок в условиях ОДКВ

Коэффициенты старения (K_σ, K_ε) образцов рассчитывали по формуле [75]

$$K = \frac{A}{O}, \quad (2.7)$$

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

2.5 Методика исследования теплостойкости эластомеров Ф-40, Ф-40С и нанокompозитов на их основе

Теплостойкость исследовали, фиксируя изменения условного модуля упругости полимерных покрытий, нагретых до различных температур, при внедрении в них шарикового индентора. Модуль упругости полимерного материала резко снижается при температуре равной или выше температуры теплостойкости.

Модуль упругости рассчитывали по формуле Герца [24]

$$E = 0,795 \frac{P}{\Delta^{3/2} d^{1/2}}, \quad (2.8)$$

где P – нагрузка на шарик, Н; Δ – глубина погружения шарика в полимерное покрытие, м; d – диаметр шарика, $d = 0,01$ м.

«В качестве образцов использовали цилиндрические диски диаметром 30 и толщиной 5 мм, изготовленные из Ст.3. На верхнюю поверхность диска нанесли послойно покрытие из раствора полимерного материала» [2]. Толщина покрытия составляла 0,2 мм. Покрытие подвергалось термической обработке в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3 при оптимальном режиме.

«Теплостойкость эластомерных покрытий исследовали с помощью модернизированного твердомера типа ТП» [2]. На рисунках 2.10 и 2.11 показаны общий вид прибора и его кинематическая схема [24].

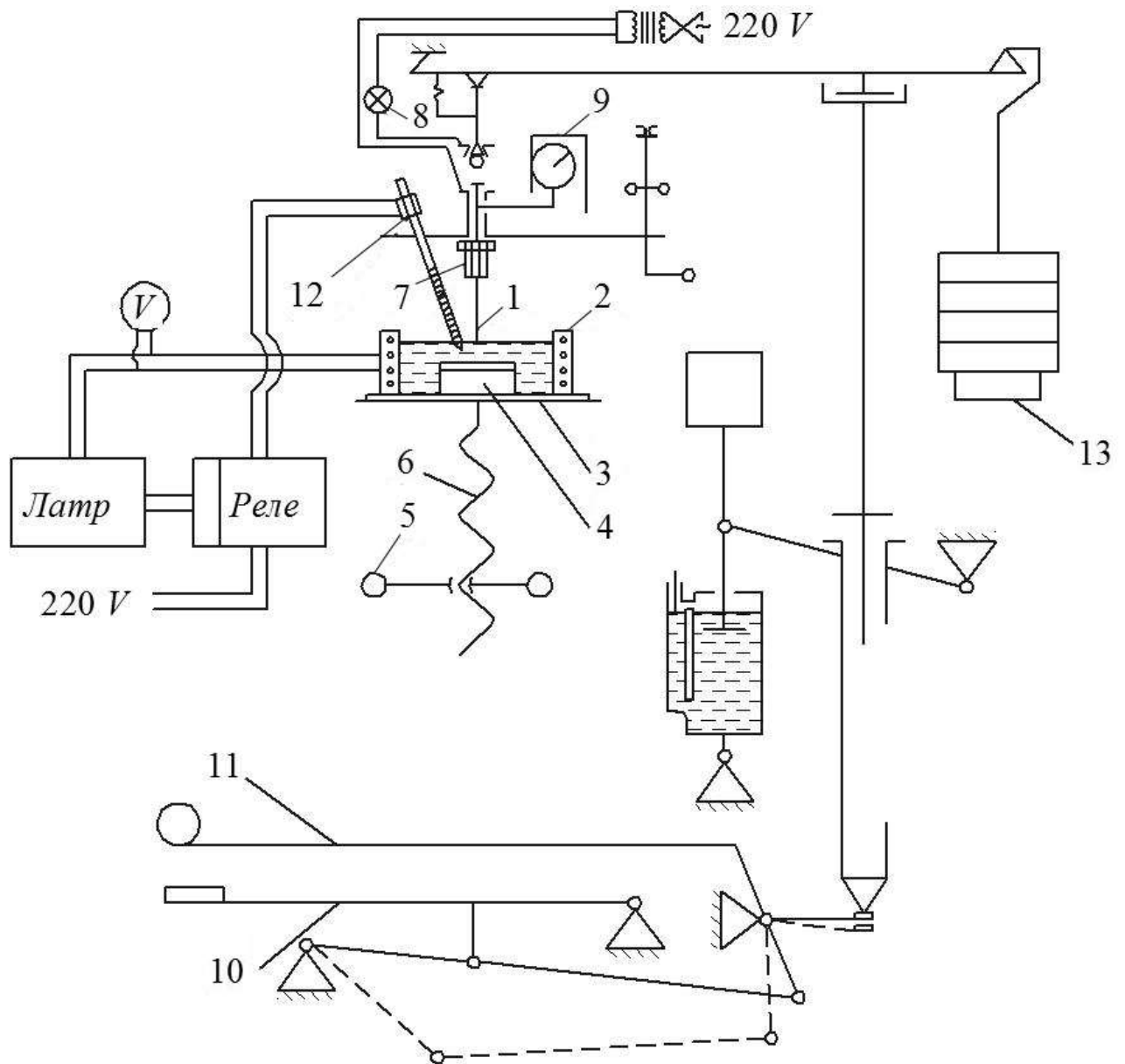
Первоначально диск с полимерным покрытием размещают на опорном столе. Далее с помощью маховика 5 и винта 6 опорный стол поднимают до соприкосновения полимерного покрытия и шарикового индентора 1, установленного в шпинделе 7. Контрольная лампочка 8 загорается при контакте шарикового индентора и полимерного покрытия



Рисунок 2.10 – Общий вид модернизированного твердомера типа ТП [24]

«Нагрузку на индентор обеспечивают грузы 13. Рукояткой 11 взводят механизм грузового привода, затем нажимают на рычаг спусковой 10 и по секундомеру отсчитывают время приложения нагрузки. Время под нагрузкой составляет 60 с.» [24].

«Глубину внедрения нагруженного индентора в полимерное покрытие измеряют с помощью индикаторной головки МИГ-1М с ценой деления 0,001 мм, размещенной на станине прибора» [24].



1 – индентор; 2 – ванна; 3 – стол; 4 – образец; 5 – маховик; 6 – винт;
7 – шпindel; 8 – лампочка; 9 – индикаторная головка; 10 – рычаг спусковой; 11 –
рукоятка; 12 – электроконтактный термометр; 13 – грузы [24]

Рисунок 2.11 – Кинематическая схема модернизированного твердомера типа

2.6 Методика исследования теплопроводности эластомеров Ф-40, Ф-40С и нанокompозитов на их основе

Теплопроводность эластомеров Ф-40, Ф-40С и нанокompозитов на их основе исследовали по методу температурного градиента [204]. На рисунке 2.12 изображена установка для исследования теплопроводности полимерных материалов (в приложении Б приведены принцип работы и принципиальная схема установки) [2, 24, 53, 204, 205].



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

Рисунок 2.12 – Установка для исследования теплопроводности полимеров

Коэффициент теплопроводности исследуемых образцов λ_1 рассчитывали по формуле [149]

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_2 l_1 (T_2 - T_3) S d \tau}{S d \tau l_2 (T_1 - T_2)} = \lambda_2 \frac{l_1 (T_2 - T_3)}{l_2 (T_1 - T_2)}, \quad (2.9)$$

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.

2.7 Методика исследования физических свойств растворов эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе

Чтобы определить параметры УЗО растворов полимерных материалов в диссертации экспериментально исследованы физические свойства эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе двух составов:

- состав №1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч, алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч.;

- состав №2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,09 масс.ч.; медный нанопорошок – 0,03 масс.ч.

Плотность растворов полимерных материалов исследовали по методике [206], с помощью ареометра АОН-1 (рисунок 2.13). Прибор позволяет определять плотность полимерных растворов в диапазоне от 700 до 1840 кг/м³.

Коэффициент адиабатической сжимаемости полимерных растворов определяли как относительное изменение объема $\frac{\Delta V}{V}$ при повышении давления на величину ΔP [92].

Принципиальная схема пьезометра показана на рисунке 2.14, а на рисунке 2.15 – его фото. Стекланный сосуд 1, заполненный полимерным раствором, раз-

мешают внутри сосуда 2. Через штуцер 5 в сосуд 2 нагнетают воздух с помощью поршневого компрессора марки FIAC FX 224 ГОСТ 20073-81.



Рисунок 2.13 – Ареометр АОН-1

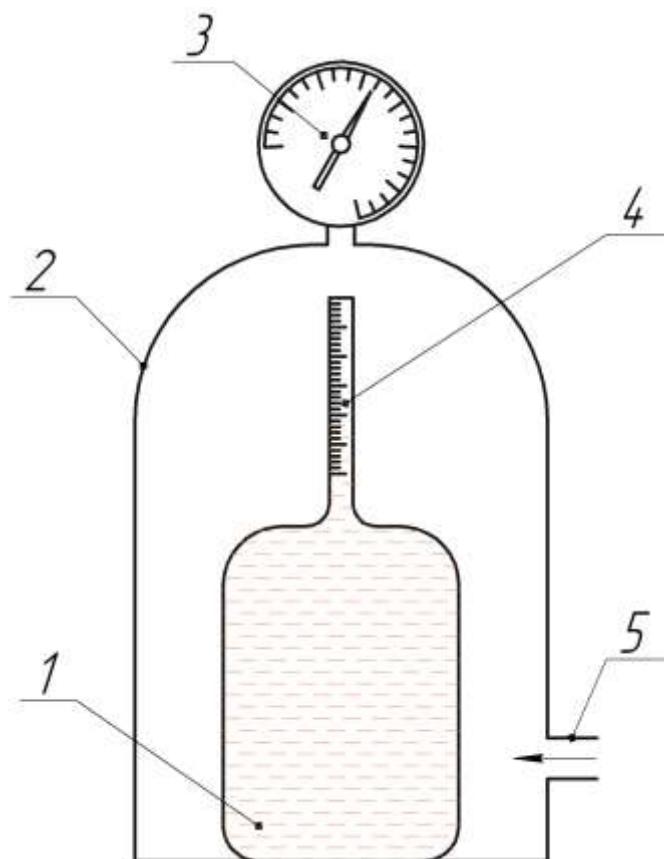


Рисунок 2.14 – Принципиальная схема пьезометра



Рисунок 2.15 – Пьезометр

Это приводит к избыточному давлению внутри сосуда 2 и его воздействию через открытую горловину 4 сосуда 1 на исследуемый полимерный раствор. Полимерный раствор сжимается и его уровень в горловине 4 снижается. Изменение объема исследуемого полимерного раствора фиксируют по разметке на горловине сосуда 1.

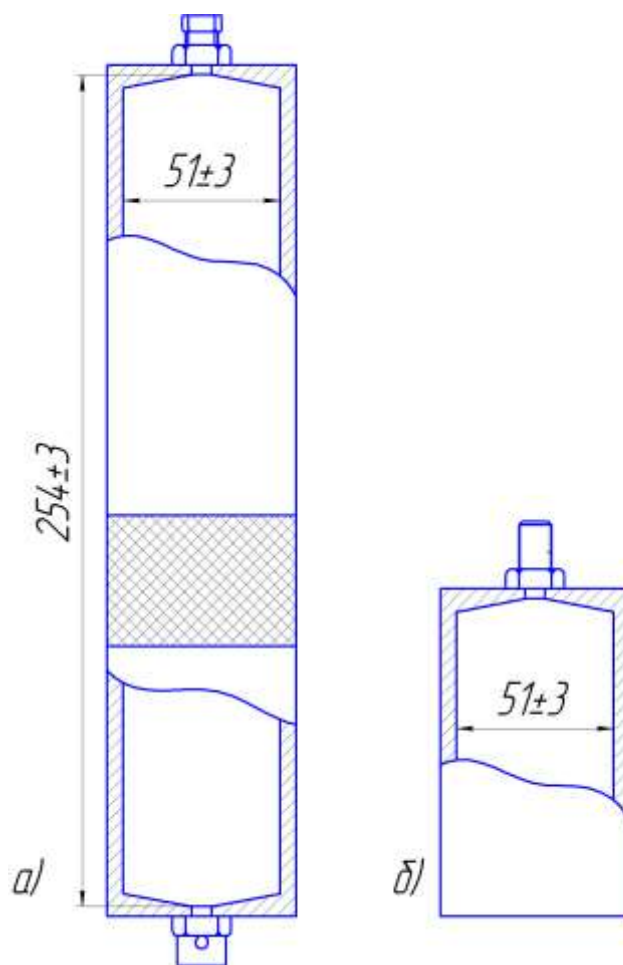
Избыточное давление в сосуде 2 фиксируют с помощью манометра 3 марки МТ-100 по ГОСТ 2405-88 [207].

Значения коэффициента адиабатической сжимаемости β_{ad} рассчитали по формуле [195]

$$\beta_{ad} = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P}, \quad (2.10)$$

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

Давление насыщенных паров полимерных растворов определяли по ГОСТ 1756-2000 [208], с помощью бомбы (рисунок 2.16)



а – воздушная камера; б – жидкостная камера

Рисунок 2.16 – Бомба для определения давления пара

Скорость распространения звуковых волн в жидкости рассчитывали по формуле [172]

$$C = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad} \cdot \rho}}, \quad (2.11)$$

где β_{ad} – коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

2.8 Методика исследования режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования растворов эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе

Звуковое давление P_A возникающее в ходе УЗО полимерных растворов рассчитали по формуле [167]

$$P_A = \sqrt{\frac{2W}{S_t}} \sqrt[4]{\frac{\rho}{\beta_{ад}}}, \quad (2.12)$$

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

Критерий эрозионной активности χ определяли по формуле

$$\chi = \frac{8,14(P_A - P_0)^{\frac{5}{2}} (0,2P_A + P_0)^{\frac{7}{2}}}{P_A^3 P_{II}^3}, \quad (2.13)$$

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

«Для ультразвуковой обработки растворов нанокompозитов использовали ультразвуковую ванну «GRAD 0,5 HOME STYLE» [61] (рисунок 2.17, таблица 2.6).

Таблица 2.6 – 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	160x90x200	145x85x55	1,7



Рисунок 2.17 – Ультразвуковая ванна «GRAD 0,5 HOME STYLE»

Взвешивание компонентов проводили используя аналитические весы марки ВЛА-200М с ценой деления 0.0001 г. По завершении интервала озвучивания определяли вязкость раствора нанокompозита с помощью вискозиметра типа ВПЖ-2 по методике ГОСТ 18249-72 (рисунок 2.18).

Динамическую вязкость раствора нанокompозита рассчитали по формуле [209]

$$\eta = K\rho\tau, \quad (2.14)$$

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

Рациональным временем УЗО раствора эластомерного нанокompозита приняли время озвучивания по достижении которого значения вязкости раствора нанокompозита стабилизировались.

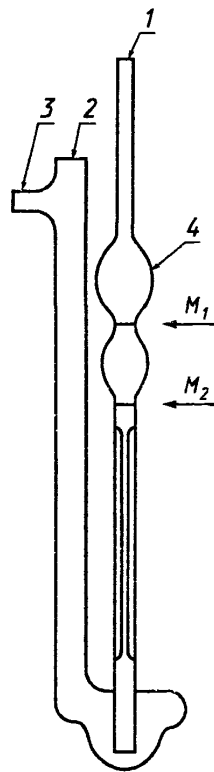


Рисунок 2.18 – Вискозиметр типа ВПЖ-2

2.9 Методика исследования дегазации растворов нанокompозитов на основе эластомера Ф-40С при ультразвуковой обработке

Дегазацию растворов эластомерных нанокompозитов исследовали на лабораторной установке (рисунок 2.19), в состав которой входят: ультразвуковая ванна «GRAD 0,5 HOME STYLE», весы лабораторные ВК 3000.1 [210] (таблица 2.7), инфракрасный пирометр Testo 830-T4 [211] (таблица 2.8).

Таблица 2.7 – Технические характеристики весов ВК 3000.1 [210]

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



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

Рисунок 2.19 – Лабораторная установка для исследования дегазации растворов эластомерных нанокомпозитов

Таблица 2.8 – Технические характеристики инфракрасного пирометра Testo 830-T4 [211]

Параметры	Testo 830-T4
Тип К (NiCr-Ni)	
Диапазон измерений	-50 ... +500 °C
Погрешность	±0,5 °C + 0,5 % от изм. знач.
Разрешение	0,1 °C
Частота измерений	1,75 с.
Инфракрасное измерение	
Диапазон измерений	-30 ... +400 °C
Погрешность	±1,5 °C (-20 ... 0 °C) ±2 °C (-30 ... -20,1 °C) ±1 °C или ±1 % от изм. знач. (в ост. диапазоне)
Разрешение	0,1 °C
Частота измерений	0,5 с.
Общие технические данные	
Корпус	ABS

Коэффициент излучения	настраиваемый (от 0,2 до 1,0)
Расстояние до точки замера	30:1 (обычно на расстоянии 0,7 м от объекта измерения) 24 мм @ 700 мм (90%)
Целеуказание	2-х точечный лазерный указатель
Спектральный диапазон	8 ... 14 μm
Тип батареек	9 В блочная батарейка
Ресурс батареек	15 ч
Размеры	190 × 75 × 38 мм
Рабочая температура	-20 ... +50 °С
Температура хранения	-40 ... +70 °С
Вес	200 г

Температура раствора нанокompозита фиксировалась с интервалом времени в 2 мин с помощью инфракрасного пирометра Testo 830-T4 на протяжении всего ультразвукового диспергирования.

2.10 Методика исследования структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после УЗО

Образцами использовали пленки квадратной формы размерами 10×10×0,1 мм, вырезанные из пленок нанокompозитов составов №1 и №2. Растворы нанокompозитов предварительно диспергировали ручным смешением и ультразвуковой обработкой, после чего изготовили из них пленки по методике, описанной в разделе 2.2. Микроструктуру образцов нанокompозитов на основе эластомера Ф-40С изучали методом растровой электронной микроскопии. Для исследований использовали электронно-ионный сканирующий микроскоп «Quanta 600 FEG» с электроннолучевой колонной, оснащенной вольфрамовым катодом. Описание и принцип работы микроскопа представлены в приложении В.

2.11 Методика исследования эффективности смешения и диспергирования раствора нанокompозита на основе анаэробного герметика Анатерм 111 механизированным способом

Смешение и диспергирование раствора нанокompозита на основе анаэробного герметика Анатерм 111 проводили с использованием механизированной ме-

шалки. Конструкция мешалки позволяет регулировать частоту вращения рабочих органов в диапазоне: 1100; 1200; 1320; 1410; 1490 мин⁻¹. Время обработки раствора нанокompозита при $n = 1100$ мин⁻¹ составляло: $t = 3; 4; 5$ и 7 мин, при $n = 1490$ мин⁻¹ – 3 мин.

Вязкость раствора нанокompозита по завершении диспергирования определяли по методике, описанной в разделе 2.8.

2.12 Методика исследования параметров инфракрасного нагрева корпусных деталей с полимерными покрытиями

Образцами являлись: подшипниковый щит электродвигателя 4A112-2 и корпуса коробок передач 24-1701015 и 53A-1700010-05 автомобилей ГАЗ-24 и ГАЗ-53 с изношенными подшипниковыми отверстиями [212-215].

Нагрев подшипникового щита осуществляли при помощи кварцевого инфракрасного излучателя, который состоит отражателя марки QTSR и лампы QTS мощностью 750 Вт.

Нагрев корпусных деталей автомобилей выполняли двумя одинаковыми инфракрасными установками, размещенными напротив торцов детали на определенном расстоянии L . Для нагрева коробки автомобиля ГАЗ-24 использовали «излучатель QTS мощностью 750 Вт и отражатель марки QTSR, коробки автомобиля ГАЗ-53 – излучатель QTS мощностью 1500 Вт и отражатель марки QTSR» [157].

Температуру корпусных деталей измеряли инфракрасным пирометром марки Testo 830-T4.

2.13 Методика исследования усилия резания при калибровании эластомерных нанокompозитных покрытий

Исследовали покрытия эластомерных нанокompозитов трех составов:
состав №1: эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 1,9 масс. ч. и медный нанопорошок – 1,8 масс. ч.;

состав №2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,09 масс. ч. и медный нанопорошок – 0,03 масс. ч.;

состав №3: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс. ч.

Образец представлял собой стальную втулку с эластомерным нанокompозитным покрытием нанесенным на внутреннюю поверхность (рисунок 2.20).

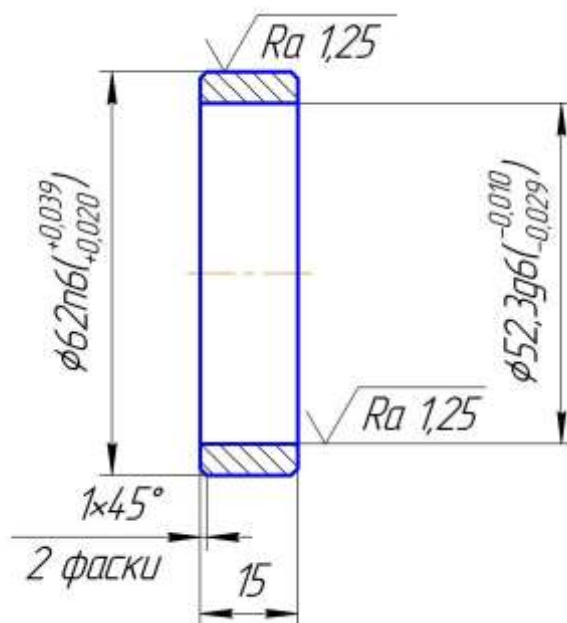
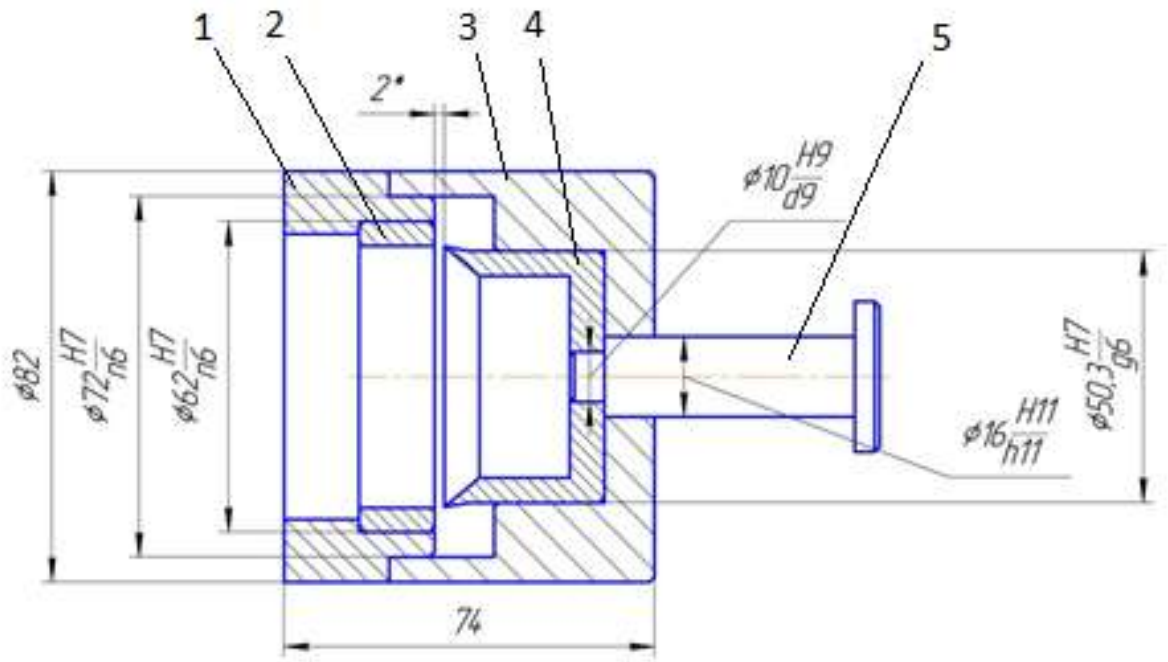


Рисунок 2.20 – Втулка для исследования усилия резания эластомерных нанокompозитных покрытий

Эластомерное нанокompозитное покрытие наносили послойно с помощью кисти волосяной №3, с просушиванием каждого слоя в течение 20 мин. Толщина покрытия составляла 0,2 мм. Втулки с покрытием подвергали термической обработке в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3. Режим термической обработки: температура 150°C, время 3 ч [216].

Для исследования усилия резания эластомерных нанокompозитных покрытий изготовили оригинальное приспособление (рисунки 2.21, 2.22, 2.23, 2.24) [2, 54, 180].



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

Рисунок 2.21 – Приспособление в сборе для исследования усилия резания полимерных покрытий

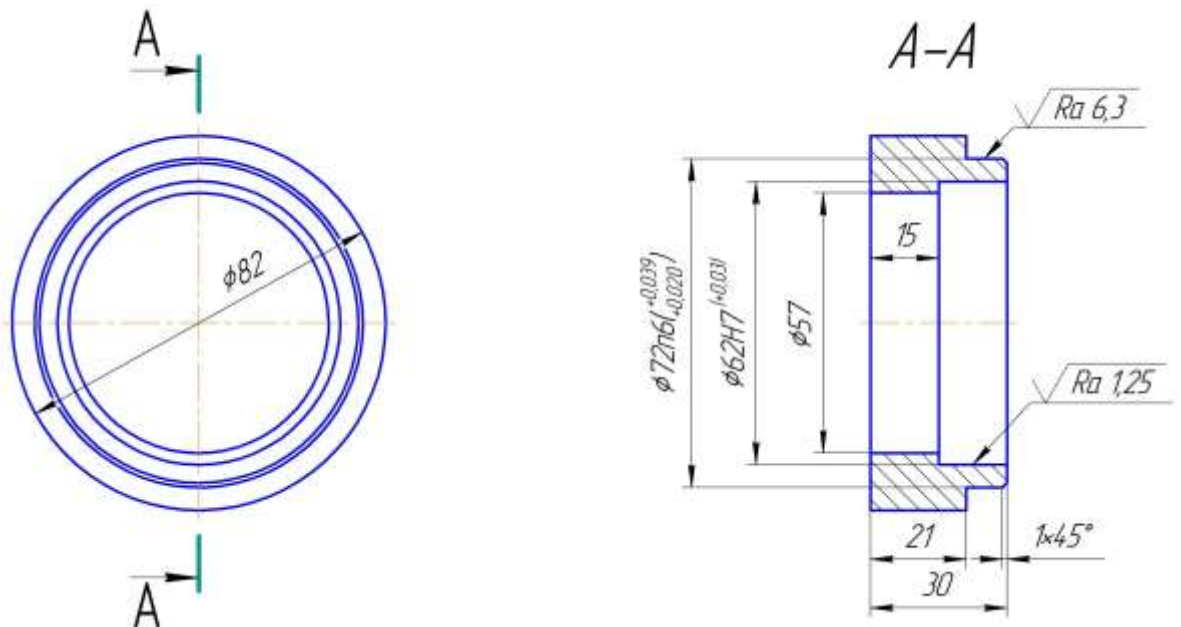


Рисунок 2.22 – Корпус центрирующей оправки

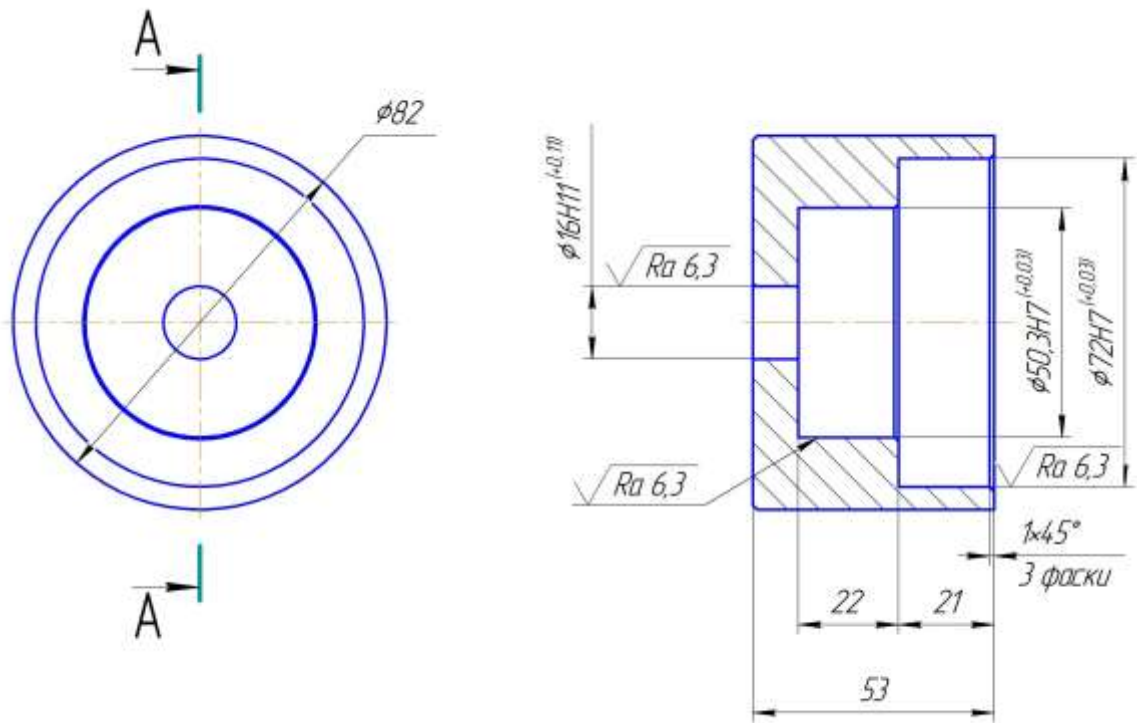


Рисунок 2.23 – Крышка центрирующей оправки

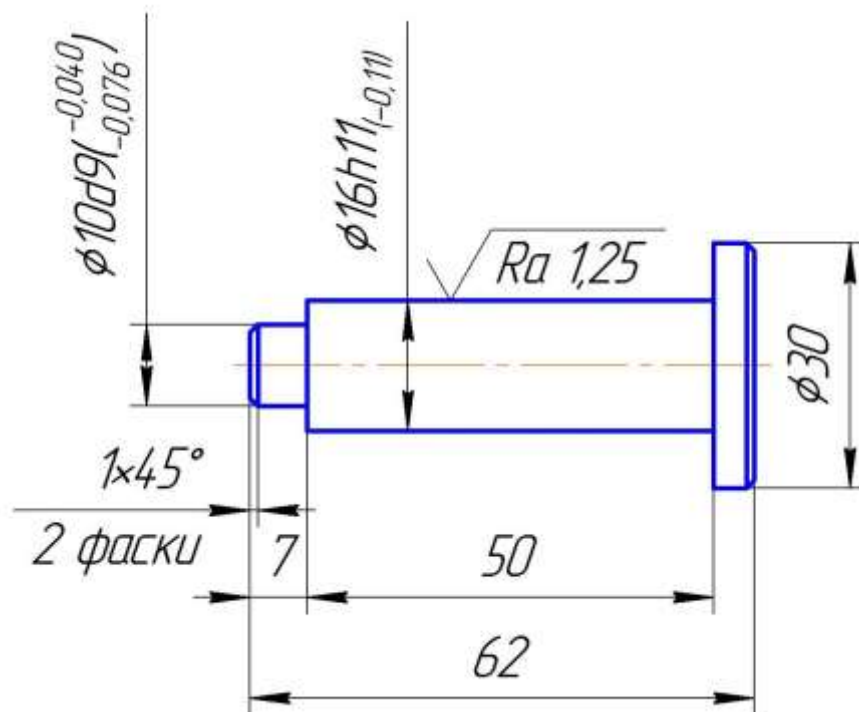


Рисунок 2.24 – Палец

Для определения рационального угла режущей кромки калибра-резца исследования усилия резания эластомерных нанокompозитных покрытий проводили с помощью калибров-резцов, изготовленных из стали 40X с углом заточки режущей кромки: 50° , 60° , 70° . Рабочий чертеж калибра-резца представлен на рисунке 2.25.

Калибрование покрытий исследовали с помощью разрывной машины ИР 5082-50 (рисунок 2.3).

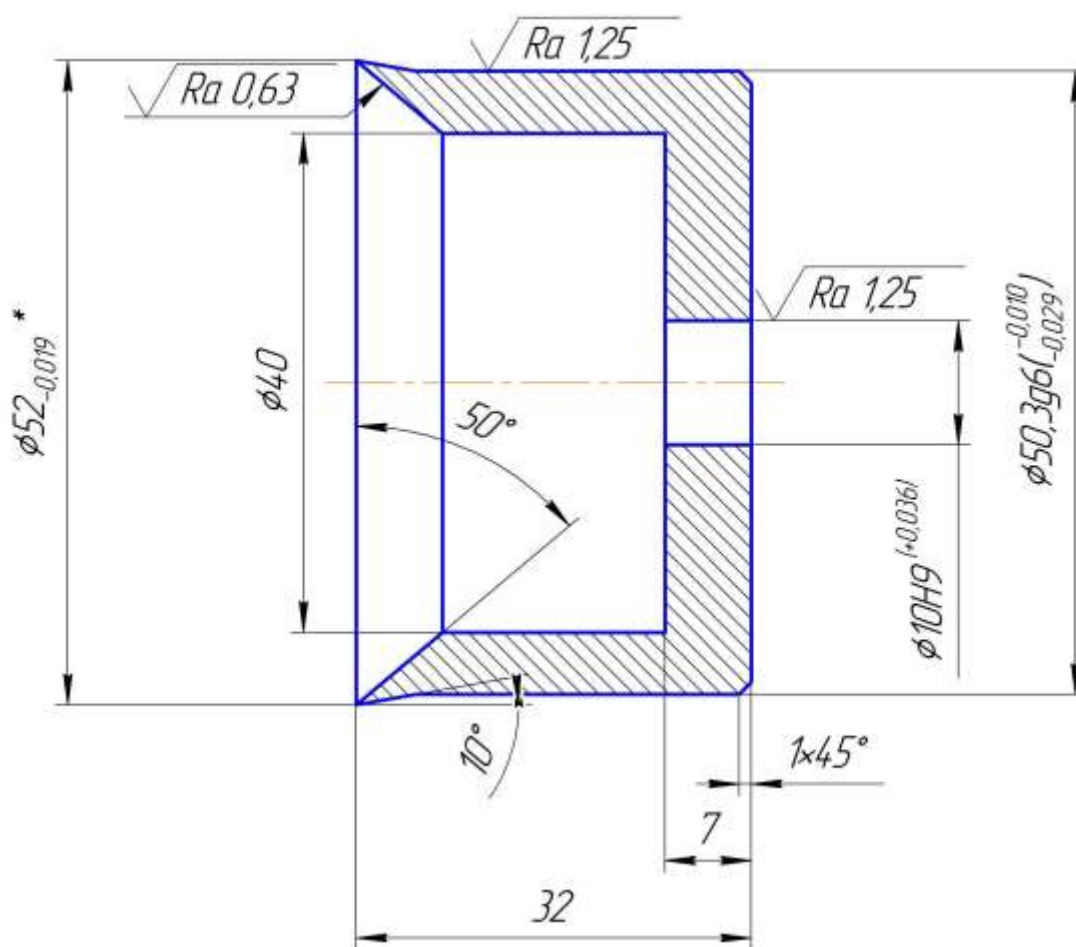


Рисунок 2.25 – Калибр-резец

На рисунке 2.26 показано фото деталей оснастки для исследования усилия резания эластомерных нанокompозитных покрытий при различных углах резания.



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

Рисунок 2.26 – Фото приспособления для исследования усилия резания эластомерных нанокompозитных покрытий при различных углах резания

2.14 Методика исследования повреждаемости и точностных характеристик эластомерных нанокompозитных покрытий после ультразвукового диспергирования, инфракрасной обработки и калибрования

Дефектность эластомерных нанокompозитных пленок, подвергнутых в ходе изготовления, ультразвуковому диспергированию оценивали по площади разрушенного покрытия, по размерам (диаметр пузырьков) и количеству пузырьков на единицу площади [2, 54, 217]. По таким же оценочным параметрам оценивали дефектность полимерных покрытий после инфракрасной обработки. Образцы по завершении калибрования исследовали на наличие дефектов полимерного покрытия: растрескивание, отслаивание и сморщивание.

Площадь разрушенного покрытия в процентах определяли по значению частотного показателя разрушения C по формуле [217]

$$C = \frac{n_1}{n} \times 100, \quad (2.15)$$

где n_1 – количество квадратов (5x5 мм), в которых наблюдается разрушение покрытия; n – общее количество квадратов на прозрачной пластине или проволочной сетке.

«Размеры пор (пузырьков), наличие трещин, отслаивания, сморщивания покрытия измеряли с помощью микроскопа МПБ-2, обеспечивающего 24-х кратное увеличение» [2].

«Оценку точности отверстий с полимерным покрытием после калибрования проводили по двум параметрам: овальность отверстий и отклонение диаметра отверстия от заданного размера» [2].

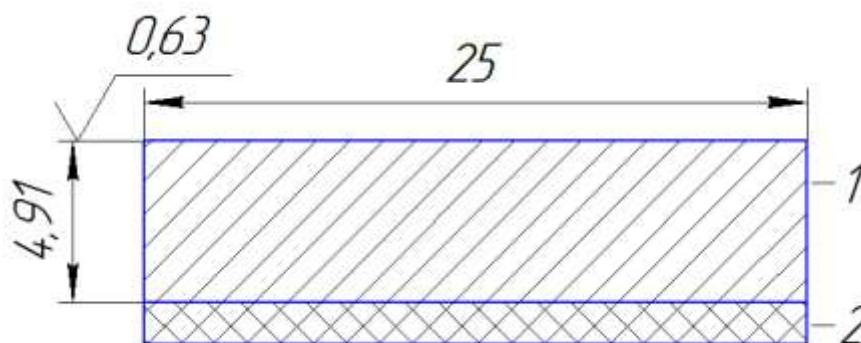
2.15 Методика исследования коэффициента Кирхгофа, коэффициента податливости покрытий из эластомера Ф-40С и нанокompозитов на его основе

«В качестве образца в исследованиях использовали пластину из стали ШХ-15 ($R_a=0,63$) размерами $100 \times 25 \times 4,92$ мм с подложкой из полимерного покрытия» [157] (рисунок 2.27) [203].

«При таких размерах момент инерции поперечного сечения пластины составляет $248,1 \text{ мм}^4$, что эквивалентно моменту инерции кольца подшипника 209» [16].

После зачистки и обезжиривания на поверхность основания пластины нанесли полимерное покрытие. Материал покрытия эластомер Ф-40С и нанокompозиты на его основе: состав №1 (эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наноразмерный порошок алюминия – 0,075 масс.ч.); состав №2 (эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.;

наноразмерные порошки алюминия – 0,09 масс.ч. и меди – 0,03 масс.ч.). Толщина покрытий: 0,1; 0,125; 0,15 мм.



1 – пластина; 2 – подложка из полимерного покрытия

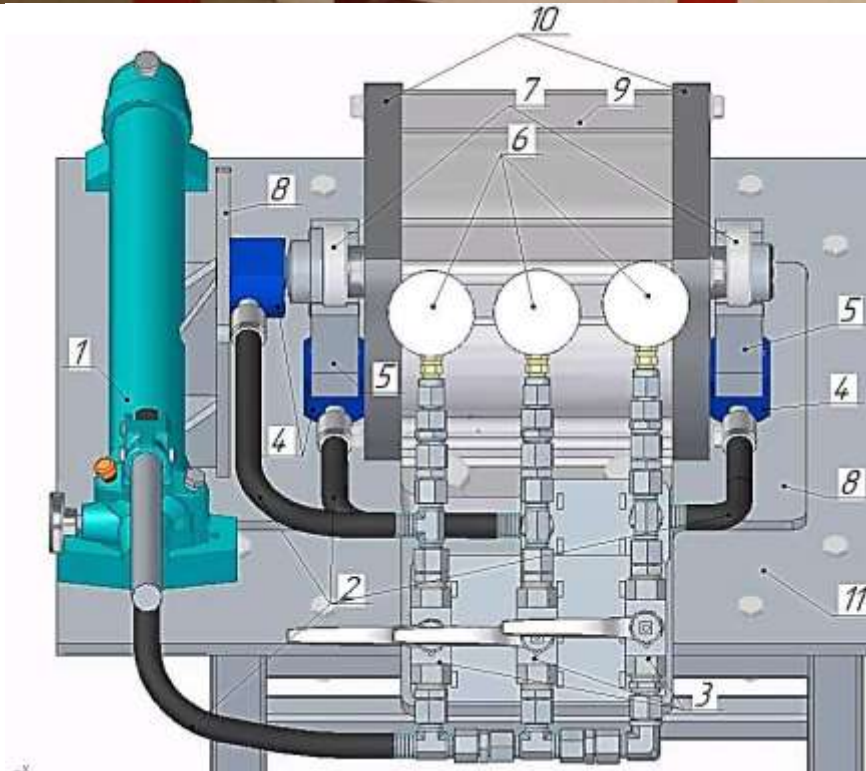
Рисунок 2.27 – Пластина с подложкой

«Коэффициенты Кирхгофа η и постели K исследовали с помощью стенда для статического нагружения подшипниковых узлов» [157] (рисунок 2.28) [218]. Описание работы стенда представлено в приложении Г.

2.16 Методика исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения с посадками восстановленными эластомерными нанокompозитами

Исследования трибологических параметров и долговечности проводили на стенде для испытания подшипников 209 при статическом нагружении (рисунок 2.28).

«Первоначально исследовали зависимость площади пятна контакта шарика с дорожкой качения наружного кольца подшипника от нагрузки» [157]. Для этого использовали, как в предыдущем эксперименте, нагрузочную вилку и стальной шарик диаметром 12,7 мм. Нагрузочную вилку разобрали и в проем между двумя квадратными втулками разместили наружное кольцо подшипника 209.



1 – гидронасос; 2 – магистрали; 3 – запорные краны; 4 – гидроцилиндры; 5 – нагрузочная вилка; 6 – манометры; 7 – вспомогательный подшипник; 8 – опорная пластина; 9 – электродвигатель; 10 – подшипниковый щит; 11 – рама станда

Рисунок 2.28 – Стенд для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения [218]

На наружное кольцо подшипников нанесены эластомерные нанокompозитные покрытия составов №1 и №2 толщиной 0,15 мм. Затемвилку собрали и между дорожкой качения наружного кольца подшипника и нагрузочнойвилкой установили стальной шарик. «Для фиксации оттиска пятна контакта между беговой дорожкой подшипника и шариком проложили полоску копировальной бумаги марки MB-16 ГОСТ 489-88. Нагрузку на шарик от гидроцилиндра передавала нагрузочнаявилка» [157]. Размеры полуосей a и b эллипса пятна контакта измеряли микроскопом МПБ-2.

Площадь пятна контакта (эллипса) определяли по формуле [219]

$$S = \pi ab \quad (2.18)$$

По результатам эксперимента строили тарировочные графики зависимости площади пятна контакта от нагрузки на шарик.

Коэффициент распределения нагрузки между телами качения [10, 16]

$$K_{pn} = \frac{P_1}{P_0}, \quad (2.20)$$

где P_1 и P_2 – соответственно, нагрузка на первое боковое и центральное тела качения, Н.

Расчетную долговечность L подшипников 209 определяли по формуле [203, 219]

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^3, \quad (2.21)$$

где C – динамическая грузоподъемность, $C = 25700$ Н для подшипника 209 [203];

P – эквивалентная нагрузка, $P = 10450$ Н.

Расчетная долговечность подшипника 209

$$L = \left(\frac{25700}{10450}\right)^3 = 14,87 \text{ млн.об.}$$

2.17 Методика исследования долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных эластомерными нанокompозитами

«Конструкция вибростенда для испытаний на долговечность включает: электромеханический вибратор ИВ-107А, две опорные плиты, плиту-основание и четыре демпфирующие пружины» [2] (рисунок 2.29, устройство вибростенда представлено в приложении Д) [220].

«Полимерное покрытие наносили на поверхность посадочного отверстия втулки под подшипник, кистью волосяной №4 «Пони», с последующей его термической обработкой в сушильном шкафу СНОЛ-3.5, 3.5,3.5/3 при оптимальном режиме» [2]. Образцы после термической обработки подвергали кондиционированию на протяжении 16 ч при стандартной температуре [216]. «После сборки вибратора подшипники смазывали пластичной смазкой ВНИИНП-242 (ГОСТ 20241-74)» [2].

Полимерные покрытия калибровали и затем собирали подшипниковые узлы, которые затем испытывали при циклическом нагружении.

«При исследовании теплообразования в посадках подшипников, восстановленных эластомерными нанокompозитами, циклическая радиальная нагрузка составляла: $P = 9,9; 15,8$ и $20,0$ кН. Нагрузку меняли раздвигая дебалансы на различный угол установки.

В ходе эксперимента инфракрасным пирометром Testo 830-T4 измеряли температуру наружного кольца подшипника и втулки в корпусе подшипникового щита» [2].



Рисунок 2.29 – Стенд для испытания подшипниковых узлов при циклическом нагружении

3 НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В УЗЛАХ ТЕХНИКИ

3.1 Теплофизические свойства полимерных нанокомпозиов, наполненных дисперсными металлическими наночастицами

3.1.1 Термостойкость эластомерных нанокомпозиов

Термостойкость полимерного материала относится к категории важнейших эксплуатационных свойств материала [221].

Исследования термоокислительной деструкции композиов на основе натурального каучука, наполненных частицами меди, марганца, кобальта, показали, что последние выступают как катализаторы термоокисления [222-224]. Установлено, что наиболее активный катализатор деструкции натурального каучука – это медь, однако для бутадиен-нитрильных каучуков этот металл – ингибитор процесса окисления [225, 226].

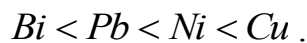
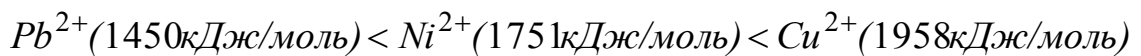
«В работе Михайлюк А.Е. исследовано влияние наночастиц металлов переменной валентности на термостойкость эластомеров на основе параметра эффективной энергии активации термодеструкции $E_{акт}$ » [2] (таблицы 3.1 и 3.2) [149, 227].

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.

Таблица 3.1 – Энергия активации $E_{акт}$ термодеструкции композитов модифицированных частицами металлов переменной валентности [149]

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

«С увеличением энергии ионизации металлов, между поверхностью металлических наночастиц и макромолекулами каучука образуются более прочные хемосорбционные связи, что является причиной более высокой термостойкости материала» [2].



Медь является ингибитором процесса окисления бутадиен-нитрильных каучуков [225-231], поэтому в нашей работе предложено наполнять эластомер Ф-40 наночастицами меди, что позволит связать свободные радикалы, образующиеся при термораспаде и повысить термостойкость эластомера.

Таблица 3.2 – Температура 5 % (T_5) и 10 % (T_{10}) потери массы исследуемых композитов [149]

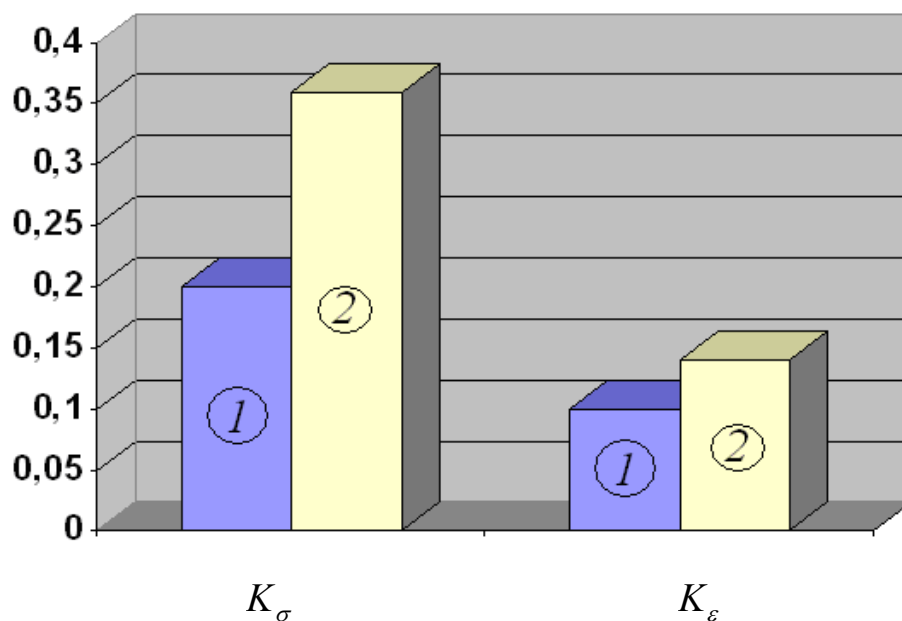
Тип металлических частиц	Способ модификации	Дозировка, %	T_5 , °C	T_{10} , °C
Не модифицированный полимер		–	340	360
Cu	В матрице эластомера	0,5	350	377
		5,0	369	380
		20,0	336	366
	На вальцах	0,5	375	388
		5,0	350	365
		20,0	335	350
Ni	В матрице эластомера	0,5	352	369
		5,0	365	381
		20,0	343	364
	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

В таблице 3.3 показаны результаты испытаний полимерных образцов из эластомера Ф-40 до и после высокотемпературного старения [232] и в таблице 3.4 образцов из эластомера Ф-40С.

На рисунке 3.1 показаны коэффициенты старения по прочности K и относительному удлинению K_ϵ эластомера Ф-40 и его нанокompозита.

Таблица 3.3 – Механические свойства эластомера Ф-40 и его нанокомпозита до и после высокотемпературного старения [232]

Наименование показателя	Эластомер Ф-40	Нанокомпозит на основе Ф-40 (эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., алюминиевого нанопорошка – 1,9 масс. ч. и медного нанопорошка – 1,8 масс. ч.)
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

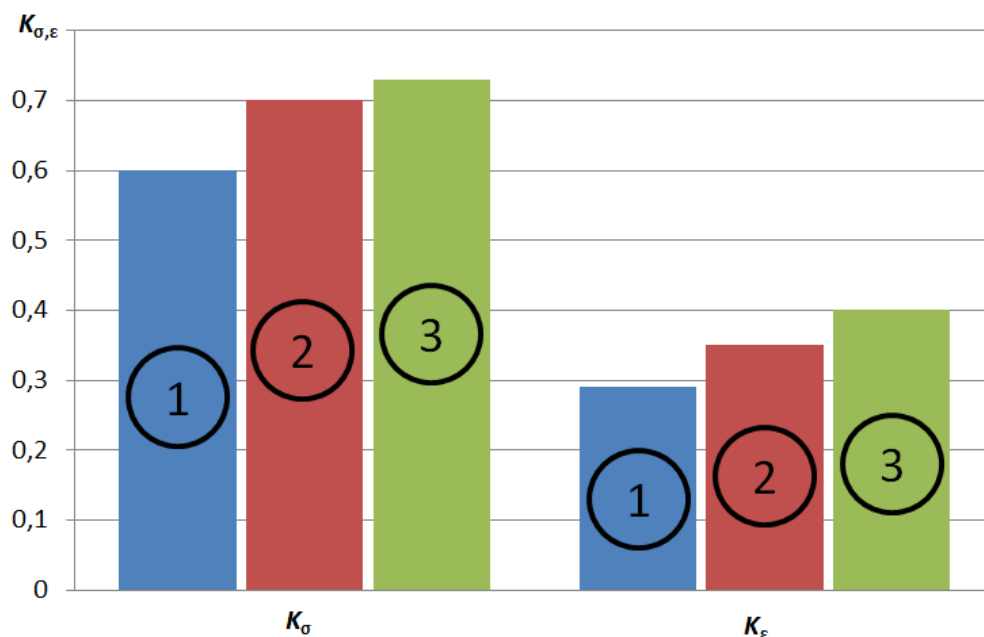


1 – эластомер Ф-40; 2 – нанокомпозит на его основе

Рисунок 3.1 – Коэффициенты старения по условной прочности K_σ и относительному удлинению K_ε [232]

Как следует из рисунка 3.1 термостойкость нанокompозита, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40, существенно повысилась [233].

На рисунке 3.2 показаны коэффициенты старения по прочности K_σ и относительному удлинению K_ε эластомера Ф-40С и его нанокompозитов, наполненных алюминиевыми и медными наночастицами.



1 – эластомер Ф-40С; 2 – нанокompозит, наполненный алюминиевыми наночастицами; 3 – нанокompозит, наполненный алюминиевыми и медными наночастицами

Рисунок 3.2 – Коэффициенты старения по условной прочности K_σ и относительному удлинению K_ε [234]

Как следует из рисунка 3.2 термостойкость нанокompозитов, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С, повысилась. Наиболее высокие показатели термостойкости нанокompозита состава №2 можно объяснить наличием и влиянием наночастиц меди, являющихся ингибитором процессов термоокисления.

Таблица 3.4 – Механические свойства эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе до и после высокотемпературного старения [234]

Наименование показателя	Эластомер Ф-40С	Нанокомпозит на основе Ф-40С, наполненный алюминиевыми наночастицами	Нанокомпозит на основе Ф-40С, наполненный алюминиевыми и медными наночастицами
До старения			
Прочность σ_p , МПа	20,61	23,29	23,71
Деформация ε_p , %	179,08	199,35	208,17
После старения			
Прочность σ_p , МПа	12,45	16,31	17,21
Деформация ε_p , %	52,3	69,15	82,42
Коэффициент старения по прочности K_σ	0,6	0,70	0,73
Коэффициент старения по деформации K_ε	0,29	0,35	0,4

Вывод

Наночастицы меди и алюминия являются ингибиторами термоокисления эластомеров на основе бутадиен-нитрильных каучуков. Коэффициенты старения нанокомпозита, наполненного алюминиевыми наночастицами, по прочности в 1,17 раза, а по деформации в 1,2 раза больше аналогичных показателей не наполненного эластомера Ф-40С, у нанокомпозита, наполненного алюминиевыми и медными наночастицами, по прочности в 1,22 раза, а по деформации в 1,4 раза больше соответствующих показателей полимерной матрицы.

3.1.2 Теплостойкость эластомерных нанокомпозитов

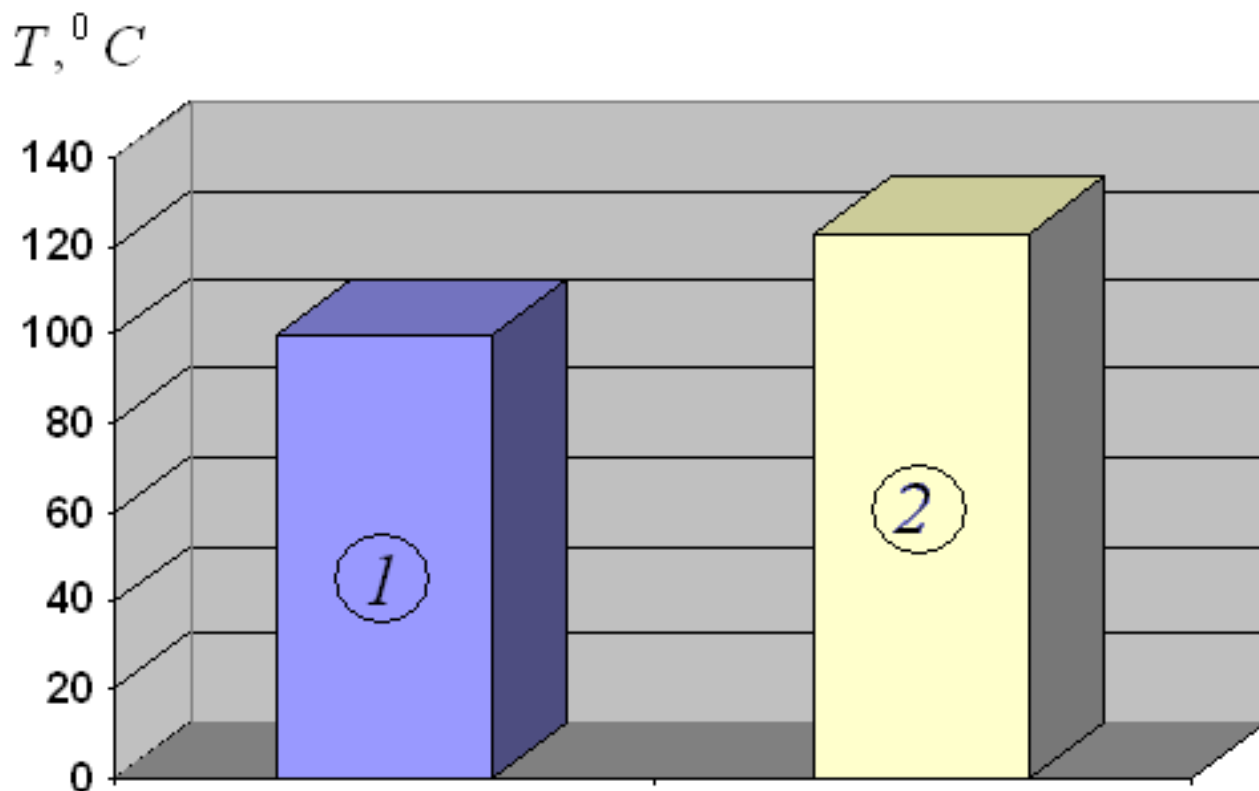
Теплостойкость полимерного материала определяет предельную допустимую температуру использования материала в реальных условиях эксплуатации.

Наполнение полимерных материалов микроразмерными металлическими частицами практически не изменяет теплостойкость и температуру стеклования композита [90, 235]. Теплостойкость микрокомпозита фактически определяется теплостойкостью полимерной матрицы.

«Наполнение полимерной матрицы металлическими наночастицами, приводит к образованию сетчатых образований с наночастицами в узлах» [2, 236]

В работах [2, 99, 233] 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)» [2].

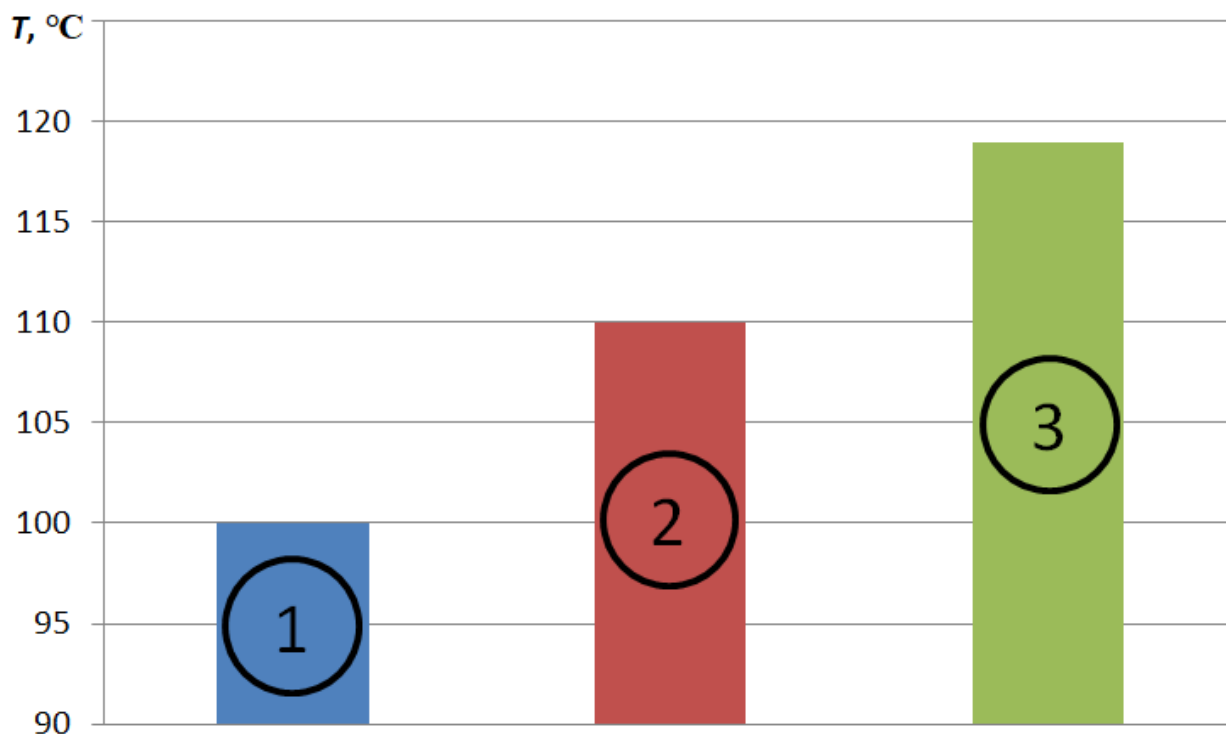
На рисунке 3.3 показана температура теплостойкости покрытий эластомера Ф-40 и нанокомпозита на его основе [2] (при наполнении эластомера нанопорошками меди и алюминия теплостойкость повысилась в 1,23 раза).



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

Рисунок 3.3 – Температура теплостойкости [2]

На рисунке 3.4 показана температура теплостойкости покрытий эластомера Ф-40С и наноккомпозитов на его основе. Как следует из рисунка 3.4 теплостойкость не наполненного эластомера Ф-40С составляет 100°С. Теплостойкость, наноккомпозита, наполненного алюминиевыми наночастицами (состав №1), увеличилась в 1,1 раза до 110°С. Аналогичный теплофизический параметр наноккомпозита, наполненного наночастицами алюминия и меди (состав №2), увеличился в сравнении с не наполненным эластомером в 1,19 раза, составом №1 в 1,08 раза и составил 119°С.



1 – эластомер Ф-40С; 2 – нанокompозит состава №1; 3 – нанокompозит состава №2

Рисунок 3.4 – Температура теплостойкости

Вывод

В нанокompозитах при взаимодействии полимера с частицей наполнителя 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 нанокompозите значительно больше, чем в микрокомпозите. «Замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, повышение модуля упругости, являются, в зависимости от материала и содержания наполнителей, причиной увеличения теплостойкости нанокompозитов от 1,1 до 1,23 раза, в сравнении с не наполненным эластомером.

3.1.3 Теплопроводность полимерных нанокompозитов

Полимерные материалы относятся к категории теплоизоляторов, по этой

причине возможно ухудшение теплоотвода в восстановленных подшипниковых узлах в условиях эксплуатации.

Результаты исследований теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе показаны на рисунке 3.5 [2].

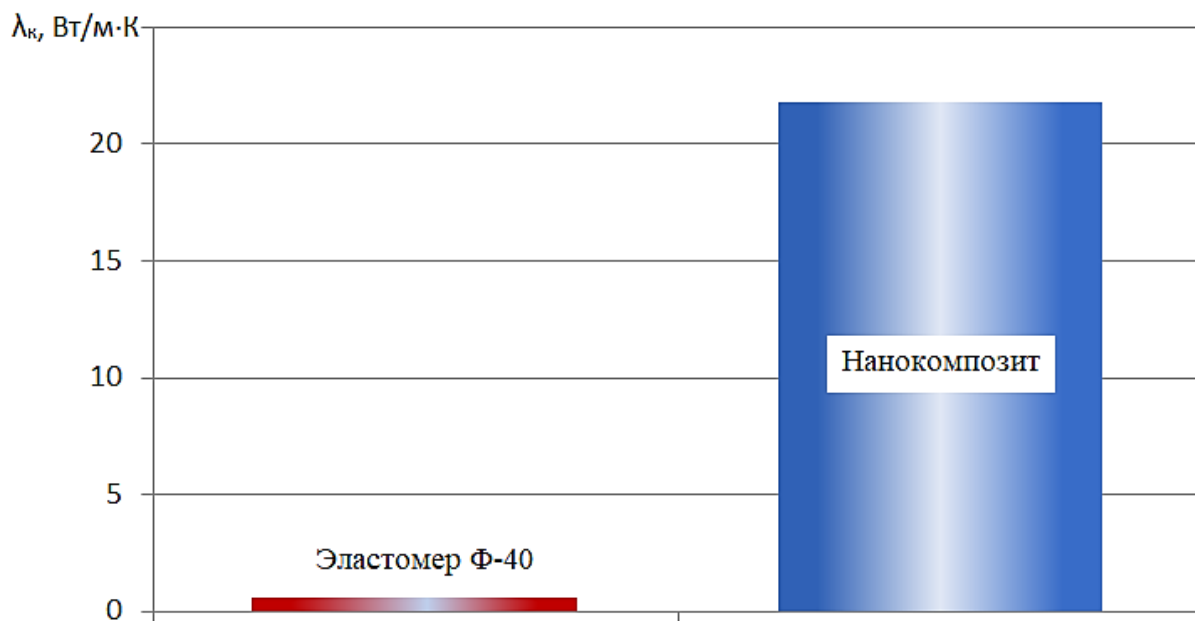


Рисунок 3.5 – Коэффициент теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе [2]

Благодаря вводу в эластомер наночастиц алюминия и меди коэффициент теплопроводности увеличился в 38,9 раза.

На рисунке 3.6 показаны теплопроводность эластомера Ф-40С и микрокомпозита на его основе, наполненного алюминиевыми и бронзовыми порошками [56]. Эффект аналогичен.

«Различие в размерах и форме микро- и наночастиц, концентрации компонентов обуславливают влияние вышеуказанных факторов на разницу в теплопроводности микро- и нанокompозитов» [2].

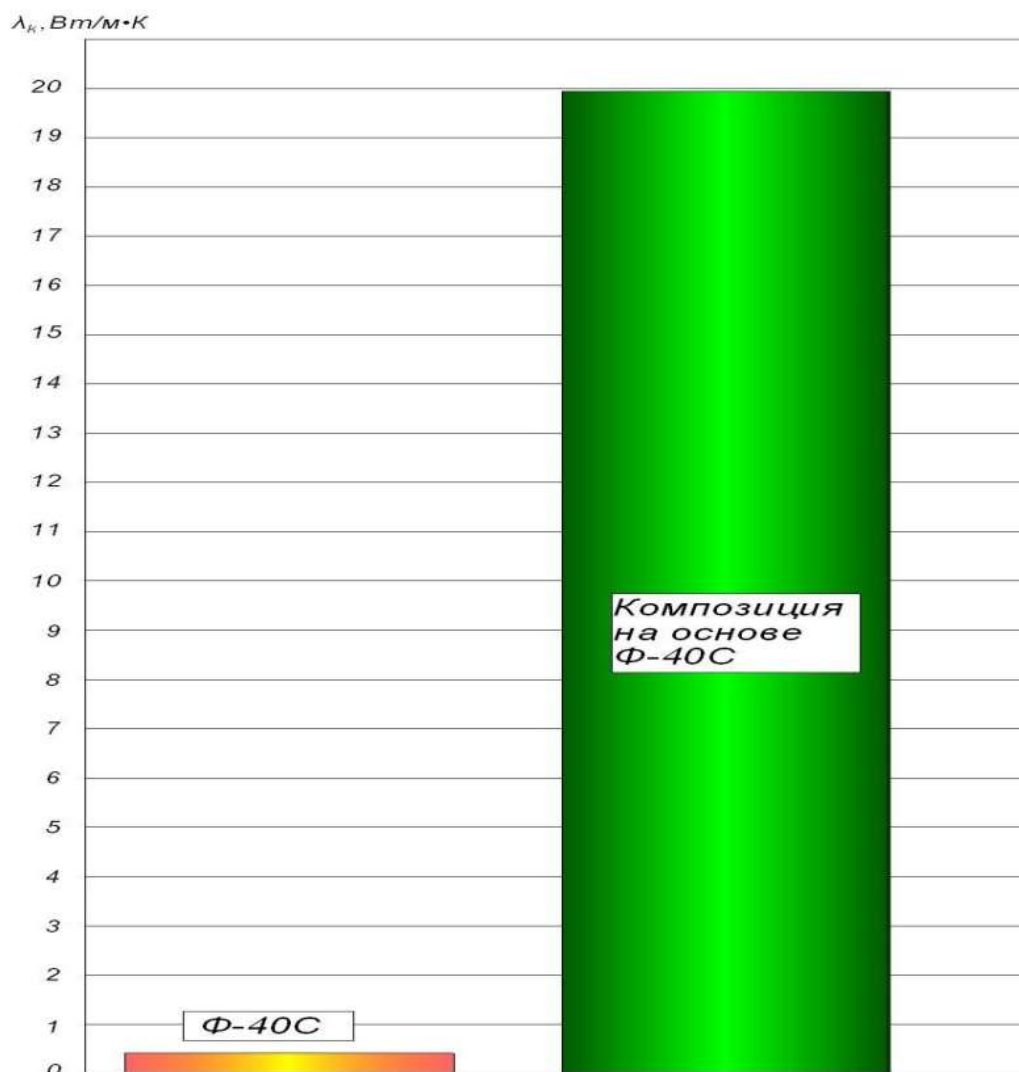


Рисунок 3.6 – Теплопроводность эластомера Ф-40С и микрокомпозита на его основе [56]

Как упоминалось в первой главе, расчет коэффициента теплопроводности композитов, наполненных микроразмерными частицами, по формулам Оделевского и Миснара показал, что расчетные значения значительно меньше экспериментальных. С увеличением отношения теплопроводности наполнителя λ_n к теплопроводности полимерной матрицы λ_m , разница возрастает. Например, при отношении $\lambda_n / \lambda_m \geq 100$ отличие расчетных и экспериментальных значений теплопроводности составляет более 40%, при $\lambda_n / \lambda_m \geq 250$ – более чем на 60%.

Поэтому в настоящей работе проведены теоретические и экспериментальные исследования с целью выбора и обоснования методики исследования и расчета теплопроводности полимерных нанокомпозитов.

На начальном этапе рассчитали по известным формулам теплопроводность полимерного двухкомпонентного нанокомпозита [237].

Состав: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; алюминиевый нанопорошок (ТУ 1791-003-36280340-2008) – 0,025 масс.ч.

Формула Максвелла

$$\lambda_k = \lambda_n \left[\frac{\lambda_n + 2\lambda_n - 2\varphi_n(\lambda_n - \lambda_n)}{\lambda_n + 2\lambda_n + \varphi_n(\lambda_n - \lambda_n)} \right], \quad (3.1)$$

где λ_n и λ_n – коэффициенты теплопроводности полимерной матрицы и наполнителя. Результат расчета по формуле (3.1): $\lambda_k = 0,29 \text{ Вт/м} \times \text{К}$.

Формула Оделевского

$$\lambda_k = \lambda_n \left[1 - \frac{\varphi_n}{\left(\frac{1}{1-\nu} \right) - \left(\frac{1-\varphi_n}{3} \right)} \right], \quad (3.2)$$

где $\nu = \lambda_n / \lambda_n$.

Результат расчета по формуле (3.2): $\lambda_k = 0,29 \text{ Вт/м} \times \text{К}$.

Формула Дульнева Г.Н.

$$\lambda_k = \lambda_n \left[\frac{\nu - (\nu - 1)(1 - \varphi_n^{2/3})\varphi_n^{1/3}}{\nu - \varphi_n^{1/3}(\nu - 1)} \right] \quad (3.3)$$

Результат расчета по формуле (3.3): $\lambda_k = 0,28 \text{ Вт/м} \times \text{К}$.

Расчет теплопроводности композита по формулам (3.1) и (3.2) показал одинаковый результат: $\lambda_k = 0,29 \text{ Вт/м} \times \text{К}$. Расчет по формуле (3.3) показал несколько меньший результат: $\lambda_k = 0,28 \text{ Вт/м} \times \text{К}$. Фактическое значение коэффициента теплопроводности композита состава №1 составляет $\lambda_k = 24,7 \text{ Вт/м} \times \text{К}$.

Рассмотрим причины такой большой (от 85,2 до 88,2 раза) разницы между расчетными и экспериментальными значениями теплопроводности полимерных нанокompозитов:

- агрегирование частиц, благодаря чему при определенных условиях между частицами наполнителя возникают проводящие «мостики» и реализуется эффект прыжковой проводимости;
- наличие межфазных слоев, свойства которых значительно отличаются от свойств полимерной матрицы;
- наличие пористости в полимерном композите.

В работе [106] авторами на основе множественной регрессии получена формула для расчета теплопроводности трехкомпонентного композита

$$\lambda_k [\varphi_n + C(\varphi_1 + \varphi_2)] = \lambda_n \varphi_n + C(\lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2), \quad (3.4)$$

где φ_1 и φ_2 – объемное содержание наполнителей; C – поправочный коэффициент, учитывающий отношение теплопроводности наполнителя к теплопроводности полимерной матрицы.

$$C = f\left(\frac{\lambda_n}{\lambda_n}\right) \quad (3.5)$$

Применительно к исследованиям в работе [107] коэффициент C в формуле (3.4) имеет значение $C = \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_n}\right)^{-0,65}$.

Формула (3.4) подобна формуле Бургера, однако она предназначена для трехкомпонентного композита. Оригинальность этой формулы заключается в том,

что не требуется инверсия компонентов и в ней используется зависимость

$$C = f\left(\frac{\lambda_n}{\lambda_n}\right).$$

В настоящих исследованиях проведена оценка возможности применения формул Бургера, в сочетании с результатами экспериментальных исследований, для расчета двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.

Составы двухкомпонентного нанокомпозита:

№1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; нанопорошок Al – 0,025; масс.ч.;

№2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; нанопорошок Al – 0,075; масс.ч.;

№3: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; нанопорошок Al – 0,125; масс.ч.

Составы трехкомпонентного нанокомпозита:

№1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; нанопорошок Al – 0,05; масс.ч.;
нанопорошок Cu – 0,01масс.ч.

№2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; нанопорошок Al – 0,09; масс.ч.;
нанопорошок Cu – 0,03масс.ч.

№3: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; нанопорошок Al – 0,13; масс.ч.;
нанопорошок Cu – 0,05 масс.ч.

Расчетные значения коэффициента теплопроводности двухкомпонентных полимерных композитов при различном содержании наполнителя определяли по формуле Бургера [238]

$$\lambda_k(\varphi_n + C\varphi_n) = \lambda_n\varphi_n + C\lambda_n\varphi_n, \quad (3.6)$$

где С – коэффициент, $C = \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_n}\right)^\alpha$.

Первоначально экспериментально в трехкратной повторности определили значения коэффициента теплопроводности двухкомпонентных эластомерных нанокомпозитов и средние значения. Используя формулу Бургера, рассчитали для каждого состава коэффициент С. В таблице 3.5 представлены результаты экспериментов и расчета. По полученным значениям построили графики

зависимости коэффициента C от содержания наполнителя φ_n , которые затем аппроксимировали логарифмической и показательной функциями (рисунки 3.7 и 3.8).

Таблица 3.5 – Результаты экспериментов и расчета коэффициента C

№ п/п	Объемное φ_n / массовое m_n содержание наполнителя (Al)	Экспериментальные значения теплопроводности λ_k , Вт/м×К	Среднее значение λ_k , Вт/м×К	Коэффициент C
1	0,0066/0,025	6,2; 6,4; 6,7	6,43	4,57
2	0,02/0,075	9,3; 9,6; 9,8	9,57	2,28
3	0,0338/0,125	10,3; 10,6; 11,1	10,67	1,49

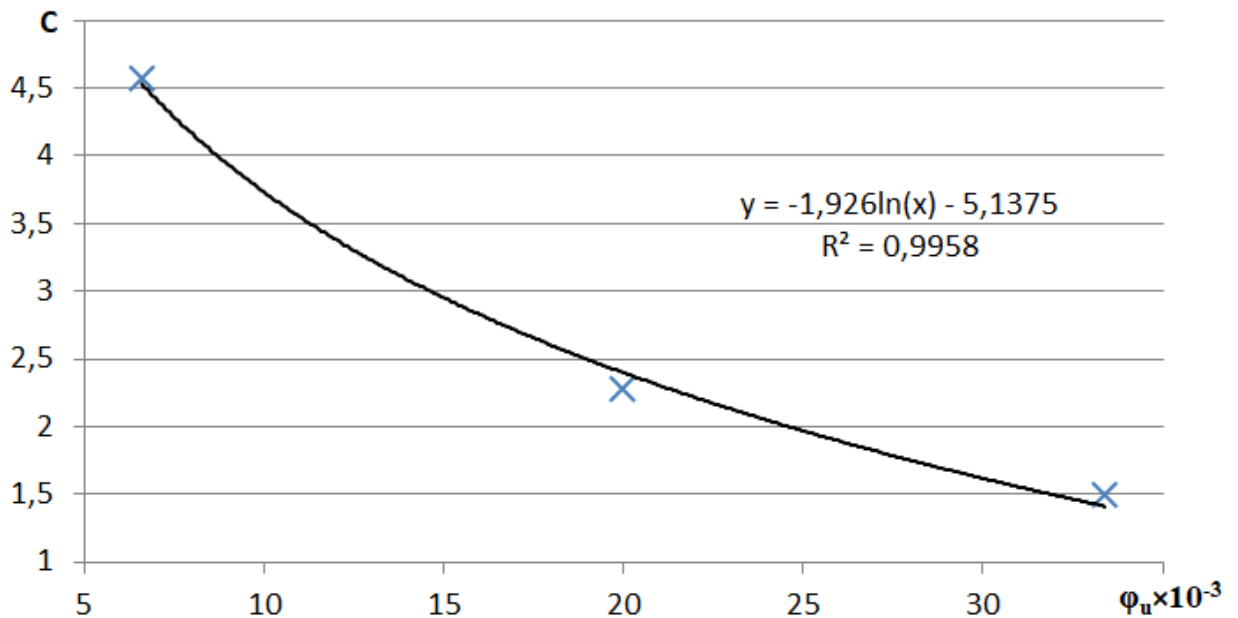


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента C от объемной доли наполнителя φ_n в двухкомпонентном эластомерном нанокompозите

Для оценки сходимости аппроксимированных функций и расчетных значений теплопроводности с фактическими использовали видоизмененную формулу Бургера (3.6)

$$\lambda_{\kappa} = \frac{\lambda_n \varphi_n + C \lambda_n \varphi_n}{\varphi_n + C \varphi_n} \quad (3.7)$$

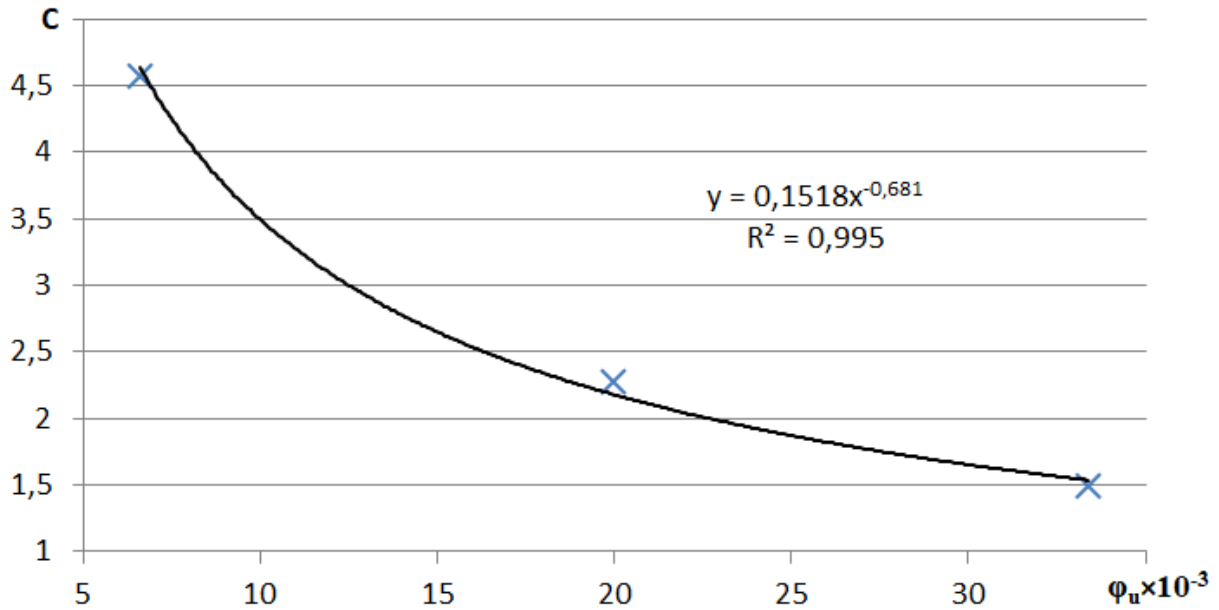


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента C от объемной доли наполнителя φ_n в двухкомпонентном эластомерном нанокомпозите

Для определения расчетных значений теплопроводности нанокомпозитов $\lambda_{\kappa p}$ в формулу (3.7) вместо коэффициента C подставили аппроксимированные функции зависимости коэффициента C от объемного содержания наполнителя φ_{Al} .

Расчет по логарифмической функции C

$$\lambda_{\kappa} = \frac{\lambda_n \varphi_n + [-1,926 \ln(\varphi_{Al}) - 5,1375] \times (\lambda_{Al} \varphi_{Al})}{\varphi_n + [-1,926 \ln(\varphi_{Al}) - 5,1375] \times (\varphi_{Al})}$$

$$\lambda_{\kappa p} = \frac{0,27 * 0,9934 + [-1,926 \ln(0,0066) - 5,1375] \times (209,3 * 0,0066)}{0,9934 + [-1,926 \ln(0,0066) - 5,1375] \times 0,0066} = \frac{6,5291}{1,0233} = 6,38;$$

$$\lambda_{\kappa \phi} = 6,43;$$

$$\text{Сходимость} - \Delta = 0,77\%$$

$$\lambda_{\kappa} = 9,57;$$

$$\lambda_{\kappa p} = \frac{0,27 * 0,98 + [-1,926 \ln(0,02) - 5,1375] \times (209,3 * 0,02)}{0,98 + [-1,926 \ln(0,02) - 5,1375] \times 0,02} = \frac{10,2984}{1,02784} = 10,02;$$

$$\lambda_{\kappa \phi} = 9,57;$$

$$\text{Сходимость} - \Delta = 4,68\%$$

$$\lambda_{\kappa p} = \frac{0,27 * 0,9662 + [-1,926 \ln(0,0338) - 5,1375] \times (209,3 * 0,0338)}{0,9662 + [-1,926 \ln(0,0338) - 5,1375] \times 0,0338} = \frac{10,0687}{1,013} = 9,94;$$

$$\lambda_{\kappa \phi} = 10,67;$$

$$\text{Сходимость} - \Delta = 7,3\%$$

Расчет по показательной функции С

$$\lambda_{\kappa} = \frac{\lambda_n \varphi_n + 0,1518 * \varphi_{Al}^{-0,681} \times (\lambda_{Al} \varphi_{Al})}{\varphi_n + 0,1518 * \varphi_{Al}^{-0,681} \times (\varphi_{Al})}$$

$$\lambda_{\kappa} = \frac{0,27 * 0,9934 + 0,1518 * 0,0066^{-0,681} \times (209,3 * 0,0066)}{0,9934 + 0,1518 * 0,0066^{-0,681} \times 0,0066} = \frac{6,6726}{1,024} = 6,52;$$

$$\text{Сходимость} - \Delta = 1,3\%$$

$$\lambda_{\kappa} = \frac{0,27 * 0,98 + 0,1518 * 0,02^{-0,681} \times (209,3 * 0,02)}{0,98 + 0,1518 * 0,02^{-0,681} \times 0,02} = \frac{9,3859}{1,02358} = 9,1697;$$

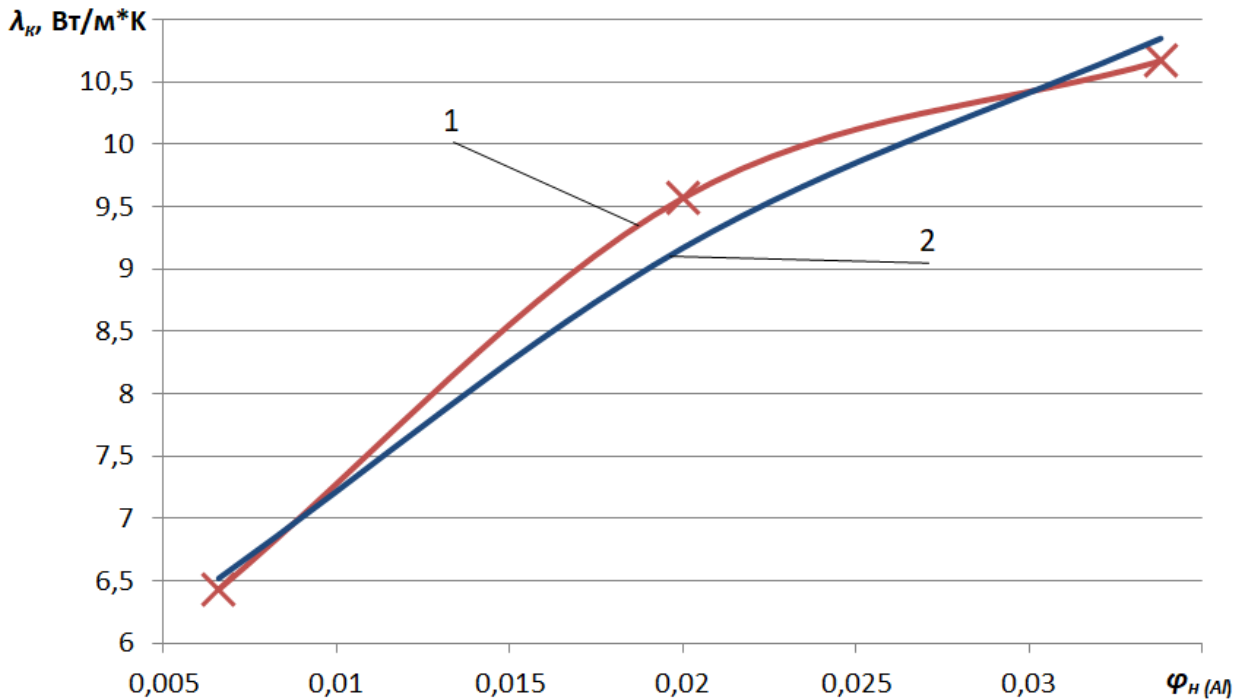
$$\text{Сходимость} - \Delta = 4,18\%$$

$$\lambda_{\kappa} = \frac{0,27 * 0,9662 + 0,1518 * 0,0338^{-0,681} \times (209,3 * 0,0338)}{0,9662 + 0,1518 * 0,0338^{-0,681} \times 0,0338} = \frac{11,0442}{1,0177} = 10,85;$$

$$\text{Сходимость} - \Delta = 1,7\%$$

Вывод: по коэффициенту С более точный результат дает показательная функция.

На рисунке 3.9 показаны расчетные и экспериментальные значения теплопроводности двухкомпонентного нанокompозита эластомера Ф-40С.



1 – фактические значения; 2 – расчетные значения

Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента теплопроводности двухкомпонентного нанокompозита на основе эластомера Ф-40С

Расчетные значения коэффициента теплопроводности трехкомпонентных полимерных композитов при различном содержании наполнителя определяли по формуле Бургера [238]

$$\lambda_k[\varphi_n + C(\varphi_{Al} + \varphi_{Cu})] = \lambda_n \varphi_n + C(\lambda_{Al} \varphi_{Al} + \lambda_{Cu} \varphi_{Cu}), \quad (3.8)$$

где C – коэффициент, $C = \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_n}\right)^\alpha$.

Первоначально экспериментально в трехкратной повторности определили значения коэффициента теплопроводности трехкомпонентных эластомерных нанокompозитов и средние значения. Используя формулу (3.8) Бургера, рассчитали для каждого состава коэффициент C . В таблице 3.6 представлены результаты экспериментов и расчета. По полученным значениям построили графики зависимости коэффициента C от содержания наполнителя φ_n , которые

затем аппроксимировали логарифмической и показательной функциями (рисунки 3.10 и 3.11).

Таблица 3.6 – Результаты экспериментов и расчета коэффициента С

№ п/п	Объемное φ_n / массовое m_n содержание наполнителя		Экспериментальные значения теплопроводности λ_k , Вт/м×К	Среднее значение λ_k , Вт/м×К	Коэффициент С
	φ_{Al}	φ_{Cu}			
1	0,0132/0,05	0,000037/0,01	7,1; 7,4; 7,6	7,37	2,49
2	0,0235/0,09	0,00011/0,03	10,9; 11,3; 12,2	11,47	2,2164
3	0,0336/0,013	0,0004/0,05	13,5; 13,9; 14,0	13,8	1,9452

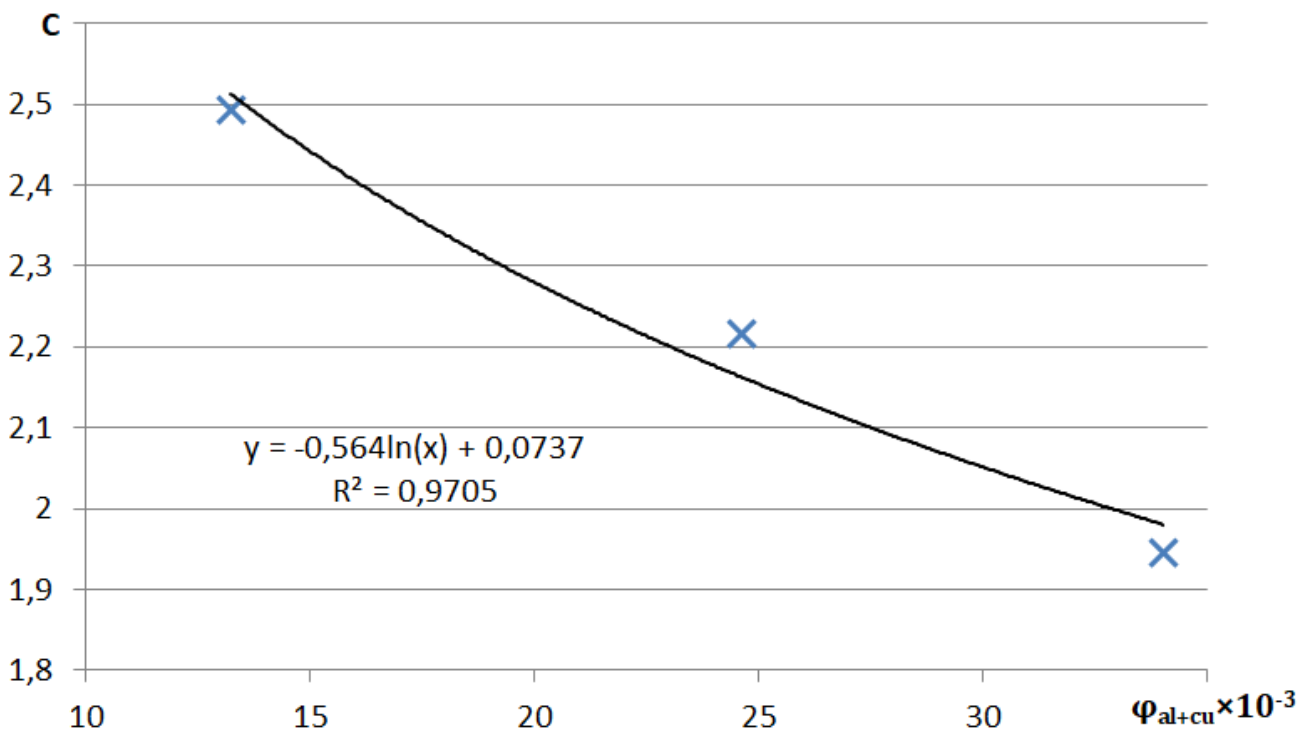


Рисунок 3.10 – Зависимость коэффициента С от суммарной объемной доли наполнителей φ_{Al+Cu} трехкомпонентного эластомерного нанокompозита

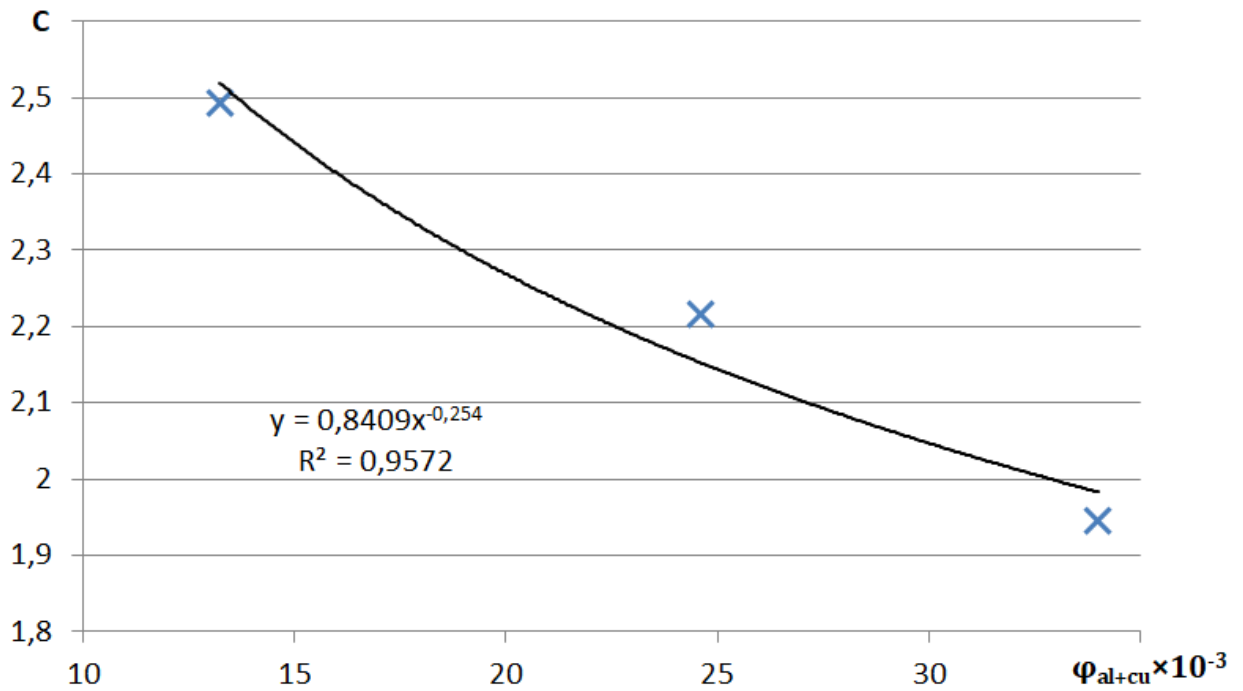


Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициента С от объемной доли наполнителя φ_{Al+Cu} трехкомпонентного эластомерного нанокompозита

Для оценки сходимости аппроксимированных функций и расчетных значений теплопроводности с фактическими использовали видоизмененную формулу (3.8) Бургера

$$\lambda_{\kappa} = \frac{\lambda_n \varphi_n + C(\lambda_{Al} \varphi_{Al} + \lambda_{Cu} \varphi_{Cu})}{\varphi_n + C(\varphi_{Al} + \varphi_{Cu})} \quad (3.9)$$

Расчет по логарифмической функции С

$$\lambda_{\kappa} = \frac{\lambda_n \varphi_n + [-0,564 \ln(\varphi_{Al+Cu}) + 0,0737] \times (\lambda_{Al} \varphi_{Al} + \lambda_{Cu} \varphi_{Cu})}{\varphi_n + [-0,564 \ln(\varphi_{Al+Cu}) + 0,0737] \times (\varphi_{Al} + \varphi_{Cu})}$$

$$\lambda_{\kappa p} = \frac{0,27 * 0,9867 + [-0,564 \ln(0,01324) + 0,0737] \times (0,0132 * 209,3 + 0,000037 * 389,6)}{0,9867 + [-0,564 \ln 0,01324 + 0,0737] \times 0,01324} = \frac{7,57}{1,02} = 7,42;$$

$$\lambda_{\kappa \phi} = 7,37;$$

Сходимость – $\Delta = 0,7\%$.

$$\lambda_{кр} = \frac{0,27*0,9764 + [-0,564\ln(0,0236) + 0,0737] \times (0,0235*209,3 + 0,00011*389,6)}{0,9764 + [-0,564\ln(0,0236) + 0,0737] \times 0,0236} = \frac{11,11}{1,03} = 10,7864;$$

$$\lambda_{кф} = 11,47;$$

Сходимость $\Delta = 6,3\%$.

$$\lambda_{кр} = \frac{0,27*0,966 + [-0,564\ln(0,034) + 0,0737] \times (0,0336*209,3 + 0,0003*389,6)}{0,966 + [-0,564\ln(0,034) + 0,0737] \times 0,034} = \frac{14,5}{1,03} = 14,07;$$

$$\lambda_{кф} = 13,8;$$

Сходимость $\Delta = 2,01\%$.

Расчет по показательной функции С

$$\lambda_{к} = \frac{\lambda_n \varphi_n + 0,8409 \varphi_{Al+Cu}^{-0,254} \times (\lambda_{Al} \varphi_{Al} + \lambda_{Cu} \varphi_{Cu})}{\varphi_n + 0,8409 \varphi_{Al+Cu}^{-0,254} \times (\varphi_{Al} + \varphi_{Cu})}$$

$$\lambda_{кр} = \frac{0,27*0,9867 + 0,8409*0,01324^{-0,254} \times (0,0132*209,3 + 0,000037*389,6)}{0,9867 + 0,8409*0,01324^{-0,254} \times 0,01324} = \frac{7,6}{1,02} = 7,45;$$

$$\lambda_{кф} = 7,37;$$

Сходимость $\Delta = 1\%$.

$$\lambda_{кр} = \frac{0,27*0,9764 + 0,8409*0,0236^{-0,254} \times (0,0235*209,3 + 0,00011*389,6)}{0,9764 + 0,8409*0,0236^{-0,254} \times 0,0236} = \frac{11,07}{1,03} = 10,75;$$

$$\lambda_{кф} = 11,47;$$

Сходимость $\Delta = 10,75\%$.

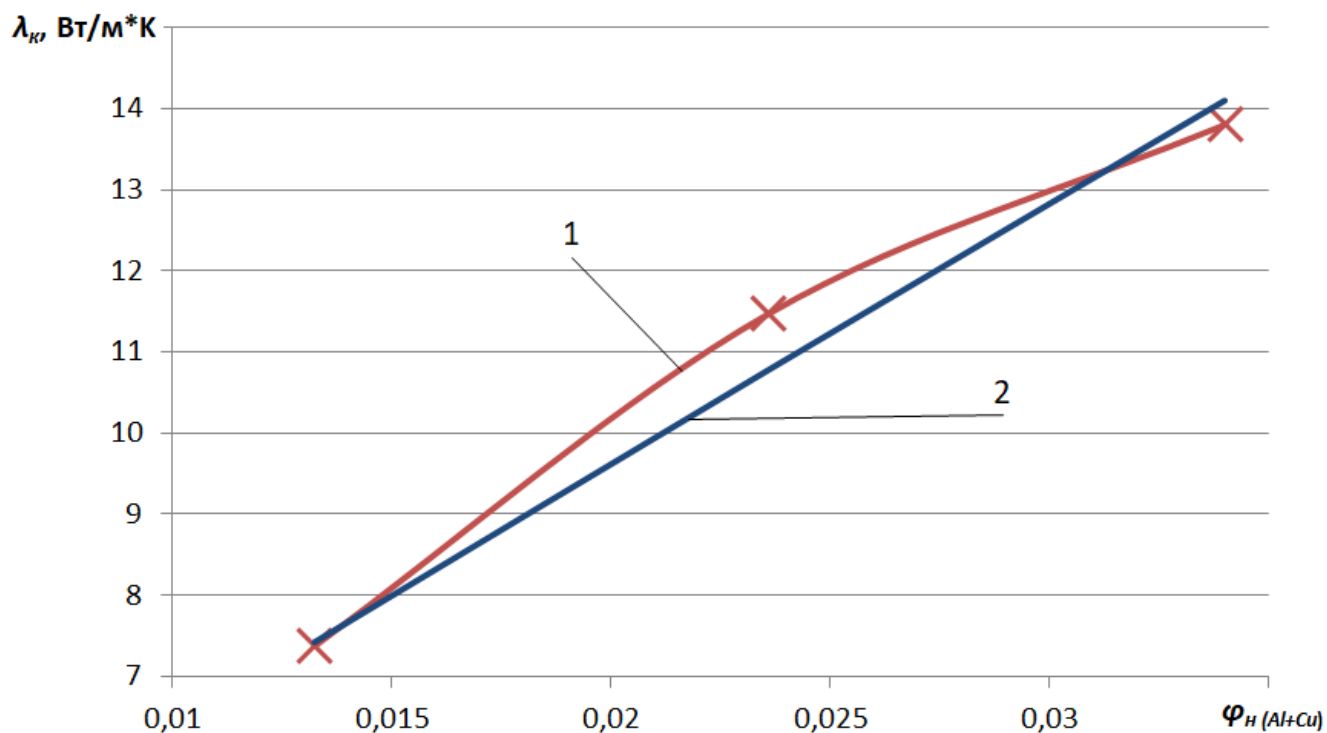
$$\lambda_{кр} = \frac{0,27*0,966 + 0,8409*0,034^{-0,254} \times (0,0336*209,3 + 0,0003*389,6)}{0,966 + 0,8409*0,034^{-0,254} \times 0,034} = \frac{14,53}{1,03} = 14,10;$$

$$\lambda_{кф} = 13,8;$$

Сходимость $\Delta = 2,2\%$.

Вывод: логарифмическая функция обеспечивает большую точность. Коэффициент детерминации больше.

На рисунке 3.12 показаны расчетные и экспериментальные значения теплопроводности трехкомпонентного нанокompозита эластомера Ф-40С.



1 – фактические значения; 2 – расчетные значения

Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента теплопроводности трехкомпонентного нанокompозита на основе эластомера Ф-40С

Таким образом, формула Бургера, в сочетании с результатами экспериментальных исследований, позволяет с достаточной точностью рассчитывать теплопроводность двухкомпонентных и трехкомпонентных полимерных нанокompозитов.

Выводы

1. Формула Бургера, в сочетании с экспериментальными исследованиями поправочного коэффициента, позволяет получить адекватную модель теплопроводности двухкомпонентных и трехкомпонентных полимерных нанокompозитов.

2. Расхождение расчетных значений коэффициента теплопроводности с фактическими значениями составляет: для двухкомпонентных эластомерных нанокompозитов от 1,3 до 4,2%; трехкомпонентных от 0,7 до 6,3%.

3.2 Фрактальный анализ и деформационно-прочностные свойства полимерных нанокомпозитов

3.2.1 Увеличение модуля упругости полимерных нанокомпозитов, наполненных дисперсными наночастицами

В настоящее время усиление полимерных нанокомпозитов, в сравнении с не наполненными полимерами, описывают тремя видами моделей: традиционные микромеханические [93, 100, 101], перколяционные [95] и фрактальные [97, 102]. Если в микромеханических моделях при расчете модуля упругости композита учитывается модуль упругости наполнителя, в перколяционных и фрактальных его не учитывают. В перколяционных и фрактальных моделях наночастицы наполнителя видоизменяют и фиксируют структуру полимерной матрицы. Отсутствие модуля упругости наполнителя в вышеупомянутых моделях объясняется многократным различием модулей упругости наполнителя и полимерной матрицы. Например, у нанокомпозитов на основе полиэтилена низкой плотности, наполненных частицами карбоната кальция (ПЭНП/ CaCO_3) модули упругости наполнителя и полимерной матрицы отличаются более чем на два порядка. У ПЭНП модуль упругости составляет 85 МПа [93], а наночастиц наполнителя CaCO_3 – порядка десятков ГПа [101]. Поэтому при деформации нанокомпозита частица наполнителя фактически не деформируется, и деформация материала обусловлена деформацией полимерной матрицы [93].

В работе [99] степень усиления нанокомпозитов на основе полипропилена, наполненных углеродными нанотрубками (ПП/УНТ), оценивают микромеханической моделью Коунто [239].

$$\frac{E_k}{E_n} = (1 - \varphi_n^{1/2}) + \frac{E_n}{[(1 - \varphi_n^{1/2}) / \varphi_n^{1/2}] * E_n + E_n}, \quad (3.10)$$

где E_k, E_n и E_n – модули упругости композита, полимерной матрицы и наполнителя соответственно φ_n – объемное содержание наночастиц наполнителя.

Модуль упругости углеродных нанотрубок составляет около 1000 ГПа [142], полимерной матрицы 0,95 ГПа, а нанокompозита – 1,4 ГПа. Если исключить второе слагаемое в правой части равенства (3.10), при содержании наполнителя $\varphi_n = 0,06$ погрешность расчета составляет всего лишь 0,1%. То есть в данном случае значение модуля упругости наполнителя фактически не влияет на значение модуля упругости нанокompозита. С уменьшением модуля упругости наночастиц наполнителя погрешность расчета аналогичного параметра нанокompозита увеличивается. Применительно к дисперсным наночастицам, погрешность расчета при исключении правой части равенства (3.10) не превышает 10%. Поэтому вопрос применения перколяционных и фрактальных моделей для оценки усиления и фрактального анализа полимерных нанокompозитов представляется перспективным и обоснованным.

В соответствии с теорией перколяции степень усиления E_n/E_m полимерных композитов предлагается оценивать следующей зависимостью [95]

$$\frac{E_k}{E_n} = 1 + 11\varphi_n^{1,7} \quad (3.11)$$

Для нанокompозитов формула (3.11) приведена к виду [96]

$$\frac{E_k}{E_n} = 1 + 11(\varphi_n + \varphi_{mf})^{1,7} \quad (3.12)$$

где φ_{mf} – объемное содержание межфазных областей.

На поверхности наночастицы наполнителя, взаимодействующей с полимерной матрицей, образуется адсорбированный слой – межфазная область, которая имеет свойства, отличные от свойств полимерной матрицы.

В перколяционной и фрактальной моделях межфазные области, как и наночастицы, рассматривают как армирующий элемент в структуре полимерного нанокомпозита, повышающий его модуль упругости. Это обусловлено «замораживанием» молекулярной подвижности полимерной матрицы у поверхности наночастиц наполнителя [99].

Авторы в работе [103] исследовали композит на основе бутадиен-стирольного каучука, в который в качестве наполнителя вводили наноразмерный фуллеренсодержащий минерал – наносунгит. Исследования показали, что модуль упругости межфазного слоя меньше модуля упругости наполнителя только на 23 – 45%, но при этом превышает аналогичный параметр не наполненного полимера до 8,5 раз (рисунок 3.13).

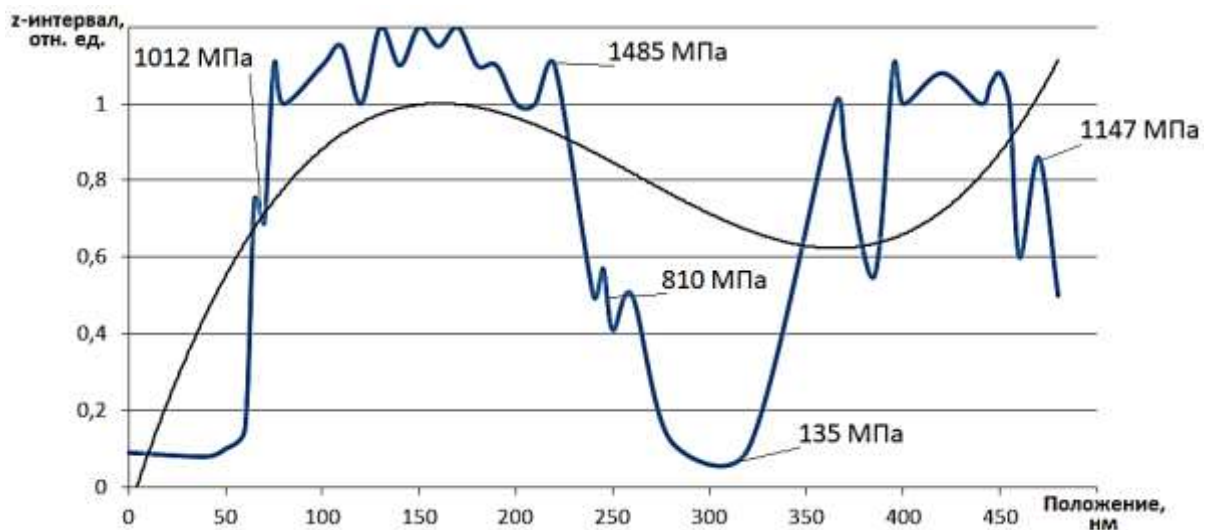


Рисунок 3.13 – Механические характеристики структурных компонентов нанокомпозита на основе бутадиен-стирольного каучука, определенных нанопрофилированием (деформация 150 нм) [103]

Исследования авторов в работах [93, 103, 228] показали, что в эластомерных нанокомпозитах, наполненных дисперсными наночастицами, образуются от одного до трех, в среднем два межфазных слоя. Первый межфазный слой это результат взаимодействия поверхности наночастицы наполнителя с полимерной матрицей. Молекулярная подвижность в этом слое «заморожена», так как последний нахо-

дится в стеклообразном состоянии. Второй межфазный слой формируется при взаимодействии стеклообразного межфазного слоя с полимерной матрицей.

Межфазный слой в полимерных композитах авторы работ [97] рассматривают как результат взаимодействия двух фракталов: полимерная матрица и поверхность наночастицы наполнителя. В виду того, что модуль упругости наполнителя многократно превышает аналогичный параметр полимерной матрицы, взаимодействие фракталов сводится к внедрению поверхности наночастицы в полимерную матрицу. В этом случае расстояние взаимопроникновения фракталов составляет $l = l_{мф}$.

Толщину межфазного слоя определяют по формуле [93]

$$l_{мф} \approx a \left(\frac{r_n}{a} \right)^{\frac{2(d-d_s)}{d}}, \quad (3.13)$$

где a – нижний линейный масштаб фрактального поведения, который для полимеров принимают равным длине статистического сегмента $l_{см}$ [240], r_n – радиус наночастицы (а точнее, агрегата наночастиц) наполнителя; d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал [99], $d=3$; d_s – фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя [99].

Относительную объемную долю межфазных областей в нанокompозите предлагается определять по формуле

$$\varphi_{мф} = (d_s - 2)\varphi_n \quad (3.14)$$

После подстановки формулы (3.14) в формулу (3.12) получены:

а) выражение, учитывающее наличие одного армирующего межфазного слоя (ближайшего к поверхности наночастицы) и размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя

$$E_{\kappa} = E_n \left\{ 1 + 11[\varphi_n (d_s - 1)]^{1,7} \right\} \quad (3.15)$$

б) выражение, учитывающее наличие двух армирующих межфазных слоев и размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя

$$E_{\kappa} = E_n \left\{ 1 + 11[\varphi_n (2d_s - 3)]^{1,7} \right\} \quad (3.16)$$

Получим формулу для расчета модуля упругости нанокомпозита на основе анаэробного герметика.

При течении тело подвержено сдвиговой деформации. При деформировании нанокомпозита материал пребывает в вязкотекучем состоянии, для которого справедливо выполнение условия

$$\frac{\eta_{\kappa}}{\eta_n} = \frac{G_{\kappa}}{G_n}, \quad (3.17)$$

где η_{κ} и η_n – вязкость полимерного композита и полимерной матрицы соответственно; G и G_1 – модули сдвига полимерного нанокомпозита и полимерной матрицы соответственно.

В работе [103, 241] вязкость композита на основе олигомера, наполненного частицами технического углерода, определяют по уравнению

$$\frac{\eta_{\kappa}}{\eta_n} = 1 + \frac{2,5\varphi_n}{1 - \varphi_n} \quad (3.18)$$

Формула (3.18) справедлива для анаэробных герметиков, которые как и олигомеры, относятся к реактопластам.

После подстановки (3.17) в (3.18) получили формулу расчета модуля жесткости (сдвига) анаэробного нанокompозита

$$G_{\kappa} = G_n \left(1 + \frac{2,5\varphi_n}{1 - \varphi_n} \right) \quad (3.19)$$

Анаэробный нанокompозит приняли изотропным. В виду того, что при восстановлении неподвижных соединений «вал-подшипник» толщина клеевого шва не превышает 0,05...0,075 мм, вполне справедливо допущение, что зависимость деформации нанокompозита от прилагаемой к нему нагрузки линейная. В таком случае справедливо выражение [242]

$$G = \frac{E}{2 + 2\mu}, \quad (3.20)$$

где G и E – модули сдвига и Юнга материала; μ – коэффициент Пуассона.

Выражение (3.20) подставили в формулу (3.19) и после преобразования получили

$$\frac{E_{\kappa}}{2 + 2\mu_{\kappa}} = \frac{E_n}{2 + 2\mu_n} \left(1 + \frac{2,5\varphi_n}{1 - \varphi_n} \right), \quad (3.21)$$

где E_{κ} и E_n – модули упругости нанокompозита и полимерной матрицы; μ_{κ} и μ_n – коэффициенты Пуассона нанокompозита и полимерной матрицы.

Вполне справедливо и достаточно достоверно допущение о равенстве коэффициентов Пуассона анаэробного герметика и нанокompозита на его основе.

При этом условии выражение (3.21) получит следующий вид

$$E_k \approx E_n \left(1 + \frac{2,5\varphi_n}{1-\varphi_n} \right) \quad (3.22)$$

По аналогии с формулами (3.12) и (3.14) для расчета модуля упругости эластомерного нанокompозита и объемной доли межфазных областей получены формулы аналогичные формулам (3.15) и (3.16):

формула расчета модуля упругости анаэробного нанокompозита, учитывающая наличие одного армирующего межфазного слоя (ближайшего к поверхности наночастицы) и размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя

$$E_k \approx E_n \left[1 + \frac{2,5\varphi_n (d_s - 1)}{1 - \varphi_n (d_s - 1)} \right], \quad (3.23)$$

формула расчета модуля упругости анаэробного нанокompозита, учитывающая наличие двух армирующих межфазных слоев и размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя

$$E_k \approx E_n \left[1 + \frac{2,5\varphi_n (2d_s - 3)}{1 - \varphi_n (2d_s - 3)} \right] \quad (3.24)$$

Предложены и получены формулы (3.15), (3.16), (3.23) и (3.24) для расчета модуля упругости наполненных эластомеров и анаэробных герметиков.

3.2.2 Фрактальный анализ поверхности наночастиц и структуры полимерных нанокompозитов

*Классификация дисперсных наполнителей
по степени усиления композита*

Под термином «усиление» понимают в основном увеличение механических свойств (модуль упругости, прочность) полимерных композитов в сравнении с матричным полимером [99]. Экспериментально установлено, что модуль упругости не наполненного эластомера Ф-40С составляет 80,9 МПа. Введение в эластомер металлических наночастиц алюминия и меди приводит к увеличению модуля упругости материала. На рисунках 3.14 и 3.15 показаны зависимости модуля упругости нанокомпозита от объемного содержания наночастиц наполнителей.

По результатам многочисленных исследований установлено, что основными факторами, определяющими изменение механических свойств композита являются два фактора: механический – размер частиц (или удельная поверхность наполнителя) и химический – химические связи эластомера с поверхностью наполнителя [235].

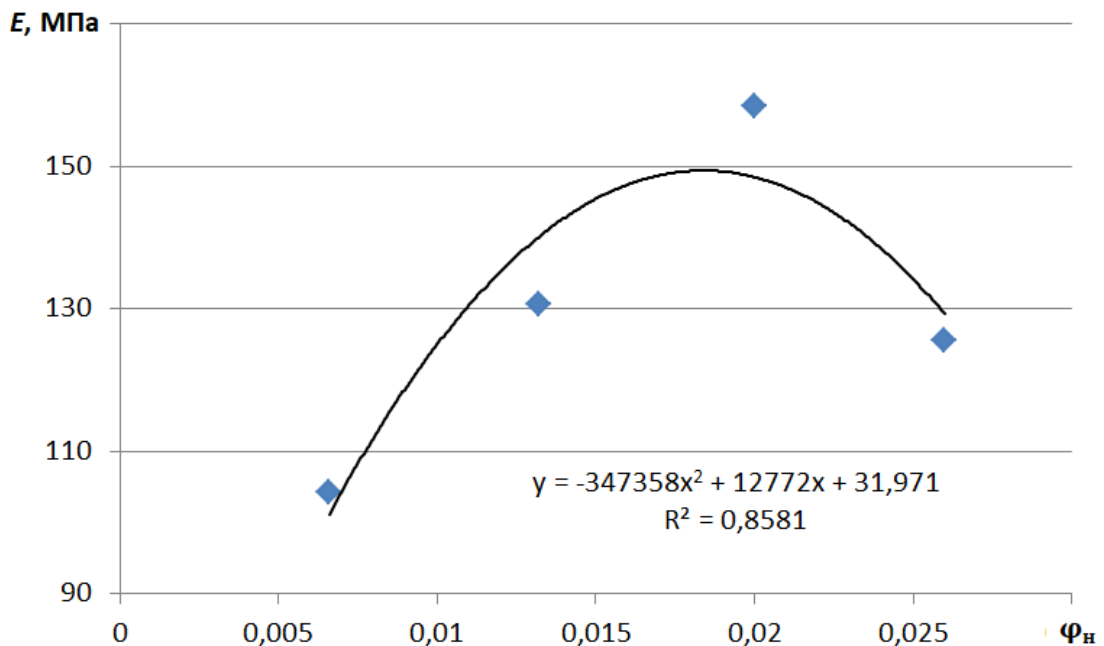


Рисунок 3.14 – Зависимость модуля упругости нанокомпозита от объемного содержания наночастиц алюминия

В работе [243] исследовано влияние размера частиц наполнителя на эффективность усиления эластомеров и проведена классификация наполнителей. Наполнители делят по размерам частиц на следующие классы: разбавляющие

наполнители, у которых размеры частиц располагаются в диапазоне 10000-1000 нм, полуусиливающие – в диапазоне 1000-100 нм, усиливающие – в диапазоне 100-35 нм, суперусиливающие – в диапазоне 35-10 нм. Зависимость степени усиления композита от размера частиц наполнителя и градация разных типов наполнителей показана на рисунке 3.16.

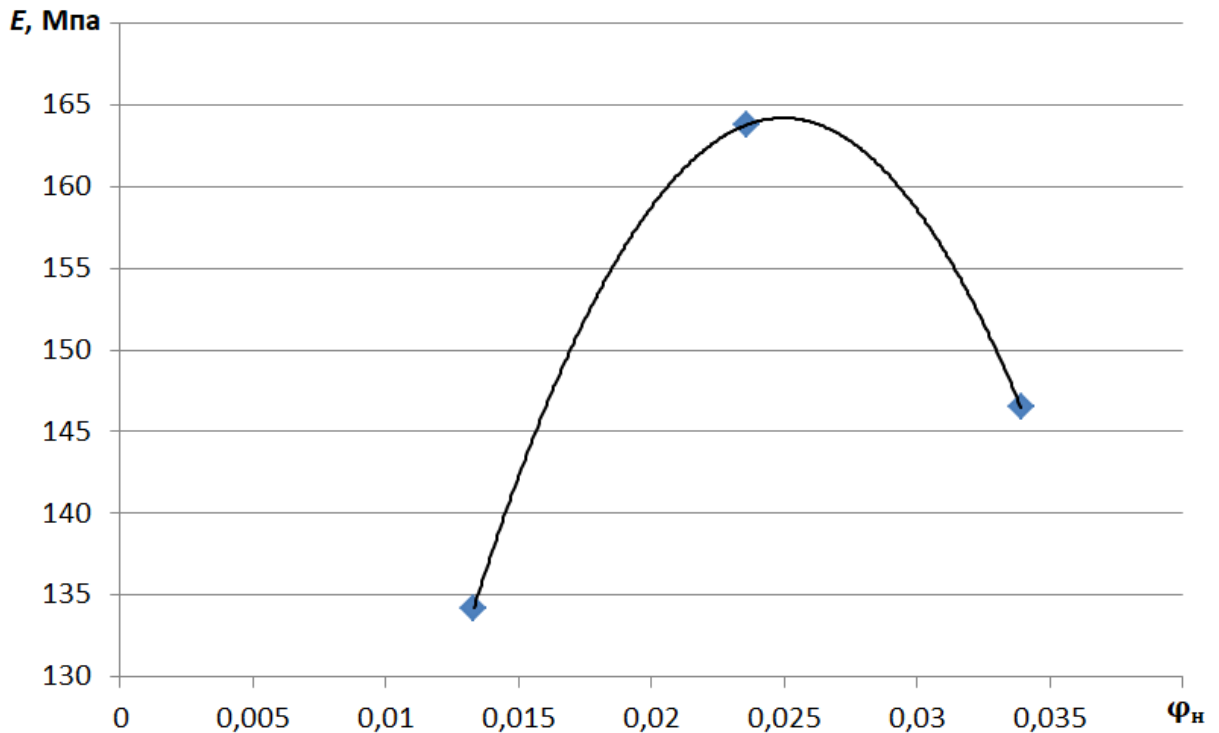
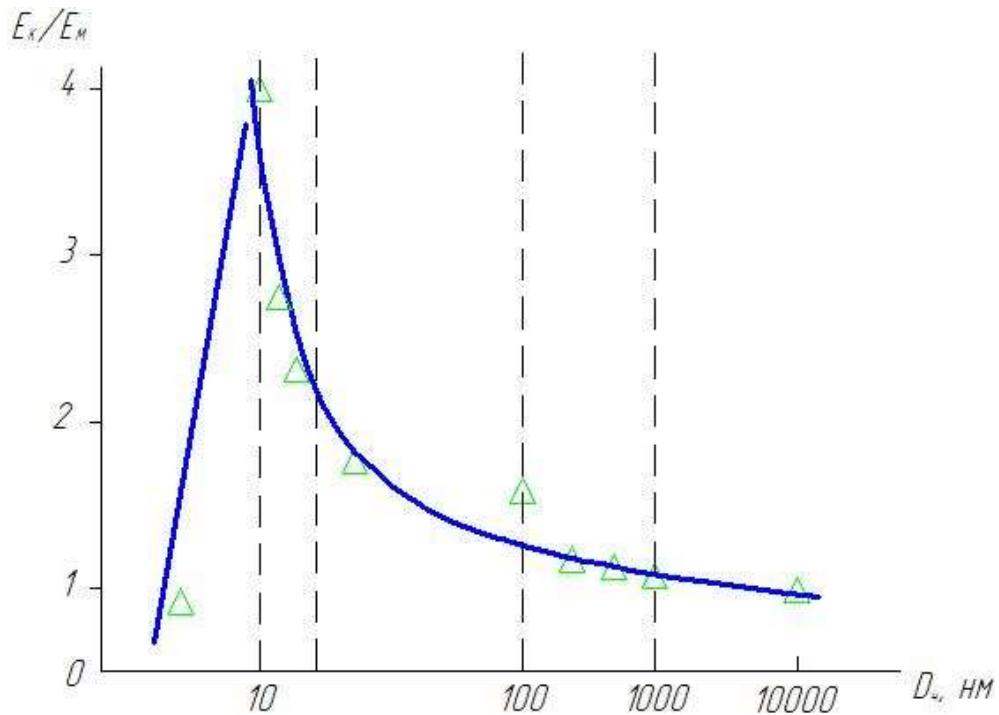


Рисунок 3.15 – Зависимость модуля упругости нанокompозита E от объемного содержания наночастиц алюминия и меди

Вертикальными штриховыми линиями обозначены границы областей усиления в соответствии с упомянутой выше классификацией. В зависимости от размера частиц разбавляющие наполнители увеличивают модуль упругости наполненного эластомера E_k в сравнении с аналогичным параметром не наполненного E_m 1,05...1,20 раза, полуусиливающие – в 1,20...1,60 раза, усиливающие – в 1,60...2,20 раза, суперусиливающие – 2,20...4,10 раза.



1 – разбавляющие; 2 – полуусиливающие; 3 – усиливающие;
4 – суперусиливающие [243]

Рисунок 3.16 – Зависимость степени усиления E_k/E_m от диаметра частиц дисперсного наполнителя D_n , и границы, определяющие класс наполнителя

Размер наночастиц алюминия и меди, используемых в качестве наполнителей в нанокompозитах, предназначенных для восстановления посадочных мест подшипников, составляет 70 нм (ТУ 1791-003-36280340-2008) [193].

Степень усиления в зависимости от содержания наполнителей составляет от $E_k/E_n = 104,3/80,9 = 1,29 \approx 1,3$ до $E_k/E_n = 163,8/80,9 = 2,02$ (рисунки 3.14 и 3.15). Поэтому с учетом оптимальной концентрации наполнителей, обеспечивающей наибольшую степень усиления полимера, можно сделать вывод, что наночастицы алюминия и меди следует отнести к усиливающим наполнителям.

Фрактальная размерность поверхности наночастиц наполнителя

Фрактальный анализ применяли к структуре трех нанокompозитов на основе эластомера Ф-40С: состав №1 (эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наноразмерный порошок алюминия – 0,075 масс.ч.); состав №2 (эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.;

наноразмерные порошки алюминия – 0,09 масс.ч. и меди – 0,03 масс.ч.); состав №3 (эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наноразмерный порошок меди – 0,1 масс.ч.).

Фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя d_s зависит в значительной мере от удельной поверхности S_u и размера наночастицы D_q , определяет степень усиления композита E_k / E_n и относит рассматриваемый наполнитель к конкретному типу (разбавляющие, полуусиливающие, усиливающие наполнители).

Величину d_s определили из формулы [93]

$$E_k / E_n = 18 \left[1 - (d - d_s)^{1/1,7} \right]. \quad (3.25)$$

где d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал, $d=3$; E_k и E_n – модули упругости композита и полимерной матрицы соответственно.

В таблице 3.7 представлены результаты экспериментальных исследований модуля упругости на растяжение $E_{кр} / E_{пр}$ и фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя d_s (для состава №2 получены усредненные значения величины, которые обеспечивают экспериментально определенное увеличение модуля упругости).

Как видно из таблицы 3.7 фрактальная размерность поверхности наночастиц алюминия составляет $d_s = 2,17$ (состав №1). Усредненный показатель аналогичной величины для состава №2 не значительно отличается $d_s = 2,18$. Отличие обусловлено наличием в составе композита наночастиц меди. Фрактальная размерность поверхности наночастиц меди наибольшая и составляет $d_s = 2,2$ (состав №3).

Таблица 3.7 – Результаты экспериментальных исследований модуля упругости и расчетные значения фрактальной размерности (шероховатости) поверхности наночастиц наполнителя

№ п/п	Состав нанокompозита	Степень усиления, $E_{кр} / E_{пр}$	Фрактальная размерность поверхности наночастиц d_s
1	Эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы алюминия – 0,075 масс.ч.	1,96	2,17
2	Эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы алюминия – 0,09 масс.ч. и меди – 0,03 масс.ч.)	2,025	2,18
3	Эластомер Ф-40С – 100 масс.ч.; наночастицы меди – 0,1 масс.ч.)	2,22	2,2

В соответствии с классификацией в рисунке 3.16 наночастицы алюминия и меди следует отнести к усиливающим наполнителям, обеспечивающим более чем двукратное усиление модуля упругости на растяжение нанокompозитов в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С.

В фрактальном анализе полимерных композитов частицы наполнителя характеризуются двумя важными характеристиками: фрактальной размерностью поверхности частиц d_s и фрактальной размерностью структуры частиц d_f .

Фрактальную размерность поверхности частиц сажи d_s , используемую в качестве наполнителя эластомеров, в работе [99] определяют из уравнения

$$S_u = 410 \left(\frac{D_u}{2} \right)^{d_s - d} = K \left(\frac{D_u}{2} \right)^{d_s - d}, \quad (3.26)$$

где K – поправочный коэффициент, $K = 410$; S_u – удельная поверхность наночастиц, $m^2 \cdot g^{-1}$; D_u – диаметр наночастиц, нм.

Расчет величины d_s по формуле (3.26) показал для наночастиц алюминия значение $d_s = 3,3$, что свидетельствует о том, что поправочный коэффициент $K = 410$, принятый для саж, не корректен применительно к металлическим наночасти-

цам. По этой причине, используя паспортные данные производителя нанопорошков [193] и расчетные величины d_s , определенные по формуле (3.25), внесены изменения в формулу (3.26). В таблице 3.8 показаны исходные данные и результаты расчета.

Таблица 3.8 – Характеристики поверхности металлических наночастиц и поправочные коэффициенты

№ п/п	Материал наполнителя	Размер наночастицы D_q , нм	Удельная поверхность S_u , м ² /г	Фрактальная размерность поверхности наночастиц d_s	Значение поправочного коэффициента для формулы (3.25)
1	Алюминий	70	12,0	2,17	229
2	Медь	70	12,5	2,20	215
3	Алюминий+медь (усредненное значение, полученное по правилу смесей)	70	12,357*	2,18	228*
	В итоге выбрали				220

Таким образом, формула (3.26) получит вид

$$S_u = 220 \left(\frac{D_q}{2} \right)^{d_s - d} \quad (3.27)$$

Фрактальную размерность структуры наночастиц наполнителя эластомерного нанокompозита d_f определяли из формулы [99]

$$\rho = \rho_{nl} \left(\frac{D_q}{2a} \right)^{d_f - d}, \quad (3.28)$$

где ρ и ρ_{nl} – плотность фрактального агрегата и плотность компактных частиц в состоянии упаковки; a – нижний линейный масштаб фрактального пове-

дения, который для полимеров принимают равным длине статистического сегмента $\ell_{ст}$.

Плотность фрактального агрегата ρ определили по формуле [99]

$$\rho = \frac{M}{V_q \times N_A}, \quad (3.29)$$

где M – молекулярная масса наполнителя; V_q – объем частицы наполнителя, $V_q = 146,53 \times 10^{-27} \text{ м}^3$; N_A – число Авогадро, $N_A = 6,022 \times 10^{23}$.

Молекулярную массу наполнителя рассчитывали по формуле [99]

$$M = N_{am} m_{Al}, \quad (3.30)$$

где N_{am} – предельное число атомов для объектов наномира $N_{am} = 10^3 \dots 10^4$, приняли $N_{am} = 10^3$; m_{Al} – атомная масса материала наполнителя, для алюминия $m_{Al} = 26,981 \text{ аем}$, меди – $m_{Cu} = 63,546 \text{ аем}$.

Состав №1

Плотность фрактального агрегата ρ по формуле (3.29)

$$\rho^{Al} = \frac{10^3 \times 26,981 \times 10^{-3}}{146,53 \times 10^{-27} \times 6,022 \times 10^{23}} = 305 \text{ кг} / \text{м}^3$$

По данным производителя нанопорошок алюминия имеет следующие параметры: плотность материала частиц в состоянии упаковки $\rho_{пл} \approx 400 \text{ кг} / \text{м}^3$, размер наночастицы $D_q = 70 \text{ нм}$ [193].

После подстановки значений величин, рассчитанных выше, формула (3.28) получила вид

$$305 = 400 \left(\frac{70}{2 \times 10,9} \right)^{d_f - 3}$$

Расчет неизвестного показал, что фрактальная размерность структуры наночастиц алюминиевого наполнителя d_f состава №1 составляет $d_{f-Al} = 2,77$.

Состав №2

При расчете плотности фрактального агрегата ρ параметры наполнителя определяли по правилу смеси

$$m_{\Sigma} = m_{Al} V_{Al} + m_{Cu} V_{Cu},$$

где V_{Al} и V_{Cu} – объемная доля алюминия и меди в смеси.

$$m_{\Sigma} = 26,981 \times 0,714 + 63,546 \times 0,286 = 37,438$$

Плотность фрактального агрегата ρ по формуле (3.29)

$$\rho^{Al+Cu} = \frac{10^3 \times 37,438 \times 10^{-3}}{146,53 \times 10^{-27} \times 6,022 \times 10^{23}} = 425 \text{ кг} / \text{м}^3$$

По данным производителя нанопорошки алюминия и меди имеют следующие параметры: плотность наночастиц наполнителей в состоянии упаковки алюминия $\rho_{nl}^{Al} \approx 400 \text{ кг} / \text{м}^3$, меди – $\rho_{nl}^{Cu} \approx 5000 \text{ кг} / \text{м}^3$, размер наночастиц $D_q = 70 \text{ нм}$.

Плотность смеси частиц алюминия и меди в состоянии упаковки определили по правилу смеси.

Объем, занимаемый частицами наполнителя в смеси, рассчитали, исходя из массового содержания и плотности материала

$$\mathcal{G}_{Al} = W_{Al} / \rho_{Al},$$

$$\mathcal{G}_{Al} = 0,1 \text{масс.ч.} / 400 \text{кг} / \text{м}^3 = 0,00025 \text{м}^3$$

$$\mathcal{G}_{Cu} = W_{Cu} / \rho_{Cu},$$

$$\mathcal{G}_{Cu} = 0,04 \text{масс.ч.} / 5000 \text{кг} / \text{м}^3 = 0,000008 \text{м}^3$$

Общий объем, занимаемый частицами наполнителей

$$\mathcal{G}_{Al+Cu} = 0,00025 + 0,000008 = 0,000258 \text{м}^3$$

Объемная доля наполнителей в смеси из нанопорошков

$$V_{Al} = \frac{0,00025}{0,000258} = 0,969, V_{Cu} = \frac{0,000008}{0,000258} = 0,031.$$

$$\rho_{nl}^{Al+Cu} = \rho_{nl}^{Al} \times V_{Al} + \rho_{nl}^{Cu} \times V_{Cu}$$

$$\rho_{nl}^{Al+Cu} = 400 * 0,969 + 5000 * 0,031 = 543 \text{кг} / \text{м}^3$$

После подстановки значений величин, рассчитанных выше, формула (3.28) получила вид

$$425 = 543 \left(\frac{70}{2 \times 8,54} \right)^{d_f - 3}$$

Расчет неизвестного показал, что усредненная фрактальная размерность структуры алюминиевых и медных наночастиц наполнителя d_f состава №2 составляет $d_{f-Al+Cu} = 2,82$.

Определим, в рамках фрактального анализа, такую важную характеристику как фрактальную размерность структуры композита d_f^k .

В работе [99] подчеркивается, что фрактальная размерность d_f^k содержит наиболее общую информацию о структуре объекта. Применительно к полимерному материалу – это основная структурная характеристика, которая описывает распределение элементов структуры в пространстве. При фрактальном анализе усиления полимерных нанокомпозитов авторы используют величину d_f^k , то есть фрактальную размерность структуры композита, как наиболее обобщенную характеристику структуры эластомерных нанокомпозитов.

Например, для идеально хрупкого тела значение фрактальной размерности структуры составляет $d_f = 2,5$, а работа его разрушения соответственно имеет значение $A_p = 0$. Установлено, что максимальное значение фрактальной размерности структуры твердых тел составляет $d_f = 2,95$ [244].

Авторы в работе [245] показали, что классическая энтропийная теория высокоэластичности может применяться только к евклидовым объектам, т.е. объектам у которых коэффициент Пуассона $\nu = 0,5$, а величина $d_f = 3,0$. У композитов на основе каучука, наполненных дисперсными частицами, другие характеристики, соответствующие фрактальным объектам: $\nu < 0,5$; $d_f < 3,0$. Поэтому при описании поведения эластомерных нанокомпозитов рекомендуются фрактальная теория упругости и энтропийной высокоэластичности.

Фрактальную размерность структуры композита d_f^k можно определить по формуле [246]

$$d_f^k = (d - 1)(1 + \nu) \quad (3.31)$$

Значения коэффициента Пуассона для эластомерных нанокомпозитов:
 $\nu_{Al}^k = 0,45$; $\nu_{Al+Cu}^k = 0,44$.

Состав №1

Значение коэффициента Пуассона для нанокомпозита состава №1 составляет $\nu_{Al}^k = 0,45$. Соответственно:

$$d_{f-Al}^k = (3-1)(1+0,44) = 2,9.$$

Состав №2

Значение коэффициента Пуассона для нанокомпозита состава №2 составляет $\nu_{Al+Cu}^k = 0,44$. Соответственно:

$$d_{f-Al+Cu}^k = (3-1)(1+0,43) = 2,88.$$

Объемную долю межфазных слоев в нанокомпозите $\varphi_{m\phi}$ определили по формуле [247]

$$\varphi_{m\phi} = \varphi_n \left[\left(\frac{R}{r_q} \right)^3 - 1 \right], \quad (3.32)$$

где φ_n – объемная доля наполнителя; r_q – радиус частицы наполнителя, $r_q = 35 \text{ нм}$.

Величину R рассчитали по формуле

$$R = \frac{D_q}{2} + \ell_{m\phi}, \quad (3.33)$$

где $\ell_{мф}$ – толщина межфазного слоя, $\ell_{мф} \cong a \left(\frac{D_ч}{2a} \right)^{2(d-d_s)/d}$.

Состав №1

$$\ell_{мф}^{Al} \cong 10,9 \left(\frac{70}{2 * 10,9} \right)^{0,553} = 20,7 \text{ нм}; \varphi_n = 0,02;$$

$$R^{Al} = \frac{70}{2} + 20,7 = 55,7 \text{ нм}; \varphi_{мф}^{Al} = 0,02 * \left[\left(\frac{55,7}{35} \right)^3 - 1 \right] = 0,199/3 \approx 0,07$$

Состав №2

$$\ell_{мф}^{Al+Cu} \cong 8,54 \left(\frac{70}{2 * 8,54} \right)^{0,547} = 18,5 \text{ нм}; \varphi_n = 0,0236; R^{Al+Cu} = \frac{70}{2} + 18,5 = 53,5 \text{ нм};$$

$$\varphi_{мф}^{Al+Cu} = 0,0236 \left[\left(\frac{53,5}{35} \right)^3 - 1 \right] = 0,07.$$

Формирование химических связей «полимер-наполнитель»

Химическая реакция двух структурных объектов возможна в случае, когда структура вышеуказанных объектов обеспечивает сближение реакционноспособных центров на расстояние достаточное для протекания реакции. При взаимодействии объектов «полимер-наночастица» следует отметить такие определяющие факторы: 1) фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастицы d_n ; 2) жесткость цепи или длина статистического сегмента полимера $\ell_{см}$. С увеличением шероховатости поверхности наночастиц и длины статистического сегмента полимера ухудшаются условия для сближения реакционноспособных центров на расстояние, необходимое для протекания реакции [99].

Влияние фрактальной размерности поверхности частиц d_n и жесткости статистического сегмента макромолекулы полимера на вероятность сближения реакционноспособных центров для реализации химической реакции показано на ри-

сунке 3.17. Из рисунка следует, что сближение реакционноспособных центров затрудняется с увеличением шероховатости поверхности частиц d_n и жесткости (увеличении длины) статистического сегмента, соответственно снижается относительная реакционная способность наночастиц наполнителя k_p .

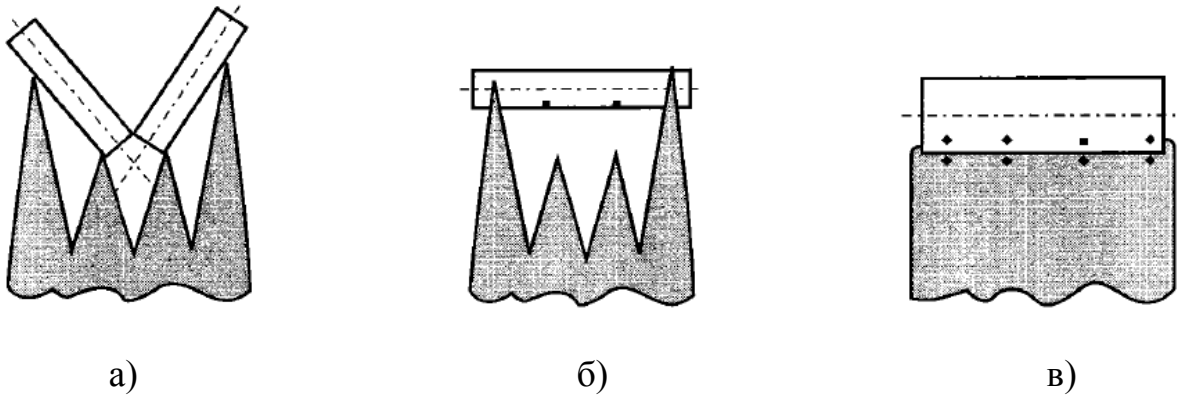


Рисунок 3.17 – Схематическое изображение вероятности контакта реакционноспособных центров (черные точки) для фрактальной (а, б) и евклидовой (в) поверхностей частиц с гибкой (а) и жесткой (б, в) полимерной макромолекулой [99]

Относительную реакционную способность частиц наполнителя k_p можно определить по формуле [235]

$$k_p = \frac{v_n}{S_u v_c}, \quad (3.34)$$

где v_n – плотность химической связи «каучук-наполнитель»; S_u – удельная поверхность наночастиц наполнителя, v_c – плотность сшивки объемного каучука.

На рисунке 3.18 показана зависимость относительной реакционной способности сажи k_p от фрактальной размерности (шероховатости) поверхности их частиц d_n для трех наполненных каучуков (матрицей являлись бутадиенстирольный (БСК), бутильный (БК) и натуральный (НК) каучуки [248]).

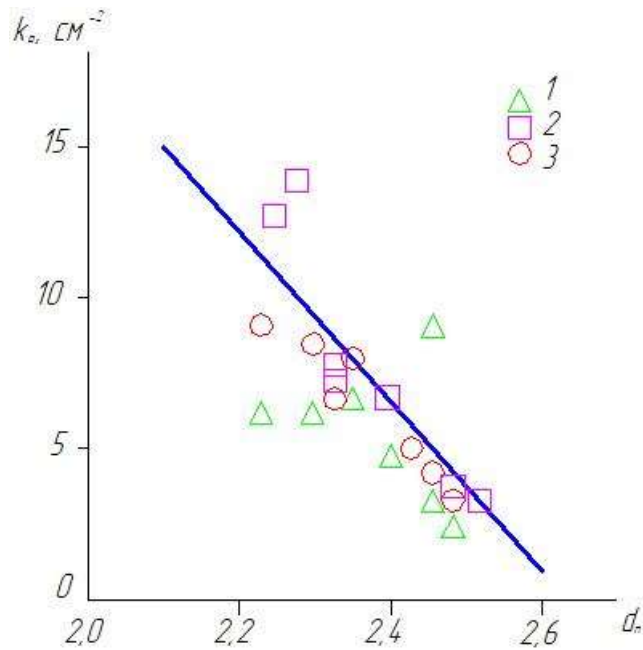


Рисунок 3.18 – Зависимость относительной реакционной способности k_p саж от фрактальной размерности поверхности их частиц d_n для наполненных каучуков БСК (1), БК (2) и НК (3) [99]

Зависимость линейная. С увеличением шероховатости поверхности частиц наполнителя реакционная способность k_p уменьшается. Следует отметить две причины: 1) форма и размер адсорбируемых молекул полимера; 2) размерность «неэкранированной» (доступной для адсорбции) поверхности частиц наполнителя d_u .

На частицах с одинаковой фрактальной размерностью поверхности d_n адсорбция молекул раствора полимера разных размеров и формы приводит к разным значениям величины S_u . Это подтверждается зависимостью [99]

$$S_u \approx S^{(2-d_s)/2}$$

где S – площадь поперечного сечения адсорбируемой молекулы.

Чем больше размеры молекулы полимера, тем меньше величина S_u .

Сложность структуры оценивают размерностью «неэкранированной» (доступной для адсорбции) поверхности частиц наполнителя d_u , которую можно рассчитать по формуле [99]

$$d_u = (d_s - 1) + \frac{d - d_s}{d_w}, \quad (3.35)$$

где d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал ($d = 3$), d_w – размерность траекторий макромолекул каучука, $d_w = 2$ (броуновское движение).

Следует отметить, что для значений $d_u > 1,50$ эффективная размерность «неэкранированной» поверхности частиц $d_u^{\text{эф}}$ уменьшается по мере роста величины d_u .

$$d_u^{\text{эф}} = 2 - d_u \quad (3.36)$$

На рисунке 3.19 представлена зависимость относительной реакционной способности k_p саж от величины $d_u^{\text{эф}}$. С ее ростом увеличивается количество доступных (неэкранированных) реакционноспособных центров N_u и соответственно величина k_p .

Количество доступных (неэкранированных) реакционноспособных центров N_u на поверхности частицы наполнителя можно определить по зависимости [93]

$$N_u \approx \left(\frac{D_u}{2}\right)^{d_u^{\text{эф}}} \quad (3.37)$$

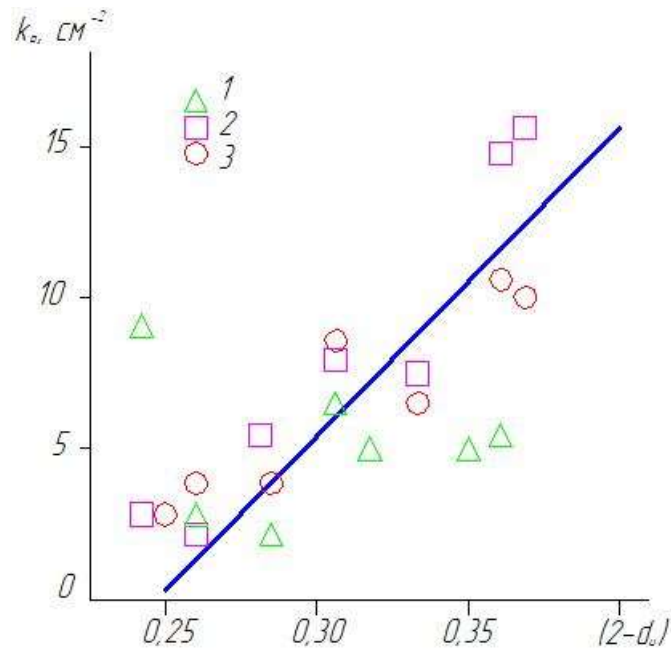


Рисунок 3.19 – Зависимость относительной реакционной способности k_p саж от эффективной размерности $(2 - d_u)$ «неэкранированной» поверхности частиц саж для наполненных каучуков БСК (1), БК (2) и НК (3) [99]

Количество частиц на единицу объема эластомерного композита можно рассчитать по формуле [93]

$$N_u = \frac{\varphi_n}{V_u}, \quad (3.38)$$

где V_u – объем частицы, определяемый по ее диаметру D_u в предположении сферической формы частиц наполнителя.

Суммарное количество доступных (неэкранированных) реакционноспособных центров на поверхности частиц $N_u^{сум}$ на единицу объема эластомерного нанокомпозита (в относительных единицах) можно определить по зависимости [99]

$$N_u^{сум} = N_u N_p \quad (3.39)$$

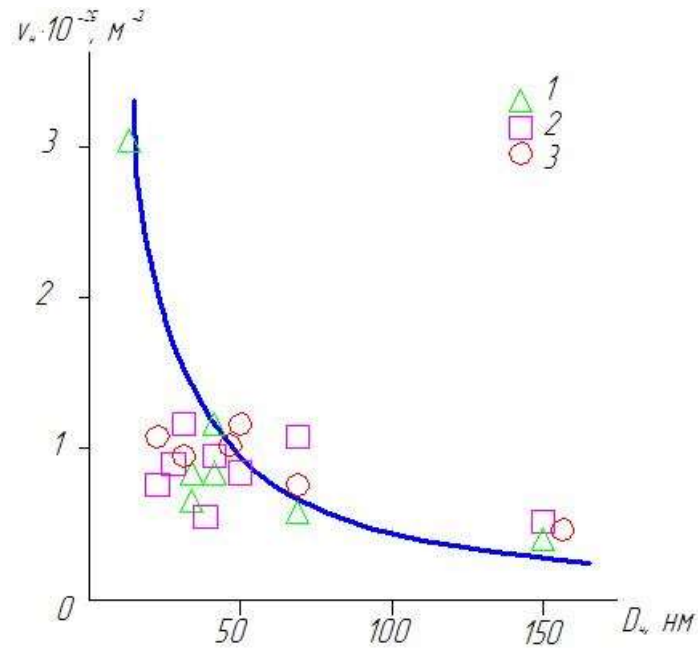
С учетом формул (3.37)...(3.39) после преобразований получена зависимость [99]

$$N_u^{сум} \approx \varphi_n \left(\frac{D_q}{2}\right)^{d_u-3} \quad (3.40)$$

С учетом вышеизложенного, вероятность формирования химических связей полимер-наполнитель определяется структурой поверхности частиц наполнителя и макромолекул каучука. Основные физические факторы, определяющие реакционную способность частиц наполнителя это: эффективная размерность «неэкранированной» поверхности частиц наполнителя $d_u^{эф}$ и жесткость полимерной цепи, которая определяется длиной статистического сегмента ℓ_{cm} и площадью поперечного сечения макромолекулы S [248].

Следует отметить, что величина d_s отражает наличие всех активных, реакционноспособных центров на поверхности частиц наполнителя, а d_u – только доступных для формирования химической связи. С увеличением размерности «неэкранированной» поверхности частиц наполнителя d_u усиливается фрактальность (шероховатость) поверхности, что вызывает экранирование части активных мест, то есть они приходится на узкие щели, поры и другие области, в которые доступ молекул полимера ограничен. При значениях шероховатости поверхности частиц $d_n \geq 2,60$, рост количества доступных (неэкранированных) реакционноспособных центров N_u на поверхности частицы наполнителя существенно замедляется. Это явление является общим для всех фрактальных структур [99].

Рассмотрим влияние физического (структурного) фактора на формирование химических связей «наполнитель-эластомер» [249]. При постоянной объемной доле наполнителя φ_n с уменьшением размера частиц D_q плотность связей «эластомер-наполнитель» ν_n увеличивается (рисунок 3.20). Тогда в соответствии с формулой (3.34) увеличивается и реакционная способность наполнителя.

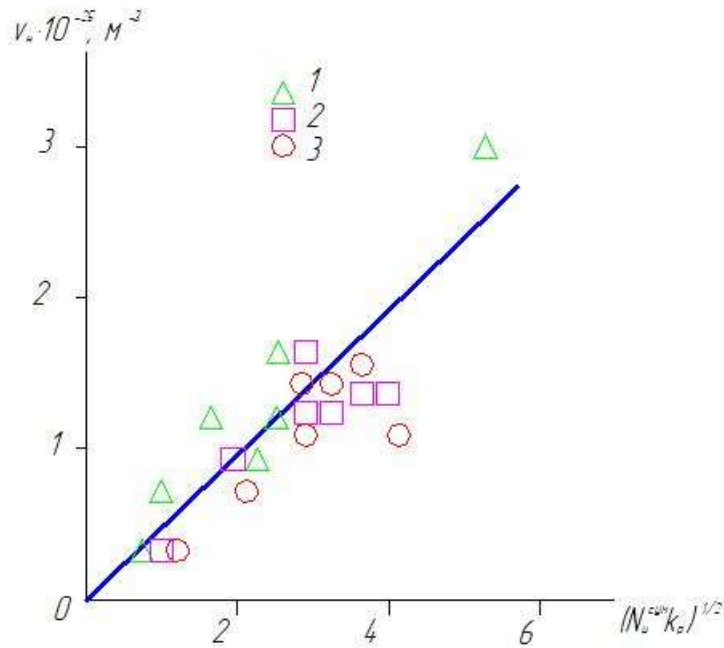


точки – экспериментальные данные, линия – расчетные по соотношению (3.39)
при $d_u \approx 1,60$ [249]

Рисунок 3.20 – Зависимость плотности связей эластомер-наполнитель v_n от диаметра частиц сажи D_c для каучуков БСК (1), БК (2) и НК (3)

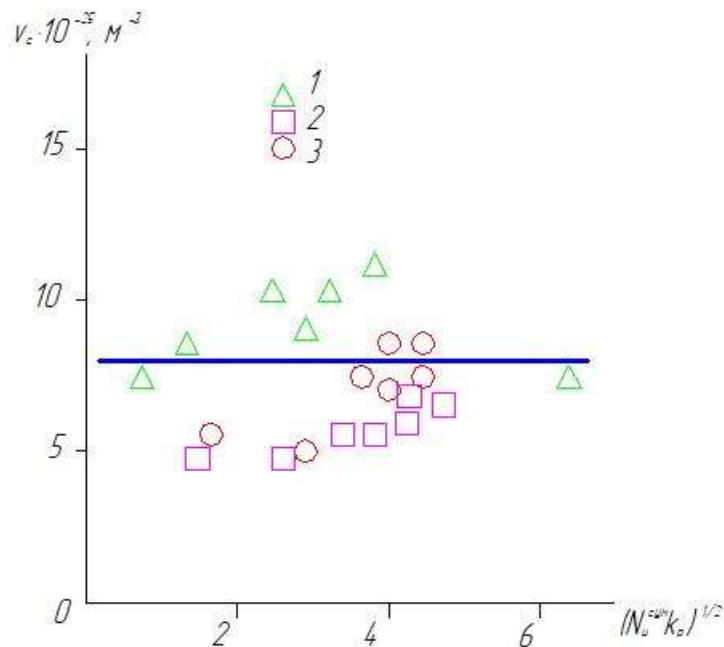
«Формирование химических связей определяется двумя факторами: химическим (реакционной способностью сажи k_p) и физическим (доступной для реакции поверхностью сажевых частиц $N_u^{сум}$)» [99]. Зависимость v_n от обобщенного параметра $(N_u^{сум} k_p)^{1/2}$ линейная (рисунок 3.21), что свидетельствует о равнозначности химического k_p и физического факторов $N_u^{сум}$ [249].

На рисунке 3.22 показана зависимость плотности сшитого каркаса v_c эластомерной матрицы от обобщенного параметра $(N_u^{сум} k_p)^{1/2}$. Из рисунка следует, что на плотность связи «полимер-полимер» v_c физический фактор не влияет, то есть воздействие структуры поверхности частиц наполнителя является близкodayствующим.



точки – экспериментальные данные, линия - расчетные
по соотношению (3.39) при $d_u \approx 1,60$

Рисунок 3.21 – Зависимость плотности связей эластомер-наполнитель v_n от параметра $(N_u^{\text{сум}} k_p)^{1/2}$ [249]



точки – экспериментальные данные, линия - расчетные
по соотношению (3.39) при $d_u \approx 1,60$ [249]

Рисунок 3.22 – Зависимость плотности сшивки объемной эластомерной матрицы v_c от величины параметра $(N_u^{\text{сум}} k_p)^{1/2}$

Для расчета длины статистического сегмента ℓ_{cm} использовали зависимость [93]

$$E_k / E_n = 1 + 0,32 \ell_{cm} \sqrt{W_c}, \quad (3.41)$$

где W_c – массовое содержание наполнителя, масс.ч.

После преобразования формула (3.41) получила вид

$$\ell_{cm} = \frac{\left(\frac{E_k}{E_n} - 1 \right)}{0,32 \sqrt{W_c}} \quad (3.42)$$

Показатель статистической гибкости полимерной цепи нанокompозитов рассчитали по формуле

$$C_\infty = \frac{2d_f^k}{d(d-1)(d-d_f^k)} + 4/3 \quad (3.43)$$

Длина скелетной связи основной цепи определена из зависимости

$$\ell_0 = \frac{\ell_{cm}}{C_\infty} \quad (3.44)$$

Фрактальная размерность участка полимерной цепи его фиксации (кластерами, физическими зацеплениями, узлами химической сшивки и т.п.)

$$D_y = \frac{\ln(\lambda_p * C_\infty)}{\ln C_\infty} \quad (3.45)$$

где λ_p – предельная степень вытяжки нанокompозита.

Состав №1

$$d_{Al}^k = (3 - 1)(1 + 0,44) = 2,9$$

Длина статистического сегмента

$$\ell_{cmAl} = \frac{1,96 - 1}{0,32\sqrt{0,075}} = 10,9_{нм}$$

Показатель статистической гибкости полимерной цепи

$$C_\infty = C_\infty^{Al} = \frac{2 \times 2,9}{3(3 - 1)(3 - 2,9)} + 1,333 = 10,9$$

Длина скелетной связи основной цепи

$$\ell_0 = \ell_0^{Al} = \frac{10,9}{10,9} = 1,0 \overset{\circ}{\text{A}}$$

Фрактальная размерность участка полимерной цепи

$$D_{y-0,075}^{Al} = \frac{\ln(3,4 \cdot 10,9)}{\ln 10,9} = 1,51$$

Состав №2

$$d_{Al+Cu}^k = (3 - 1)(1 + 0,43) = 2,88$$

Результаты предыдущих исследований показали, что фрактальная размерность поверхности наночастиц алюминия и меди отличается не значительно ($d_{sAl} = 2,17$ и $d_{sCu} = 2,20$). Поэтому длину статистического сегмента определяли как для двухкомпонентной композиции.

Длина статистического сегмента

$$\ell_{cmAl+Cu} = 8,54 \text{ нм}$$

Показатель статистической гибкости полимерной цепи

$$C_{\infty} = \frac{2 * 2,88}{6 * 0,12} + 1,3333 = 9,3$$

Длина скелетной связи основной цепи

$$\ell_0 = \frac{\ell_{cm}}{C_{\infty}} = \frac{8,54}{9,3} = 0,92 \text{ \AA}$$

Фрактальная размерность участка полимерной цепи

$$D_{u-0,15}^{Al+Cu} = \frac{\ln(3,3 * 9,3)}{\ln 9,3} = 1,53$$

Размерность «неэкранированной» (доступной для абсорбции) поверхности d_u определили по формуле (3.35), эффективную величину «неэкранированной» поверхности частиц наполнителя d_u^{ϕ} рассчитали по зависимости (3.36).

Состав №1

$$d_u^{Al} = (2,17 - 1) + \left(\frac{3 - 2,17}{2}\right) = 1,58; \quad d_u^{Al \rightarrow \phi} = 2 - 1,58 = 0,42.$$

$$d_u^{Al+Cu} = (2,18-1) + \left(\frac{3-2,18}{2}\right) = 1,59; \quad d_u^{Al+Cu-\phi} = 2-1,59 = 0,41.$$

В соответствии с рисунком 3.15 и высокими значениями размерности «неэкранированной» поверхности наночастиц наполнителей $d_u^{Al-\phi} = 0,42$ и $d_u^{Al+Cu-\phi} = 0,41$ можно сделать вывод о достаточно высокой реакционной способности наночастиц алюминия и меди при взаимодействии с раствором эластомера Ф-40С. Структурные и молекулярные характеристики структуры эластомерных нанокомпозитов представлены в таблице 3.9.

3.2.3 Исследование текучести эластомерных нанокомпозитов с использованием фрактального анализа

Применительно к пластичным материалам предел текучести σ_m является важной эксплуатационной характеристикой. При этом постоянном значении напряжения σ_m и даже более низком значении, материал продолжает деформироваться, т.е. имеет место холодное течение материала. Поэтому предел текучести σ_m является напряжением, определяющим верхний предел напряжений в условиях эксплуатации.

Предел текучести на сдвиг τ_m можно рассчитать по формуле [93]

$$\tau_m^{\kappa} = \tau_n + \frac{G_{\kappa} b_B}{\lambda_{\phi}}, \quad (3.46)$$

где τ_n – предел текучести на сдвиг полимерной матрицы; G_{κ} – модуль сдвига нанокомпозита; b_B – вектор Бюргерса; λ_{ϕ} – расстояние между наночастицами в композите.

Таблица 3.9 – Структурные и молекулярные характеристики структуры эластомерных нанокомпозитов

№ П/П	W_c / φ_n	$E_{кр} / E_{пр}$	d_s	d_f	d_f^k	$\ell_{мф}, нм$	$\varphi_{мф}$	$\ell_{ст}, нм$	C_∞	$\ell_o, \overset{o}{A}$	d_u	$d_u^{эф}$	b_f	λ_u	D_u
Состав №1: Ф-40С+Al															
1	0,075/0,02	1,96	2,17	2,77	2,9	20,7	0,07	10,9	10,9	1,0	1,58	0,42	2,35	138	1,51
Состав №2: Ф-40С+Al+Cu															
3	0,12/0,0236	2,02	2,18	2,82	2,88	18,5	0,073	8,54	9,3	0,92	1,59	0,41	2,55	127	1,53

Для определения предела текучести на сдвиг полимерной матрицы τ_m^k и предела текучести нанокомпозита σ_m^k использовали следующее соотношение между нормальным напряжением σ и напряжением сдвига τ

$$\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad (3.47)$$

Модуль сдвига нанокомпозита G_k определили, используя соотношение [94]

$$G_k = \frac{E_k}{d_f^k}, \quad (3.48)$$

где E_k – модуль упругости композита; d_f^k – фрактальная размерность структуры композита.

Вектор Бюргера рассчитали по уравнению [250]

$$b_B = \left(\frac{60,5}{C_\infty} \right)^{1/2} \quad (3.49)$$

Расстояние между наночастицами в композите определили из зависимости [93]

$$\lambda_u = \left[\left(\frac{4\pi}{3\varphi_n} \right)^{1/3} - 2 \right] * \frac{D_u}{2}, \quad (3.50)$$

где D_u – диаметр наночастицы наполнителя; φ_n – объемное содержание наполнителя.

Были получены следующие результаты расчета предела текучести нанокompозитов.

Состав №1

Предел текучести на сдвиг полимерной матрицы рассчитали по формуле (3.47)

$$\tau_n = \frac{14,1}{\sqrt{3}} = 8,14 \text{ МПа}$$

Модуль сдвига нанокompозита G_k определили по формуле (3.48)

$$G_k = \frac{158,4}{2,9} = 54,62 \text{ МПа}$$

Вектор Бюргера рассчитали по уравнению (3.49)

$$b_B = \left(\frac{60,5}{10,9} \right)^{1/2} = 2,35$$

Расстояние между наночастицами в композите определили из зависимости (3.50)

$$\lambda_q = \left[\left(\frac{4\pi}{3 * 0,02} \right)^{1/3} - 2 \right] * 35 = 137,78 \text{ нм}$$

Предел текучести на сдвиг нанокompозита τ_m рассчитали по формуле (3.46)

$$\tau_m^k = 8,14 + \frac{54,62 * 2,35}{137,78} = 9,07 \text{ МПа}$$

Из соотношения (3.47) определили предел текучести нанокompозита состава №1

$$\sigma_m^{\kappa-Al} = 15,7 \text{ МПа}$$

Состав №2

Модуль сдвига нанокompозита G_κ определили по формуле (3.48)

$$G_\kappa = \frac{163,8}{2,9} = 56,48 \text{ МПа}$$

Вектор Бюргерса рассчитали по уравнению (3.49)

$$b_B = \left(\frac{60,5}{9,3} \right)^{1/2} = 2,55$$

Расстояние между наночастицами в композите определили из зависимости (3.50)

$$\lambda_\kappa = \left[\left(\frac{4\pi}{3 * 0,0236} \right)^{1/3} - 2 \right] * 35 = 126,6 \text{ нм}$$

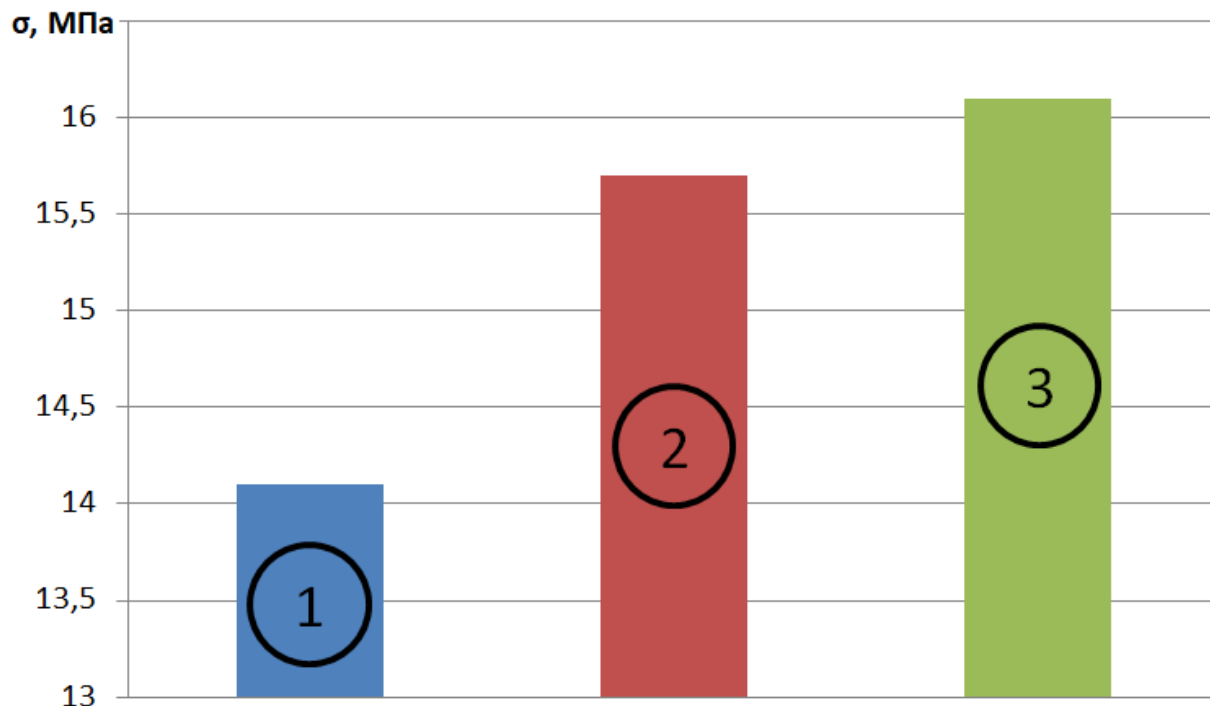
Предел текучести на сдвиг нанокompозита τ_m рассчитали по формуле (3.46)

$$\tau_m^\kappa = 8,14 + \frac{56,48 * 2,55}{126,6} = 9,28 \text{ МПа}$$

Из соотношения (3.47) определили предел текучести нанокompозита состава №2

$$\sigma_m^{\kappa-Al+Cu} = 16,1 \text{ МПа}$$

На рисунке 3.23 представлены пределы текучести эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе.



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

Рисунок 3.23 – Пределы текучести эластомера Ф-40С и нанокомпозитов на его основе

Выводы

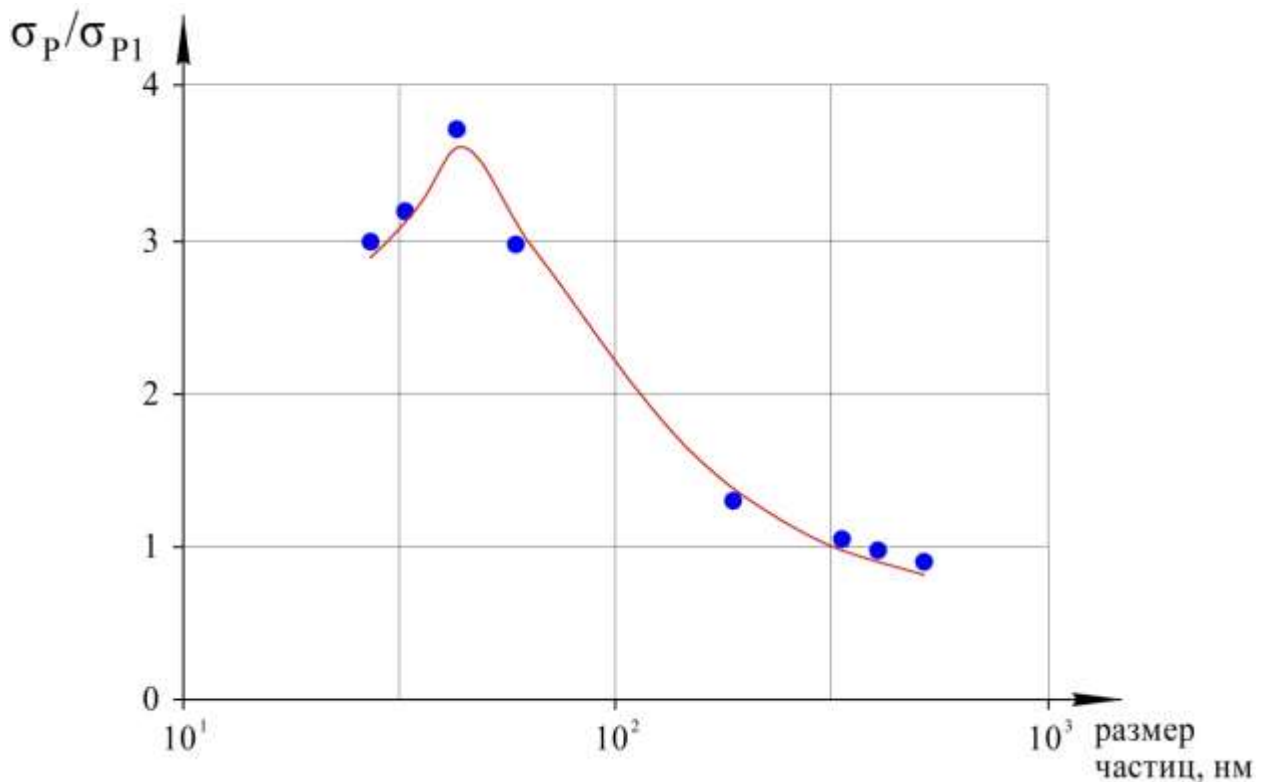
1. Наполнение эластомера Ф-40С алюминиевым нанопорошком в оптимальной концентрации увеличивает предел текучести материала в 1,11 раза, от 14,1 до 15,7 МПа.

2. Благодаря наполнению эластомера Ф-40С металлическими наночастицами предел текучести трехкомпонентного нанокомпозита эластомера Ф-40С с алюминиевым и медным нанопорошками в оптимальной концентрации, в сравнении с не наполненным эластомером, увеличивается в 1,14 раза, от 14,1 до 16,1 МПа.

3. Увеличение предела текучести нанокомпозитов обусловлено повышением их модуля упругости, в сравнении с не наполненным эластомером.

3.2.4 Прочность полимерных нанокомпозитов

В зависимости от размера дисперсных частиц наполнителя в полимерной матрице при нагружении формируются трещины определенной длины, определяющие прочность композита [2, 251]. Зависимость прочности композита на основе бутадиенового каучука от размера наночастиц наполнителя представлена на рисунке 3.24.



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

Рисунок 3.24 – Зависимость относительной прочности σ_p/σ_{p1} резины на основе бутадиенового каучука от размера частиц наполнителя [242]

Максимальная прочность композита, по сравнению не наполненной матрицей, увеличилась до 3,8 раз при размере наночастиц в 70 нм.

Наполнение матричного полимера наноразмерными частицами усиливает композит, т.к. при нагружении в последнем образуются микротрещины размером гораздо меньше критического. В виду того, что у наноразмерных частиц высокая удельная поверхность, общее количество возникающих микротрещин в нанокompозите значительно превышает их количество в микрокомпозите. В этой связи необходимо больше приложить энергии для разрушения нанокompозита, нежели для композита, наполненного микроразмерными частицами.

В зависимости от формы частицы способны образовывать в матричном полимере цепочечные и разветвленные структуры.

В работе Воюцкого рассмотрено, каким образом адгезия полимера к наполнителю влияет на усиление композита [251]. Прочность эластомерного композита обеспечивается по причине наличия в зазоре между ними молекул полимера.

По модели Бики связь между частицами наполнителя при деформации материала разрушается по двум причинам: при отрыве полимерных цепей сетки от частиц наполнителя или разрыве сильно растянутых полимерных цепей сетки [231] (рисунок 3.25).

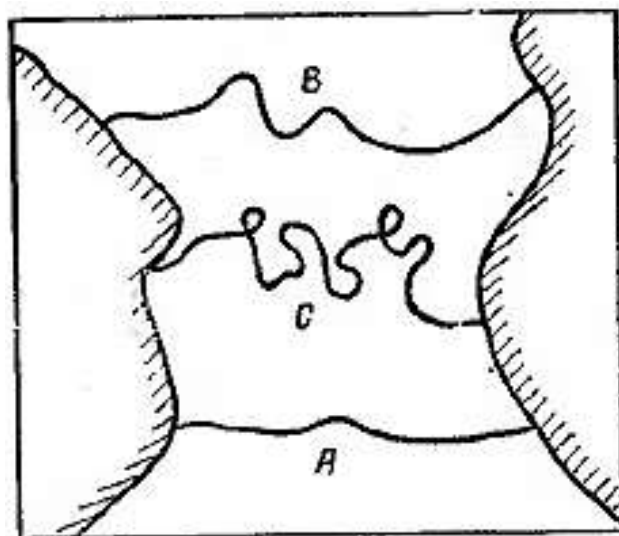


Рисунок 3.25 – Схематическое изображение цепей каучука, связанных с двумя частицами наполнителя [231]

В соответствии с рисунком полимерная цепь А наиболее деформирована, поэтому она разорвется первой. Далее будет иметь место разрыв цепи В. Благодаря тому, что цепь С свернута, ее разрыв или отрыв от поверхности наполнителя возникает в последнюю очередь при наибольшей деформации материала.

Степень усиления в значительной мере определяется межмолекулярным взаимодействием в полимере.

Упорядочение макромолекул полимера, молекулярная подвижность в межфазных областях вблизи контакта с частицами наполнителя, ориентация макромолекул на поверхности частиц наполнителя под воздействием несимметричных силовых полей вокруг последних – эти факторы также увеличивают прочность композитов.

Молекулярное движение в значительной степени влияет на прочность полимерных композитов. Различие термических коэффициентов расширения полимера и наполнителя затрудняет релаксацию напряжений в композите, что является причиной снижения прочности материала. По этой причине подвижность кинетических элементов определяет не только деформационные процессы и формирование дефектов, но и когезию материала.

Липатов в своей работе [252] выделил следующие «основные факторы усиления эластомерных композитов:

- особенности химической природы полимера и сильное межмолекулярное взаимодействие его с поверхностью частиц наполнителя;
- образование вторичных структур частицами наполнителя;
- перестройка при деформации молекулярной структуры наполненного материала без его разрушения;
- разрушение структуры сетки;
- разрыв связей наполнитель-полимер или поперечных связей молекулярной сетки» [99].

Авторы [2, 235] отмечают «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» [2].

Выравнивание напряжений при разрыве связей эластомер-наполнитель

«При деформации эластомерного композита, возникающие напряжения выравниваются по объему материала» [2]. Вследствие этого прочность композита, по сравнению с матричным полимером, увеличивается.

В основе механизма усиления эластомерных композитов лежат в основном механические эффекты, вызывающие перераспределение напряжений в композите в ходе его деформации. Значимость других факторов определяется их влиянием на деформационно-прочностные свойства эластомерного композита.

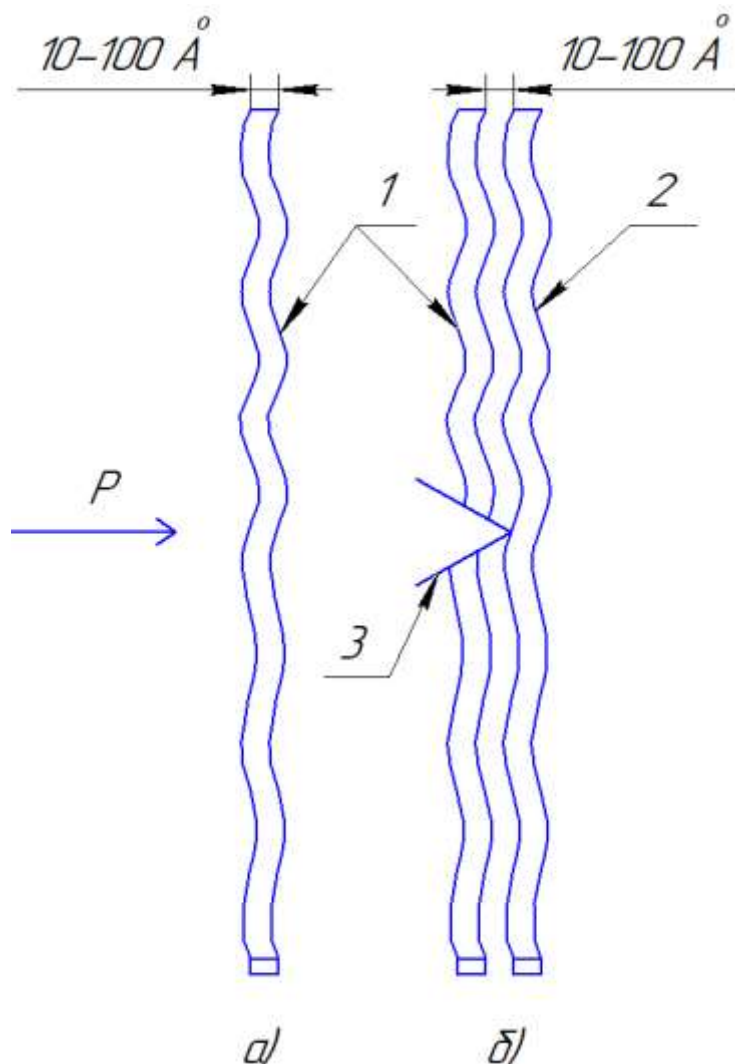
При значительной деформации в композите возникают высокие напряжения. Деформация резины вызывает разрыв многочисленных связей каучук-наполнитель. Далее молекулы каучука опять прикрепляются к поверхности наполнителя. Образуются новые связи, частично ориентированные в направлении деформации. Это приводит к местной релаксации и выравниванию локальных избыточных напряжений.

Следовательно, чтобы обеспечить выравнивание напряжений при деформировании эластомерного композита, и соответственно высокую выносливость материала, следует при выборе наполнителя учитывать фрактальную размерность шероховатости наночастиц d_s (эффективную величину «неэкранированной» поверхности частиц наполнителя $d_u^{эф}$) и гибкость полимерной цепи C_∞ . Эти параметры непосредственно влияют на величину физического взаимодействия между молекулами каучука и частицами наполнителя, как было описано ранее в разделе 3.2.2.

Притупление растущих трещин в материале

Характер роста трещин, образующихся в дефектах полимерной матрицы (притупление вершин растущих трещин) это следующий фактор увеличения прочности наполненных эластомеров [231]. Разрыв тонкого полимерного волокна

у вершины трещины приводит к перемещению надрыва на расстояние (рисунок 3.26), примерно сопоставимое с толщиной волокна ($10 - 100 \text{ \AA}$).



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

Рисунок 3.26 – Притупление растущих трещин в материале [2]

Это сопровождается релаксацией разорванного волокна и передачей высокого напряжения соседнему полимерному волокну, на которое теперь воздействует вершина надрыва.

Напряжение и удлинение при разрыве можно определить по формулам

$$\sigma_p = k / \Gamma(t_B/n), \quad (3.51)$$

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

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

Из формулы (3.51) следует, что прочность эластомерного композита определяется константой k и характером кривых ползучести. Исследования показали, что значения константы k для эластомера и композита на его основе отличаются очень незначительно. Поэтому увеличение прочности объясняется различной ползучестью наполненных и не наполненных эластомеров. В сравнении с эластомером, композит на его основе имеет более высокий модуль упругости и соответственно меньшую ползучесть. Поскольку обобщенная функция ползучести $\Gamma(t_B/n)$ в формуле (3.51) расположена в знаменателе, ее уменьшение увеличивает прочность σ_p эластомерного нанокомпозита.

Скорость разрастания трещины в значительной степени зависит от гистерезисных свойств эластомеров. Гистерезис эластомерных композитов выше, чем у матричного полимера. С увеличением гистерезиса, скорость разрастания трещин уменьшается.

«В эластомерных композитах гистерезис повышается по двум причинам:

- 1) энергия, выделяемая при разрыве физических связей между частицами наполнителя и каучука;
- 2) заторможенность движения полимерных цепей у поверхности частиц наполнителя» [2].

Наполненные эластомеры по причине повышенного механического гистерезиса имеют повышенную трещиностойкость, прочность и выносливость материала, и, соответственно повышенную долговечность.

В соответствии с сеточными теориями усиления эластомеров Вики [231] «причиной упрочнения является образование между цепями каучука и частицами активного наполнителя прочных связей» [2].

При малых деформациях между прочностью σ и деформацией α справедливо соотношение

$$\sigma = (v_r + v_f)kT(\alpha - \alpha^{-2}), \quad (3.52)$$

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

$$v_f = (S/s)\Phi, \quad (3.53)$$

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

Использование наночастиц позволит увеличить величину v_f и соответственно прочность полимера.

«Площадь, приходящаяся на один активный центр s , определяется размером частицы наполнителя S , поэтому отношение этих величин называют коэффициентом пропорциональности $\beta = \frac{S}{s}$ » [2].

С учетом вышеизложенного формула (3.52) получила вид

С учетом вышеизложенного формула (3.52) получила вид

$$\sigma = (v_0 v_1 + \beta\Phi)kT(\alpha - \alpha^{-2}), \quad (3.54)$$

где V_o – значение V_o для ненаполненного полимера, ν_1 – концентрация каучука.

В соответствии с формулой (3.53) увеличение деформации материала повысит прочность. Поэтому, разрабатывая эластомерные нанокомпозиты, предназначенные для восстановления посадок подшипников, необходимо стремиться к увеличению деформационных свойств материала.

Увеличение рассеивания энергии в объеме материала по линии разрыва

Прочность эластомерного композита повышается из-за рассеивания энергии в материале по линии разрыва.

В виду того, что энергия разрушения связи каучук-наполнитель не больше поверхностной энергии матрицы при деформировании композита в последнем возникает большое количество очагов разрушения, сопровождаемое повышенным рассеянием энергии [10].

Исследования разрушения наполненных резин проведены Муллинзом Л. методом электронной микроскопии [253]. Автор описывает, что движение разрыва осуществляется по зигзагообразной линии от одной поверхности раздела каучук-наполнитель к другой.

«Благодаря наличию в структуре вулканизатов многочисленных внутренних дефектов, являющихся причиной повышенного рассеяния энергии, чтобы разрушить образец необходим больший объем резины, подвергаемый значительной деформации» [2]. Поэтому наличие дефектов (гетерогенности) может усиливать эластомерный композит.

Образование цепочечных структур частиц наполнителя между собой

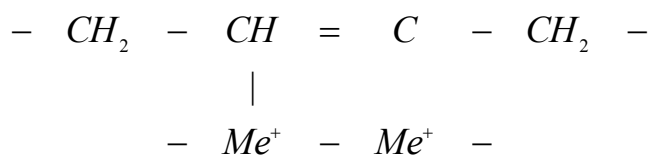
В работах Липатова, Бартенева, Козлова, Микитаева показано, что дисперсные наночастицы образуют в эластомерных нанокомпозитах пространственные линейные цепочки [93, 99, 252]. Композиты на основе каучуков исследованы в работе Догадкина [254]. «Установлено, что повышением степени структурирования (развитием цепочечной структуры из частиц наполнителя) увеличивается эффект усиления. Причиной образования цепочечных структур в каучуковой матрице является энергетическая неоднородность поверхности частиц активного

наполнителя. Плоскость разрыва пересекая более прочные связи между частицами наполнителя тормозит свое продвижение и для разрушения композита требуется дополнительная энергия» [2].

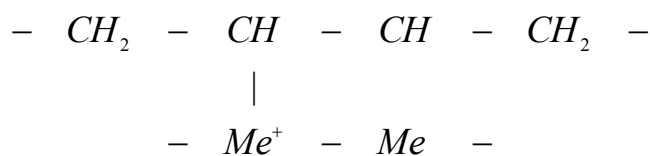
Полимер, взаимодействуя с частицей наполнителя, образует на поверхности последней адсорбированный слой (межфазную область), значительно отличающуюся свойствами от полимерной матрицы. Полимер в межфазной области, т.е. у поверхности наночастицы наполнителя, имеет «замороженную» молекулярную подвижность. Благодаря таким межфазным областям происходит усиление полимерных нанокомпозитов [93, 99].

Химическое взаимодействие металлических частиц с молекулами каучука

Частицы металлов переменной валентности взаимодействуя с непредельными каучуками могут образовывать ковалентные связи [221]



Или



Подтверждением наличия в натуральном каучуке коллоидных частиц железа, никеля и кобальта является то, что образуется металлкаучуковый гель.

«Михайлюком А.Е. исследованы нанокомпозиты на основе эластомера СКЭПТ-40 в котором при высоких сдвиговых деформациях синтезированы наночастицы металлов переменной валентности» [2]. Установлено усиление нанокомпозитов в сравнении с матричным полимером [149] (рисунок 3.27).

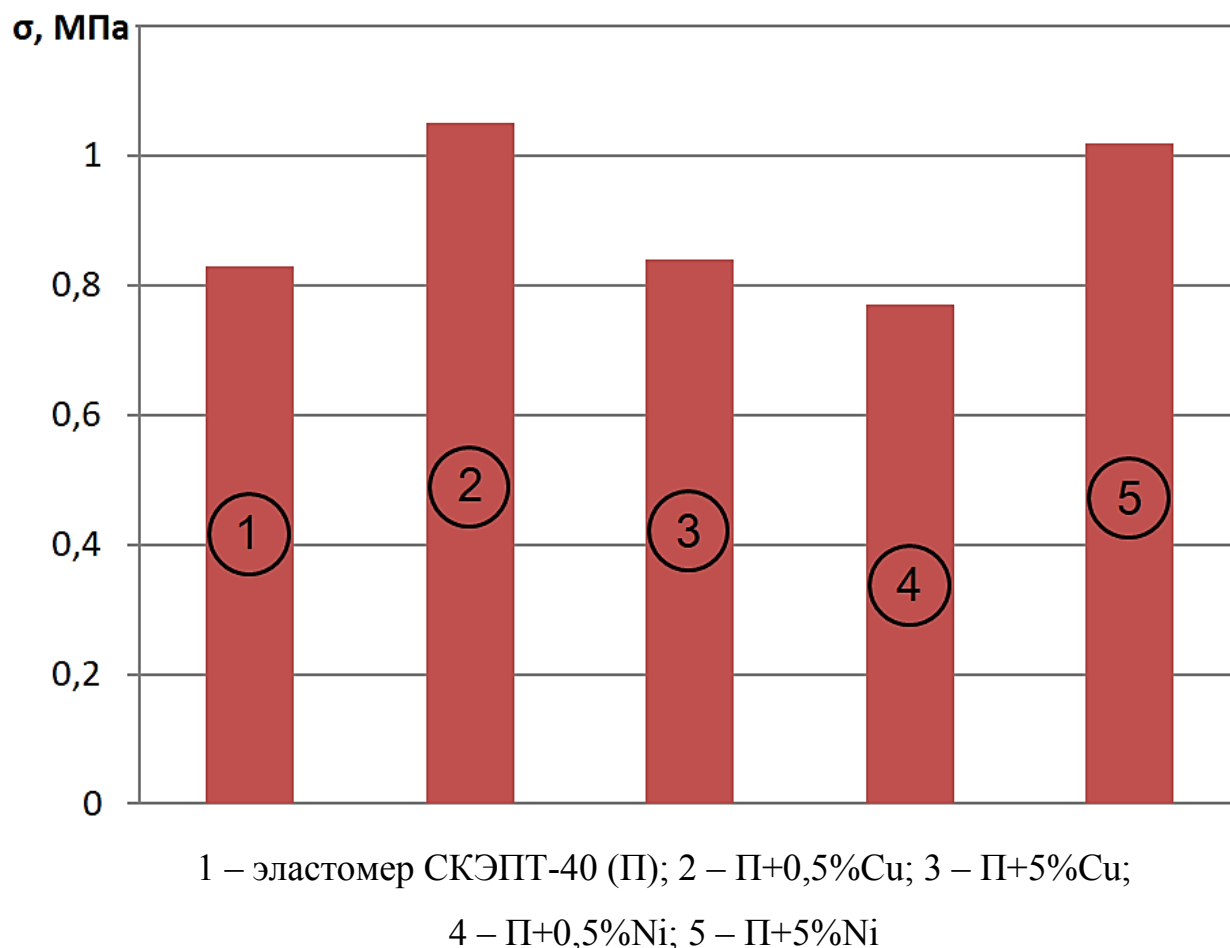


Рисунок 3.27 – Прочность σ образцов эластомера СКЭПТ-40 и нанокompозитов на его основе [149]

Нанокompозиты на основе эластомера СКЭПТ-40 имеют, в сравнении с матричным полимером, более высокую прочность и термостойкость. Причина заключается в образовании хемосорбционных связей между макромолекулами каучука и поверхностью металлических наночастиц.

Резинам, наполненным высокодисперсными частицами металлов, присущи повышенные деформационно-прочностные свойства (таблица 3.10). Это объясняется наличием прочных связей каучук-металл, которые образуются в момент раскрытия двойных связей.

Таблица 3.10 – Свойства вулканизатов на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-26, содержащих ультрадисперсные частицы металлов [231]

Показатели	Контрольный	Марганец			Железо			Свинец			Алюминий		
		Масс. ч.											
		3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10
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	

Как видно из таблицы, наиболее высокие показатели имеют композиты, наполненные частицами алюминия и марганца.

«Алюминий обладает наиболее высокой удельной поверхностной энергией разрушения» [2]. Поэтому, с учетом данных таблицы 3.10, наполнение эластомера Ф-40С на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-40, наночастицами алюминия приведет к увеличению прочности и долговечности нанокомпозита.

На рисунках 3.28 и 3.29 показаны зависимости прочности нанокомпозитов на основе эластомера Ф-40С от содержания алюминиевых и медных наночастиц наполнителя.

Наполнение эластомера Ф-40С алюминиевыми наночастицами приводит к увеличению прочности материала. Причины увеличения прочности анаэробных герметиков при наполнении наночастицами были рассмотрены выше. В сравнении с не наполненным эластомером, прочность которого составляет $\sigma = 14,1 \text{ МПа}$, при объемном содержании наполнителя $\varphi_n = 0,0066$ величина σ увеличилась в 1,22 раза, до значения $\sigma = 17,2 \text{ МПа}$, при значении $\varphi_n = 0,0132$ – в 1,36 раза, до $\sigma = 19,15 \text{ МПа}$. Наиболее высокое значение прочности $\sigma = 21,64 \text{ МПа}$ имеют образцы с оптимальным содержанием наполнителя $\varphi_n = 0,02$, что в 1,53 раза пре-

вышает аналогичный параметр не наполненного герметика. При дальнейшем повышении содержания наночастиц наполнителя до $\varphi_n = 0,026$ наблюдается снижение прочности нанокompозита до $\sigma = 19,2 \text{ МПа}$, что можно объяснить агрегированием наночастиц и соответствующим уменьшением прочности нанокompозита.

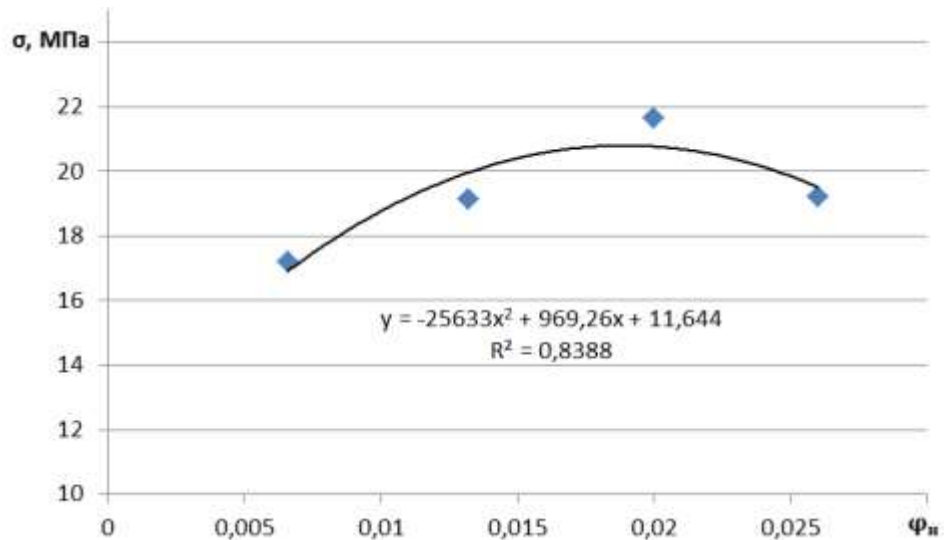


Рисунок 3.28 – Зависимость прочности нанокompозита эластомера Ф-40С σ от объемного содержания наночастиц алюминия φ_n

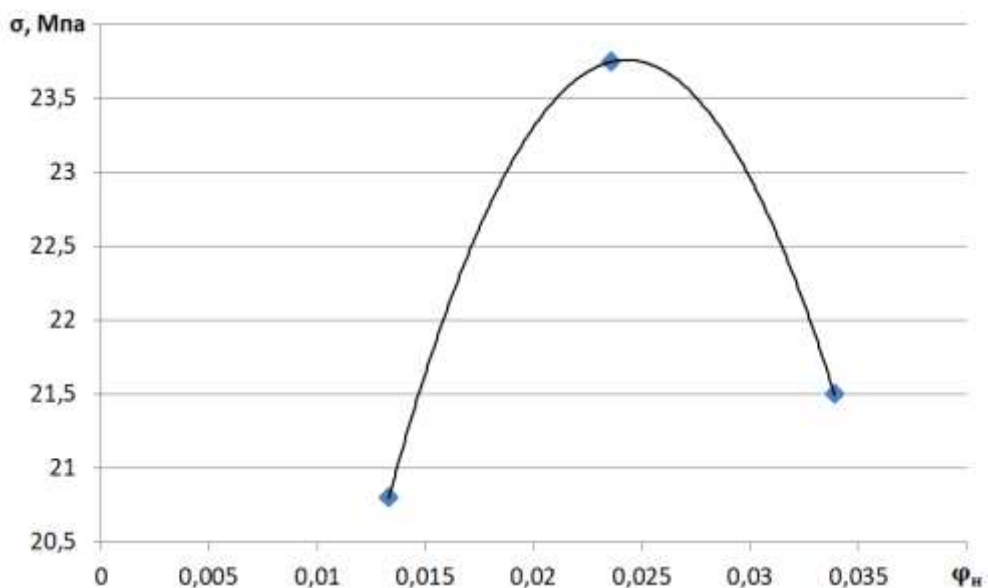


Рисунок 3.29 – Зависимость прочности нанокompозита эластомера Ф-40С σ от объемного содержания наночастиц алюминия и меди φ_n

Подобная зависимость наблюдается в нанокompозите эластомера Ф-40С, наполненным алюминиевыми и медными дисперсными наночастицами (рисунок 3.29). В сравнении с не наполненным эластомером при объемном содержании наночастиц наполнителей $\varphi_n = 0,0133$ величина σ увеличилась в 1,47 раза, до значения $\sigma = 20,8 \text{ МПа}$. Наиболее высокое значение прочности $\sigma = 23,75 \text{ МПа}$ имеют образцы с оптимальным содержанием алюминиевых и медных наночастиц $\varphi_n = 0,0236$, что в 1,68 раза превышает аналогичный параметр не наполненного герметика. При дальнейшем повышении содержания наночастиц наполнителя до $\varphi_n = 0,0339$ наблюдается снижение прочности нанокompозита до $\sigma = 21,5 \text{ МПа}$, что можно объяснить агрегированием наночастиц и соответствующим уменьшением прочности нанокompозита.

Прочность эластомерного нанокompозита, наполненного дисперсными частицами, авторы предлагают определять по основному уравнению фрактальной теории высокоэластичности [99].

$$\sigma = \frac{E}{1 + 2\nu + 4\nu^3} \left[\lambda_{\text{мол}}^{1+2\nu} - 2\nu \lambda_{\text{мол}}^{-1-2\nu(1+\nu)} - (1 - 2\nu) \lambda_{\text{мол}}^{-2\nu} \right], \quad (3.55)$$

где E и ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона композита; $\lambda_{\text{мол}}$ – молекулярная кратность вытяжки.

Коэффициент Пуассона можно рассчитать по зависимости

$$\nu = \nu_n (1 - \varphi_n) + \nu_n \varphi_n,$$

где ν_n и ν_n – коэффициенты Пуассона полимера и наполнителя, коэффициент Пуассона полимера (каучука) $\nu_n = 0,5$; алюминия и меди $\nu^{Al} \approx \nu^{Cu} = 0,34$.

Молекулярную кратность вытяжки определяют по формуле

$$\lambda_{\text{мол}} = \frac{\lambda}{1 - \varphi_n},$$

где λ – локальная (номинальная) кратность вытяжки, $\lambda = 1 + \varepsilon$.

Величину λ можно определить по зависимости

$$\lambda = 1 + \varepsilon,$$

где ε – деформация материала.

Анализ формулы (3.55) показал, что член формулы $\lambda_{\text{мол}}^{1+2\nu}$ требует корректировки, потому что при любых реально возможных значениях $E\mu\lambda_{\text{мол}}$ формула превышает расчетное значение прочности до $\sigma = 1534 \text{ МПа}$, т.е. на два порядка (около 100 раз). Предлагается заменить вышеуказанный член формулы (3.55) на выражение $\lambda_{\text{мол}}^{-2\nu}$. Формула прочности получила следующий вид

$$\sigma = \frac{E}{1 + 2\nu + 4\nu^3} \left[\lambda_{\text{мол}}^{-2\nu} + 2\nu \lambda_{\text{мол}}^{-1-2\nu(1+\nu)} - (1 - 2\nu) \lambda_{\text{мол}}^{-2\nu} \right] \quad (3.56)$$

После простейших преобразований (3.56) получила вид

$$\sigma = \frac{E}{1 + 2\nu + 4\nu^3} \left[2\nu (\lambda_{\text{мол}}^{-2\nu} + \lambda_{\text{мол}}^{-1-2\nu(1+\nu)}) \right] \quad (3.57)$$

Двухкомпонентный эластомерный нанокомпозит

Рассчитаем и сопоставим расчетные значения прочности с фактическими для составов с содержанием алюминиевого нанопорошка:

$$m_n = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1 \text{ масс.ч.}$$

Объемную долю наполнителя в эластомерном нанокompозите φ_n определили по массовой доле в композите.

Массовое содержание алюминиевых наночастиц наполнителя в композите:

$$m_n = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1 \text{ масс.ч.} \quad (\varphi_n = 0,0066; 0,0132; 0,02; 0,026).$$

Вначале определили массовые доли наполнителя M_n и полимерной матрицы M_m

$$M_n = \frac{m_n}{m_k},$$

где m_n и m_k – масса наполнителя и композита, г.

$$M_m = 1 - M_n$$

Связь между массовым S и объемным P содержанием компонентов выражается соотношениями:

$$\varphi_n = \frac{M_n \times \rho_n}{M_n \times \rho_n + M_m \times \rho_m},$$

где ρ_n и ρ_m – плотность наполнителя и полимерной матрицы, г/см³.

$$\varphi_m = 1 - \varphi_n$$

Определим массовые доли наполнителя M_n и матрицы M_m в долях единицы

$$M_u = \frac{m_u}{m_k} = \frac{0,025}{100,025} = 0,000249;$$

$$M_n = 1 - M_u = 1 - 0,000249 = 0,999751$$

$$\varphi_u = \frac{M_u \times \rho_n}{M_u \times \rho_n + M_n \times \rho_u} = \frac{0,000249 \times 1,87}{0,000249 \times 1,87 + 0,999751 \times 0,07} =$$

$$\frac{0,0004653}{0,0004653 + 0,06998257} = \frac{0,0004653}{0,0704482} = 0,0066$$

$$m_n = 0,05 \text{ масс.ч.}$$

$$M_u = 0,0004997; M_n = 1 - 0,0004997 = 0,9995003;$$

$$\varphi_u = \frac{0,0004997 \times 1,87}{0,0004997 \times 1,87 + 0,9995003 \times 0,07} = 0,01318; \varphi_n = 1 - 0,013 = 0,9868.$$

$$m_n = 0,075 \text{ масс.ч.}$$

$$M_u = \frac{0,075}{100,075} = 0,0007494; M_n = 1 - 0,0007494 = 0,9992506;$$

$$\varphi_u = \frac{0,0007494 \times 1,87}{0,0007494 \times 1,87 + 0,9992506 \times 0,07} \approx 0,02; \varphi_n = 1 - 0,02 = 0,98.$$

$$m_n = 0,1 \text{ масс.ч.}$$

$$M_u = \frac{0,1}{100,1} = 0,000999; M_n = 1 - M_u = 1 - 0,000999 = 0,999001;$$

$$\varphi_u = \frac{0,000999 \times 1,87}{0,000999 \times 1,87 + 0,999001 \times 0,07} = 0,026; \varphi_n = 1 - 0,026 = 0,974.$$

$$m_n = 0,025 \text{ масс.ч.}; \varphi_u = 0,0066; \varphi_n = 0,9934.$$

Ф-40С+Al - Расчет прочности по формуле (3.56)

$$m_n = 0,025 \text{ масс.ч.}; \varphi_u = 0,0066; \varphi_n = 1 - 0,0066 = 0,9934.$$

$$\lambda^{Al} = 1 + 1,9 = 2,9; \lambda_{\text{мол}}^{Al} = \frac{2,9}{1 - 0,0066} = 2,92;$$

$$v_{\kappa}^{Al} = 0,45$$

$$\sigma_{\kappa}^{Al} = \frac{104,3}{1 + 2 * 0,45 + 4 * 0,45^3} [2 * 0,45(2,92^{-2*0,45} + 2,92^{-1-2*0,45(1+0,45)})] =$$

$$= 46,05[0,9(0,3812 + 0,0845)] = 19,3 \text{ МПа}$$

Фактическое значение прочности составляет $\sigma_{\kappa\phi}^{Al} = 17,2 \text{ МПа}$. Разница между расчетным и фактическим значениями прочности составляет $\Delta = 12,2\%$.

$$m_n = 0,05 \text{ масс.ч.}; \varphi_n = 0,0132; \varphi_n = 1 - 0,0132 = 0,9868.$$

$$\lambda^{Al} = 1 + 2,16 = 3,16; \lambda_{\text{мол}}^{Al} = \frac{3,16}{1 - 0,0132} = 3,20;$$

$$v_{\kappa}^{Al} = 0,45$$

$$\sigma_{\kappa}^{Al} = \frac{130,6}{1 + 2 * 0,45 + 4 * 0,45^3} [2 * 0,45(3,2^{-2*0,45} + 3,2^{-1-2*0,45(1+0,45)})] =$$

$$= 59,88[0,9(0,351 + 0,068)] = 21,77 \text{ МПа}$$

Фактическое значение прочности составляет $\sigma_{\kappa\phi}^{Al} = 19,15 \text{ МПа}$. Разница между расчетным и фактическим значениями прочности составляет $\Delta = 13,6\%$.

$$m_n = 0,075 \text{ масс.ч.}; \varphi_n = 0,02; \varphi_n = 1 - 0,02 = 0,98$$

$$\lambda^{Al} = 1 + 2,4 = 3,4; \lambda_{\text{мол}}^{Al} = \frac{3,4}{1 - 0,02} = 3,47;$$

$$v_{\kappa}^{Al} = 0,45$$

$$\sigma_{\kappa}^{Al} = \frac{158,4}{1 + 2 * 0,45 + 4 * 0,45^3} [2 * 0,45(3,47^{-2*0,45} + 3,47^{-1-2*0,45(1+0,45)})] =$$

$$= 69,94[0,9(0,3263 + 0,0568)] = 24,12 \text{ МПа}$$

Фактическое значение прочности составляет $\sigma_{\kappa\phi}^{Al} = 21,64 \text{ МПа}$. Разница между расчетным и фактическим значениями прочности составляет $\Delta = 11,4\%$.

$$m_n = 0,1 \text{ масс.ч.}; \varphi_n = 0,026; \varphi_n = 1 - 0,026 = 0,974.$$

$$\lambda^{Al} = 1 + 2,03 = 3,03; \lambda_{\text{мол}}^{Al} = \frac{3,03}{1 - 0,026} = 3,11;$$

$$v_{\kappa}^{Al} = 0,45$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\kappa}^{Al} &= \frac{125,6}{1 + 2 * 0,45 + 4 * 0,45^3} [2 * 0,45(3,11^{-2*0,45} + 3,11^{-1-2*0,45(1+0,45)})] = \\ &= 55,46[0,9(0,3601 + 0,0791)] = 21,62 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Фактическое значение прочности составляет $\sigma_{\kappa\phi}^{Al} = 19,2 \text{ МПа}$. Разница между расчетным и фактическим значениями прочности составляет $\Delta = 12,6\%$.

На рисунке 3.30 показаны расчетная и фактическая прочности нанокомпозита состава №1 при различном содержании алюминиевых наночастиц наполнителя.

Ф-40С+Al+Cu - Расчет прочности по формуле (3.56)

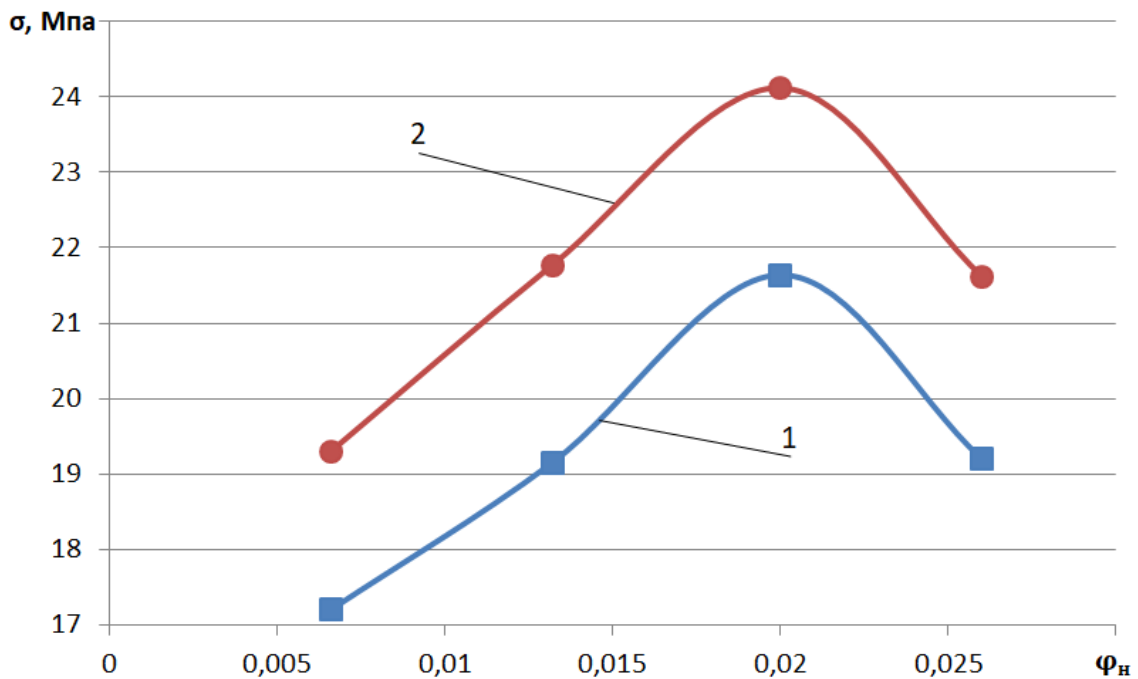
Состав №1: Al=0,05; Cu=0,01.

$$\varphi_{Al} = 0,0132 \text{ и } \varphi_{Cu} = 0,000037; \varphi_n = 0,9867.$$

$$\lambda_{\kappa}^{\Phi} = 1 + 2,05 = 3,05; \lambda_{\text{мол}}^{Al+Cu} = \frac{3,05}{1 - 0,0133} = 3,1;$$

$$v_{\kappa}^{Al+Cu} = 0,44$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\kappa}^{Al+Cu} &= \frac{134,2}{1 + 2 * 0,44 + 4 * 0,44^3} [2 * 0,44(3,1^{-2*0,44} + 3,1^{-1-2*0,44(1+0,44)})] = \\ &= 60,4[0,88(0,3694 + 0,0769)] = 23,7 \text{ МПа} \end{aligned}$$



1 – фактическая прочность; 2 – расчетная прочность

Рисунок 3.30 – Зависимость прочности нанокompозита эластомера Φ-40С σ от объемного содержания наночастиц алюминия φ_n

Фактическое значение прочности составляет $\sigma_{\text{кф}}^{Al+Cu} = 20,8 \text{ МПа}$. Разница между расчетным и фактическим значениями прочности составляет $\Delta = 14\%$.

Состав №2: Al=0,09; Cu=0,03.

$$\varphi_{Al} = 0,0235 \text{ и } \varphi_{Cu} = 0,0001 \text{ ; } \varphi_n = 0,9764.$$

$$\lambda_{\text{к}}^{\Phi} = 1 + 2,3 = 3,3 \text{ ; } \lambda_{\text{мол}}^{Al+Cu} = \frac{3,3}{0,9764} = 3,38 \text{ ;}$$

$$v_{\text{к}}^{Al+Cu} = 0,44$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{к}}^{Al+Cu} &= \frac{163,8}{1 + 2 * 0,44 + 4 * 0,44^3} [2 * 0,44(3,38^{-2*0,44} + 3,38^{-1-2*0,44(1+0,44)})] = \\ &= 73,78 [0,88(0,3424 + 0,0632)] = 26,33 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Фактическое значение прочности составляет $\sigma_{\text{кф}}^{Al+Cu} = 23,75 \text{ МПа}$. Разница между расчетным и фактическим значениями прочности составляет $\Delta = 10,8\%$.

Состав №3: Al=0,13; Cu=0,09.

$$\varphi_{Al} = 0,0336 \text{ и } \varphi_{Cu} = 0,0003; ; \varphi_n = 0,9661.$$

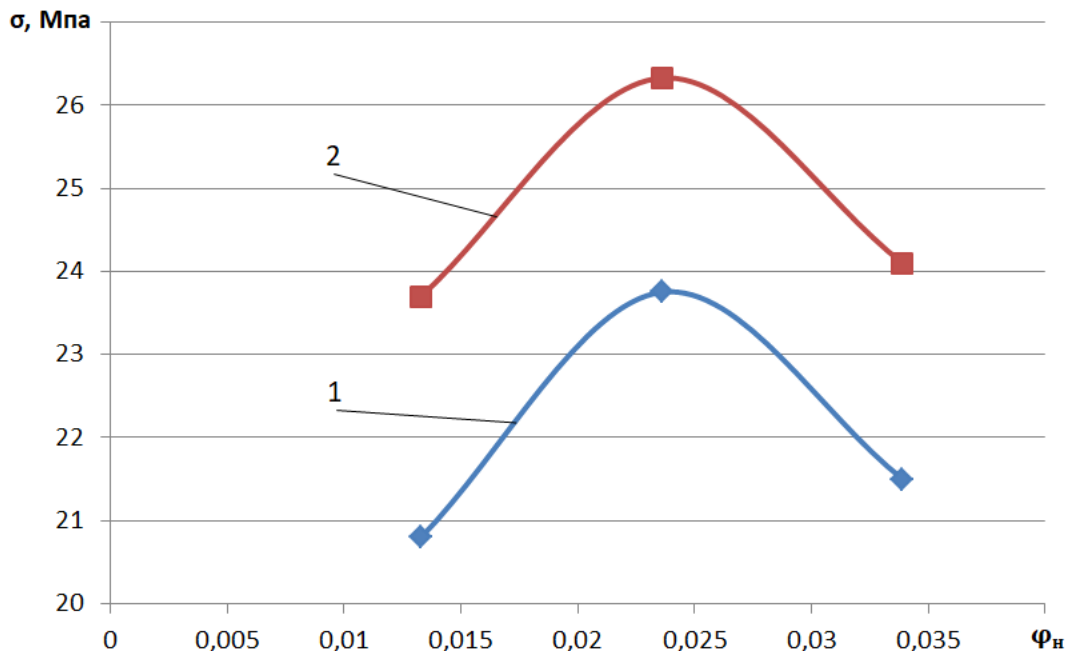
$$\lambda_{\kappa}^{\phi} = 1 + 2,20 = 3,20; \lambda_{\text{мол}}^{Al+Cu} = \frac{3,20}{0,9661} = 3,31;$$

$$v_{\kappa}^{Al+Cu} = 0,44$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\kappa}^{Al+Cu} &= \frac{146,5}{1 + 2 * 0,44 + 4 * 0,44^3} [2 * 0,44(3,31^{-2*0,44} + 3,31^{-1-2*0,44(1+0,44)})] = \\ &= 65,99[0,88(0,3488 + 0,0662)] = 24,10 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Фактическое значение прочности составляет $\sigma_{\kappa\phi}^{Al+Cu} = 21,5 \text{ МПа}$. Разница между расчетным и фактическим значениями прочности составляет $\Delta = 12,1\%$

На рисунке 3.31 показаны расчетная и фактическая прочности нанокомпозита состава №1 при различном содержании алюминиевых и медных наночастиц наполнителя.



1 – фактическая прочность; 2 – расчетная прочность

Рисунок 3.31 – Зависимость прочности нанокомпозита эластомера Ф-40С

σ от объемного содержания наночастиц алюминия и меди φ_n

Выводы

1. При наполнении эластомеров металлическими наночастицами образуются хемосорбционные связи между макромолекулами каучука и поверхностью металлических наночастиц, что увеличивает прочность и деформацию нанокомпози- тов.

2. Наполнение эластомера Ф-40С алюминиевыми наночастицами увеличивает прочность нанокомпозита до $\sigma = 21,64 \text{ МПа}$, что в 1,53 раза превышает ана- логичный параметр не наполненного герметика. Прочность нанокомпозита эла- стомера Ф-40С, наполненного алюминиевыми и медными дисперсными наноча- стицами достигает $\sigma = 23,75 \text{ МПа}$, что в 1,68 раза превышает аналогичный пара- метр не наполненного герметика.

3. Предложена формула (3.56) для расчета прочности эластомерных нано- композитов. Расхождение расчетных значений прочности с фактическими не пре- вышает 14%.

Прочность анаэробных нанокомпозитов

В работах, посвященных фрактальному анализу усиления полимерных нанокомпозитов, указывается, что наиболее обобщенной характеристикой струк- туры нанокомпозита, является такая величина как фрактальная размерность структуры нанокомпозитов d_f^k . Она характеризует распределение элементов структуры в пространстве.

«В случае наполнения полимерных материалов дисперсными микроразмер- ными частицами, частицы (агрегаты частиц) наполнителя формируют фракталь- ный каркас, определяющий структуру полимерной матрицы (аналог фрактальной решётки в компьютерном моделировании)» [99]. Наличие фрактального каркаса частиц (агрегатов частиц) наполнителя приводит к изменению («возмущению») микроструктуры полимерной матрицы, что выражается в увеличении фракталь- ной размерности структуры композита d_f^k [97, 103].

В нанокомпозитах дисперсные наночастицы образуют пространственные линейные цепочки [242, 255] и фрактальный каркас, который при этом не нару-

шает структуру матричного полимера. Низкая размерность структуры фрактальной каркаса наночастиц (агрегатов частиц) в полимерных нанокомпозитах объясняется высокой фрактальной размерностью поверхности наночастиц и низким содержанием наполнителя.

В отличие от полимерных микрокомпозитов, в нанокомпозитах с изменением концентрации наночастиц наполнителя, величина d_f^k меняется очень незначительно и приблизительно равна фрактальной размерности структуры матричного полимера [96]. То есть в полимерных микрокомпозитах и нанокомпозитах наблюдается различный механизм структурообразования, чем объясняется значительное изменение ряда свойств композитов указанных классов, в частности, степени усиления.

В работе [93] исследованы нанокомпозиты на основе полипропилена, наполненные наночастицами карбоната кальция (ПП/СаСО₃), и показано наличие фрактального каркаса частиц (агрегатов частиц) наполнителя. На рисунке 3.32 показана электронная микрофотография скола нанокомпозита ПП/СаСО.

На фото показано наличие в нанокомпозите распределения наночастиц (агрегатов частиц) наполнителя в интервале размеров от ~ 80 нм (отдельные частицы СаСО₃) до ~ 360 нм (агрегаты частиц СаСО₃).

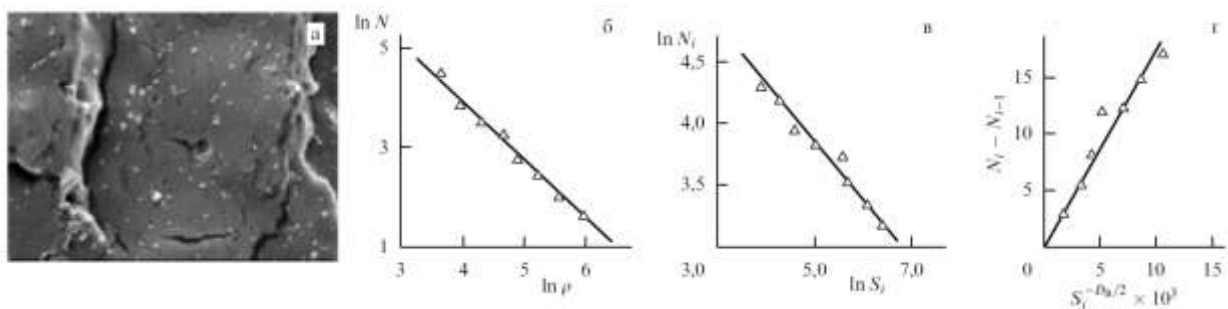


Рисунок 3.32 – Электронная микрофотография скола нанокомпозита ПП/СаСО₃ с содержанием нанонаполнителя $W_n = 4$ масс. % [90]

В отличие от микрочастиц, наночастицы более равномерно распределяются в объеме полимерной матрицы, что создает условия для более эффективной передачи нагрузки от матрицы к наполнителю [97].

Механические свойства анаэробных композитов определяются свойствами матричного полимера, уровнем взаимодействия между фазами, совместимостью компонентов в системе, размерами, формой, удельной поверхностью частиц наполнителя и др [53].

«Условием высокой адгезии является наличие на поверхности частиц наполнителя групп, которые способны к активному химическому взаимодействию с полимерной матрицей» [53], а также полная смачиваемость поверхности частиц наполнителя раствором полимера.

Улучшение структуры полимера наблюдается благодаря перемещению низкомолекулярных примесей из объёма полимера на поверхность наполнителя [58]. «Наночастицы имеют высокую удельную поверхность, поэтому, в сравнении с микрочастицами, адсорбция низкомолекулярных примесей из полимера будет больше» [53].

На рисунке 3.33 показана модель межфазного слоя в системе «полимерная матрица – наночастица» [150].

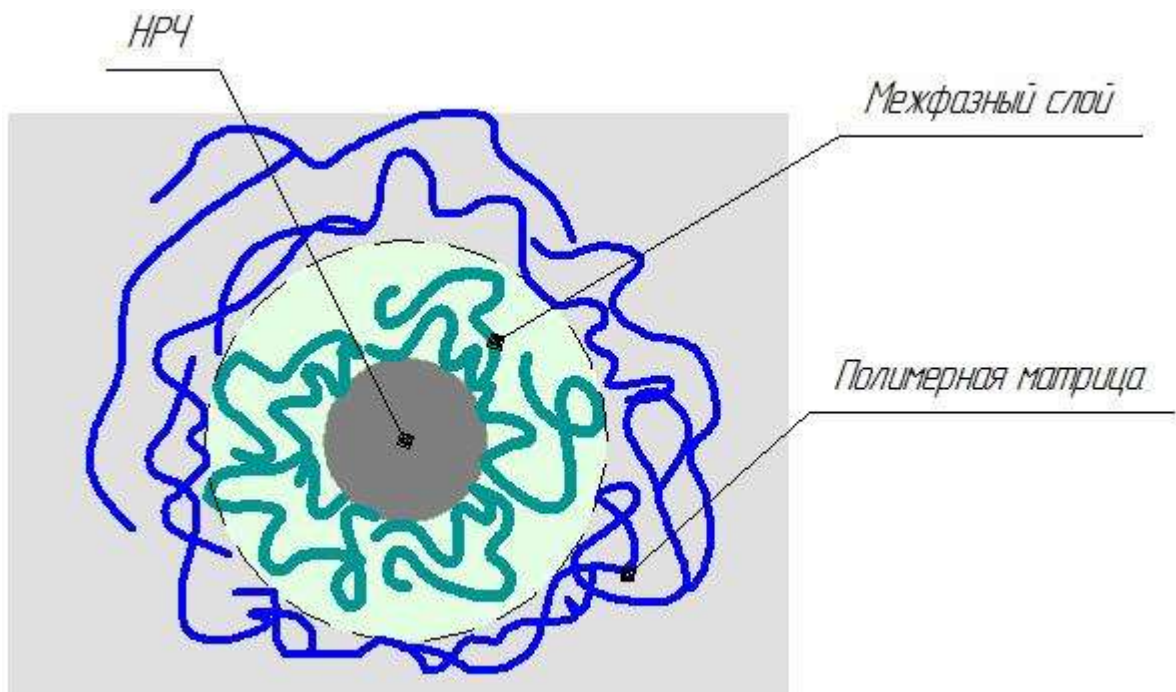
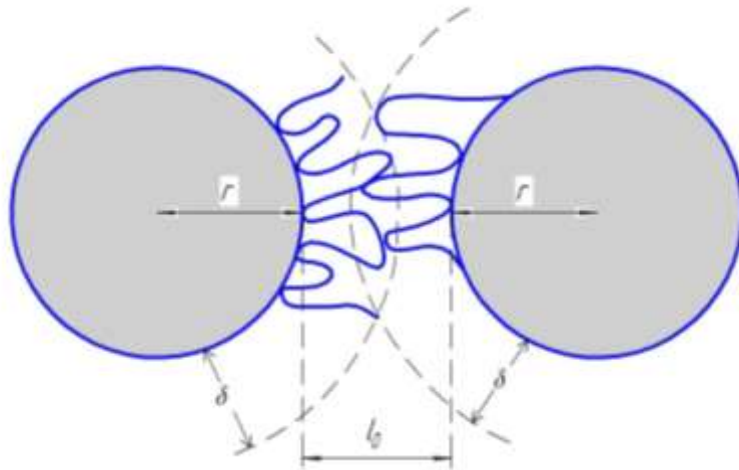


Рисунок 3.33 – Модель межфазного слоя в системе «полимерная матрица – наночастица» [150]

Наночастицы обладают высокой удельной поверхностью. Например, удельная поверхность наночастиц алюминия ($s_{уд} = 24,5 м^2 / г$) в 35 раз превышает аналогичный параметр микроразмерных частиц ($s_{уд} = 0,7 м^2 / г$) алюминиевой пудры ПАП-1 [55, 193]. Поэтому их количество, в сравнении с микрочастицами, в том же объеме композита будет значительно больше, а расстояние между наночастицами меньше.

При сближении двух наночастиц до расстояния меньше суммарной толщины адсорбционных (межфазных) слоев (рисунок 3.34), между ними происходит зацепление «петель» (межфазных слоев). Благодаря такому взаимодействию прочность нанокомпозита повышается [256].

При вводе наночастиц меди в анаэробные герметики увеличивается скорость и глубина полимеризации последних, благодаря ионам металла, которые участвуют в окислительно-восстановительных процессах [257].



r – радиус НРЧ; δ – толщина межфазного слоя; l_0 – расстояние между НРЧ

Рисунок 3.34 – Зацепление «петель» при взаимодействии двух НРЧ [256]

«Металлические наночастицы взаимодействуя с полимерной матрицей могут принимать активное участие в процессах сшивания, образовывать дополнительные узлы или центры структурообразования, вокруг которых возникают ориентированные слои полимерной матрицы с плотной упаковкой входящих в нано-

композит компонентов» [53]. Такие узлы выдерживают экстремальные условия эксплуатации без разрушения [24]. Поэтому наполнение анаэробных герметиков наночастицами меди позволит сократить время отверждения, увеличить прочность и долговечность нанокompозитов.

Прочность анаэробного нанокompозита, который представляем, как упругоизотропное твердое тело, можно рассчитать по формуле Гриффита, преобразованной Орованом и Ирвином [55]

$$\sigma_F = Y \sqrt{2E\gamma_F / c}, \quad (3.58)$$

где σ_F – разрушающее напряжение; Y – геометрическая константа, зависящая от формы и размеров образца; γ_F – удельная поверхностная энергия разрушения (энергия, поглощаемая в процессе образования единицы новой поверхности при росте трещины); c – длина трещины.

В соответствии с формулой (3.58) прочность композита определяется размером трещины c , модулем упругости E и удельной поверхностной энергией разрушения γ_F . Анализ формулы (3.58) показал, каким образом эти величины влияют на прочность материала.

При наполнении частицами возникают трещины в полимерной матрице, размер которых определяется размером вводимых частиц наполнителя. В случае наполнения крупными частицами в матричном полимере образуются трещины размер которых превышает определенное критическое значение. В итоге полимерный композит разрушится при меньшей нагрузке, чем матричный полимер.

Наполнение наночастицами в полимерной матрицы приводит к возникновению микротрещин размер которых значительно меньше критического. При деформации нанокompозита требуется энергия γ_F на образование и рост трещины, которую определяют как произведению площади образующейся поверхности на поверхностную энергию материала.

С увеличением количества таких микротрещин размером меньше критического требуется большее количество внешней энергии для разрушения образца. Поэтому прочность анаэробного композита, наполненного наночастицами, увеличивается в сравнении с анаэробным микрокомпозитом и не наполненным герметиком. Поэтому при наполнении высокодисперсными частицами увеличивается прочность полимерного композиционного материала.

Второй фактор увеличения прочности анаэробного композита – повышение удельной поверхностной энергии разрушения γ_F . Многочисленные источники указывают на ветвление растущих трещин в случае встречи с твердыми частицами наполнителя. Ветвление тормозит разрастание трещины до критических размеров и на образование новой поверхности необходима дополнительная энергия.

Если в полимерную матрицу вводить активный наполнитель с большей поверхностной энергией разрушения, энергия разрушения композита, по сравнению с матричным полимером, увеличится. Например, после ввода частиц активных наполнителей в полимеры с поверхностной энергией разрушения $\gamma_F = 50...150 \text{ Дж/м}^2$, поверхностная энергия разрушения композитов повысилась до $\gamma_F = 450...500 \text{ Дж/м}^2$ [55]. Увеличение параметра составило от трех до десяти раз.

В таблице 3.11 показаны значения поверхностной энергии разрушения у различных материалов.

Таблица 3.11 – Вязкость разрушения материалов [55]

№ п/п	Наименование материала	Вязкость разрушения γ_f , Дж/м ²
1	Алюминиевый сплав	$1,4 \cdot 10^5$
2	Медь	$5 \cdot 10^4$
3	Сталь	$5 \cdot 10^4$
4	Чугун	$4 \cdot 10^3$
5	Полистирол	$1 \cdot 10^3$
6	Полиметилметакрилат	$5 \cdot 10^2$
7	Отвержденная эпоксидная смола	$3,3 \cdot 10^2$
8	Графит	50...100
9	Поликристаллический оксид алюминия	40
10	Поликристаллический оксид магния	10
11	Стекло	4

Как следует из таблицы, наибольшие значения этого энергетического параметра наблюдаются у алюминиевого сплава и меди. Поэтому чтобы обеспечить высокую прочность композитов на основе анаэробных герметиков, необходимо в качестве наполнителей использовать наночастицы алюминия и меди.

Третий фактор увеличения прочности анаэробного композита – повышение модуля упругости. Как упоминалось в разделе 3.2.1 это обусловлено образованием на поверхности частиц наполнителя межфазного слоя полимера с пониженной («замороженной») молекулярной подвижностью. Наличие таких межфазных областей приводит к увеличению модуля упругости полимера и, в соответствии с формулой (3.56), повышению прочности композита. С увеличением удельной поверхности частиц наполнителя объем межфазных областей возрастает. Так как наночастицы имеют высокую удельную поверхность, использование их в качестве наполнителя анаэробных герметиков, позволит увеличить модуль упругости и, соответственно, прочность анаэробных композитов.

На рисунке 3.35 показана зависимость прочности клеевых соединений, выполненных анаэробным герметиком АН-111 и нанокомпозитами на его основе.

Наполнение анаэробного герметика АН-111 алюминиевыми наночастицами приводит к увеличению прочности материала. Причины увеличения прочности анаэробных герметиков при наполнении наночастицами были рассмотрены выше.

В сравнении с не наполненным герметиком АН-111, прочность которого составляет $\tau = 26,4 \text{ МПа}$, при массовом содержании наполнителя $m_n = 0,025 \text{ масс.ч.}$ величина τ увеличилась в 1,08 раза, до значения $\tau = 28,5 \text{ МПа}$, при значении $m_n = 0,05 \text{ масс.ч.}$ – в 1,14 раза, до $\tau = 30,0 \text{ МПа}$. Наиболее высокое значение прочности клеевого шва $\tau = 32,6 \text{ МПа}$ имеют образцы с оптимальным содержанием наполнителя $m_n = 0,075 \text{ масс.ч.}$, что в 1,23 раза превышает аналогичный параметр не наполненного герметика. При дальнейшем повышении содержания наночастиц наполнителя до $m_n = 0,1 \text{ масс.ч.}$ наблюдается снижение прочности клеевых соединений до $\tau = 30,4 \text{ МПа}$, что можно объяснить агрегированием наночастиц и соответствующим уменьшением прочности нанокомпозита.

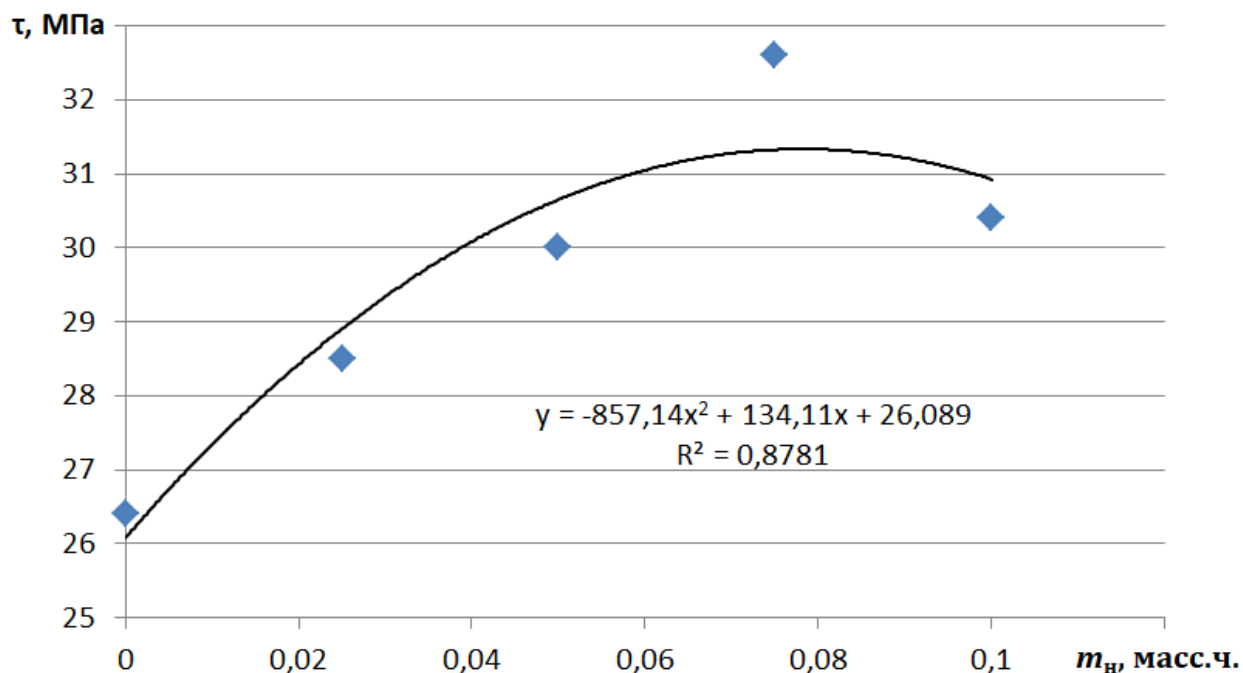


Рисунок 3.35 – Зависимость прочности клеевых соединений на аксиальный сдвиг τ от содержания алюминиевых наночастиц m_n в нанокompозите на основе анаэробного герметика АН-111

Выводы

1. Наполнение анаэробных герметиков дисперсными, металлическими наночастицами приводит к увеличению поверхностной энергии разрушения. Возникновение трещин размерами меньше критического, их ветвление при нагружении являются причиной увеличения прочности нанокompозита. Образование на поверхности частиц наполнителя межфазных областей полимера с пониженной («замороженной») молекулярной подвижностью приводит к увеличению модуля упругости и, соответственно, прочности нанокompозита.

2. Прочность клеевых соединений нанокompозита на основе анаэробного герметика АН-111, наполненного алюминиевыми наночастицами увеличивается и в 1,23 раз превышает аналогичный параметр полимерной матрицы.

3.2.5 Деформация и выносливость полимерных нанокompозитов

Пластичность полимерных нанокompозитов

Пластичность и, соответственно деформация является важной эксплуатационной характеристикой полимерных материалов. Она определяет существенным образом выносливость материала, деформацию колец подшипника и, соответственно контактные напряжения, виброактивность подшипникового узла при циклическом нагружении и др. При наполнении полимерного материала деформация композита, по сравнению с полимерной матрицей, уменьшается. Увеличение содержания микроразмерного наполнителя повышает до определенного значения прочность, но при этом снижается пластичность композита, что проявляется в уменьшении предельной деформации до разрушения или ударной вязкости материала. Поэтому охрупчивание является побочным эффектом от наполнения полимерных материалов дисперсными микроразмерными частицами органического и неорганического происхождения [93].

Эта закономерность нарушается при наполнении полимерных материалов наноразмерными частицами. Исследования в работах [99] показали значительное повышение пластичности полимерных нанокомпозитов, наполненных дисперсными наночастицами. Увеличение пластичности и деформации наблюдается также в полимерных нанокомпозитах, наполненных углеродными нанотрубками [142].

«Вязкое сопротивление перемещению наночастиц с высокой адгезией к полимерной матрице может повышать деформационно-прочностные свойства нанокомпозита при разрыве» [53]. Экспериментальные исследования подтвердили данное предположение.

На рисунке 3.36 представлена зависимость деформации клеевого шва от содержания алюминиевых наночастиц в анаэробном герметике АН-111.

Наполнение анаэробного герметика АН-111 алюминиевыми наночастицами приводит к увеличению деформации материала. Причины увеличения деформации анаэробных герметиков при наполнении наночастицами были рассмотрены выше.

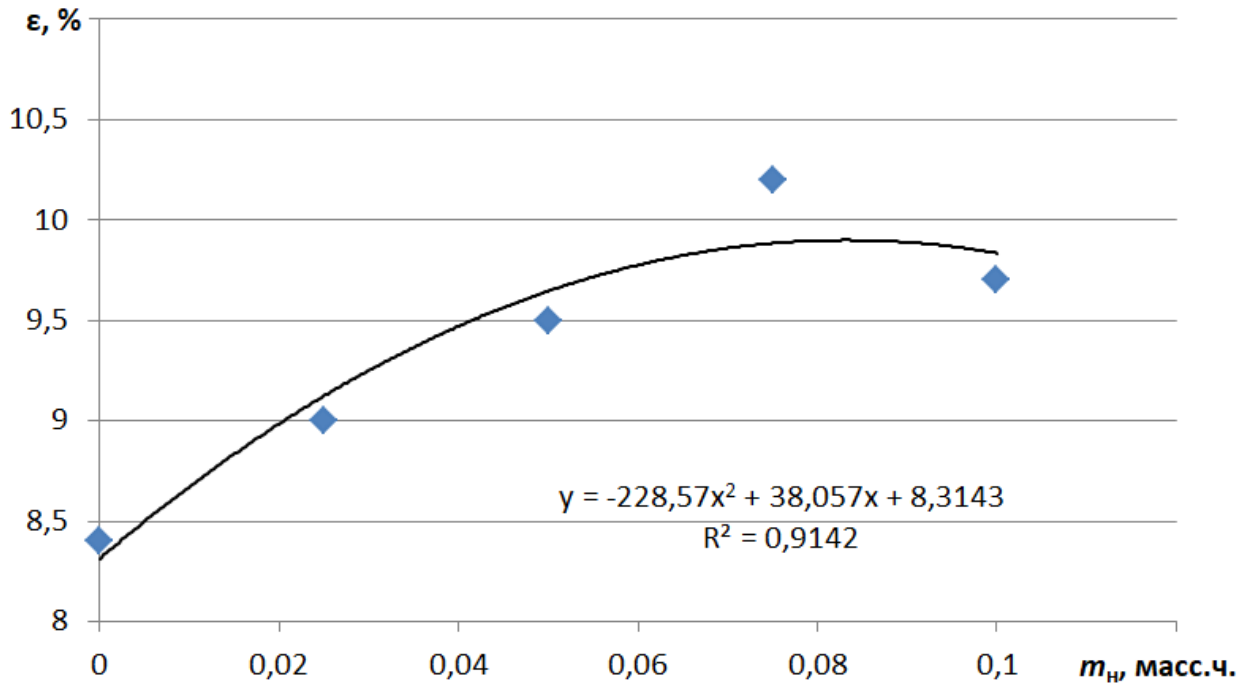


Рисунок 3.36 – Зависимость деформации клевого шва ε от содержания алюминиевых наночастиц m_n в нанокомпозите на основе анаэробного герметика АН-111

Наполнение анаэробного герметика АН-111 алюминиевыми наночастицами приводит к увеличению деформации материала. В сравнении с не наполненным герметиком АН-111, деформация которого составляет $\varepsilon = 8,5\%$, при массовом содержании наполнителя $m_n = 0,025 \text{ масс.ч.}$ величина τ увеличилась в 1,06 раза, до значения $\varepsilon = 9,0\%$, при значении $m_n = 0,05 \text{ масс.ч.}$ – в 1,12 раза, до $\varepsilon = 9,5\%$. Наиболее высокое значение деформации клевого шва $\varepsilon = 10,2\%$ имеют образцы с оптимальным содержанием наполнителя $m_n = 0,075 \text{ масс.ч.}$, что в 1,2 раза превышает аналогичный параметр не наполненного герметика. При дальнейшем повышении содержания наночастиц наполнителя до $m_n = 0,1 \text{ масс.ч.}$ наблюдается снижение деформации клеевых соединений до $\tau = 30,4 \text{ МПа}$, что можно объяснить агрегированием наночастиц и соответствующим уменьшением деформационных свойств нанокомпозита.

В работе [93] авторы исследовали деформационные свойства нанокомпози-

тов на основе поливинилхлорида, наполненных дисперсными наночастицами карбоната кальция ($PBX / CaCO_3$). На рисунке 3.37 показана зависимость относительной деформации ε нанокомпозитов $PBX / CaCO_3$ от содержания наполнителя φ_n .

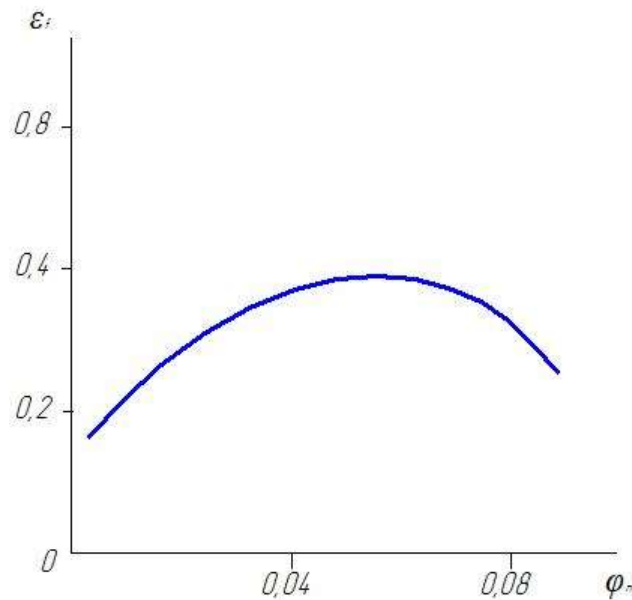


Рисунок 3.37 – Зависимость относительной деформации ε нанокомпозитов $PBX / CaCO_3$ от содержания наполнителя φ_n [90]

При испытаниях образцов нанокомпозитов $PBX / CaCO_3$ установлено, что с увеличением содержания наполнителя до $\varphi_n = 0,05$ пластичность (деформация до разрушения) нанокомпозитов повышается. По достижении экстремального значения и дальнейшем увеличении содержания наполнителя деформация до разрушения материала уменьшается.

Повышение пластичности и деформации нанокомпозитов $PBX / CaCO_3$ авторы объясняют повышением модуля упругости нанокомпозитов с увеличением содержания наполнителя от $\varphi_n = 0$ до $\varphi_n = 0,05$. При дальнейшем увеличении содержания наполнителя уменьшение деформации и пластичности материала авторы объясняют агрегированием наночастиц карбоната кальция.

Увеличение деформации наблюдается также при наполнении эластомеров. Введение ультрадисперсных металлических частиц в бутадиен-нитрильный каучук СКН-26 существенно повышает деформационные свойства материала (таблица 3.9). Относительная деформация увеличивается с 520% для не наполненного эластомера до 630% для композита, наполненного частицами марганца. До 600% увеличивается деформация эластомерного композита, наполненного ультрадисперсными алюминиевыми частицами. Так же, как и в случае с нанокompозитами $PBX / CaCO_3$, после превышения оптимального содержания наполнителя, в композитах на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-26, наполненных ультрадисперсными частицами марганца, железа, свинца и алюминия наблюдается уменьшение пластичности, что можно объяснить агрегированием наночастиц.

Аналогичная картина наблюдается при наполнении эластомера Ф-40С металлическими наночастицами. Введение в эластомер Ф-40С металлических дисперсных наночастиц приводит к увеличению деформации материала. На рисунках 3.38 и 3.39 показана деформация нанокompозитов, наполненных алюминиевыми и медными наночастицами.

Наполнение эластомера Ф-40С алюминиевыми наночастицами приводит к увеличению деформации материала. Причины увеличения деформации эластомера при наполнении наночастицами были рассмотрены выше. В сравнении с не наполненным эластомером, деформация которого составляет $\varepsilon = 171\%$, при объемном содержании наполнителя $\varphi_n = 0,0066$ величина ε увеличилась в 1,11 раза, до значения $\varepsilon = 190\%$, при значении $\varphi_n = 0,0132$ – в 1,26 раза, до $\varepsilon = 216\%$. Наиболее высокое значение деформации $\varepsilon = 240\%$ имеют образцы с оптимальным содержанием наполнителя $\varphi_n = 0,02$, что в 1,4 раза превышает аналогичный параметр не наполненного герметика. При дальнейшем повышении содержания наночастиц наполнителя до $\varphi_n = 0,026$ наблюдается уменьшение деформации нанокompозита до $\varepsilon = 203\%$. Уменьшение деформации можно объяснить агрегированием наночастиц.

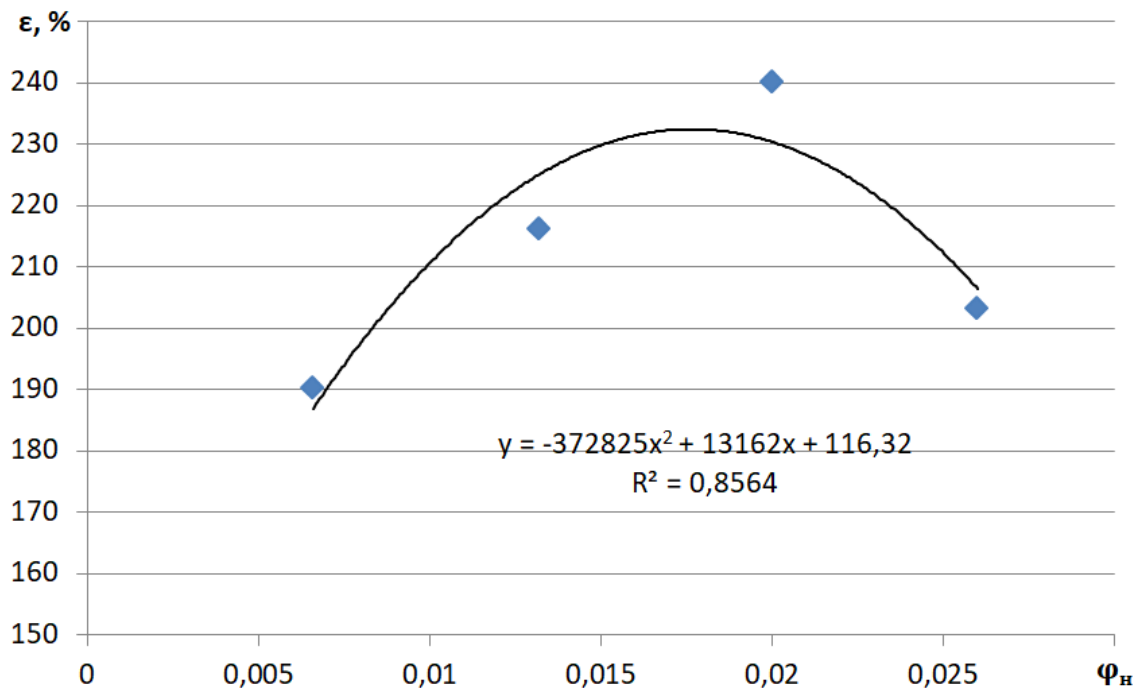


Рисунок 3.38 – Зависимость деформации эластомерного нанокompозита ε от содержания алюминиевых наночастиц наполнителя φ_n

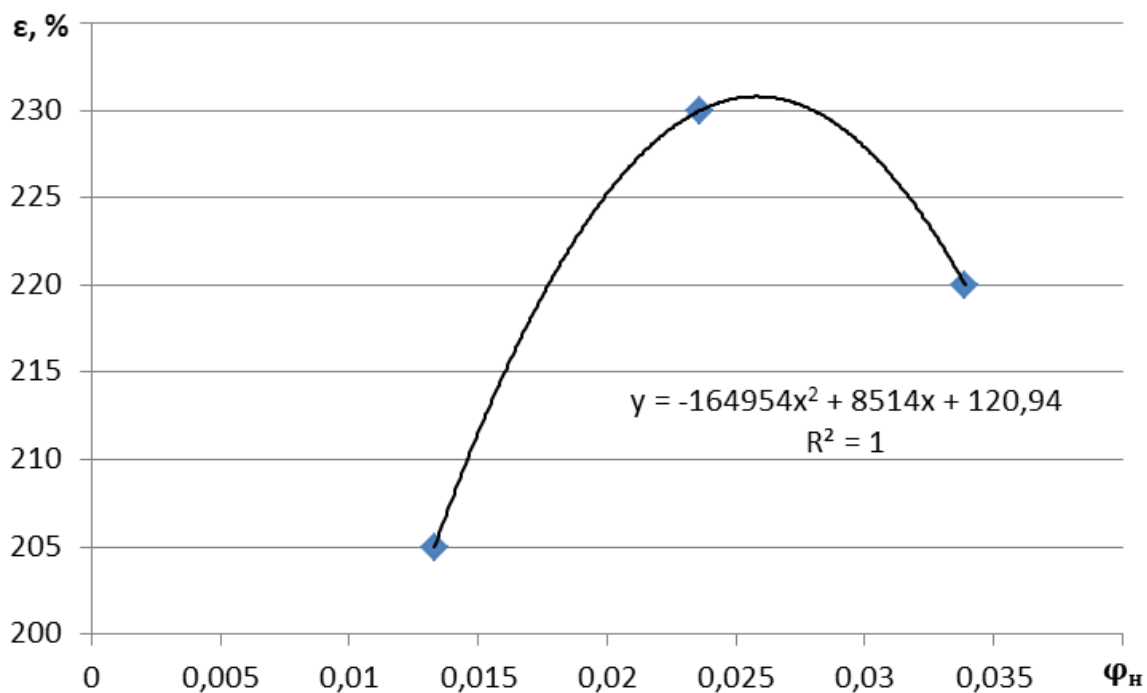


Рисунок 3.39 – Зависимость деформации эластомерного нанокompозита ε от содержания алюминиевых и медных наночастиц наполнителя φ_n

Подобная зависимость наблюдается в нанокompозите эластомера Ф-40С, наполненным алюминиевыми и медными дисперсными наночастицами (рисунок 3.39). В сравнении с не наполненным эластомером при объемном содержании наночастиц наполнителей $\varphi_n = 0,0133$ величина ε увеличилась в 1,2 раза, до значения $\varepsilon = 205\%$. Наиболее высокое значение деформации $\varepsilon = 230\%$ имеют образцы с оптимальным содержанием алюминиевых и медных наночастиц $\varphi_n = 0,0236$, что в 1,34 раза превышает аналогичный параметр не наполненного герметика. При дальнейшем повышении содержания наночастиц наполнителя до $\varphi_n = 0,0339$ наблюдается уменьшение деформации нанокompозита до $\varepsilon = 220\%$. Уменьшение деформации можно объяснить агрегированием наночастиц.

Многочисленными исследованиями полимерных нанокompозитов, которые наполнены углеродными нанотрубками, установлено, что в сравнении с не наполненным исходным полимером, в нанокompозитах повышается пластичность и, соответственно увеличивается деформация до разрушения. Это явление имеет место при введении углеродных нанотрубок в нанокompозиты на основе эпоксиполимера, фенилона [93] и др. В работе Микитаева раскрываются физические основы механизма повышения пластичности нанокompозитов, после наполнения углеродными нанотрубками. В отличие от дисперсных частиц и органоглин для углеродных нанотрубок характерна гладкая в атомном масштабе поверхность [99]. Благодаря этому макромолекулы (макромолекулярные клубки) матричного полимера растягиваются на поверхности углеродных нанотрубок и образуются плотноупакованные межфазные слои с измененными, по сравнению с объемной полимерной матрицей, молекулярными и структурными характеристиками.

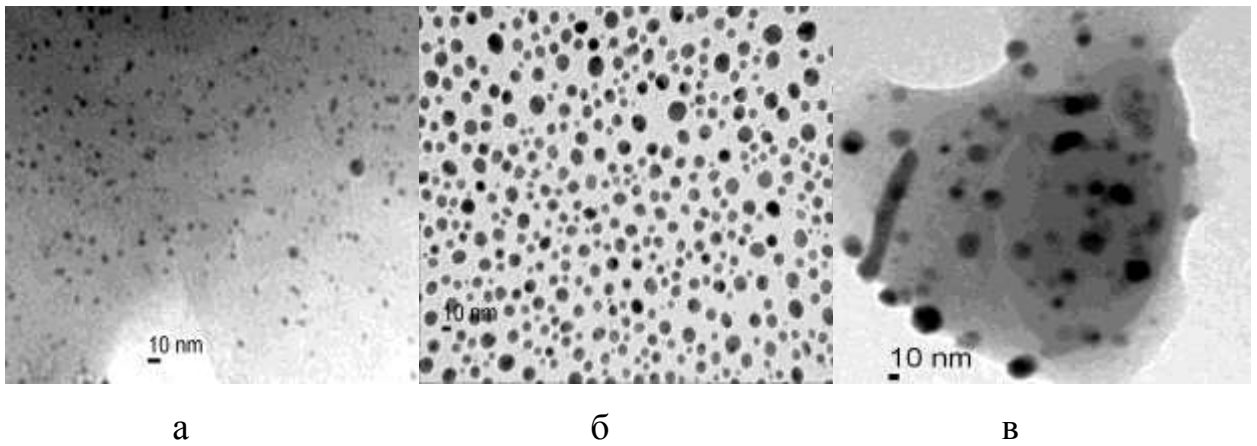
В разделе 3.2.2 упоминается, об исследованиях авторов в работах [93, 99], которые показали, что в эластомерных нанокompозитах, наполненных дисперсными наночастицами, образуются от одного до трех межфазных слоев. Первый межфазный слой это результат взаимодействия поверхности наночастицы наполнителя с полимерной матрицей. Вторым межфазным слоем формируется при взаимодействии стеклообразного межфазного слоя с полимерной матрицей. Третий

межфазный слой формируется при взаимодействии со вторым. Эти межфазные слои имеют свойства, отличные от свойств полимерной матрицы. Можно предположить, что при растяжении образца из эластомерного нанокомпозита, причина и механизм деформации аналогичны нанокомпозитам, наполненным углеродными нанотрубками.

Рассмотрим нанокомпозит, наполненный дисперсными наночастицами. Первый межфазный слой, сформированный на поверхности наночастицы, имеет «замороженную» молекулярную подвижность, находится в стеклообразном состоянии и его поверхность можно принять гладкой в атомном масштабе. Тогда в результате взаимодействия этого слоя с матричным полимером, на наружной поверхности первого слоя макромолекулы растягиваются и образуется второй плотноупакованный межфазный слой с измененными, по сравнению с объемной полимерной матрицей, молекулярными и структурными характеристиками. Этот межфазный слой является причиной увеличения деформации композита. Таким же образом взаимодействуют второй межфазный слой с матричным полимером и образуется третий межфазный слой.

В работах, описывающих увеличение пластичности полимерных нанокомпозитов, отмечается, что основной причиной снижения пластичности при дальнейшем увеличении содержания наполнителя, является агрегирование наночастиц (рисунок 3.40) [93].

Из рисунка следует, что избыточное содержание наночастиц серебра в растворе полимерной матрицы приводит к образованию агрегатов, которые принимают в отличие от сферовидной другую форму – это стержневидная или эллипсоидальная формы. Поэтому при создании полимерных нанокомпозитов следует определять оптимальную концентрацию наполнителя и использовать способы, повышающие эффективность смешения и диспергирования в растворе полимера наноразмерных частиц наполнителя.



а) ПГЭМА + Ag (1 масс. %); б) ПГЭМА + Ag (5 масс. %); в) ПГЭМА + Ag (10 масс. %)

Рисунок 3.40 – Микрофотографии ПЭМ [93]

Выводы

1. В отличие от микрокомпозитов, в полимерных нанокомпозитах, наполненных дисперсными металлическими наночастицами увеличивается деформация. Благодаря низкому объемному содержанию, наночастицы свободно перемещаются с полимерной матрицей, которая свободно растягивается. Вязкое сопротивление перемещению наночастиц с высокой адгезией к полимерной матрице увеличивает деформацию нанокомпозита при разрыве.

2. Деформация эластомера Ф-40С с алюминиевыми наночастицами увеличилась, в сравнении с не наполненным эластомером, в 1,4 раза, до значения $\varepsilon = 240\%$. Нанокомпозит эластомера Ф-40С, наполненный дисперсными алюминиевыми и медными наночастицами имеет деформацию $\varepsilon = 230\%$, что в 1,34 раза выше деформации не наполненного эластомера.

Наполнение анаэробного герметика АН-111 алюминиевыми наночастицами приводит к увеличению деформации материала. В сравнении с не наполненным герметиком АН-111, деформация достигает $\varepsilon = 10,2\%$, что в 1,2 раза превышает аналогичный параметр не наполненного герметика.

Выносливость полимерных нанокомпозитов

К основным факторам, определяющим выносливость эластомерных композитов, можно отнести: притупление вершин растущих трещин в материале, уве-

личный гистерезис и рассеивание энергии в объеме материала по линии разрыва.

Как упоминалось ранее в разделе 3.2.4 увеличение прочности, а также выносливости эластомерных композитов вызывает явление – притупление вершин растущих трещин в материале. Под действием циклических напряжений происходит разрыв тонкого полимерного волокна у вершины трещины, сопровождающийся релаксацией разорвавшегося волокна. Вершина трещины и остаточное напряжение переходят на соседнее полимерное волокно. Последнее при этом деформируется, однако для его разрыва необходимо приложить дополнительную энергию. Поэтому необходима большая работа разрушения, т.е. композит имеет более высокую выносливость.

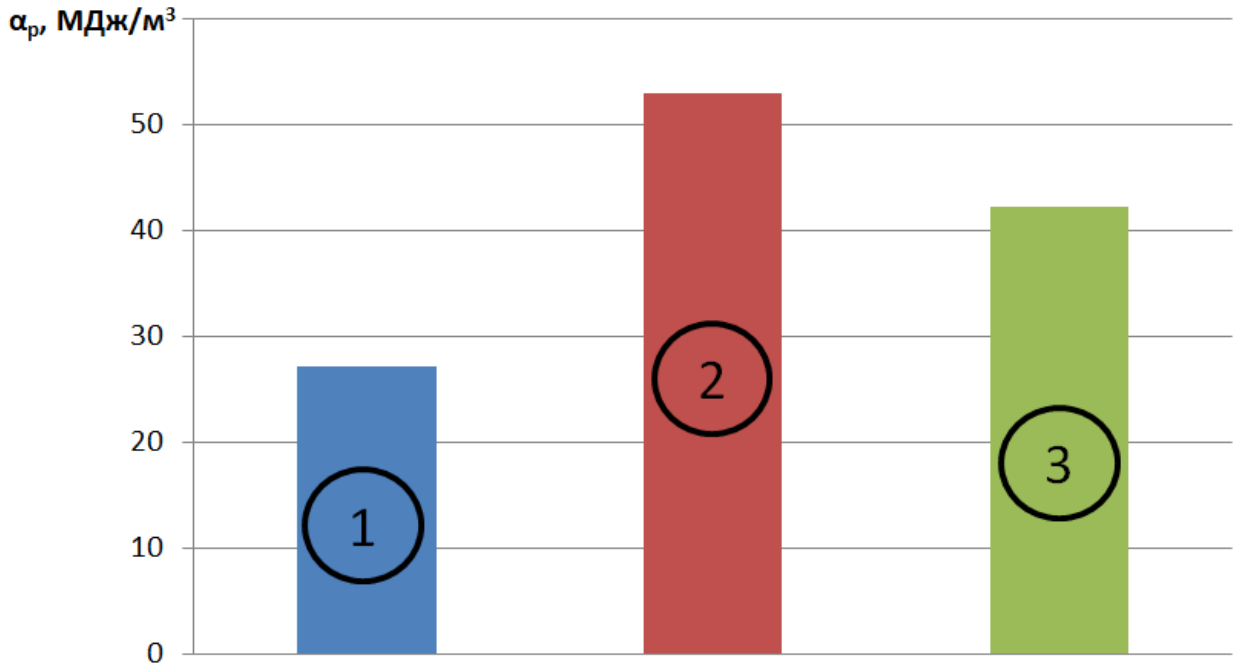
Скорость разрастания трещин, и, соответственно трещиностойкость, в значительной степени зависят от гистерезисных свойств эластомеров. Эластомерные нанокompозиты имеют более высокий гистерезис, по сравнению с не наполненными эластомерами. С увеличением гистерезиса, скорость разрастания трещин уменьшается.

Увеличение гистерезиса в эластомерных композитах вызвано в основном двумя причинами: 1) энергия, которая выделяется вследствие разрыва физических связей между частицами наполнителя и каучука, 2) «замороженная» молекулярная подвижность межфазных областей у поверхности наночастиц наполнителя.

Повышенный механический гистерезис композита является причиной более высокой степени релаксации напряжений перед вершиной растущей трещины в сравнении с не наполненным эластомером. Поэтому эластомерные нанокompозиты будут иметь более высокую трещиностойкость и выносливость, способность противостоять действию циклических нагрузок, иметь более высокую долговечность в сравнении с не наполненным эластомером.

При циклическом нагружении в эластомерном композите с течением времени образуются очаги разрушения полимерной матрицы, вызывающие повышенное рассеяние энергии. По результатам многочисленных исследований известно, что материал, требующий большую работу разрушения, обладает более высокой

стойкостью к воздействию циклических нагрузок, большей выносливостью и, соответственно, долговечностью [10]. Экспериментальные исследования показали увеличение, в сравнении с эластомером Ф-40С, удельной работы разрушения у нанокompозитов на его основе (рисунок 3.41).



1 – эластомер Ф-40С [176]; 2 – нанокompозит, наполненный наночастицами Al; 3 – нанокompозит, наполненный наночастицами Al и Cu

Рисунок 3.41 – Удельная работа разрушения полимерных образцов при одноосном растяжении α_p

Наполнение эластомера Ф-40С алюминиевыми и медными наночастицами увеличивает, в сравнении с не наполненным эластомером, удельную работу разрушения в 1,55 раза, до $\alpha_p = 42,19 \text{ МДж} / \text{м}^3$. Причиной являются более высокая прочность и деформация нанокompозита. Наиболее высокое значение удельной работы разрушения имеет нанокompозит, наполненный алюминиевыми наночастицами (состав №1) $\alpha_p = 52,95 \text{ МДж} / \text{м}^3$. Аналогичный параметр у не наполненного эластомера Ф-40С в 1,94 раза меньше $\alpha_p = 27,2 \text{ МДж} / \text{м}^3$, а у нанокompозита, наполненного алюминиевыми и медными наночастицами (состав №2) меньше

в 1,25 раза, $\alpha_p = 42,19 \text{ МДж} / \text{м}^3$. Состав №1, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С и составом №2, имеет наиболее высокую деформацию и эластичность $\varepsilon = 240\%$. По этой причине на разрушение образца затрачивается наибольшая работа, что подтверждается максимальной площадью участка под кривой «нагрузка-деформация» на диаграмме разрушения. В разделе 3.2.4 рассмотрены факторы увеличения прочности эластомерных нанокомпозитов, наполненных дисперсными наночастицами. В начале данного раздела рассмотрен механизм увеличения деформационных свойств эластомерного нанокомпозита.

Таким образом, увеличение прочности и деформации нанокомпозитов, в сравнении с не наполненным эластомером, однозначно увеличивает удельную работу разрушения эластомерных нанокомпозитов при одноосном растяжении, которая характеризует способность материала противостоять воздействию циклических нагрузок, т.е. его выносливость. Наполнение эластомеров дисперсными наночастицами алюминия и меди существенно повышает выносливость и долговечность материала.

Разрушение «жестких» полимеров, к которым относятся анаэробные герметики и композиты на их основе, при длительном циклическом нагружении происходит через три стадии: зарождение микротрещин, их стабильный рост и катастрофический рост трещин, приводящий к разрушению материала [53].

Под действием циклических нагрузок, благодаря наличию дефектов в структуре материала, появления областей перенапряжений, в материале образуются микротрещины [258]. Микротрещины также могут возникать при сборке клеевого соединения «вал-подшипник» в процессе отверждения клеевого шва, по причине не полной релаксации, усадки адгезива, вследствие флуктуации тепловой энергии, которая провоцирует разрыв химических связей.

Вторая стадия характеризуется стабильным ростом трещины и концентрацией напряжений в области ее вершины. С разрастанием трещины напряжения у вершины увеличиваются.

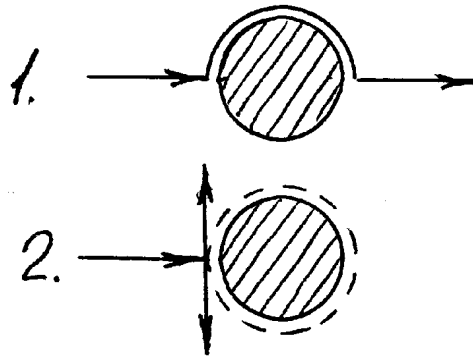
На третьей стадии трещина достигает определенного критического размера. При этом энергия у вершины трещины концентрируется настолько, что по значе-

нию она больше термодинамической поверхностной энергии полимерной матрицы γ_m . Это является причиной катастрофического роста трещины и последующего разрушения материала.

Следует особо отметить для композитов, что «размер трещин, которые возникают в полимерной матрице, существенным образом определяется размером дисперсных частиц наполнителя» [53]. Для каждого полимера существует определенный критический размер трещин, провоцирующий катастрофический рост последней и разрушение материала. Если в матрицу вводят крупные дисперсные частицы, то могут возникнуть трещины размером больше определенного критического значения. Наполнение анаэробных герметиков дисперсными наночастицами может приводить к образованию микротрещин, размер которых значительно меньше критического. Для разрастания последних до критического размера потребуется, в сравнении с не наполненным герметиком, значительно больше энергии. С уменьшением размера частиц наполнителя, увеличивается количество возникающих микротрещин размер которых меньше критического. Поэтому, в сравнении с не наполненным герметиком, для разрушения анаэробного нанокompозита необходимо затратить больше внешней энергии. Нанокompозит будет более вынослив и долговечен.

«Наночастицы активного наполнителя, помимо высокой удельной поверхности, имеют высокую адсорбционную способность. Адсорбция на поверхности наночастиц сегментов макромолекул вызывает деформацию молекулярного клубка и ориентацию нефиксированных сегментов из поверхности наночастицы в направлении объема полимерной матрицы» [53]. В итоге образуется упорядоченный, плотно упакованный и частично ориентированный межфазный слой полимера с «замороженной» молекулярной подвижностью и повышенной прочностью [256].

Схема разрастания трещины при встрече с наночастицей наполнителя показана на рисунке 3.42.



1 – трещина огибает частицу; 2 – ветвление и исчезновение трещины

Рисунок 3.42 – Схема разрастания трещины при встрече с наночастицей наполнителя [256]

Растущая трещина, при встрече с наночастицей твердого металлического наполнителя или огибает ее, или начинает ветвление, или приостанавливается. В любом варианте, для разрастания трещины, требуется дополнительная поверхностная энергия разрушения γ_F и, по этой причине материал является, в сравнении с полимерной матрицей, более вынослив и долговечен.

Таким образом, на образование и рост трещины затрачивается поверхностная энергия разрушения γ_F . Чем больше ее значение, тем более вынослив материал, и более высока его долговечность. Как отмечалось в разделе 3.2.4 наполнение полимерной матрицы высокодисперсными частицами с более высокой, чем у матрицы, поверхностной энергией разрушения существенно увеличивает энергию разрушения композита. Из таблицы 3.11 таблицы видно, что наиболее высокую поверхностную энергию разрушения имеют алюминиевый сплав и медь. Отсюда следует важный вывод: наполнение анаэробных герметиков наночастицами алюминия и меди обеспечит увеличение поверхностной энергии разрушения γ_F , повысит выносливость и долговечность полимерного композита.

Экспериментальные исследования подтвердили корректность нашего вывода (рисунок 3.43).

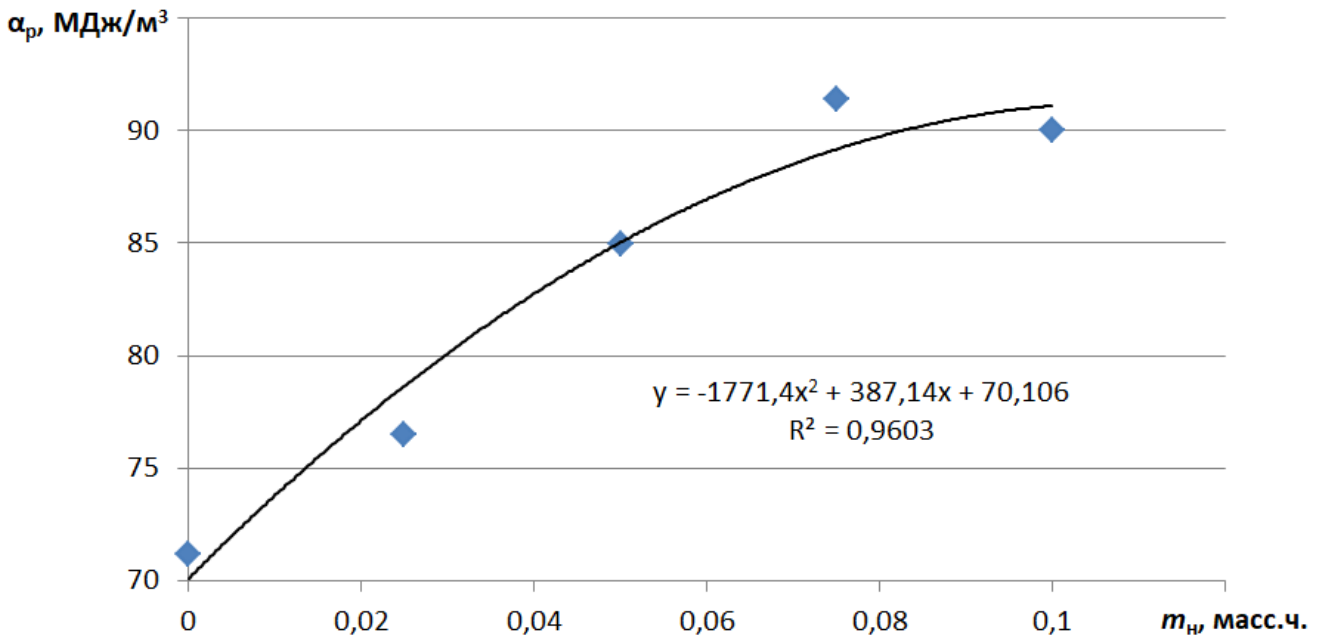


Рисунок 3.43 – Зависимость удельной работы разрушения клеевых соединений α_p от содержания алюминиевых наночастиц m_n в нанокompозите на основе анаэробного герметика АН-111

С повышением содержания алюминиевых наночастиц наблюдается увеличение удельной работы разрушения. Причины повышения выносливости анаэробных герметиков рассмотрены выше. В сравнении с не наполненным герметиком АН-111, удельная работа разрушения которого составила $\alpha_p = 71,2 \text{ МДж} / \text{м}^3$, при массовом содержании наполнителя $m_n = 0,025 \text{ масс.ч.}$ величина α_p увеличилась в 1,074 раза, до значения $\alpha_p = 76,5 \text{ МДж} / \text{м}^3$, при значении $m_n = 0,05 \text{ масс.ч.}$ в 1,19 раза, до значения $\alpha_p = 85,0 \text{ МДж} / \text{м}^3$. Наиболее высокое значение удельной работы разрушения $\alpha_p = 91,4 \text{ МДж} / \text{м}^3$ имеют образцы с оптимальным содержанием наполнителя $m_n = 0,075 \text{ масс.ч.}$, что в 1,28 раза превышает аналогичный параметр не наполненного герметика.

При дальнейшем повышении содержания наночастиц наполнителя до $m_n = 0,1 \text{ масс.ч.}$ наблюдается снижение удельной работы разрушения материала до значения $\alpha_p = 90,0 \text{ МДж} / \text{м}^3$, что можно объяснить агрегированием наночастиц и

соответствующим ухудшением деформационно-прочностных свойств нанокompозита.

Выводы

1. Увеличение прочности и деформации нанокompозитов, в сравнении с не наполненным полимером, однозначно увеличивает удельную работу разрушения полимерных нанокompозитов при одноосном растяжении, характеризующую выносливость материала.

2. Наполнение эластомеров дисперсными наночастицами алюминия и меди существенно повышает выносливость и долговечность материала. Удельная работа разрушения нанокompозита, наполненного наночастицами алюминия и меди составляет $\alpha_p = 42,19 \text{ МДж} / \text{м}^3$, что в 1,55 раза больше аналогичного параметра не наполненного эластомера Ф-40С ($\alpha_p = 27,2 \text{ МДж} / \text{м}^3$). Наиболее высокой удельной работой разрушения обладает нанокompозит, наполненный алюминиевыми наночастицами $\alpha_p = 52,95 \text{ МДж} / \text{м}^3$. Ее значение в 1,94 раза превышает имеет удельную работу разрушения не наполненного эластомера Ф-40С.

3. Удельная работа разрушения анаэробного нанокompозита, в сравнении с не наполненным герметиком ($\alpha_p = 71,2 \text{ МДж} / \text{м}^3$), в 1,28 раза больше и достигает значения $\alpha_p = 91,4 \text{ МДж} / \text{м}^3$.

3.3 Регрессионные модели деформационно-прочностных свойств полимерных нанокompозитов

Удельная работа разрушения полимерного материала α_p является комплексным оценочным параметром механических свойств полимерного материала. Работа разрушения экспериментально определяется как площадь под кривой «нагрузка-деформация» на диаграмме разрушения образца при одноосном нагружении. Чем больше прочность и деформация, при которых происходит разрушение, тем больше площадь и, соответственно, работа разрушения. Помимо дефор-

мационно-прочностных свойств, величина α_p характеризует выносливость материала, т.е. его стойкость к воздействию циклических нагрузок. Чем больше удельная работа разрушения, тем выше долговечность материала при циклическом нагружении [10, 16]. Поэтому в работе проведены активные эксперименты с целью оптимизации параметров термической обработки и наполнения эластомерных нанокомпозитов при которых обеспечиваются наиболее высокие механические свойства материалов.

3.3.1 Оптимизация режима термической обработки эластомера Ф-40С наполненного алюминиевыми наночастицами

В разделе 3.2 экспериментально установлен состав нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С, при котором достигаются наиболее высокие деформационно-прочностные свойства материала: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч. ($\varphi_n = 20,0 \times 10^{-3}$). Помимо содержания наполнителя на механические свойства существенным образом влияет режим термической обработки материала. Поэтому оптимальный режим термической обработки нанокомпозита определяли в ходе активного эксперимента по композиционному плану В₂ [197]. Функция отклика Y – удельная работа разрушения образцов нанокомпозита α_p , МДж/м³, независимые факторы: X₁ – температура, °С, X₂ – время, ч. нагрева конвективным способом.

В таблице 3.12 представлены результаты активного эксперимента по плану В₂.

Проверка воспроизводимости эксперимента

Расчет дисперсии среднего значения:

$$S_1^2 = \frac{(30,578 - 30,92)^2 + (31,569 - 30,92)^2 + (30,612 - 30,92)^2}{3 - 1} = 0,3164$$

$$S_2^2 = \frac{(25,821 - 25,32)^2 + (25,445 - 25,32)^2 + (24,691 - 25,32)^2}{3 - 1} = 0,3311$$

Таблица 3.12 – Композиционный план В₂ и результаты активного эксперимента

№ п/п	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	\bar{Y}	\hat{y}_i	S _g ²
1	-1	-1	30,578	31,569	30,612	30,92	31,155	0,3164
2	+1	-1	25,821	25,445	24,691	25,32	25,325	0,3311
3	-1	+1	25,842	26,691	26,862	26,46	26,455	0,2984
4	+1	+1	22,573	20,229	21,401	21,4	21,165	1,3736
5	-1	0	46,147	46,814	47,496	46,82	46,59	0,458
6	+1	0	40,789	40,678	40,919	40,8	41,03	0,014
7	0	-1	37,204	36,756	38,038	37,33	37,09	0,4233
8	0	+1	32,035	32,106	33,139	32,42	32,66	0,3818

$$S_3^2 = \frac{(25,842 - 26,46)^2 + (26,691 - 26,46)^2 + (26,862 - 26,46)^2}{3 - 1} = 0,2984$$

$$S_4^2 = \frac{(22,573 - 21,4)^2 + (20,229 - 21,4)^2 + (21,401 - 21,4)^2}{3 - 1} = 1,3736$$

$$S_5^2 = \frac{(46,147 - 46,82)^2 + (46,814 - 46,82)^2 + (47,496 - 46,82)^2}{3 - 1} = 0,458$$

$$S_6^2 = \frac{(40,789 - 40,8)^2 + (40,678 - 40,8)^2 + (40,919 - 40,8)^2}{3 - 1} = 0,014$$

$$S_7^2 = \frac{(37,204 - 37,33)^2 + (36,756 - 37,33)^2 + (38,038 - 37,33)^2}{3 - 1} = 0,4233$$

$$S_8^2 = \frac{(32,035 - 32,42)^2 + (32,106 - 32,42)^2 + (33,139 - 32,42)^2}{3 - 1} = 0,3818$$

$$\sum S_g^2 = 0,3165 + 0,3311 + 0,2984 + 1,3754 + 0,4549 + 0,0137 + 0,4233 + 0,3817 = 3,595$$

Однородность дисперсий оценивали критерием Кохрена [198]. Расчетное значение критерия $G_p = 0,382$, а табличное значение – $G_T = 0,5612$. Так как табличное значение критерия больше расчетного, дисперсии следует считать однородными.

Далее рассчитали коэффициенты регрессии

$$b_0 = +52,66; b_1 = -2,78; b_2 = -2,215; b_{12} = +0,135; b_{11} = -8,85; b_{22} = -17,785.$$

Значимость коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_0 = 2,12 \cdot 0,1871 = 0,3967 < b_0 = +52,66;$$

$$\Delta b_1 = \Delta b_2 = 2,12 \cdot 0,025 = 0,053 < b_1 = -2,78 \text{ и } < b_2 = -2,215;$$

$$\Delta b_{12} = 2,12 \cdot 0,0374 = 0,0793 < b_{12} = +0,135;$$

$$\Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 2,12 \cdot 0,1123 = 0,2381 < b_{11} = -8,85 \text{ и } < b_{22} = -17,785$$

Так как доверительные интервалы меньше по абсолютному значению чем коэффициенты регрессии, последние следует считать значимыми.

Уравнение регрессии с кодированными значениями факторов

$$Y = +52,66 - 2,78X_1 - 2,215X_2 + 0,135X_1X_2 - 8,85X_1^2 - 17,785X_2^2$$

Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов

$$Y = -1790,77 + 24,4615x_1 + 102,605x_2 + 0,0135x_1x_2 - 0,0885x_1^2 - 17,785x_2^2$$

Значения отклика в точках плана, рассчитанные по уравнению регрессии:

$$\hat{y}_1 = 31,155; \hat{y}_2 = 25,325; \hat{y}_3 = 26,465; \hat{y}_4 = 21,165;$$

$$\hat{y}_5 = 46,59; \hat{y}_6 = 41,03; \hat{y}_7 = 37,09; \hat{y}_8 = 32,66.$$

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

$$S^2 = \frac{(30,92 - 31,155)^2 + (25,32 - 25,325)^2 + (26,46 - 26,465)^2 + (21,4 - 21,165)^2}{(8 - 1) - 6} = 0,1659$$

Для оценки адекватности уравнения регрессии использовали критерий Фишера.

Регрессионная модель является адекватной при выполнении условия

$$F_p < F_T. \quad (3.59)$$

$$F_T = 3,63; F_p = 1,1076$$

$$F_p = 1,1076 < F_T = 3,63$$

Неравенство (3.59) выполняется, поэтому модель можно считать адекватной.

Условие работоспособности регрессионной модели имеет вид

$$R^2 > 0,75, \quad (3.60)$$

где R^2 – коэффициент детерминации.

$$R^2 = \frac{3 \cdot [(30,92 - 32,68)^2 + (25,32 - 32,68)^2 + (26,46 - 32,68)^2 + (21,4 - 32,68)^2 + (46,82 - 32,68)^2 + (40,8 - 32,68)^2 + (37,33 - 32,68)^2 + (32,42 - 32,68)^2] - (8 - 6) \cdot 1,1076}{3 \cdot [(30,92 - 32,68)^2 + (25,32 - 32,68)^2 + (26,46 - 32,68)^2 + (21,4 - 32,68)^2 + (46,82 - 32,68)^2 + (40,8 - 32,68)^2 + (37,33 - 32,68)^2 + (32,42 - 32,68)^2] + 8(3 - 1) \cdot 0,4495} = \frac{1525,6287}{1539,4663} = 0,9910$$

Значение коэффициента детерминации составляет $R^2 = 0,991 > 0,75$. Регрессионную модель можно считать работоспособной.

На рисунке 3.44 показана поверхность функции отклика.

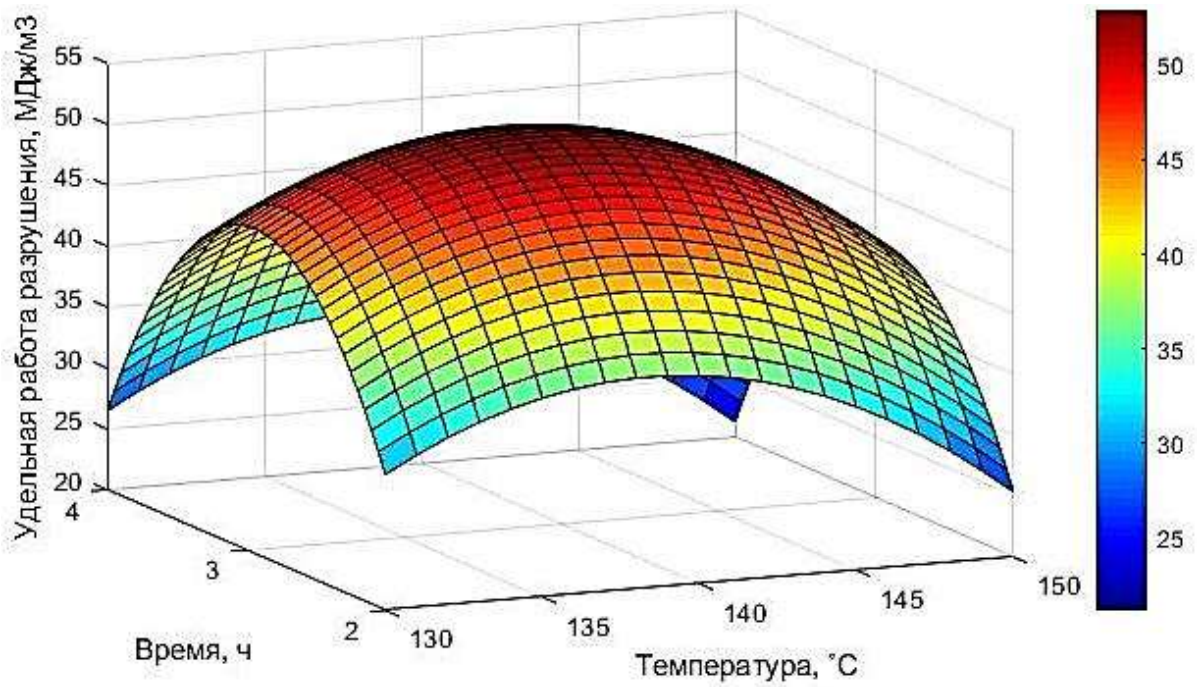


Рисунок 3.44 – Поверхность функции отклика

«Для определения координат точки экстремума функции отклика взяли частные производные по каждому фактору из системы уравнений, с последующим приравниванием полученных выражений к нулю.» [56]

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = b_1 + b_{12} \cdot x_2 + 2 \cdot b_{11} \cdot x_1 = 0 \\ \frac{dy}{dx_2} = b_2 + b_{12} \cdot x_1 + 2 \cdot b_{22} \cdot x_2 = 0 \end{cases}$$

$$Y = -1790,77 + 24,4615x_1 + 102,605x_2 + 0,0135x_1x_2 - 0,0885x_1^2 - 17,785x_2^2$$

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 24,4615 + 0,0135 \cdot x_2 - 2 \cdot 0,0885 \cdot x_1 = 0 \\ \frac{dy}{dx_2} = 102,605 + 0,0135 \cdot x_1 - 2 \cdot 17,785 \cdot x_2 = 0 \end{cases}$$

После решения вышеприведенной системы уравнений получили координаты точки экстремума функции отклика $x_{1S} = 138,42^\circ\text{C}$, $x_{2S} = 2,9372$ ч. После подстановки значений координат точки экстремума в уравнение регрессии определено значение отклика в точке экстремума $y_S = 52,9486$ МДж/м³.

Чтобы оптимизировать функцию отклика и определить область оптимума критерия оптимизации канонически преобразовали регрессионную модель.

Уравнение регрессии в канонической форме

$$Y - 52,9486 = -0,0885 \cdot X_1^2 - 17,785 \cdot X_2^2$$

На рисунке 3.45 показано двумерное сечение поверхности отклика (таблица 3.13).

Максимальное значение удельной работы разрушения $y_S = 52,9486$ МДж/м³ имеют образцы нанокompозита после термической обработки по режиму: температура $T = 138,42^\circ\text{C}$, время $t = 2,9372$ ч.

Таблица 3.13 – Координаты основных точек изолиний двумерного сечения поверхности отклика

Отклик Y	Фактор X ₁ , °C	Фактор X ₂ , ч
1	2	3
52,9486	0	0
52,0	± 0,3,27	0
52,0	0	± 0,23
51,5	± 4,04	0
51,5	0	± 0,28
51,0	± 4,69	0
51,0	0	± 0,33
50,5	± 5,26	0
50,5	0	± 0,371
50,0	± 5,889	
50,0	0	± 0,407

Ближайшая к экстремуму изолиния не значительно отличается от максимума функции отклика $y_S = 52,9486$ МДж/м³ и имеет значение $y_S = 52,0$ МДж/м³. По этой причине выбрали значения факторов, удобные в технологическом плане, и принятые как оптимальный режим термической обработки $T = 140,0^\circ\text{C}$, время $t = 3,0$ ч.

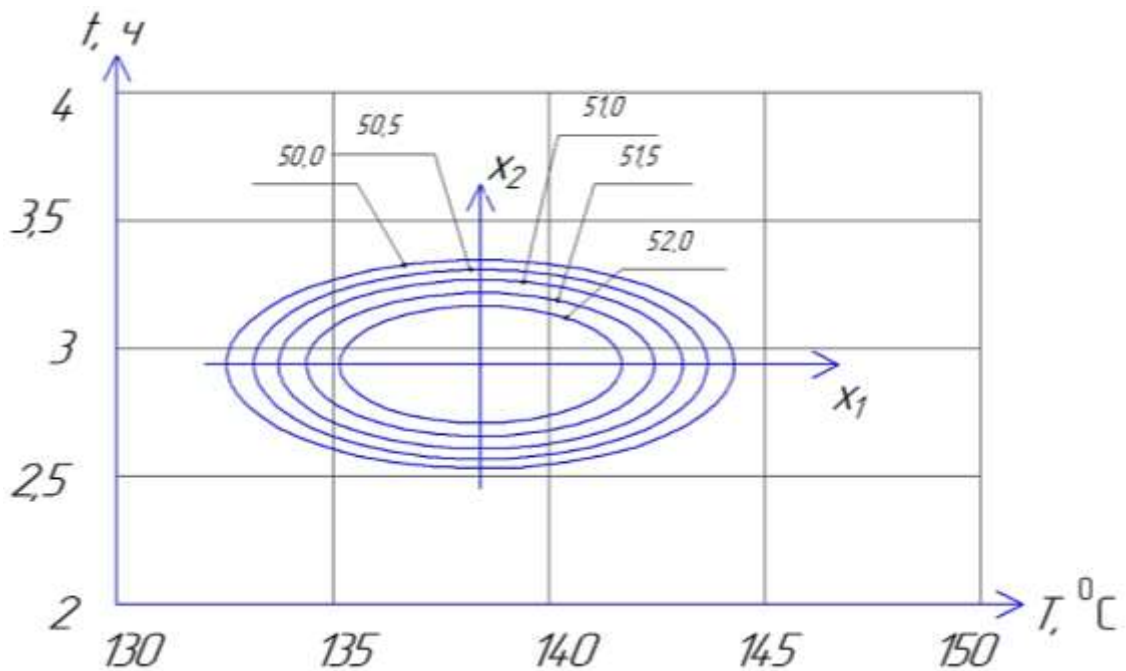


Рисунок 3.45 – Двумерное сечение поверхности отклика

Вывод

На основе полученной регрессионной модели определен оптимальный режим термической обработки эластомерного нанокомпозита: температура $T = 140,0^{\circ}\text{C}$, время $t = 3,0$ ч., при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства, $\alpha_p = 52,0 \text{ Мдж} / \text{м}^3$.

3.3.2 Оптимизация состава эластомерного нанокомпозита Ф-40С наполненного алюминиевыми и медными наночастицами

Для получения регрессионной модели, адекватно описывающей зависимость удельной работы разрушения пленок нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С от концентрации наполнителей, был проведен многофакторный эксперимент по композиционному плану B_2 , расчет представлен в приложении Е [197-200].

Вывод

На основе полученной регрессионной модели определен оптимальный состав нового эластомерного нанокомпозита: эластомер Ф-40С (ТУ 6-06-246-92) –

100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок (ТУ 1791-003-36280340-2008) – 0,09 масс.ч.; медный нанопорошок (ТУ 1791-003-36280340-2008) – 0,03 масс.ч., при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства, $\alpha_p = 42,0 \text{ Мдж} / \text{м}^3$.

Таким образом представлена методология исследования и выбора, на основе фрактального анализа, наночастиц наполнителей, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов, оптимизации их состава и условий отверждения.

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫМИ НАНОКОМПОЗИТАМИ

Качество покрытий при восстановлении посадочных подшипниковых отверстий эластомерными нанокompозитами определяется многими факторами, которые необходимо учитывать. Механические, теплофизические и другие потребительские свойства композита зависят не только от его состава, они формируются также на этапах приготовления и отверждения. Степень агрегирования частиц наполнителя зависит от способа диспергирования раствора композита (ручное смешивание, механизированное или ультразвуковое диспергирование), глубина полимеризации, пористость покрытия от способа и режима термической обработки и т.д. Требуется обеспечить при восстановлении точностные характеристики отверстий с полимерным покрытием, соосность осей валов и подшипников при клеевой сборке. Поэтому необходим комплексный подход к решению данной проблемы, предусматривающий поэтапную и всестороннюю обработку материала, покрытия на его основе на этапах приготовления и отверждения, а также финишную операцию. Исследование и развитие перспективных способов технологического воздействия позволит повысить эффективность восстановления посадочных мест подшипников качения полимерными нанокompозитами

4.1 Диспергирование растворов полимерных нанокompозитов

4.1.1 Диспергирование растворов эластомерных нанокompозитов ультразвуковой обработкой

Потребительские свойства полимерных нанокompозитов существенным образом зависят от способа смешивания частиц с раствором полимера и последующего их распределения в объеме матрицы, степенью агрегирования [91, 112, 155]. Перспективным способом, обеспечивающих эффективное смешение и дисперги-

рование растворов полимерных нанокомпозитов, является ультразвуковая обработка (УЗО) [24, 61, 94, 259]. Для оценки качества диспергирования частиц наполнителя в растворе полимера используют безразмерный критерий эрозионной активности χ , который предложен Агранатом Б.А. [167] и преобразован затем Брониным к виду [260]

$$\chi = \frac{8,14(P_A - P_0)^{\frac{5}{2}}(0,2P_A + P_0)^{\frac{7}{2}}}{P_A^3 P_{\Pi}^3} \quad (4.1)$$

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

Для варьирования гидростатическим давлением, с целью увеличения критерия эрозионной активности, необходимо дополнительное технологическое оборудование в виде компрессора, вытяжного устройства. Это усложняет и удорожает технологию восстановления, поэтому ультразвуковое диспергирование растворов полимерных композитов проводят при постоянном гидростатическом давлении P_0 , которое равно атмосферному. Так давление насыщенного пара раствора композита P_{Π} является постоянным, критерий эрозионной активности в этом случае определяется только звуковым давлением P_A .

Амплитуду звукового давления P_A можно рассчитать по формулам [155, 259]

$$P_A = \rho C w A, \quad (4.2)$$

где ρ – плотность; C – скорость распространения звуковой волны в растворе; w – циклическая частота колебаний; A – амплитуда смещения.

Или по зависимости [170]

$$P_A = \sqrt{\frac{2W}{S_t}} \sqrt[4]{\frac{\rho}{\beta_{ад}}}, \quad (4.3)$$

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

Для эффективного диспергирования раствора эластомерного композита необходимо выполнение условия

$$2,0P_{атм} \leq P_A < 10P_{атм}, \quad (4.4)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление.

Скорость распространения звуковых волн в растворе эластомерного композита жидкости можно определить по зависимости [167]

$$C = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ад} \cdot \rho}}, \quad (4.5)$$

где $\beta_{ад}$ – коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

Коэффициент адиабатической сжимаемости $\beta_{ад}$ определяли по зависимости [260]

$$\beta_{ад} = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta P}, \quad (4.6)$$

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

Для определения параметров УЗО растворов эластомерных нанокомпозитов экспериментально исследовали физические свойства следующих материалов:

- состав №1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч, алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч.;

- состав №2: эластомер Ф-40с – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,09 масс.ч.; медный нанопорошок – 0,03 масс.ч.

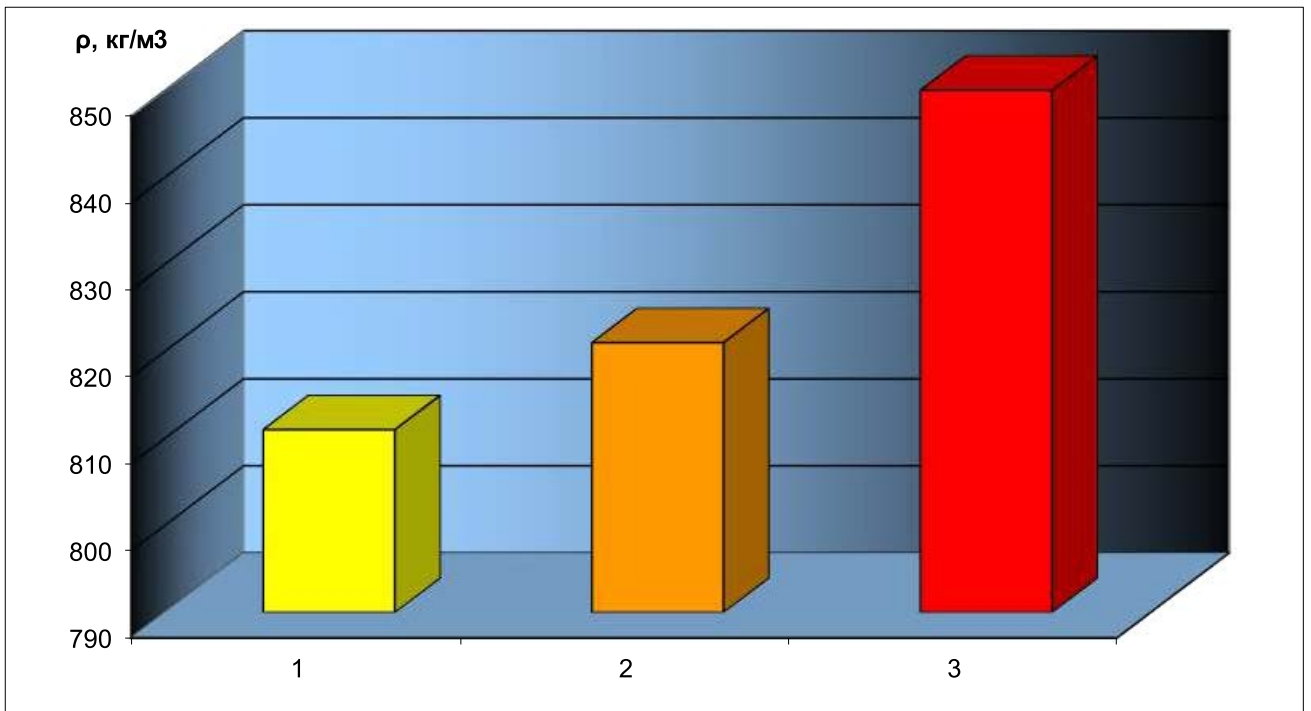
4.1.1.1 Исследование физических свойств растворов эластомерных нанокompозитов

Плотность растворов эластомерных нанокompозитов

Эксперимент показал, что плотность ненаполненного эластомера Ф-40С составляет $\rho = 811 \text{ кг/м}^3$ (рисунок 4.1). После ввода в раствор эластомера алюминиевого нанопорошка (состав №1) плотность раствора увеличилась до $\rho = 821 \text{ кг/м}^3$. Совершенно очевидно, что с увеличением содержания металлических наночастиц, плотность раствора будет расти. В составе №2 содержание металлических наночастиц наибольшее. Поэтому плотность раствора этого состава максимальная, $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$. В сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С, плотность на 5% выше, с составом №1 – на 3%.

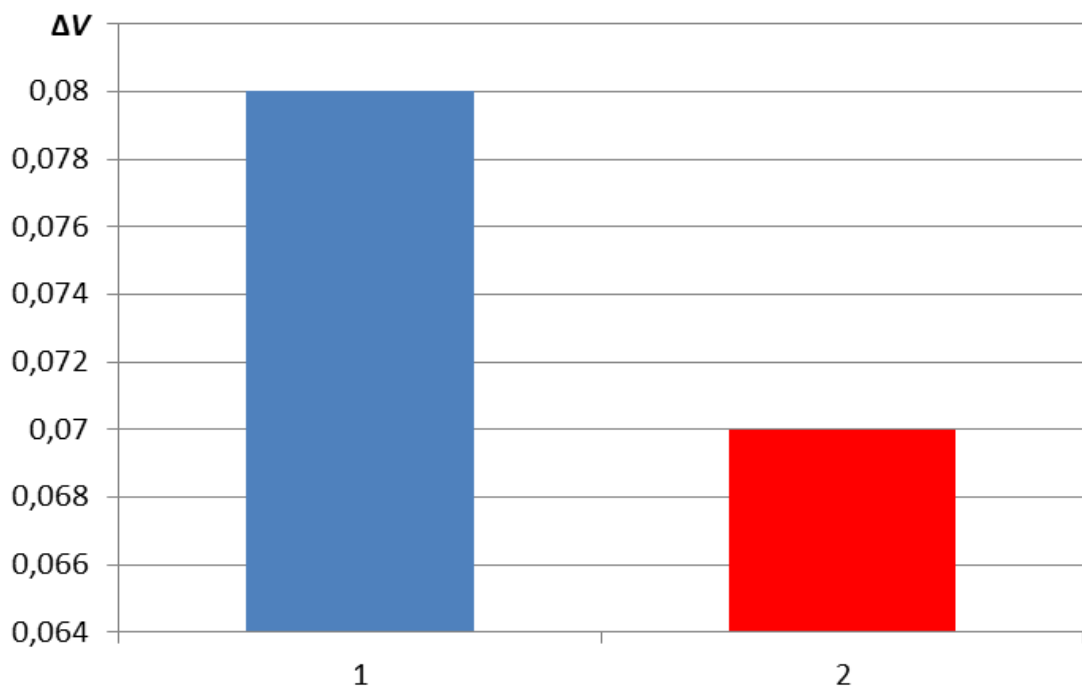
Исследование сжимаемости растворов эластомерных нанокompозитов

Адиабатическая сжимаемость раствора состава №1 имеет максимальное значение $\Delta V = 0,08$ (рисунок 4.2). Это объясняется тем, что в сравнении с составом №2, содержание металлических наночастиц существенно меньше, а доля жидкости (ацетона) значительно больше. Увеличение содержания металлических наночастиц в растворе нанокompозита приводит к уменьшению адиабатической сжимаемости последнего. В составе №2 этот показатель уменьшился, в сравнении с составом №1, на 14%, до $\Delta V = 0,07$.



1 – не наполненный эластомер; 2 – состав №1; 3 – состав №2

Рисунок 4.1 – Плотность растворов нанокompозитов на основе эластомера Ф-40С



1 – состав №1; 2 – состав №2

Рисунок 4.2 – Сжимаемость растворов эластомерных нанокompозитов

*Коэффициент адиабатической сжимаемости эластомерных
наноккомпозитов*

Коэффициенты адиабатической сжимаемости определили расчетом из зависимости (4.5). Как видно из соотношения (4.5) с увеличением сжимаемости ΔV , коэффициент адиабатической сжимаемости β_{ad} соответственно увеличивается. В этой связи рисунок 4.3 аналогичен рисунку 4.2. Коэффициент адиабатической сжимаемости состава № 1 имеет значение $\beta_{ad} = 3,2 \times 10^{-9}$, у состава №2 аналогичный параметр на 1,14 раза меньше и составляет $\beta_{ad} = 2,8 \times 10^{-9}$.

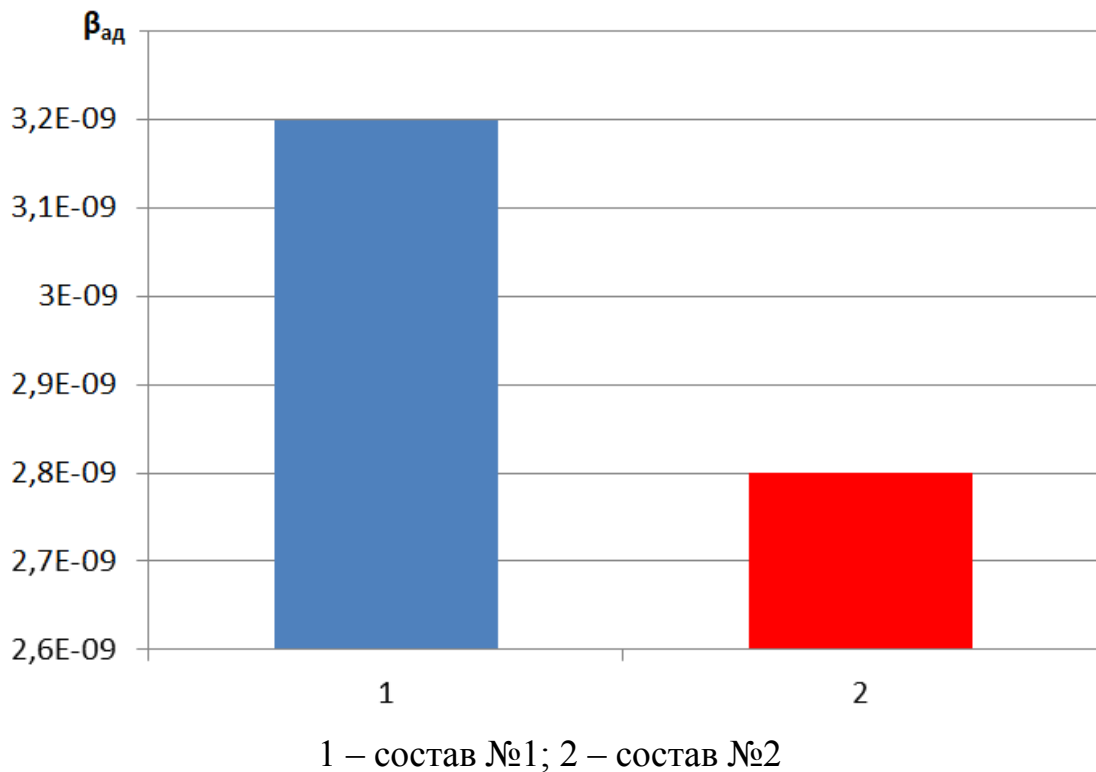


Рисунок 4.3 – Коэффициент адиабатической сжимаемости растворов
эластомерных наноккомпозитов

*Скорость распространения звуковых волн С в растворах
эластомерных наноккомпозитов*

В растворе состава №1 скорость распространения звуковых волн С наименьшая и имеет значение $C = 617 \text{ м/с}$ (рисунок 4.4). Причина заключается в том, что состав содержит минимальное количество наночастиц наполнителя и

максимальное количество жидкости (ацетона). К тому же, в соответствии с формулой (4.4), чем меньше коэффициент адиабатической сжимаемости β_{ad} , тем выше скорость звуковых волн C в растворе нанокompозита $\beta_{ad} = 2,8 \times 10^{-9}$. В этой связи скорость звука в составе №2 на 31 м/с больше, чем в составе №1 ($C = 648,2 \text{ м/с}$).

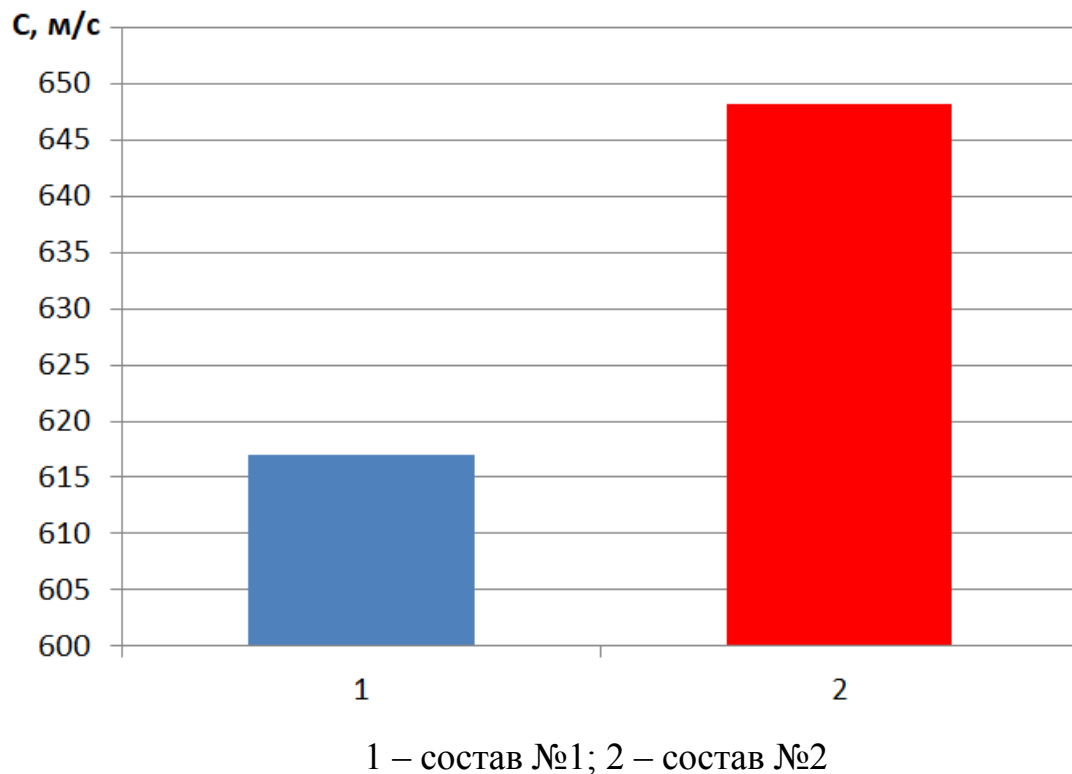


Рисунок 4.4 – Скорость звука C в растворах эластомерных нанокompозитов

Давление насыщенного пара растворов эластомерных нанокompозитов

Далее исследовали давление насыщенного пара P_{II} растворов эластомерных нанокompозитов. На рисунке 4.5 показаны результаты экспериментальных исследований по изучению давления насыщенного пара эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2.

Максимальным давлением насыщенного пара обладает раствор не наполненного эластомера [61]. Ввод металлических частиц наполнителя уменьшает величину P_{II} у композитов.

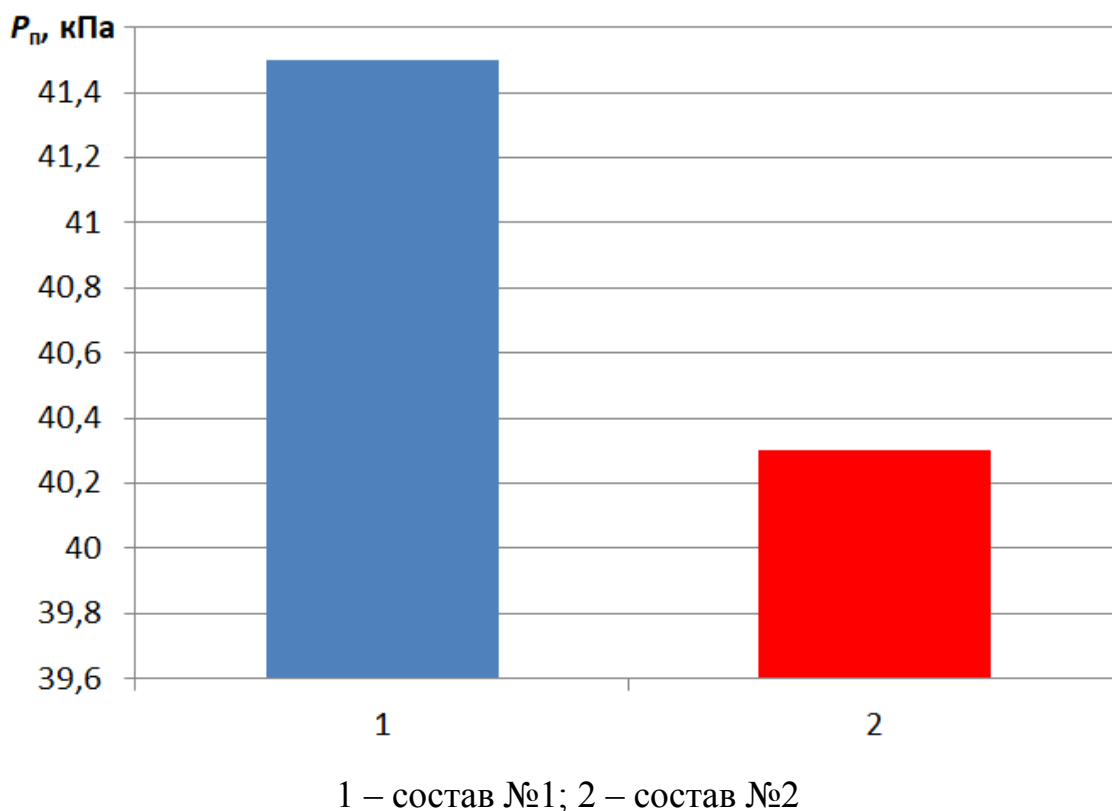


Рисунок 4.5 – Давление насыщенного пара растворов нанокompозитов на основе эластомера Ф-40С

При добавлении алюминиевых наночастиц в раствор эластомера давление насыщенного пара имеет значение $P_n = 41,5 \text{ кПа}$ (состав №1). В виду того, что состав №2 имеет большее содержание наночастиц наполнителя, этот материал имеет меньшее значение аналогичного параметра в 1,03 раза, $P_n = 40,3 \text{ кПа}$.

Выводы

Таким образом исследованиями физических свойств растворов эластомерных нанокompозитов установлено:

1. С увеличением содержания металлических наночастиц плотность и скорость звука в составах №1 и №2 увеличивается. В соответствии с формулой (4.2) это приведет к увеличению звукового давления P_a . Коэффициент адиабатической сжимаемости при этом уменьшается, и, в соответствии с формулой (4.3) это приведет также к увеличению звукового давления P_a , и, соответственно увеличению критерия эрозионной активности.

2. С повышением содержания наполнителя давление насыщенного пара в растворе эластомерного нанокompозита уменьшается. В соответствии с формулой (4.1) это приведет к увеличению критерия эрозионной активности.

4.1.1.2 Исследование режимных и оценочных параметров ультразвукового диспергирования растворов эластомерных нанокompозитов

Качество смешения, т.е. равномерность распределения наполнителя в полимерной матрице, в работе [94] оценивают по вязкости ПКМ.

В соответствии с работами Ахматовой, Колесникова, оценочным параметром качества смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокompозитов при УЗО приняли вязкость материала. Чем больше эта величина, тем более равномерно распределены частицы наполнителя в объеме раствора эластомера [61, 94].

Рациональное время УЗО определяли как время стабилизации значений растущей вязкости раствора нанокompозита в ходе УЗО.

В таблице 4.1 показаны результаты эксперимента. На рисунке 4.6 представлена зависимость динамической вязкости η раствора нанокompозита состава №1 от времени t ультразвуковой обработки. Значение динамической вязкости раствора нанокompозита стабилизируется после 4 мин УЗО и составляет $\eta = 0,1371 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Увеличение вязкости раствора через 10 мин до значения $\eta = 0,1392 \text{ Па} \cdot \text{с}$ можно объяснить тем, что спустя 6 мин после стабилизации значений вязкости в растворе превалирующее значение имеет дегазация раствора. Испарение паров ацетона приводит к увеличению вязкости раствора эластомерного нанокompозита.

Далее исследовали состав №2. В таблице 4.2 показаны результаты эксперимента. На рисунке 4.7 представлена зависимость динамической вязкости η раствора нанокompозита состава №2 от времени t ультразвуковой обработки.

Таблица 4.1 – Изменение вязкости η раствора нанокompозита состава №1 с течением времени t УЗО

№ п/п	Время УЗО нанокompозита, мин.	Кинематическая вязкость V , мм ² /с	Динамическая вязкость η , Па*с
1	2	159,41	0,1309
2	3	163,63	0,1343
3	4	167,00	0,1371
4	6	167,00	0,1371
5	10	169,5	0,1392

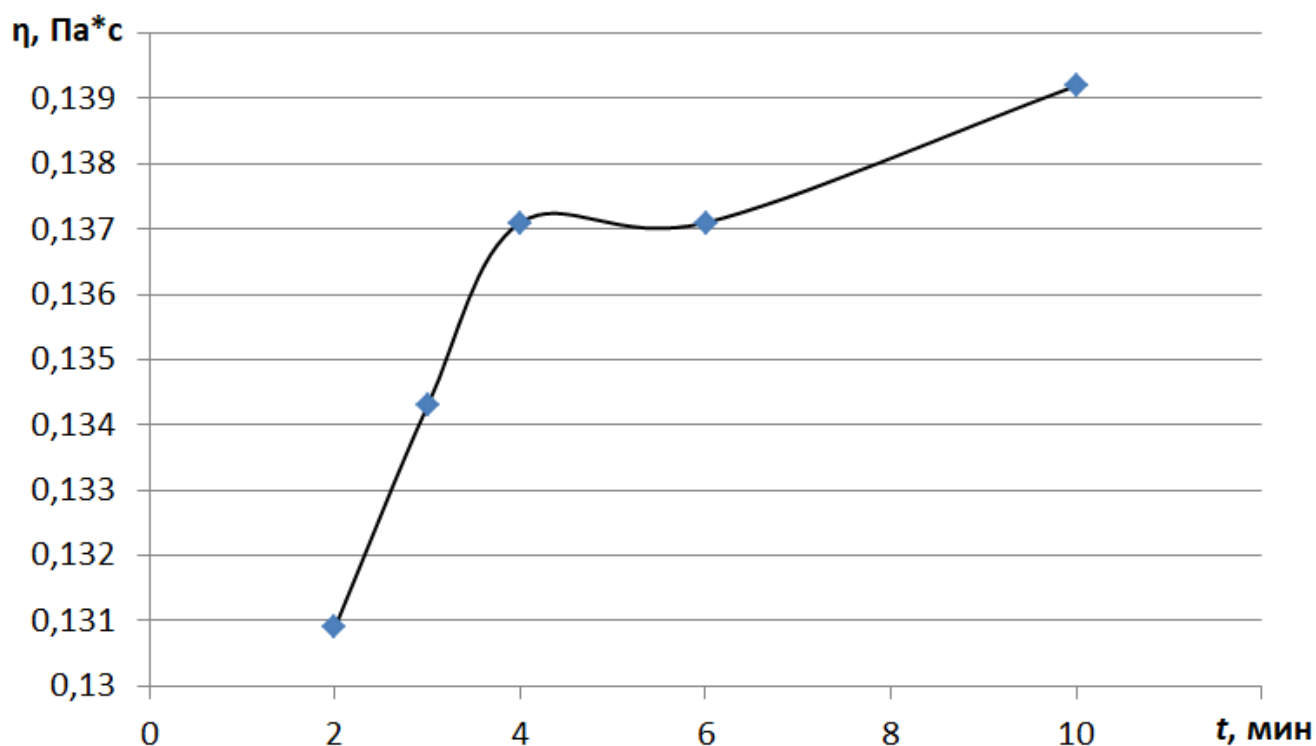


Рисунок 4.6 – Зависимость вязкости η раствора нанокompозита состава №1 от времени t ультразвуковой обработки

Таблица 4.2 – Изменение вязкости η раствора нанокompозита состава №2 с течением времени t УЗО

№ п/п	Время обработки композиции УЗ, мин.	Кинематическая вязкость V , мм ² /с	Динамическая вязкость η , Мпа
1	2	159,41	0,1355
2	3	174,59	0,1484
3	4	172,06	0,1463
4	6	173,53	0,1475
5	8	180,0	0,1530
6	10	186,47	0,1585

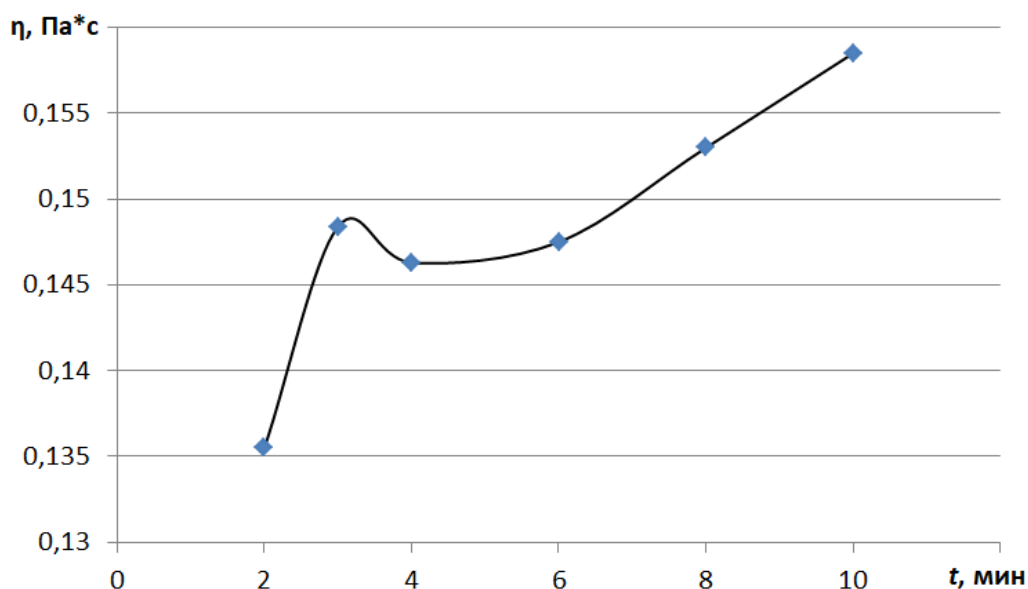


Рисунок 4.7 – Зависимость вязкости η раствора нанокompозита состава №2 от времени t ультразвуковой обработки

Характер зависимости совершенно аналогичен предыдущей графической зависимости. Исходная вязкость раствора нанокompозита состава №2 ожидаемо выше, чем у состава №1. Большие значения вязкости раствора обусловлены большим содержанием металлических наночастиц в сравнении с составом №1. Скорость роста вязкости выше, чем у состава №1. Объяснить это можно наличием медных наночастиц, которые увеличивают скорость отверждения полимерных материалов [16, 47].

Значение динамической вязкости раствора нанокompозита стабилизируется уже после 3 мин УЗО и составляет $\eta = 0,1484 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Увеличение вязкости раствора через 8 мин до значения $\eta = 0,153 \text{ Па} \cdot \text{с}$ можно объяснить тем, что спустя 5 мин после стабилизации значений вязкости в растворе превалирующее значение имеет дегазация раствора. Испарение паров ацетона приводит к увеличению вязкости раствора эластомерного нанокompозита.

Таким образом, установлен режимный параметр УЗО эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2: рациональное время УЗО растворов нанокompозитов при мощности озвучивания 55 Вт, которое обеспечивает наиболее высокое качество смешения и диспергирования, имеет значение $t = 6$ мин.

4.1.1.3 Критерий эрозионной активности УЗО растворов эластомерных нанокомпозитов χ при изменении гидростатического давления и постоянной мощности озвучивания

Проведенные исследования позволили установить параметры физических свойств растворов эластомерных нанокомпозитов составов №1 и №2. Используя эти параметры и технические характеристики ультразвуковой ванны «GRAD 0,5 HOME STYLE» по формуле (4.3) рассчитали значения звукового давления P_a в растворах эластомерных нанокомпозитов при УЗО. Затем, изменяя значения гидростатического давления P_o , по формуле (4.1) определили значения критерия эрозионной активности χ для растворов эластомерных нанокомпозитов составов №1 и №2 при постоянной мощности озвучивания $W = 55Вт$. Результаты расчета представлены в таблице 4.3.

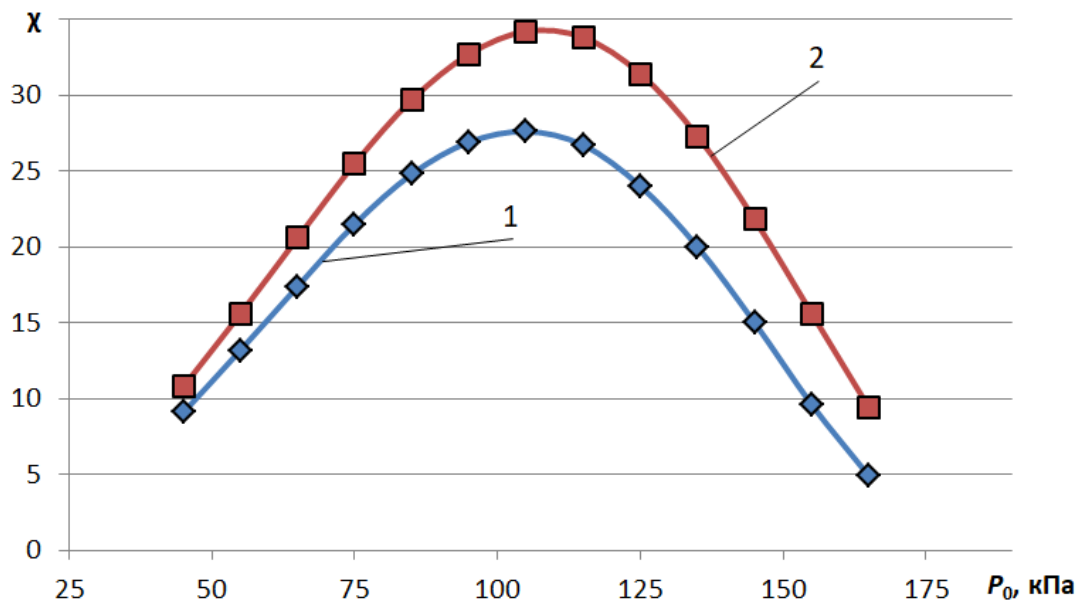
Таблица 4.3 – Критерий эрозионной активности УЗО растворов эластомерных нанокомпозитов χ при изменении гидростатического давления и постоянной мощности озвучивания $W = 55Вт$

№ п/п	Гидростатическое давление P_o , Па	Значения критерия эрозионной активности χ при УЗО мощностью $W=55Вт$	
		Состав №1	Состав №2
1	45000	9,1	10,8
2	55000	13,2	15,6
3	65000	17,4	20,6
4	75000	21,5	25,5
5	85000	24,8	29,7
6	95000	26,9	32,7
7	105000	27,6	34,2
8	115000	26,7	33,8
9	125000	24,0	31,4
10	135000	20,0	27,3
11	145000	15,0	21,8
12	155000	9,6	15,6
13	165000	4,9	9,4

Нормальное атмосферное давления принимают равным 760 мм ртутного столба, или 101325 Па (101 кПа).

С повышением гидростатического давления до значения $P_o = 105 \text{ кПа}$ критерий эрозионной активности увеличивается и по достижении экстремума уменьшается (рисунок 4.8). Состав №1 имеет максимум критерия эрозионной активности $\chi = 27,6$ при значении гидростатического давления $P_o = 105 \text{ кПа}$. Поэтому в нормальных условиях критерий эрозионной активности χ при УЗО обоих составов будет иметь наибольшие значения.

Значения критерия эрозионной активности χ у состава №2 ожидаемо выше. Это объясняется тем, что у состава №2, в сравнении с составом №1, коэффициент адиабатической сжимаемости β_{ad} меньше и, поэтому величина χ больше. Обе зависимости имеют экстремумы при значении гидростатического давления $P_o = 105 \text{ кПа}$: $\chi = 27,6$ и $34,2$ для составов №1 и №2, соответственно. Критерий эрозионной активности состава №2 превышает аналогичный параметр в 1,24 раза.



1 – Состав №1; 2 – Состав №2

Рисунок 4.8 – Зависимость критерия эрозионной активности χ при УЗО растворов эластомерных нанокомпозитов от гидростатического давления P_o

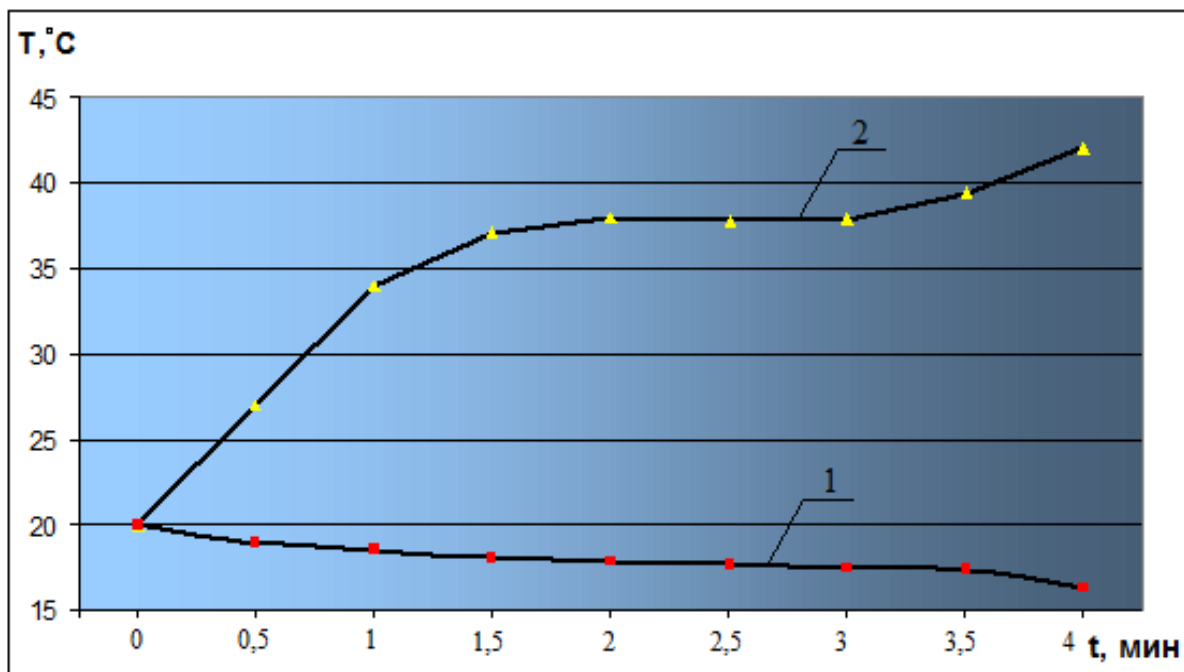
4.1.1.4 Дегазация растворов эластомерных нанокомпозитов при ультразвуковой обработке и ручном механическом смешении

На дегазацию раствора эластомерного нанокомпозита существенное влияние оказывает его температура. В процессе УЗО раствора эластомерного нанокомпозита в последнем возникает кавитация. При захлопывании полостей в микрообъемах возникают высокие давления до 100 МПа, а температура повышается до 1000°C [261, 262]. По этой причине температура раствора повышается. Например, для эластомерных микрокомпозитов: от 20 до 53,8°C [92]. С увеличением температуры уменьшается квазиравновесная концентрация C_p' , то есть снижается концентрация пузырьков газа в эластомерном растворе, в сравнении с нормальной температурой.

В таблице 4.4 показано изменение температуры T раствора нанокомпозита состава №1 с течением времени t смешения УЗО и ручным механическим способом. В первые две минуты УЗО температура раствора эластомерного нанокомпозита повышается наиболее интенсивно с 20 до 38°C (рисунок 4.9).

Таблица 4.4 – Изменение температуры T раствора нанокомпозита состава №2 с течением времени t смешения

№ п/п	Время обработки нанокомпозита, мин	Температура раствора нанокомпозита при УЗО, °С	Температура раствора нанокомпозита при ручном смешении, °С
1	0	20	20
2	0,5	27	18,9
3	1	33,9	18,6
4	1,5	37,1	18,1
5	2	38	17,9
6	2,5	37,8	17,7
7	3	37,9	17,5
8	3,5	39,4	17,4
9	4	42	16,3



1 – ручное механическое смешение; 2 – УЗ обработка

Рисунок 4.9 – Изменение температуры T раствора нанокompозита состава №1 с течением времени t смешения

Затем имеет место стабилизация температуры в течение 1,5 минут и, по достижении 3,5 мин наблюдается резкое повышение температуры раствора эластомерного нанокompозита до 42°C.

В случае ручного механического смешения характер изменения температуры кардинально меняется. Наблюдается снижение температуры раствора нанокompозита с течением времени обработки. Температура раствора снижается с 20 до 16,3°C практически по линейной зависимости. Снижение температуры раствора эластомерного нанокompозита вызвано испарением ацетона и, возникшим по этой причине, холодильным эффектом [170].

В таблице 4.5 показано изменение температуры T раствора нанокompозита состава №2 с течением времени t смешения УЗО и ручным механическим способом. Зависимость изменения температуры раствора нанокompозита состава №2 от времени УЗО отличается от зависимости состава №1 и не имеет участка стабилизации значений температуры раствора (рисунок 4.10). Наиболее интенсивно температура раствора эластомерного нанокompозита повышается в течение 2,5 мин и

увеличивается от 20 до 43°C. Температура раствора состава №2 больше аналогичного параметра состава №1 в 1,14 раза или на 5°C. Затем интенсивность роста температуры раствора эластомерного нанокompозита состава №2 несколько снижается и прирост продолжается по линейной зависимости. По завершении УЗО температура раствора эластомерного нанокompозита состава №2 достигает 45°C. В сравнении с составом №1 температура раствора состава №2 на 3°C выше, т.е. в 1,07 раза. Более высокие температуры раствора эластомерного нанокompозита состава №2, в сравнении с составом №1, следует объяснить более высоким в 1,24 раза значением критерия эрозионной активности χ , более активным протеканием кавитации.

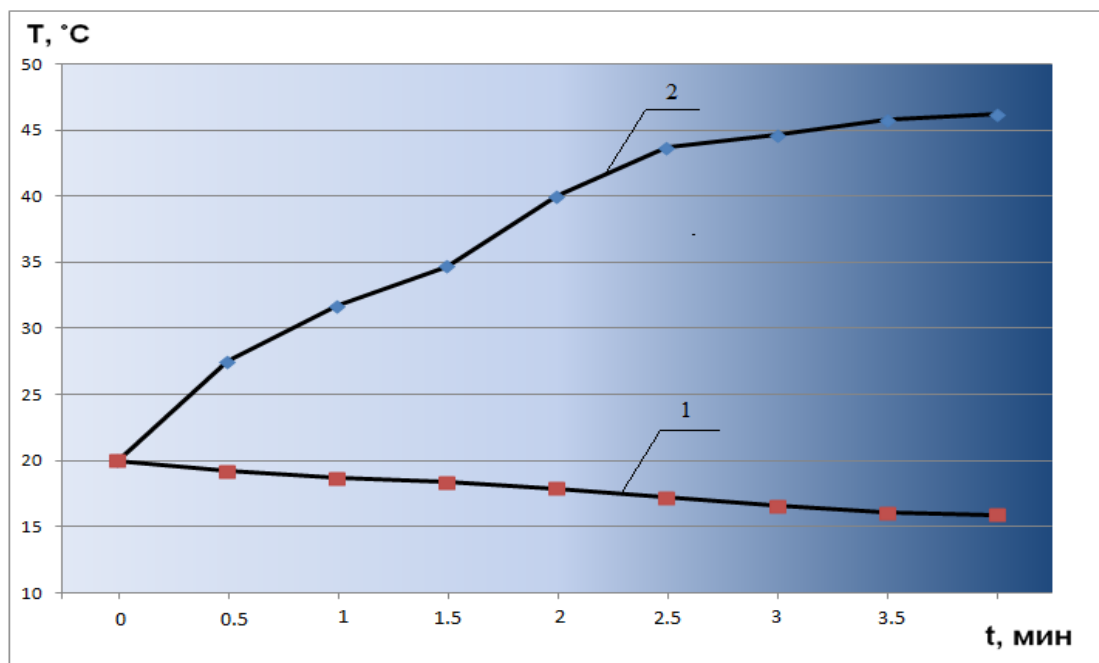
Таблица 4.5 – Изменение температуры Т раствора нанокompозита состава №2 с течением времени t смешения

№ п/п	Время обработки нанокompозита, мин	Температура раствора нанокompозита при УЗО, °С	Температура раствора нанокompозита при ручном смешении, °С
1	0	20	20
2	0,5	27	18,9
3	1	33,9	18,6
4	1,5	35,0	18,0
5	2	40	17,5
6	2,5	43	17,0
7	3	45	16,5
8	3,5	46	16,0
9	4	47	15,5

Как и для состава №1, при ручном механическом смешении температура раствора эластомерного нанокompозита состава №2 снижается с течением времени обработки примерно по линейной зависимости. В первые полторы минуты обработки температуры растворов составов №1 и №2 практически совпадают.

Однако далее в растворе состава №2, в сравнении с составом №1, наблюдается более интенсивное снижение температуры (таблица 4.5). По завершении об-

работки ручным механическим способом температура раствора эластомерного нанокompозита состава №2, в сравнении с составом №1, на $0,8^{\circ}\text{C}$ ниже, т.е. в 1,05 раза.



1 – ручное механическое смешение; 2 – УЗ обработка

Рисунок 4.10 – Изменение температуры T раствора нанокompозита состава №2 с течением времени t смешения

4.1.1.5 Изменение остаточной массы растворов эластомерных нанокompозитов при УЗО и ручном механическом смешении

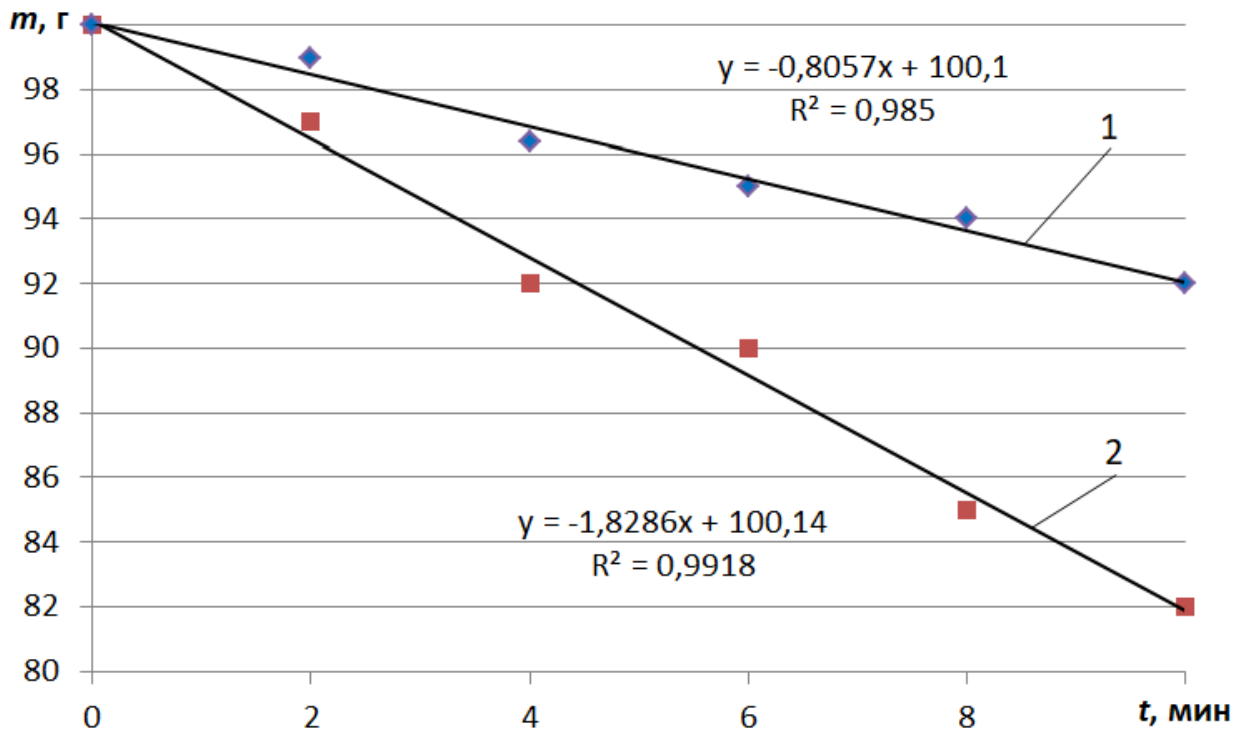
Ацетон относится к легколетучим растворителям. При УЗО и ручном механическом смешении и диспергировании пары ацетона интенсивно испаряются. Вследствие этого явления остаточная масса растворов эластомерного нанокompозита будет отличаться от исходной. Цель данного эксперимента – оценить, каким образом различные способы смешения и диспергирования влияют на значения остаточной массы растворов эластомерных нанокompозитов.

На рисунке 4.11 показаны изменения остаточной массы m раствора эластомерного нанокompозита состава №1 при увеличении времени обработки материала

ла t различными способами. Очевидно, что с увеличением количества испарившегося ацетона, уменьшается остаточная масса раствора эластомерного нанокompозита.

В первую минуту обработки испарение ацетона имеет практически одинаковые значения. Однако с увеличением времени обработки разница в испарении ацетона нарастает, о чем свидетельствуют все более отличающиеся значения остаточной массы раствора эластомерного нанокompозита после ручного смешения и УЗО. После 10 минут обработки остаточная масса раствора нанокompозита уменьшилась от 100 до 92 г после ручного механического смешения, а после УЗО – до 82 г. Таким образом, после ультразвукового смешения и диспергирования нанокompозита состава №1 количество испарившегося ацетона в 1,12 раза превышает аналогичный параметр в сравнении с ручным механическим смешением.

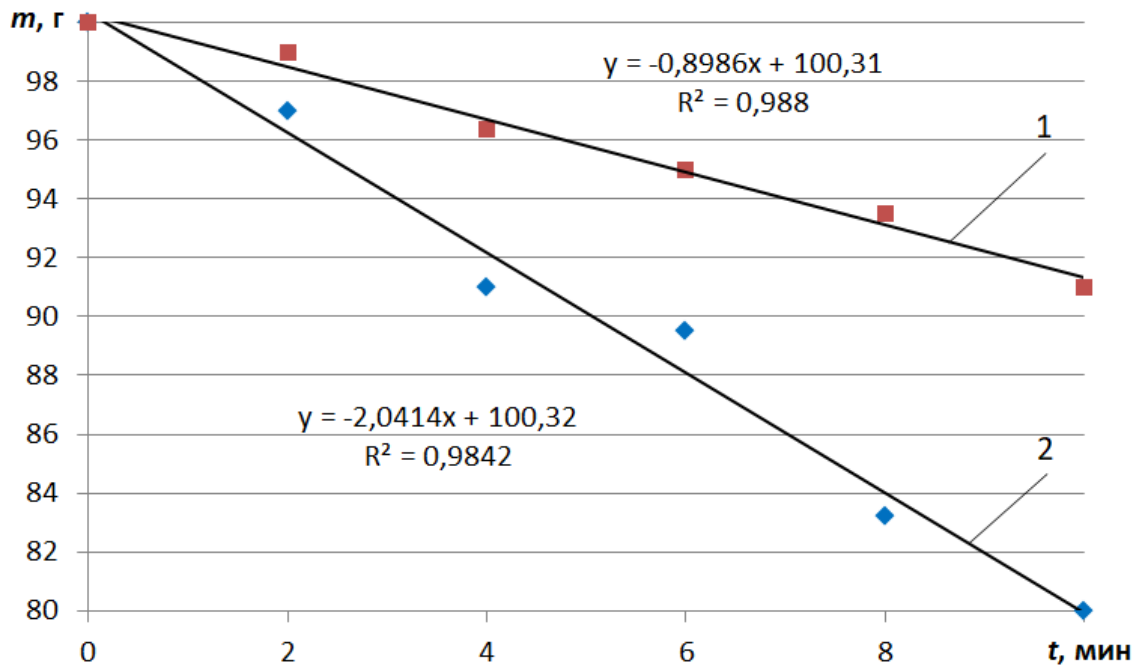
Аналогичная картина наблюдается при исследовании испарения ацетона в растворе нанокompозита состава №2 в ходе обработки различными способами.



1 – ручное механическое смешение; 2 – ультразвуковая обработка

Рисунок 4.11 – Изменения остаточной массы m раствора эластомерного нанокompозита состава №1 при увеличении времени обработки материала t

На рисунке 4.12 показаны изменения остаточной массы m раствора эластомерного нанокompозита состава №2 при увеличении времени обработки материала t ручным, механическим способом и ультразвуковой обработкой.



1 – ручное механическое смешение; 2 – ультразвуковая обработка

Рисунок 4.12 – Изменения остаточной массы m раствора эластомерного нанокompозита состава №2 при увеличении времени обработки материала t

В начальный период обработки испарение ацетона имеет практически одинаковые значения. Однако с увеличением времени обработки разница в испарении ацетона нарастает, о чем свидетельствуют все более отличающиеся значения остаточной массы раствора эластомерного нанокompозита после ручного смешения и УЗО. После 10 минут обработки остаточная масса раствора нанокompозита уменьшилась от 100 до 91 г после ручного механического смешения, а после УЗО – до 80 г. Меньшие значения остаточной массы раствора эластомерного нанокompозита состава №2, в сравнении с составом №1, можно объяснить, как и ранее, более высоким значением критерия эрозионной активности. Поэтому, после ультразвукового смешения и диспергирования нанокompозита состава №2 количество испарившегося ацетона в 1,13 раза превышает аналогичный параметр в срав-

нении с ручным механическим смешением.

Выводы

1. При ультразвуковом диспергировании температура раствора эластомерного нанокompозита состава №2 достигает 45°C. В сравнении с составом №1 температура раствора состава №2 на 3°C выше, т.е. в 1,07 раза. Более высокую температуру раствора состава №2, в сравнении с составом №1, следует объяснить более высоким в 1,24 раза значением критерия эрозионной активности χ , более активным протеканием кавитации.

2. После ультразвукового диспергирования количество испарившегося ацетона в составах №1 и №2 превышает аналогичный параметр, в сравнении с ручным механическим смешением, в 1,12 и 1,13 раза соответственно.

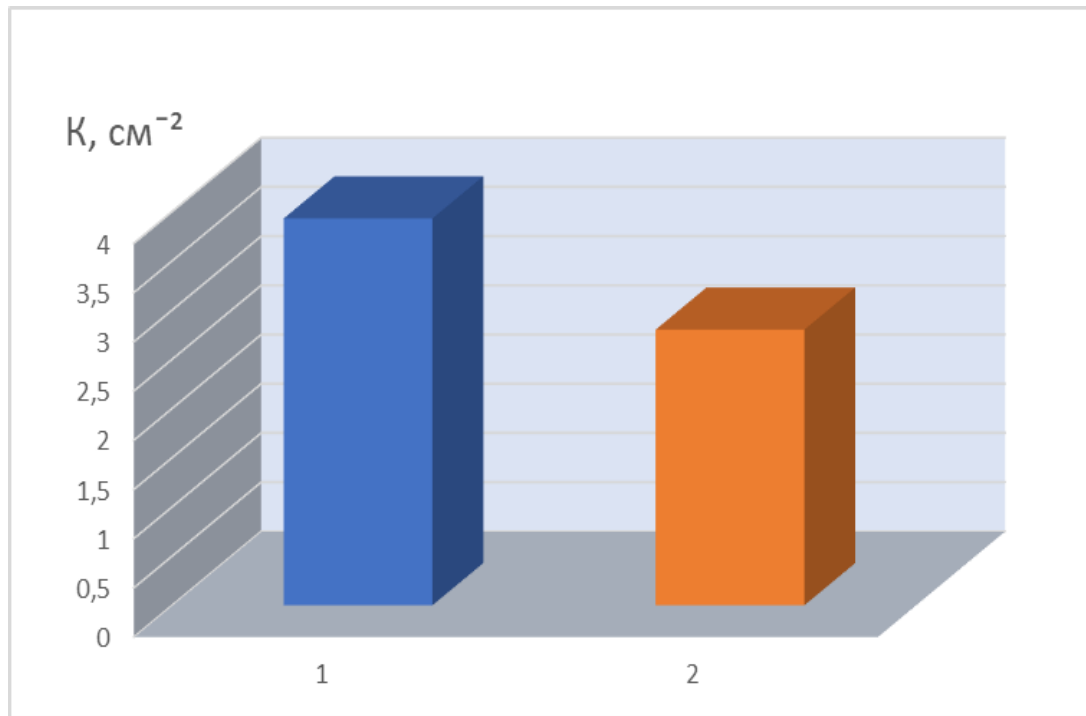
3. Определен режим УЗО эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2: мощность озвучивания $N = 55$ Вт; рациональное время УЗО растворов нанокompозитов, обеспечивающее наиболее высокое качество смешения и диспергирования, составляет $t = 6$ мин.

4.1.1.6 Качество покрытий из эластомерных нанокompозитов после УЗО

Дефекты в полимерном покрытии в значительной мере определяют его долговечность при эксплуатации. Поры и микротрещины под воздействием статических и динамических нагрузок на покрытие начинают прорастать в трещины и могут в дальнейшем привести к разрушению материала. В эластомерных покрытиях поры являются основным дефектом, который возникает при испарении паров ацетона в ходе отверждения материала. Чтобы уменьшить пористость, покрытие наносят послойно, просушивая каждый слой 10 мин при нормальной температуре. Однако полностью исключить пористость невозможно.

Ультразвуковая обработка раствора микрокомпозита на основе эластомера Ф-40 показала, в сравнении с ручным смешением, существенное снижение дефектности покрытия: площадь разрушенного покрытия уменьшилась до 1,28 раза. Количество пор в покрытии снизилось на 30 % [263].

На рисунках 4.13 и 4.14 показана дефектность покрытий состава №1 после ручного смешения и УЗО. Площадь разрушенного покрытия после ручного смешения составляет 25%. В покрытии после УЗО аналогичный параметр дефектности уменьшился в 1,25 раза, до 20%, средний диаметр пор без УЗО – $d = 0,21$ мм, после УЗО – $0,14$ мм

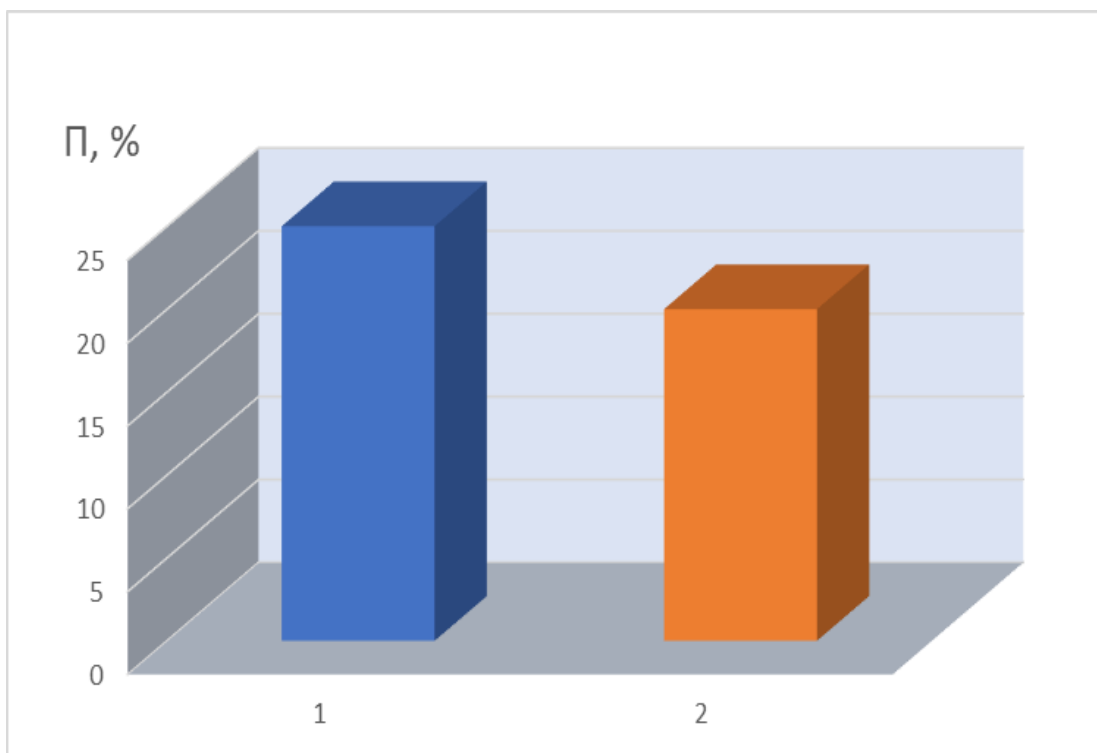


1 – ручное смешение; 2 – после ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.13 – Концентрация пузырьков в покрытиях эластомерного нанокompозита состава №1

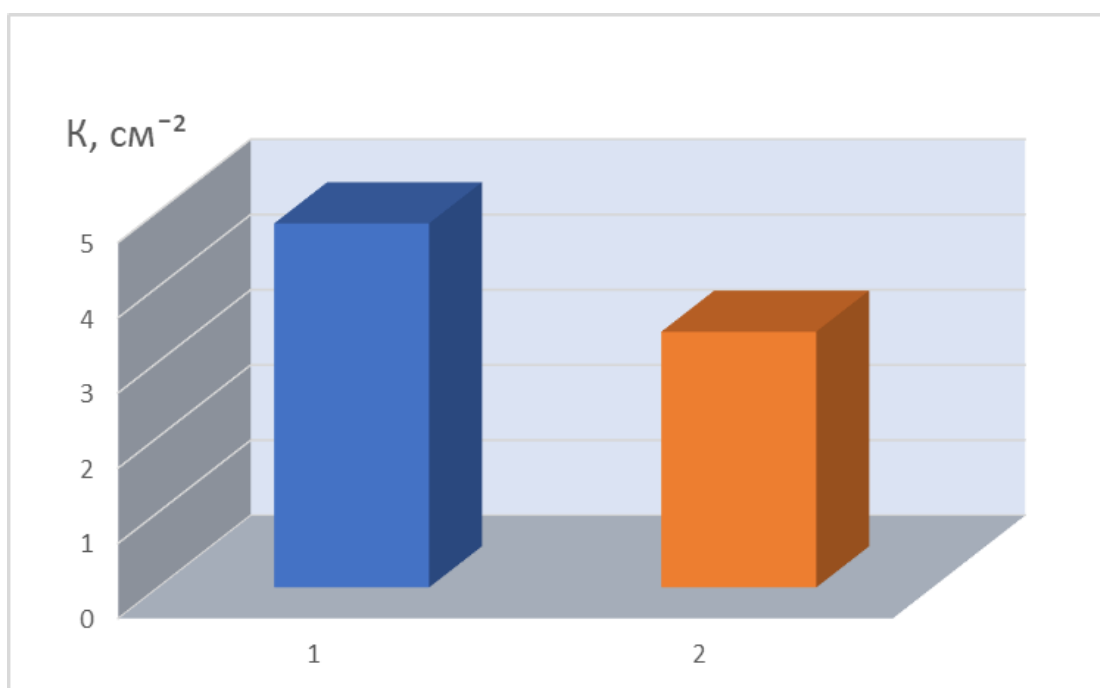
Концентрация пор (количество пузырьков на 1 cm^2) в покрытиях состава №1 после ручного смешения составляет 3,93. В покрытии после УЗО аналогичный параметр дефектности уменьшился в 1,4 раза, до 2,8.

На рисунках 4.15 и 4.16 показана дефектность покрытий состава №2 после ручного смешения и УЗО. Площадь разрушенного покрытия после ручного смешения составляет 35%. В покрытии после УЗО аналогичный параметр дефектности уменьшился в 1,4 раза, до 25%, средний диаметр пор без УЗО составляет $d = 0,19$ мм, после УЗО – $0,11$ мм.



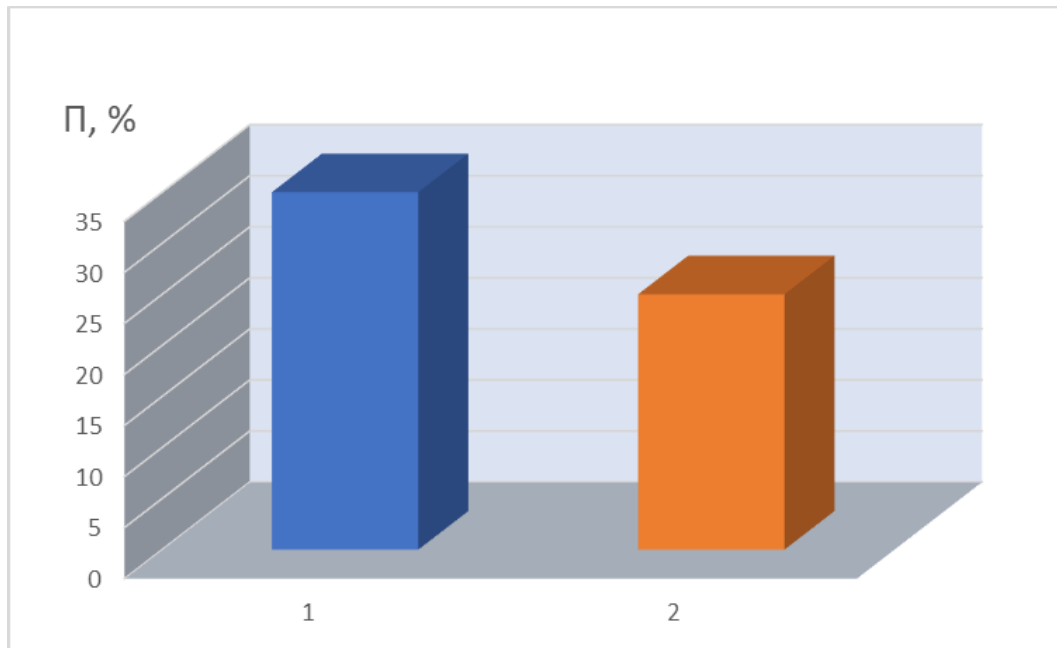
1 – ручное смешение; 2 – после ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.14 – Площадь разрушенного покрытия в покрытиях эластомерно-го нанокompозита состава №1



1 – ручное смешение; 2 – после ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.15 – Концентрация пузырьков в покрытиях эластомерного нанокompозита состава №2



1 – ручное смешение; 2 – после ультразвукового диспергирования

Рисунок 4.16 – Площадь разрушенного покрытия в покрытиях эластомерного нанокompозита состава №2

Концентрация пор (количество пузырьков на 1 см^2) в покрытиях состава №2 после ручного смешения составляет 4,84. В покрытии после УЗО аналогичный параметр дефектности уменьшился в 1,42 раза, до 3,4.

Вывод

Ультразвуковая обработка растворов эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2, в сравнении с ручным смешением, значительно снижает дефектность и повышает качество полимерных покрытий: размер пор уменьшается до 1,4 раза, площадь разрушенного покрытия уменьшается до 1,4 раза, а концентрация пор снижается до 1,42 раза.

4.1.1.7 Исследование структуры и элементного состава эластомерных нанокompозитов после УЗО

Структура и элементный состав нанокompозита состава №1 после УЗО

На начальном этапе исследовали размеры агрегатов наночастиц и элементный состав образцов нанокompозита состава №1 после ручного смешения и ультразвукового диспергирования.

Состав №1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч, алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч.

На рисунке 4.17 показано электронное фото структуры образца состава №1 после ручного смешения. На фото видны два агрегата из наночастиц размерами 80,29 и 12,34 мкм. Размеры агрегатов различаются в 6,5 раза.

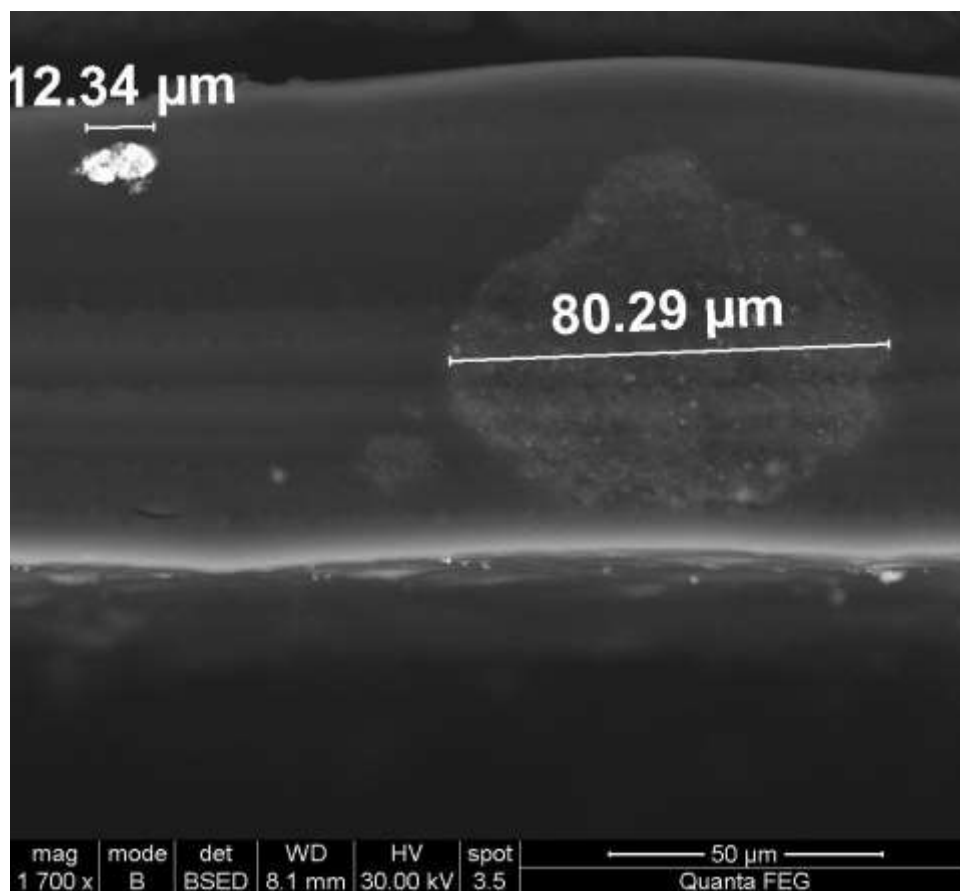


Рисунок 4.17 – Электронное фото и размеры агрегатов алюминиевых наночастиц в нанокompозите состава №1 после ручного смешения

Электронное фото структуры образца состава №1 после УЗО показано на рисунке 4.18. На фото видны два агрегата из наночастиц размерами 22,32 и 26,67 мкм. Ультразвуковое диспергирование, по сравнению с ручным смешением, обеспечивает многократное до 3,6 раза уменьшение размеров агрегатов и вырав-

нивание их по размерам. Размеры агрегатов различаются не значительно – на 16,3%.

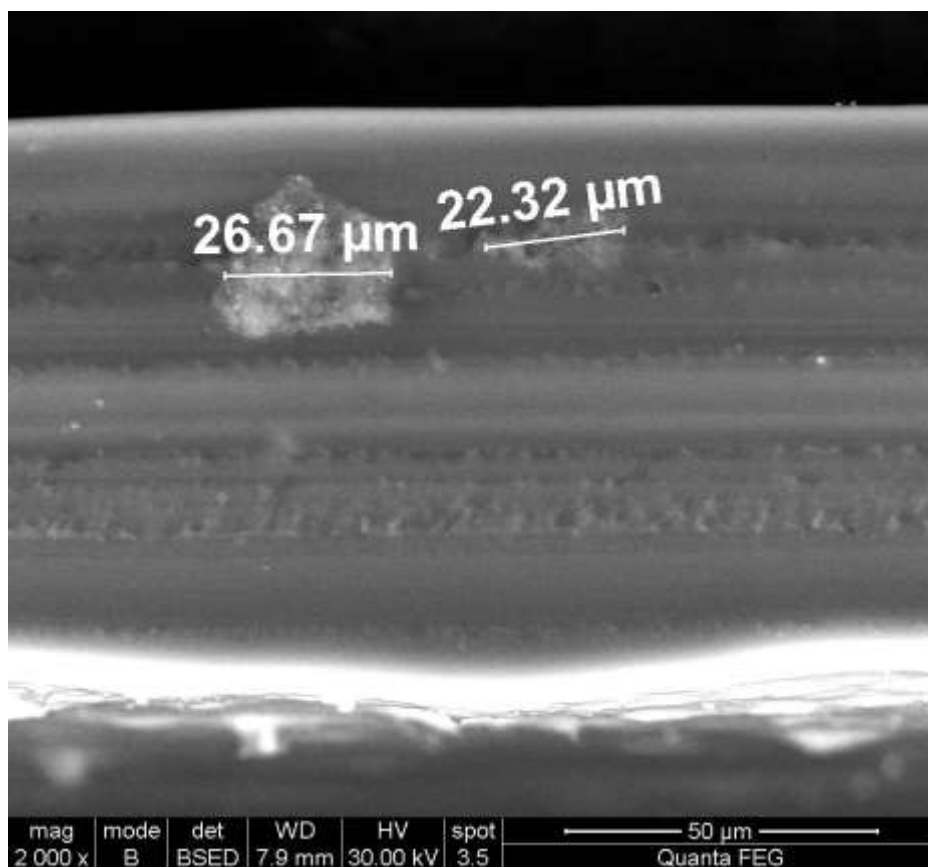


Рисунок 4.18 – Электронное фото и размеры агрегатов алюминиевых наночастиц в нанокompозите состава №1 после УЗО

На рисунке 4.19 показан элементный состав эластомерного нанокompозита состава №1 в области вне агрегата наночастиц «Area 1» и участка агрегата наночастиц «Area 2». «Area 1» представляет собой область композита вне агрегата наночастиц и из таблицы на рисунке 4.19 следует, что она содержит углерод в весовом количестве 98,02% и медь – 1,98%.

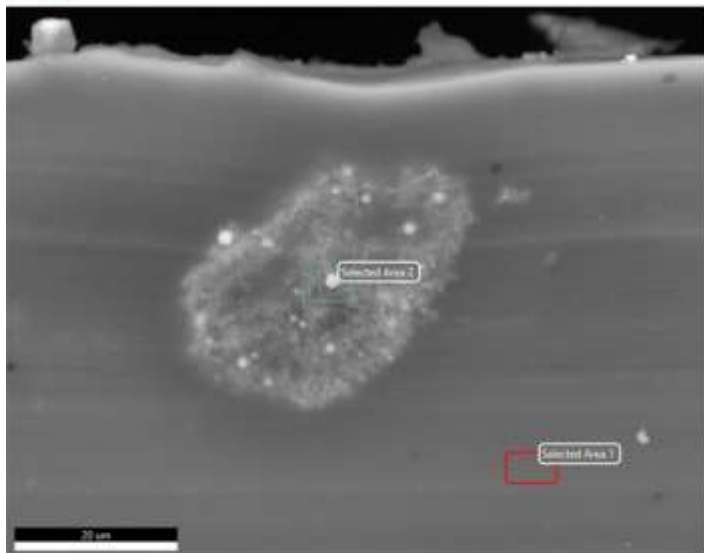
Несмотря на то, что в состав нанокompозита наночастицы меди не включали, ее наличие в элементном составе объясняется особенностями устройства растрового электронного микроскопа «Quanta 600 FEG». Наличие меди вызвано рассеянием электронов на медную часть BSE-детектора, вследствие низкой проводимости образца и скопления заряда на его поверхности (т.е. это фон от детектора).

EDAX APEX

Novikov Contr

Author: User Apex
 Creation: 1/15/2022 4:04:32 AM
 Sample Name: MG-L

MG-L



eZAF Quant Result

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
Novikov Contr MG-L +Al Selected Area 1				
C K	98.02	0.08	99.62	9.78
Cu K	1.98	0.02	0.38	3.01
Novikov Contr MG-L +Al Selected Area 2				
C K	77.87	0.18	86.05	10.39
O K	11.20	0.13	9.29	11.69
Al K	8.40	0.01	4.13	6.80
Cu K	2.53	0.02	0.53	2.54

Spectrum Overlay

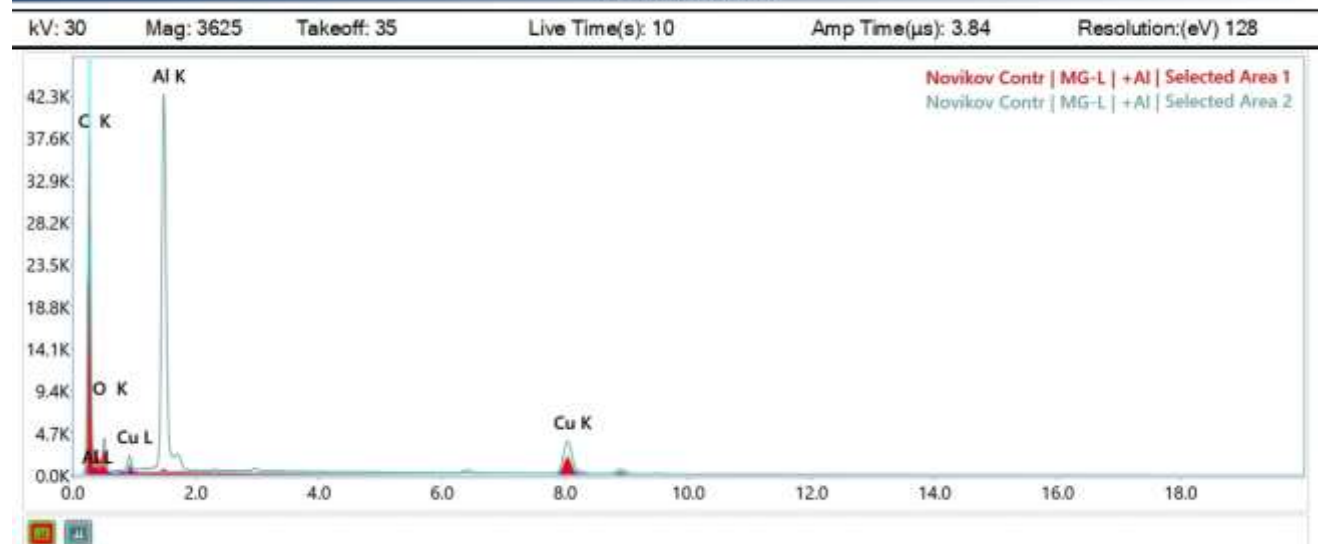


Рисунок 4.19 – Элементный состав эластомерного нанокompозита состава №1 с алюминиевыми наночастицами

«Area 2» представляет собой участок агрегата наночастиц и из таблицы на рисунке 4.19 следует, что он содержит алюминия в весовом количестве 8,4%, уг-

лерода 77,87%, кислорода 11,2% и меди – 2,53%. Таким образом агрегат имеет неоднородный состав, в котором наибольшую массу составляют углерод, далее следуют кислород и алюминий. Причины наличия минимального количества меди в агрегате были описаны выше.

Электронное фото участков образца из нанокompозита состава №1 после УЗО показаны на рисунке 4.20. На рисунке 4.20, а) показан участок «Area 1» представляющий область композита вне агрегата наночастиц. Участок представляет собой относительно однородную матрицу из частиц углерода с вкраплениями частиц меди.

Участок «Area 2» представляет собой участок агрегата наночастиц, который показан на рисунке 4.20, б). Агрегат имеет более рыхлую, неоднородную структуру в которой превалирует углерод и кислород с вкраплениями частиц алюминия и меди.

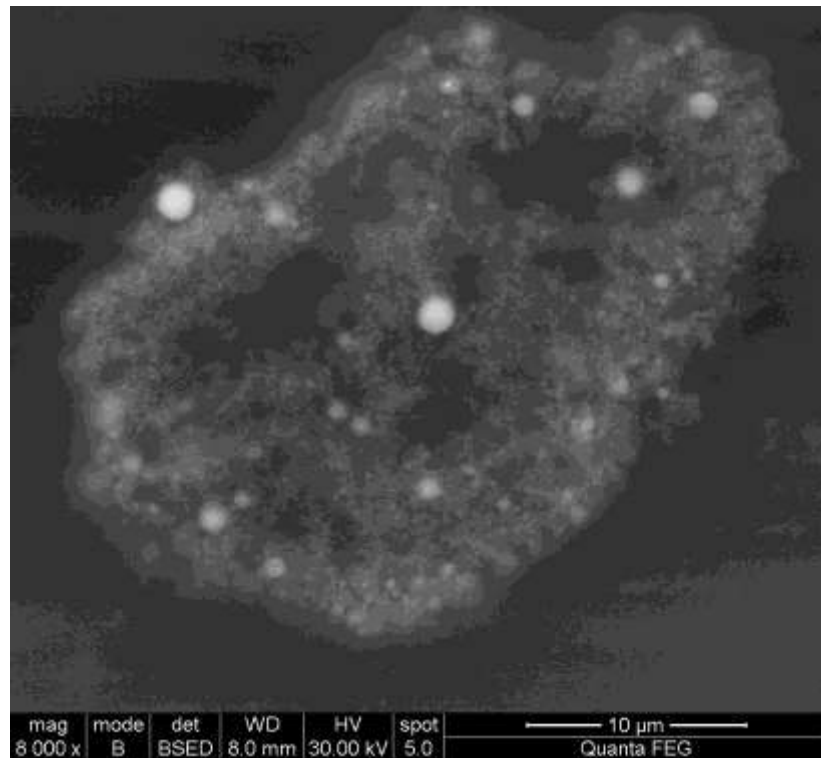
Структура и элементный состав нанокompозита состава №2 после УЗО

На следующем этапе исследовали размеры агрегатов наночастиц и элементный состав образцов нанокompозита состава №2 после ручного смешения и ультразвукового диспергирования.

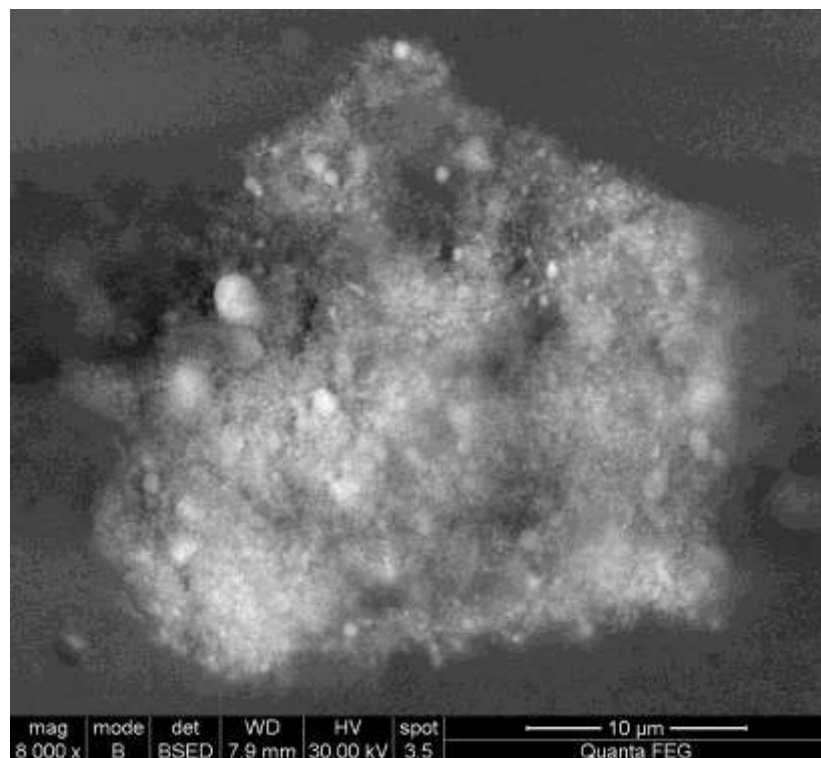
Состав №2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,09 масс.ч.; медный нанопорошок – 0,03 масс.ч.

На рисунке 4.21 показано электронное фото структуры образца состава №1 после ручного смешения. На фото виден агрегат из наночастиц размером 138,21 мкм.

Электронное фото структуры образца состава №1 после УЗО показано на рисунке 4.22. На фото виден агрегат из наночастиц размером 67,33 мкм. Ультразвуковое диспергирование, по сравнению с ручным смешением, обеспечивает многократное до 2,05 раза уменьшение размеров агрегатов. Большие значения размеров агрегатов, по сравнению с агрегатами состава №1, можно объяснить более высоким содержанием наночастиц в составе №2.



а)



б)

а) участок Area 1; б) участок Area 2 (агрегат наночастиц)

Рисунок 4.20 – Электронное фото образца из нанокompозита состава №1 после УЗО к рисунку 4.19

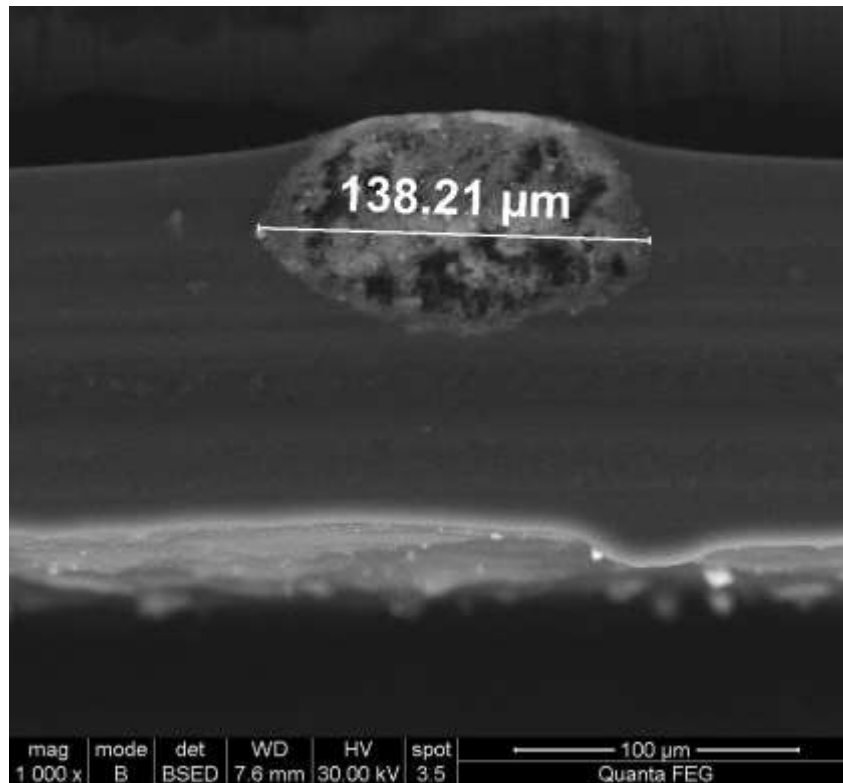


Рисунок 4.21 – Электронное фото и размер агрегата алюминиевых и медных наночастиц в нанокompозите состава №2 после ручного смешения

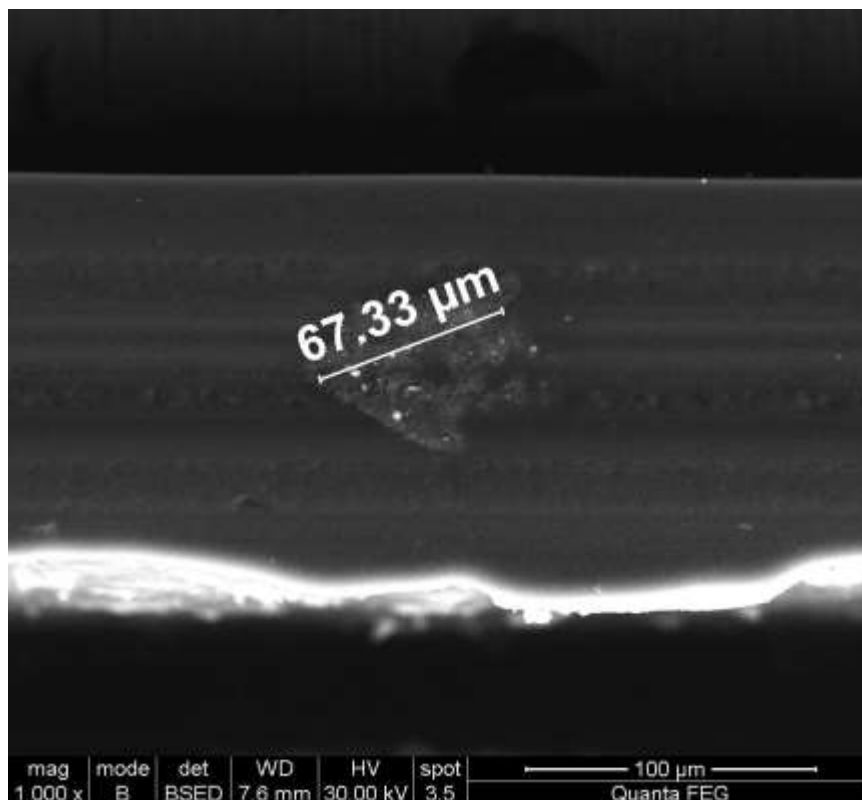


Рисунок 4.22 – Электронное фото и размеры агрегата алюминиевых и медных наночастиц в нанокompозите состава №2 после УЗО

На рисунке 4.23 показан элементный состав эластомерного нанокompозита состава №2 в области вне агрегата наночастиц «Area 1» и участка агрегата наночастиц «Area 2». «Area 1» представляет собой область композита вне агрегата наночастиц и из таблицы на рисунке 4.23 следует, что она содержит углерод в весовом количестве 97,7% и медь – 2,3%.

«Area 2» представляет собой участок агрегата наночастиц и из таблицы на рисунке 4.23 следует, что он содержит алюминия в весовом количестве 13,28%, углерода 73,89%, кислорода 9,52% и меди – 3,31%. Таким образом, агрегат имеет неоднородный состав, в котором наибольшую массу составляют углерод, далее следуют алюминий и кислород, и наименьшее количество приходится на медь.

Электронное фото участков образца из нанокompозита состава №1 после УЗО показаны на рисунке 4.24. На рисунке 4.24, а) показан участок «Area 1» представляющий область композита вне агрегата наночастиц. Участок представляет собой относительно однородную матрицу из частиц углерода с вкраплениями частиц меди.

Участок «Area 2» представляет собой участок агрегата наночастиц, который показан на рисунке 4.24, б). Агрегат имеет более рыхлую, неоднородную структуру в которой превалирует углерод с вкраплениями частиц алюминия и меди.

Выводы

1. С повышением содержания наполнителей в составе нанокompозитов размеры агрегатов наночастиц увеличиваются. Агрегат имеет рыхлую, неоднородную структуру, в которой превалирует углерод с вкраплениями частиц алюминия и меди.

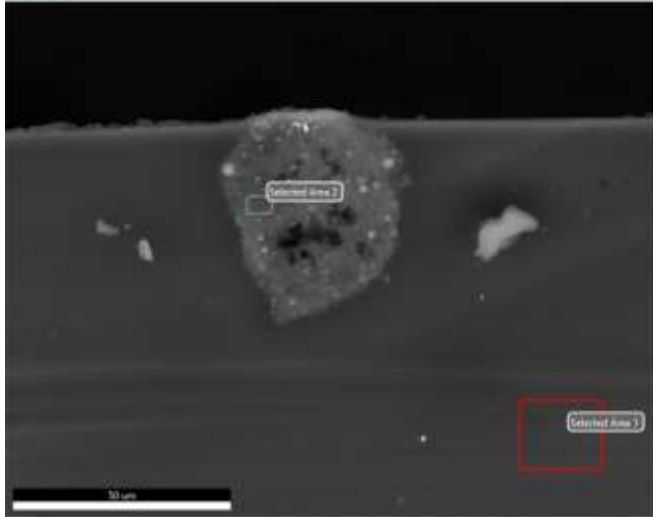
2. Ультразвуковое диспергирование, по сравнению с ручным смешением, обеспечивает многократное от 2,05 до 3,6 раза уменьшение размеров агрегатов и выравнивание их по размерам.

EDAX APEX

Novikov Contr

Author: User Apex
 Creation: 1/15/2022 4:01:43 AM
 Sample Name: MG-L

MG-L



eZAF Quant Result

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
Novikov Contr MG-L +Al, Cu Selected Area 1				
C K	97.70	0.10	99.56	9.82
Cu K	2.30	0.03	0.44	3.01
Novikov Contr MG-L +Al, Cu Selected Area 2				
C K	73.89	0.24	84.38	10.64
O K	9.52	0.14	8.16	11.92
Al K	13.28	0.02	6.75	6.86
Cu K	3.31	0.03	0.71	2.51

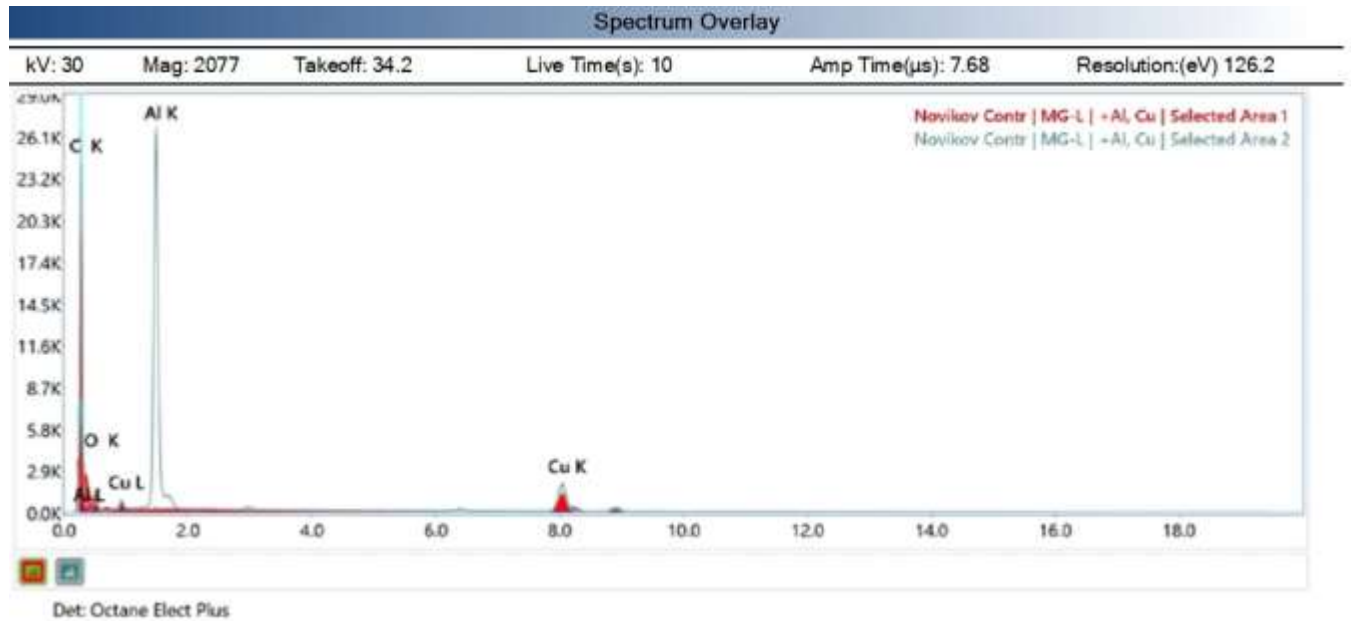
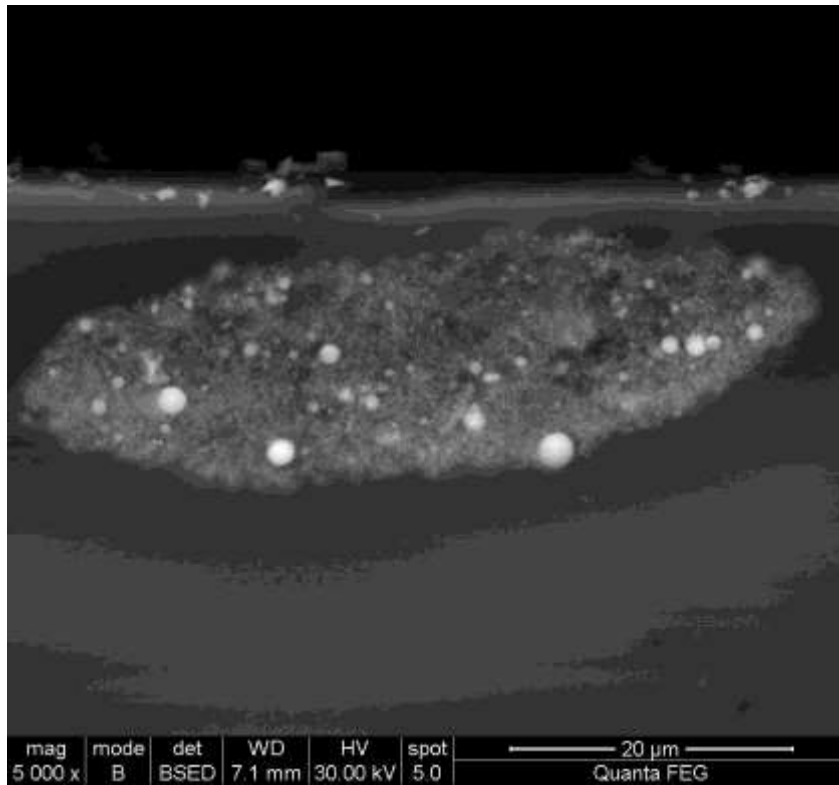
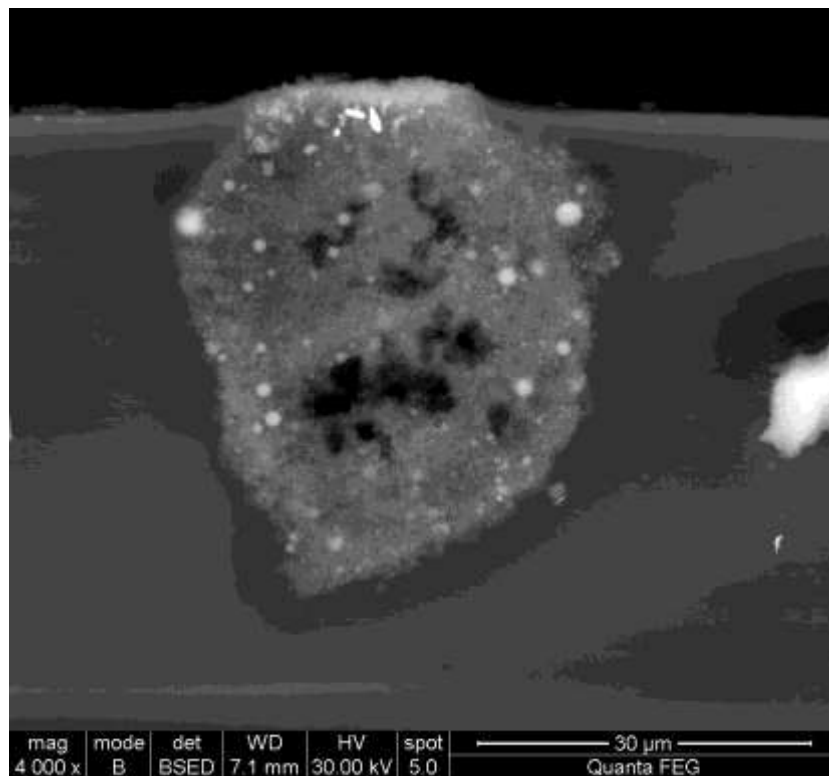


Рисунок 4.23 – Элементный состав эластомерного нанокompозита с алюминиевыми и медными наночастицам



а)



б)

а) участок Area 1; б) участок Area 2 (агрегат наночастиц)

Рисунок 4.24 – Электронное фото образца из нанокompозита состава №2 после УЗО к рисунку 4.23

4.1.2 Исследование эффективности смешения и диспергирования раствора нанокompозита на основе анаэробного герметика Анатерм 111 механизированным способом

В виду того, что нанокompозиты на основе анаэробных герметиков при восстановлении посадочных мест подшипников используются в качестве адгезивов для образования клеевых соединений «вал-подшипник», вопросы пористости при дегазации растворов таких нанокompозитов не столь актуальны. Приоритетным технологическим вопросом является обеспечение равномерного распределения металлических наночастиц в объеме полимерной матрицы и предотвращение агрегирования частиц наполнителя. В виду относительно высокой стоимости анаэробных герметиков и не большого расхода материалов при восстановлении (предельно допустимый диаметральный износ в сопряжении «вал-подшипник» для восстановления не больше 0,1 – 0,12 мм) с одной стороны, и объема выпускаемых промышленностью ультразвуковых ванн не менее 0,5 л с другой, использование для анаэробных нанокompозитов УЗО экономически не выгодно, т.к. будет иметь место большое количество не израсходованного материала.

По этой причине проведены исследования возможности механизированного смешения и диспергирования анаэробных нанокompозитов. Состав нанокompозита: анаэробный герметик АН-111 – 100 масс. ч., НРЧ алюминия – 1,0 масс. ч., НРЧ меди – 0,25 масс. ч. [264]. В качестве оценочного параметра качества смешения и диспергирования раствора анаэробного нанокompозита механизированным способом приняли вязкость материала. Чем больше эта величина, тем более равномерно распределены частицы наполнителя в объеме раствора эластомера [91, 94]. В качестве переменных факторов: время обработки t и частоту вращения рабочего органа мешалки n . На рисунке 4.25 показана зависимость вязкости η раствора нанокompозита на основе герметика АН-111 от времени механизированной обработки t при частоте вращения $n = 1100 \text{ мин}^{-1}$. Значения вязкости увеличиваются в 1,5 раза с 3,86 до 5,77 Па*с. При данной скорости временем механизированной обработки следует принять $t = 5 \text{ мин}$.

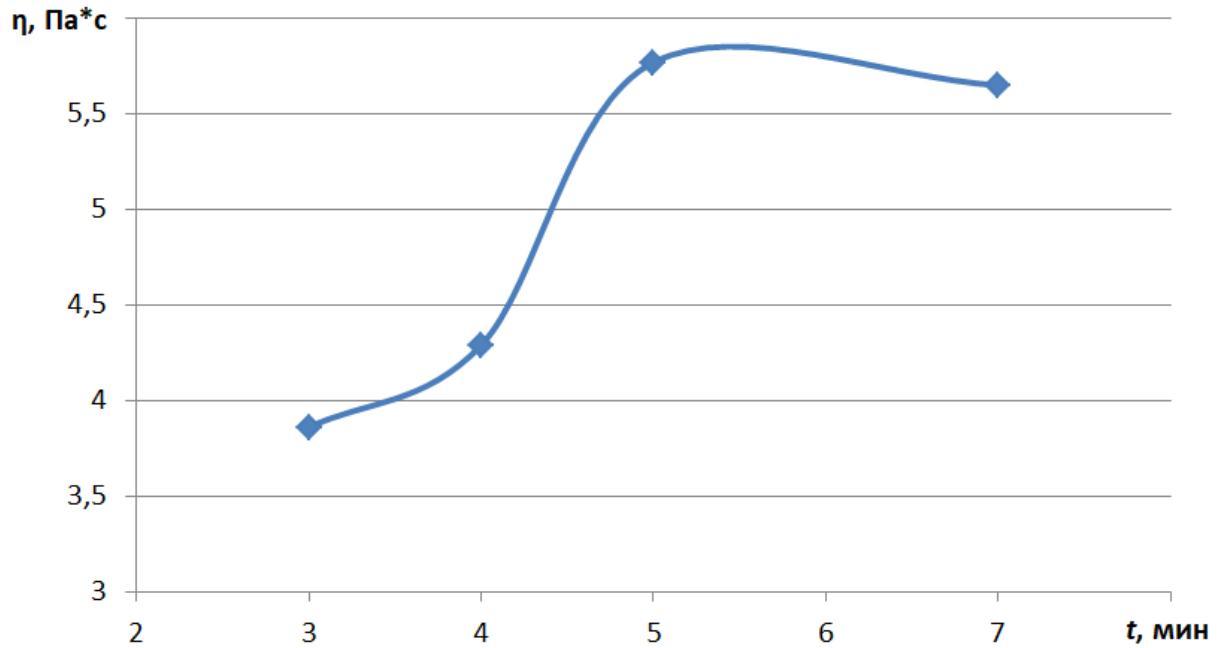


Рисунок 4.25 – Зависимость вязкости η раствора нанокompозита на основе Анатерм 111 от времени механизированной обработки t ($n = 1100 \text{ мин}^{-1}$)

Увеличение частоты вращения рабочего органа с 1100 до 1490 мин^{-1} позволяет уменьшить время обработки материала в $1,67$ раза, с 5 до 3 мин (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Изменение вязкости анаэробного нанокompозита при механизированной обработке

№ п/п	Время обработки композиции, мин t	1-я скорость, 1100 мин^{-1}		5-я скорость, 1490 мин^{-1}	
		Кинематическая вязкость V , $\text{мм}^2/\text{с}$	Динамическая вязкость η , $\text{Па}^*\text{с}$	Кинематическая вязкость V , $\text{мм}^2/\text{с}$	Динамическая вязкость η , $\text{Па}^*\text{с}$
1	3	3454	3,86	4605	5,15
2	4	3838	4,29	-	-
3	5	5165	5,77	-	-
4	7	5055	5,65	-	-

Поэтому при изготовлении нанокompозита на основе герметика АН-111 рекомендуется следующий режим механизированной обработки: частота вращения рабочего органа $n = 1490 \text{ мин}^{-1}$, время обработки материала $t = 3$ мин.

Плотность чистого АН – 111 = 1105 кг/м³, плотность наполненного АН – 111: 100 м.ч. АН – 111, 1 м.ч. Al, 0,25 м.ч. Cu = 1118 кг/м³.

4.2 Математические модели инфракрасного нагрева корпусных деталей с полимерными покрытиями

4.2.1 Математическая модель инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей

Цель настоящих исследований – разработать модель инфракрасного нагрева корпусных деталей типа II (подшипниковые щиты электродвигателей), проверить экспериментально адекватность полученной математической модели (исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Липецкой области в рамках научного проекта №19-48-480008/19).

Модель инфракрасного нагрева корпусных деталей типа II

Уравнение баланса мощности инфракрасного излучения при нагреве тела в произвольный момент времени можно записать в виде

$$q_{изл} = q_1 + q_2 + q_3, \quad (4.7)$$

где $q_{изл}$ – мощность инфракрасного излучения, полученная телом от излучателя; q_1 – мощность, отдаваемая на лучеиспускание нагретым телом; q_2 – мощность, отдаваемая телом при свободном конвективном теплообмене с внешней средой в условиях неограниченного пространства; q_3 – мощность, расходуемая на нагрев тела.

В соответствии с законом Стефана-Больцмана для серого тела величину q_1 можно определить по формуле [265]

$$q_1 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F, \quad (4.8)$$

где ε – Степень черноты серого тела, для чугуна $\varepsilon=0,60\dots0,70$; C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $C_0=5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$; T – абсолютная температура тела, °К; F – площадь поверхности тела, м².

В соответствии с законом Ньютона-Рихмана величину q_2 можно рассчитать по формуле

$$q_2 = k(T - T_0)F, \quad (4.9)$$

где k – коэффициент теплоотдачи при свободной конвенции, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$; T_0 – температура окружающей среды, К.

Мощность, расходуемую на нагрев тела q_3 можно определить по известной зависимости [175]

$$q_3 = C_v m \frac{dT}{d\tau}, \quad (4.10)$$

где C_v – изохорная теплоёмкость тела, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; m – масса тела, кг; $\frac{dT}{d\tau}$ – скорость роста температуры тела; τ – время.

После подстановки (4.8)...(4.10) в формулу (4.6) получили выражение

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F + k(T - T_0)F + C_v m \frac{dT}{d\tau}. \quad (4.11)$$

Так как поглощаемая деталью мощность излучения постоянна $q_{изл} = const$, то дифференциал $dq_{изл} = 0$ и, следовательно

$$dq_1 + dq_2 + dq_3 = 0.$$

Находим соответствующие дифференциалы

$$dq_1 = \left(\varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F \right)_{\tau} d\tau = \varepsilon C_0 \times 4 \left(\frac{T}{100} \right)^3 \frac{1}{100} \dot{T} F d\tau = \frac{\varepsilon C_0 F}{25} \left(\frac{T}{100} \right)^3 \dot{T} d\tau,$$

$$\dot{T} = \frac{dT}{d\tau},$$

$$dq_2 = (k(T - T_0)F)_{\tau} d\tau = kF\dot{T}d\tau,$$

$$dq_3 = \left(C_v m \frac{dT}{d\tau} \right)_{\tau} d\tau = C_v m \frac{d^2 T}{d\tau^2} d\tau = C_v m \ddot{T} d\tau.$$

В итоге получили выражение

$$C_v m \ddot{T} = -kF\dot{T}d\tau - \frac{\varepsilon C_0 F}{25} \left(\frac{T}{100} \right)^3 \dot{T} d\tau. \quad (4.12)$$

Для заданных неизменных условий процесса нагрева вводим обозначение константы нагревания

$$H = \frac{C_v m}{kF + \frac{\varepsilon C_0 F}{25} \left(\frac{T}{100} \right)^3} = const. \quad (4.13)$$

После подстановки выражения (4.13) в формулу (4.12) получили

$$\begin{aligned}
 -H \times \ddot{T} &= \dot{T}, \\
 \ddot{T} &= \frac{\dot{T}}{-H}.
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

Для понижения порядка дифференциального уравнения (4.14) вводим переменную $z = \dot{T}$.

Тогда

$$\begin{aligned}
 \frac{dz}{d\tau} &= -\frac{z}{H}, & \int_{z_0}^z \frac{dz}{z} &= -\frac{1}{H} \int_0^\tau d\tau, & \ln(z) - \ln(z_0) &= -\frac{\tau}{H}, \\
 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) &= -\frac{\tau}{H}, & \frac{z}{z_0} &= \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right), & z &= z_0 \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right).
 \end{aligned}$$

В итоге

$$\dot{T} = \dot{T}_0 \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right),
 \tag{4.15}$$

где \dot{T} – скорость роста температуры тела; \dot{T}_0 – скорость роста температуры тела в начальный момент времени.

Для получения зависимости температуры тела T от времени его нагрева τ проинтегрируем уравнение (4.15)

$$\begin{aligned}
 \int_{T_0}^T dT &= \int_0^\tau \dot{T}_0 \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) d\tau, \\
 T - T_0 &= \dot{T}_0 \left(-H \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) \Big|_0^\tau \right) = -\dot{T}_0 H \left(\exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) - 1 \right), \\
 T - T_0 &= \dot{T}_0 H \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) \right).
 \end{aligned}$$

В итоге получили зависимость

$$T = T_0 + \dot{T}_0 H \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) \right). \quad (4.16)$$

Далее получили формулу для определения температуры тела в установившемся режиме нагрева $T_{уст}$

При $\tau \rightarrow \infty$, $T \rightarrow T_{уст}$, а формула (4.16) получит вид

$$T_{уст} = T_0 + H \times \dot{T}_0, \quad (4.17)$$

Определим \dot{T}_0

В начальный момент времени

$$q_{уэл} = C_v m \frac{dT}{d\tau}.$$

Откуда

$$\dot{T}_0 = \frac{q_{уэл}}{C_v m}.$$

Тогда формула (4.17) примет вид

$$T_{уст} = T_0 + \frac{H q_{уэл}}{C_v m}. \quad (4.18)$$

Коэффициент теплоотдачи тела k , при установившемся режиме нагрева, т.е. при $\frac{dT}{d\tau} = 0$, можно получить, используя зависимость (4.7)

$$k = \frac{\frac{q_{\text{изл}}}{F} - \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4}{T_{\text{уст}} - T_0}. \quad (4.19)$$

Затем, используя зависимость (4.16), получили формулу для определения времени нагрева тела τ до заданной температуры T

$$T - T_0 = \dot{T}_0 H \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) \right), \quad 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) = \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}, \quad \exp\left(-\frac{\tau}{H}\right) = 1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}.$$

Логарифмируя по основанию e , получили

$$-\frac{\tau}{H} = \ln\left(1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}\right), \quad \tau = -H \ln\left(1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}\right),$$

$$\tau = H \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{T - T_0}{\dot{T}_0 H}}\right). \quad (4.20)$$

Из формулы (4.20) следует, что при $\tau = 6H$ скорость роста температуры минимальная и прирост температуры составляет 10^{-3} °C/сек, т.е. через время равное $6H$, практически наступает установившейся режим и начинаются флуктуации температуры тела около установившейся температуры $T_{\text{уст}}$

$$T_{\text{уст}} = 6H.$$

Анализ формул (4.20), (4.16), (4.13) и (4.19) показал, что для расчета времени и температуры нагрева, необходимо определить мощность инфракрасного излучения $q_{изл}$.

Расчёт мощности инфракрасного излучения от ИК-излучателя $q_{изл}$

Фронт падающей на подшипниковый щит волны представляет цилиндрическую поверхность (без учёта краевых эффектов).

Определим расстояние S от т. А до т. В (рисунок 4.26)

$$S^2 = L^2 + L^2 \operatorname{tg}^2 \beta + L^2 \operatorname{tg}^2 \alpha,$$

$$S^2 = L^2 \left(\frac{1}{\cos^2 \beta} + \operatorname{tg}^2 \alpha \right).$$

Мысленно разобьём поверхность излучателя на элементарные участки излучения длиной dl

$$dl = \frac{L}{\cos \beta} d\beta.$$

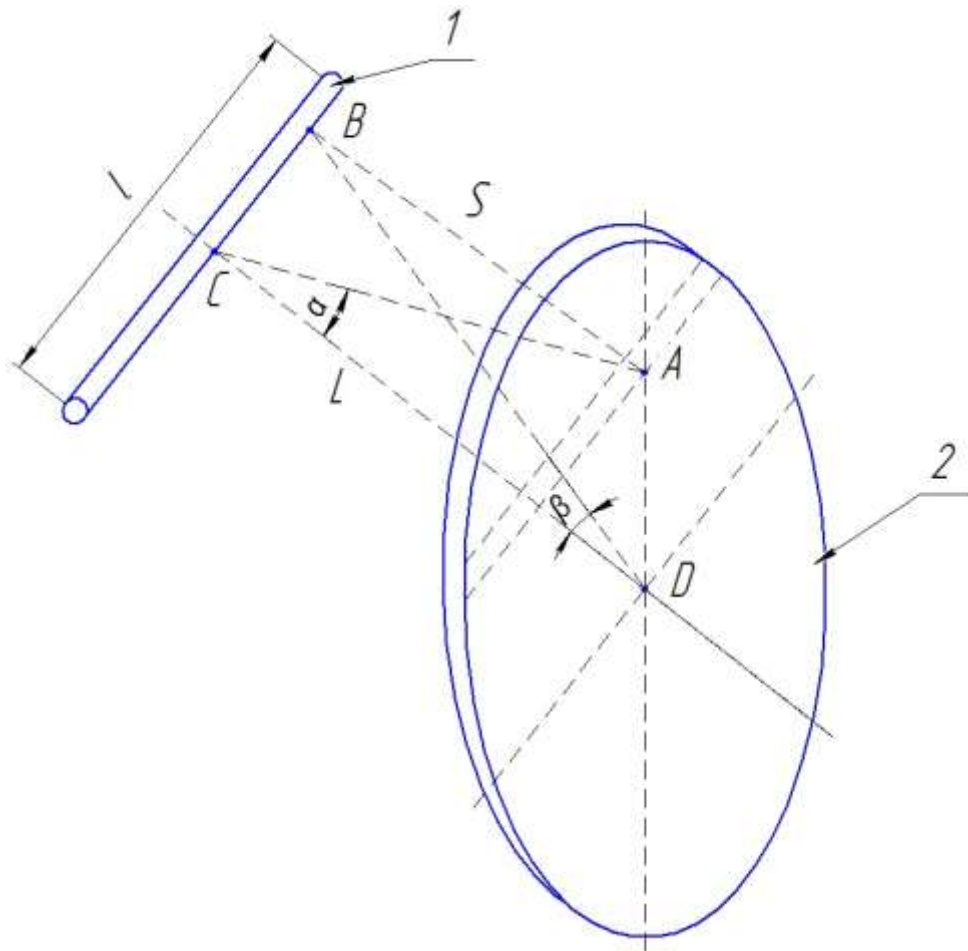
Вводим удельную мощность излучения

$$q_{уд} = \frac{Q_{изл}}{l},$$

где $Q_{изл}$ – мощность излучателя электрическая, Вт.

Тогда, элементарная мощность (мощность элементарного участка излучения) можно определить по формуле

$$q_{уд} dl = \frac{Q_{изл}}{l} \frac{L}{\cos \beta} d\beta.$$



1 – инфракрасный излучатель; 2 – подшипниковый щит; т. А – точка на элементарной площадке $d\delta$ подшипникового щита; В и С – точки на элементарных участках излучателя; D – центр оси вращения подшипникового щита; $\angle\alpha$ – угол падения инфракрасного луча на поверхность щита в вертикальной плоскости, $0 \leq \angle\alpha \leq \alpha_0$; $\angle\beta$ – угол обзора точечных источников инфракрасного излучения из центра подшипникового щита в горизонтальной плоскости, $0 \leq \angle\beta \leq \beta_0$; L – расстояние от инфракрасного излучателя до подшипникового щита; ℓ – длина инфракрасного излучателя

Рисунок 4.26 – Инфракрасный нагрев подшипникового щита [212]

Элементарная интенсивность волны от элементарного участка излучения в точке А

$$dI = \frac{2q_{\text{yo}} dl}{4\pi S^2} = \frac{2Q_{\text{изл}} L d\beta}{l \cos \beta 4\pi L^2 \left(\frac{1}{\cos^2 \beta} + \text{tg}^2 \alpha \right)} = \frac{Q_{\text{изл}}}{2\pi L l} \frac{d\beta}{\left(\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times \text{tg}^2 \alpha \right)}.$$

Фиксируя значения α , можно записать для интенсивности волны, падающей на элементарную площадку $d\delta$ выражение

$$I = \frac{Q_{\text{изл}}}{2\pi L l} \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times \text{tg}^2 \alpha},$$

где β_0 – предельное значение угла β , $\beta_0 = \text{arctg}\left(\frac{l}{2L}\right)$, рад.

Тогда элементарная мощность от ИК-излучателя

$$dq_{\text{изл}} = Id\delta.$$

По рисунку 4.26 определим элементарную площадку $d\delta$

$$d\delta = 2\sqrt{\frac{D^2}{4} - (L\text{tg}\alpha)^2} \frac{L}{\cos \alpha} d\alpha.$$

Интегрированием получили мощность инфракрасного излучения от ИК-излучателя $q_{\text{изл}}$

$$q_{\text{изл}} = \frac{2Q_{\text{изл}}}{\pi l} \int_0^{\alpha_0} \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - (L\text{tg}\alpha)^2}}{\cos \alpha} d\alpha \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times \text{tg}^2 \alpha},$$

где $\alpha_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{D}{2L}\right)$ из рисунка 4.26.

С учётом отражателя с углом φ и того, что часть энергии отражается от поверхности щита, что учитывается степенью черноты тела ε , получили

$$q_{\text{изл}} = \frac{2Q_{\text{изл}} \mu}{\pi l} \frac{2\pi\varepsilon}{\varphi} \int_0^{\alpha_0} \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - (L \operatorname{tg} \alpha)^2}}{\cos \alpha} d\alpha \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times \operatorname{tg}^2 \alpha},$$

где φ – угол рассеивания отражателя, рад; μ – КПД излучателя.

Окончательно формула мощности инфракрасного излучения от ИК-излучателя получила вид

$$q_{\text{изл}} = \frac{4Q_{\text{изл}} \mu \varepsilon}{\varphi l} \int_0^{\alpha_0} \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - (L \operatorname{tg} \alpha)^2}}{\cos \alpha} d\alpha \int_0^{\beta_0} \frac{d\beta}{\frac{1}{\cos \beta} + \cos \beta \times \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (4.21)$$

Для оценки корректности полученной модели проведен контрольный эксперимент. В качестве образца использовали подшипниковый щит электродвигателя 4A112-2. Нагрев корпусной детали осуществляли при помощи кварцевого инфракрасного излучателя, который состоит из отражателя марки QTSR и лампы QTS мощностью 750 Вт.

В таблице 4.7 приведены сравнительные расчетные и экспериментальные значения температуры при установившемся режиме нагрева детали, а также времени нагрева при различном расстоянии между деталью и инфракрасным излучателем. На рисунке 4.27 показаны расчетная и экспериментальная кривые роста температуры детали тела в процессе нагрева.

Таблица 4.7 – Расчетные и экспериментальные значения параметров нагрева корпусной детали типа II [212]

Расстояние L , м	Константа нагрева H , с	Температура t , °С		Время нагрева τ , мин	
		Расчетная	Экспериментальная	Расчетная	Экспериментальная
0,20	715,7	86,7	88,1	78,8	82,0
0,25	943,0	73,5	71,5	89,0	94,0
0,30	1128,8	68,5	65,7	124,3	130,0

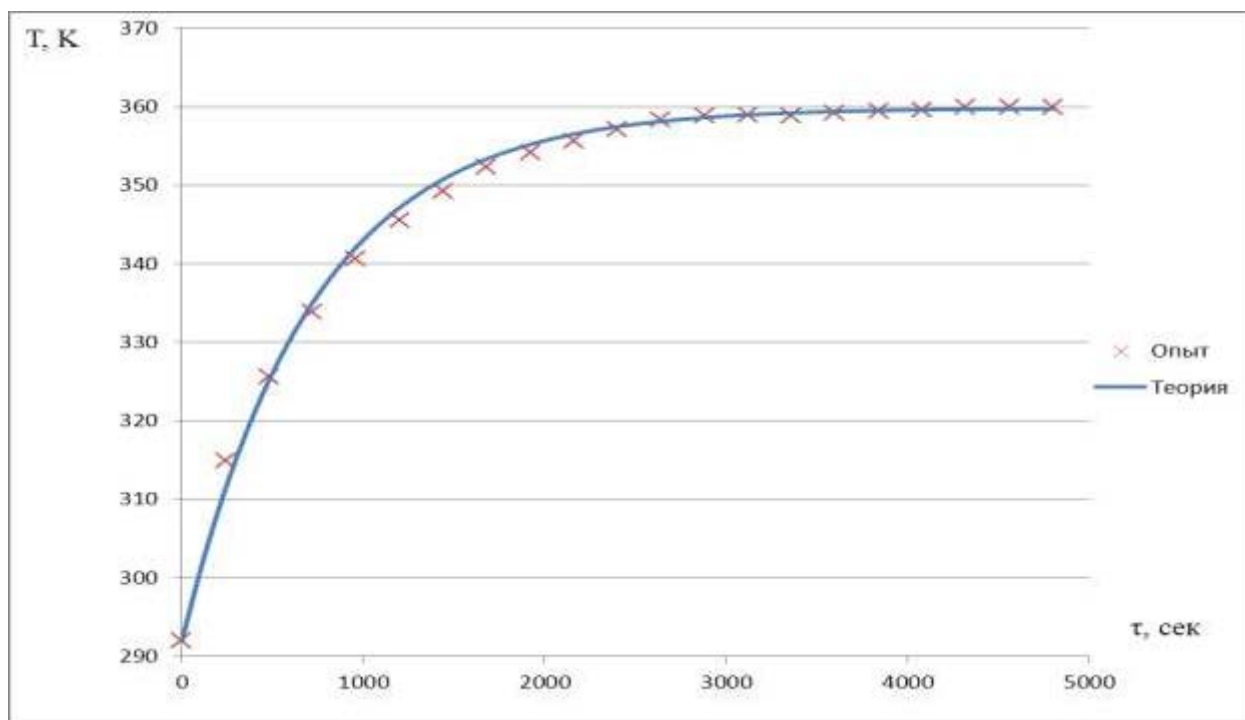


Рисунок 4.27 – Кривые температуры нагрева корпусной детали (расстояние $L = 0,20$ м) [212]

Относительная погрешность в определении температуры составила от 1,6% до 4,3%, относительная погрешность в определении времени нагрева – от 3,9 до 5,3%.

На основе модели разработаны усовершенствованный алгоритм и компьютерная программа расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий при восстановлении подшипниковых щитов электродвигателей, представленные ниже.

Алгоритм расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий

1. Ввод исходных данных:

C_v – теплоёмкость материала подшипникового щита, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

m – масса подшипникового щита, кг;

F – площадь поверхности подшипникового щита, м^2 ;

C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$;

$T_{уст}$ – установившаяся температура подшипникового щита при нагреве, К;

ε – степень черноты серого тела, для чугуна $\varepsilon = 0,60 \dots 0,70$;

T_0 – температура окружающей среды, К;

D – диаметр подшипникового щита, м;

d – диаметр отверстия под подшипник, м; конструктивные параметры инфракрасных излучателей выбираемых из базы данных для расчета:

$Q_{изл i}$ – мощность i -го излучателя электрическая, Вт;

μ_i – КПД i -го излучателя;

φ_i – угол рассеивания отражателя, рад;

ℓ_i – длина i -го излучателя, м; где $i = 1 \dots n$ – порядковый номер излучателя в базе данных для расчета.

2. Проводят эксперимент и определяют константу нагревания $H_{эксн}$ для наименьшего типоразмера подшипникового щита рассматриваемого типа. Полученное экспериментальное значение константы нагревания $H_{эксн}$ принимают равным для всех типоразмеров подшипниковых щитов данного типа.

3. Задают температуру термической обработки подшипникового щита с полимерным покрытием (установившуюся температуру), например $T_{уст} = 423 \text{ К}$ (150°C).

4. Рассчитывают допускаемую мощность поглощаемую телом $[q_{изл}]$, при достижении установившейся температуры $T_{уст}$

$$[q_{изл}] = \frac{C_v m (T_{уст} - T_0)}{H_{эксн}}$$

5. Используя конструктивные параметры i -го инфракрасного излучателя (рисунок 4.22) и оператор цикла, определяют расстояние L от i -го излучателя до подшипникового щита, при котором обеспечивается рассчитанное ранее значение $[q_{изл}]$

$$q_{изл} = \frac{4\mu\epsilon Q_{изл} \sin \beta_0}{\varphi l} \left(\int_0^{\alpha_0} \sqrt{\frac{D^2}{4} - (Ltg\alpha)^2} d\alpha - \int_0^{\gamma_0} \sqrt{\frac{d^2}{4} - (Ltg\gamma)^2} d\gamma \right),$$

где α_0 – предельное значение угла α (рис. 2), $\alpha_0 = \arctg\left(\frac{D}{2L}\right)$; β_0 – предельное значение угла β (рис. 2), $\beta_0 = \arctg\left(\frac{l}{2L}\right)$, рад; $\gamma_0 = \arctg\left(\frac{d}{2L}\right)$.

6. После выбора инфракрасного излучателя определяют скорость роста температуры подшипникового щита

$$\dot{T}_0 = \frac{q_{изл}}{C_v m},$$

7. В завершении рассчитывают время инфракрасного нагрева τ подшипникового щита до заданной температуры $T_{уст}$

$$\tau = H \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{T_{уст} - T_0}{\dot{T}_0 H}} \right),$$

Компьютерная программа расчета конструктивных и режимных параметров установки инфракрасного излучения

На основе разработанной математической модели инфракрасной обработки корпусных деталей и вышеописанного алгоритма разработаны блок-схема (рису-

нок 4.28) и получена компьютерная программа расчета конструктивных и режимных параметров установки инфракрасной сушки полимерных покрытий [212].

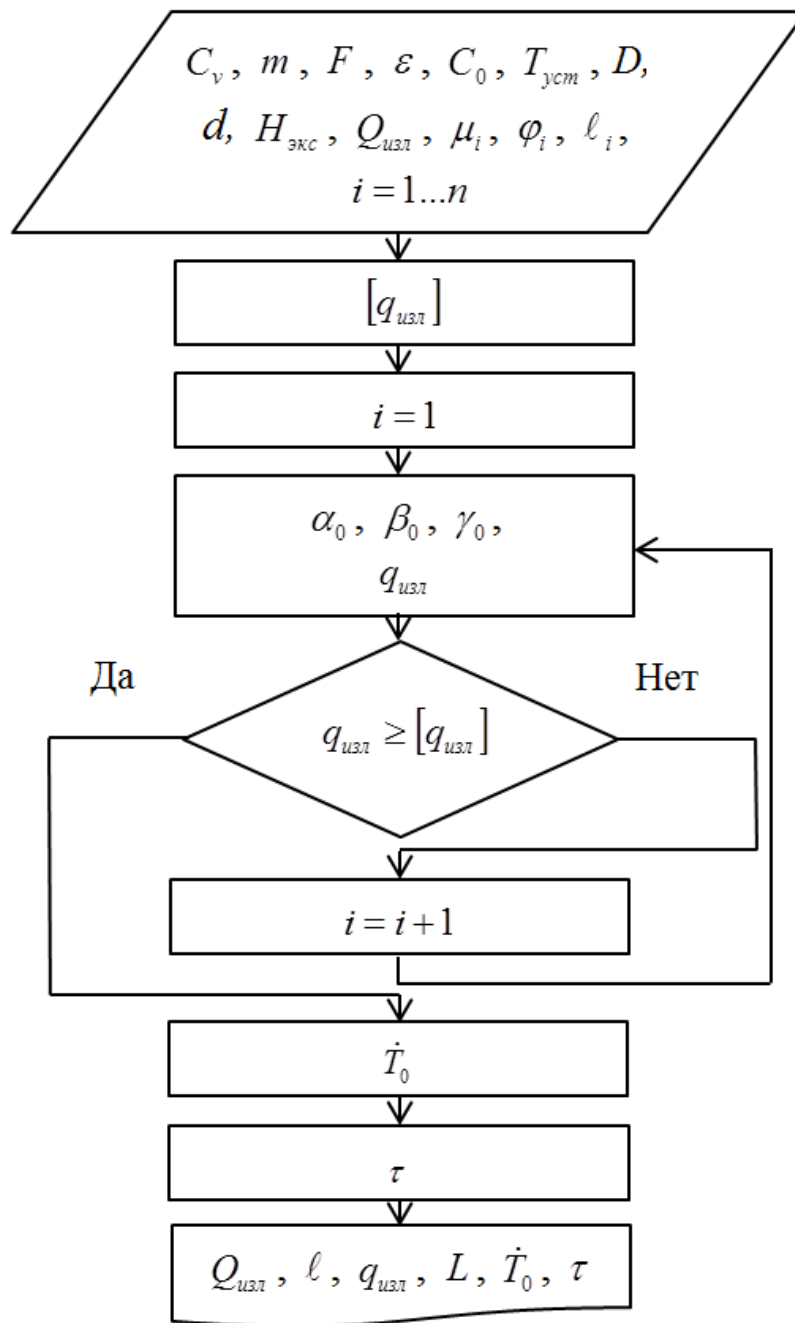


Рисунок 4.28 – Блок-схема компьютерного расчета конструктивных и режимных параметров установки инфракрасной сушки полимерных покрытий [212]

Интерфейс программы показан на рисунок 4.29.

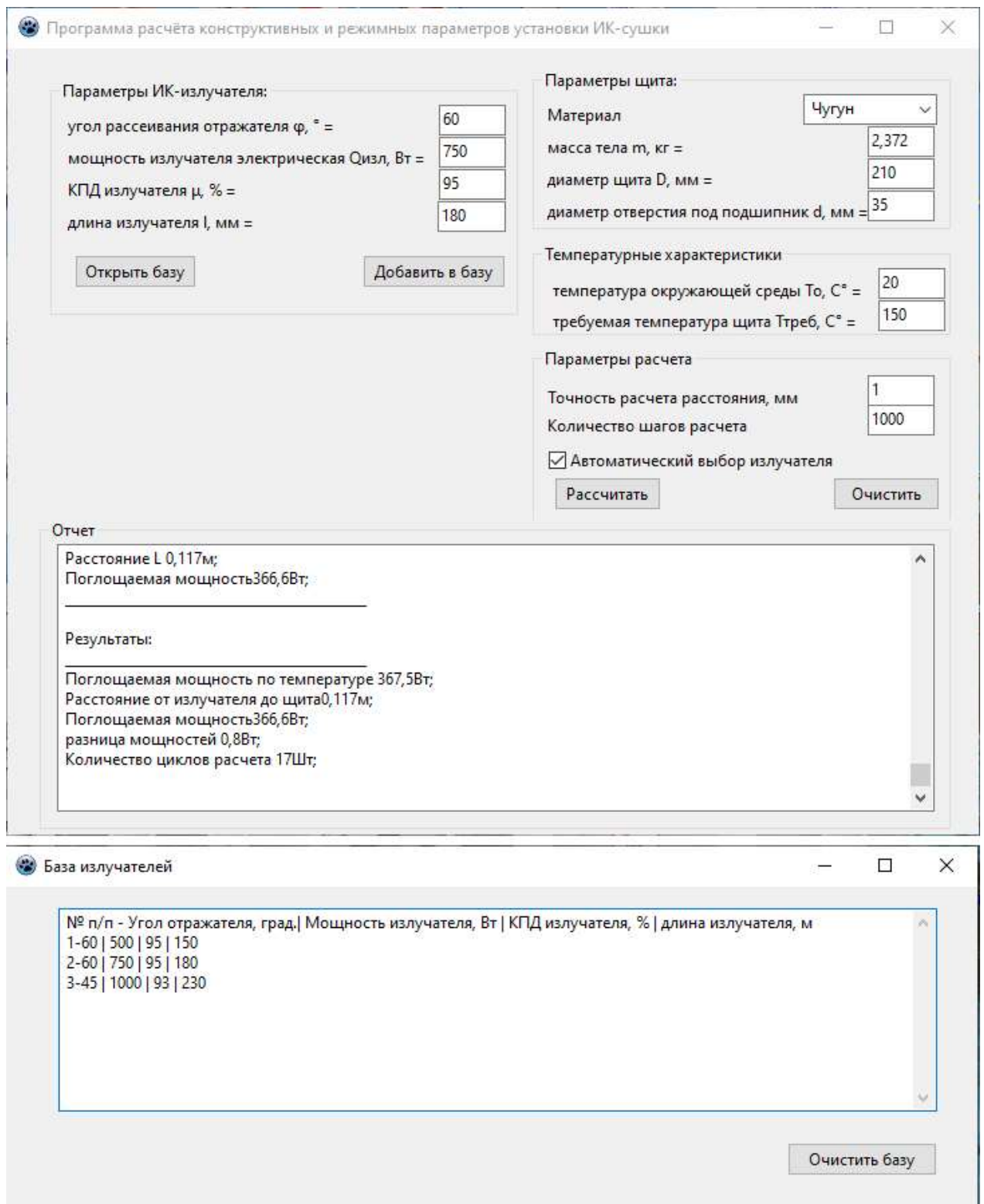


Рисунок 4.29 – Интерфейс программы [212]

Предусмотрена возможность ввода оператором конструктивных параметров инфракрасных излучателей и рефлекторов (кроме тех, что имеются в базе), которые есть в наличии на ремонтном предприятии.

В завершении расчета программа выдает на печать: конструктивные ($Q_{изл}, \ell$) и режимные параметры (L, τ) установки инфракрасной сушки полимерных покрытий.

В контрольном эксперименте образцами являлись подшипниковые щиты электродвигателей серии 4А различных типоразмеров.

Для нагрева подшипниковых щитов использовали установку инфракрасной сушки, которая состоит из излучателя QTS мощностью 750 Вт и отражателя марки QTSR.

В таблице 4.8 показаны результаты контрольного эксперимента.

Таблица 4.8 – Расчетные и экспериментальные значения параметров нагрева подшипниковых щитов электродвигателей серии 4А [212]

№ п/п	Диаметр щита D, мм	Расстояние L, м	Мощность излучателя электрическая, $Q_{изл}$	Температура T, °С		Время нагрева τ , мин	
				Расчетная	Экспериментальная	Расчетная	Экспериментальная
1	145	0,125	750	150,0	148,2	41,6	42,0
2	185	0,115	750	150,0	149,3	45,5	46,0
3	210	0,110	750	150,0	147,4	47,3	48,0

Из таблицы 4.8 следует, что опытные значения температуры нагрева подшипниковых щитов отличаются от расчетных значений от 1,2 до 1,7%, времени нагрева – от 0,95 до 1,45%. Высокая сходимость расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о корректности разработанного метода расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в подшипниковых щитах электродвигателей.

Выводы

1. На основе математической модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей разработаны усовершенствованный алгоритм и

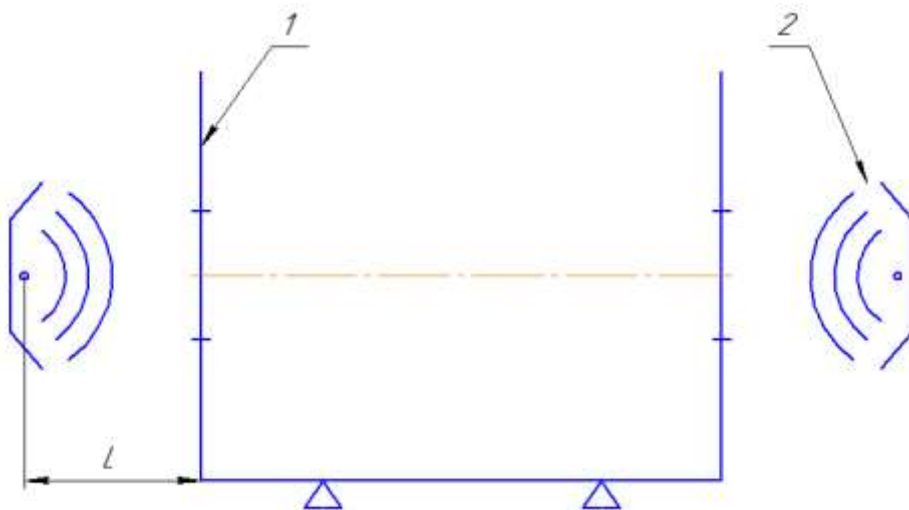
компьютерная программа расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покрытий в подшипниковых щитах электродвигателей.

2. Экспериментально установлена высокая сходимость расчетных и экспериментальных значений параметров нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и подтверждена работоспособность разработанной компьютерной программы расчета.

4.2.2 Математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей трансмиссии автотракторной техники

На основе полученной математической модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей разработана математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей автомобилей и тракторов [157, 213, 266-270].

На рисунке 4.30 представлена схема нагрева корпусной детали инфракрасными излучателями.



1 – корпусная деталь; 2 – инфракрасный излучатель

Рисунок 4.30 – Принципиальная схема нагрева корпусной детали инфракрасными излучателями [213]

Уравнение баланса теплового потока для корпусной детали можно представить в следующем виде [213]

$$q_{\text{изл}} = q_{\text{щлуч}} + q_{\text{щконв}} + q_{\text{М}} + q_{\text{стлуч}} + q_{\text{стконв}} + q_{\text{м}}, \quad (4.22)$$

где $q_{\text{изл}}$ – тепловой поток от инфракрасных излучателей, который поглощает корпусная деталь; $q_{\text{щлуч}}$ – тепловой поток, отдаваемый нагретыми торцевыми стенками (подшипниковыми щитами) при лучеиспускании; $q_{\text{щконв}}$ – тепловой поток, отдаваемый нагретыми щитами, при свободном конвективном теплообмене с окружающей средой; $q_{\text{М}}$ – тепловой поток, расходуемый на нагрев щитов; $q_{\text{стлуч}}$ – тепловой поток, отдаваемый нагретыми нижней и боковыми стенками при лучеиспускании; $q_{\text{стконв}}$ – тепловой поток, отдаваемый нагретыми нижней и боковыми стенками при конвективном теплообмене с окружающей средой; $q_{\text{м}}$ – тепловой поток, расходуемый на нагрев нижней и боковых стенок.

В результате проведенных теоретических исследований получены формулы членов формулы (4.22)

$$q_{\text{щлуч}} = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 F_{\text{щ}}, \quad (4.23)$$

где ε – степень черноты серого тела, для чугуна: $\varepsilon = 0,60-0,70$; C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$; T – абсолютная температура щита, К; $F_{\text{щ}}$ – площадь поверхности щитов, м².

$$q_{\text{щконв}} = k_{\text{щ}} (T - T_0) F_{\text{щ}}, \quad (4.24)$$

где k_{uz} – коэффициент теплоотдачи щита в условиях свободной конвекции в неограниченном пространстве, $\frac{Вт}{м^2 \times К}$; T_0 – температура окружающей среды, К.

$$q_M = c_v M \frac{dT}{d\tau} \quad (4.25)$$

$$q_{\text{стлуч}} = \int_{F_{\text{ст}}} \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 dF_{\text{ст}}, \quad (4.26)$$

где C_v – теплоемкость материала подшипникового щита, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$; M – масса подшипникового щита, кг; $T_{\text{ст}}$ – температура нижней и боковых стенок, К; $F_{\text{ст}}$ – суммарная площадь нижней и боковых стенок, м².

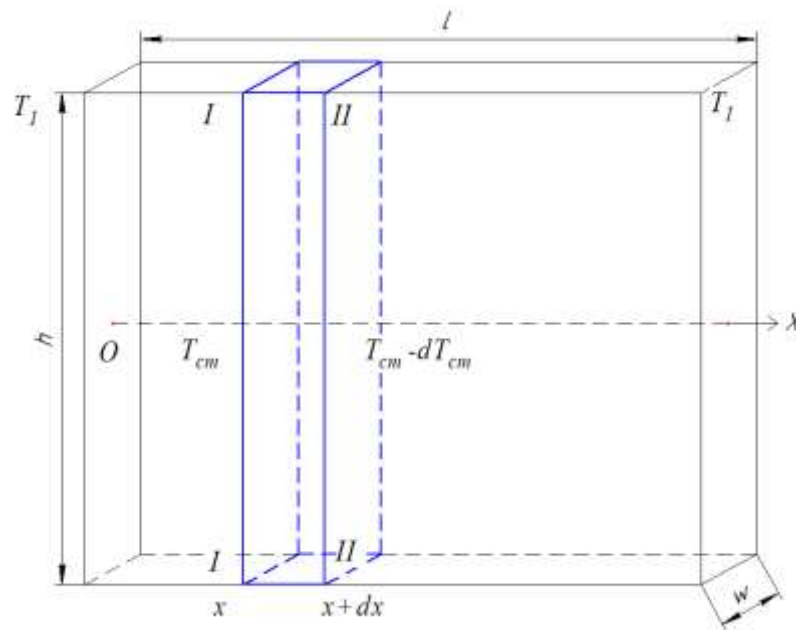
$$q_{\text{стконв}} = \int_{F_{\text{ст}}} k_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0) dF_{\text{ст}}, \quad (4.27)$$

где $k_{\text{ст}}$ – усредненный коэффициент теплоотдачи нижней и боковых стенок в условиях свободной конвекции.

$$q_m = \int_m c_v \frac{dT_{\text{ст}}}{d\tau} dm, \quad (4.28)$$

где m – суммарная масса нижней и боковых стенок.

Боковую стенку представили как однородную призму размерами: $l \times w \times h$ (рисунок 4.31).



$l \times w \times h$ – длина, толщина и высота боковой стенки, м;

T_1 – температура в торцевой части боковой стенки, К

Рисунок 4.31 – Боковая стенка корпусной детали [213]

Получено дифференциальное уравнение нагрева корпусной детали

$$\lambda w \frac{d^2 T_{cr}}{dx^2} = 2 \left[k_{cr} (T_{cr} - T_0) + \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{cr}}{100} \right)^4 \right], \quad (4.29)$$

где λ – теплопроводность материала стенки, Вт/м×К; w – толщина стенки, м.

Общее решение уравнения (4.29) имеет следующий вид

$$T_{cr} - T_0 = C_1 \operatorname{ch}(bx) + C_2 \operatorname{sh}(bx). \quad (4.30)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 определили из граничных условий, по которым температура торцов боковой стенки равна T_1

$$C_1 = T_1 - T_0 \text{ и } C_2 = \frac{T_1 - T_0 - (T_1 - T_0) \operatorname{ch}(bl)}{\operatorname{sh}(bl)}.$$

В результате получили закон распределения температуры вдоль боковой стенки корпусной детали

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{ст}}(x) = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{\text{sh}(bl)} \{ \text{sh}(bx) + \text{sh}[b(l-x)] \} \quad (4.31)$$

Тепловой поток, который передаётся одной боковой стенке при установившемся режиме нагрева

$$q_{\text{бокст2}} = 2 \left[\int_0^l \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 h dx + \int_0^l k_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0) h dx \right] \quad (4.32)$$

Тепловой поток, который передаётся нижней стенке при установившемся режиме нагрева

$$q_{\text{нижст2}} = 2 \int_0^l \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 z dx + \int_0^l k_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0) z dx, \quad (4.33)$$

где z – ширина корпусной детали, м.

Суммарный тепловой поток, который подводится к боковым и нижней стенкам детали при установившемся режиме нагрева, следует определять как сумму тепловых потоков (4.32) и (4.33) по формуле

$$q_2 = 2q_{\text{бокст2}} + q_{\text{нижст2}} \quad (4.34)$$

Тепловой поток на нагрев торцевых стенок

$$q_1 = 2 \frac{(T_1 - T_0) c_v M}{H_{\text{эксп}}}, \quad (4.35)$$

Суммарный поглощаемый тепловой поток q , который идет на восполнение тепловых потерь для поддержания установившегося режима нагрева корпусной детали, следует определять как сумму величин (4.34) и (4.35).

$$q = q_1 + q_2 \quad (4.36)$$

Формула для расчета расстояния L от излучателя до корпусной детали

$$q = \frac{4\eta\varepsilon Q_{\text{изл}} \sin(\beta_0) z \alpha_0}{l\varphi} - 8 \frac{\eta Q_{\text{изл}} \sin(\beta_0)}{l\varphi} \int_0^{\gamma_0} \sqrt{\frac{d^2}{4} - (L \operatorname{tg} \gamma)^2} d\gamma \quad (4.37)$$

где η – КПД излучателя; $Q_{\text{изл}}$ – электрическая мощность излучателя; l – длина излучателя; φ – угол рассеивания отражателя; d – диаметр отверстий в торцевой стенке корпусной детали; L – расстояние от излучателя до торца корпусной детали; углы $\alpha_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{z}{2L}\right)$, $\beta_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{l}{2L}\right)$, $\gamma_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{d}{2L}\right)$ в радианах (рисунок 4.32).

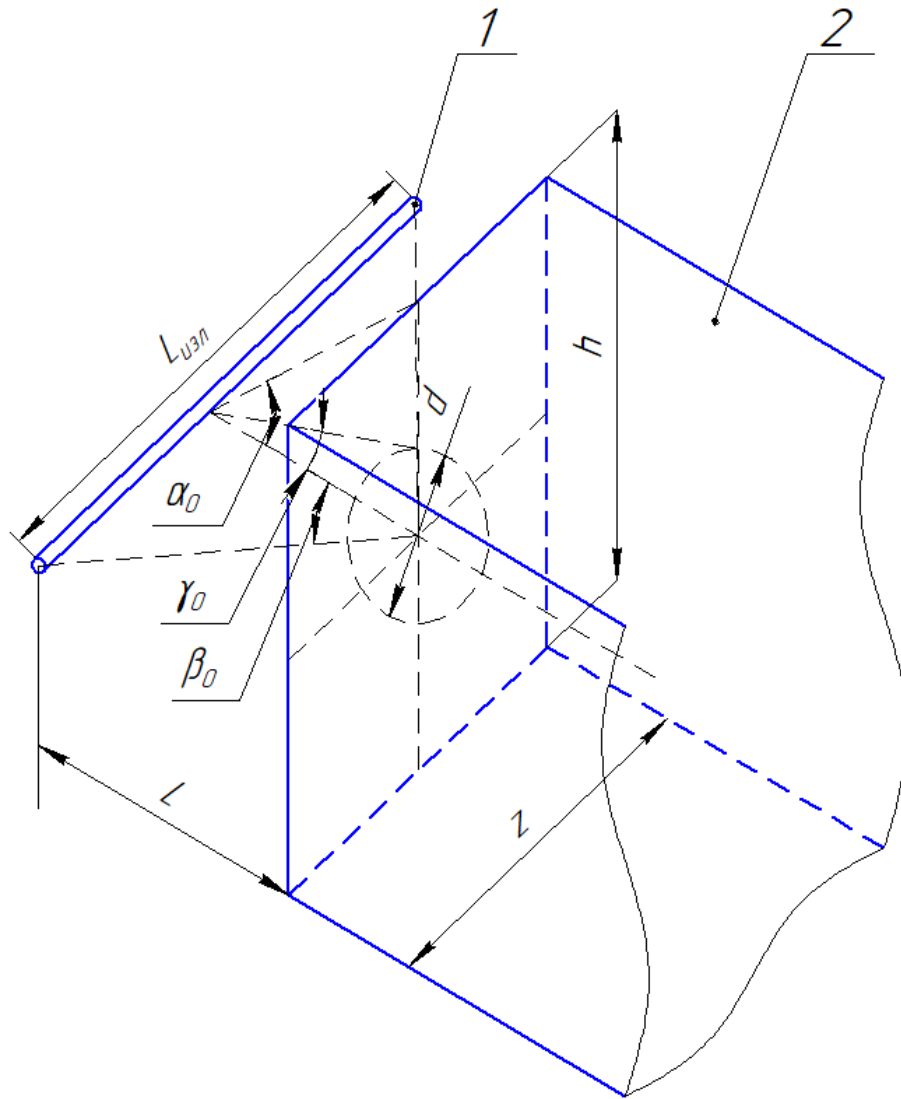
Расчет по формуле (4.37) проводят в среде РТС Mathcad Prime 3.0.

Формула для расчета времени нагрева корпусной детали

$$t = H_{\text{кд}} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{\dot{T}_0}{T_{\text{уст}} - T_0} H_{\text{кд}}} \right), \quad (4.38)$$

где $T_{\text{уст}}$ – температура в установившемся режиме (термической обработки) корпусной детали; \dot{T}_0 – скорость роста температуры корпусной детали,

$$\dot{T}_0 = \frac{q}{C_v M_{\text{кд}}}.$$



1 – инфракрасный излучатель; 2 – корпусная деталь; $\angle \alpha_0$ – предельный угол падения инфракрасного луча на поверхность корпусной детали в вертикальной плоскости; $\angle \beta_0$ и γ_0 – углы обзора инфракрасного излучателя из центра корпусной детали в горизонтальной и вертикальной плоскости; L – расстояние от излучателя до детали; $l_{\text{изл}}$ – длина инфракрасного излучателя;

h и z – высота и ширина корпусной детали

Рисунок 4.32 – Инфракрасный нагрев корпусной детали [213]

Метод (алгоритм и компьютерная программа) расчета конструктивных и режимных параметров инфракрасных установок для терморadiационной обработки полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей (рисунок 4.33) [157, 214, 215, 266].

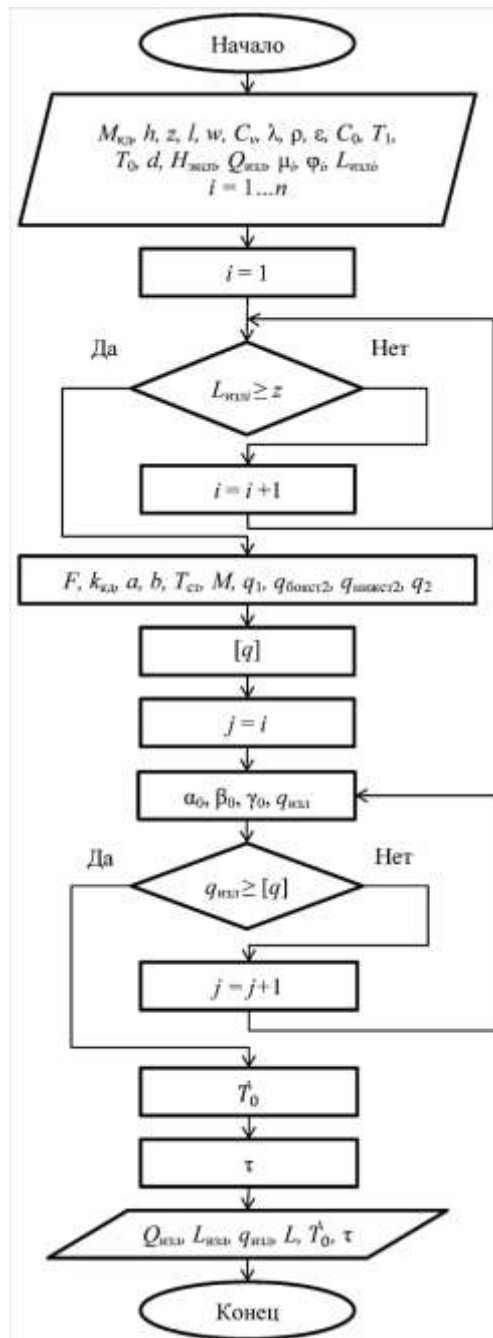
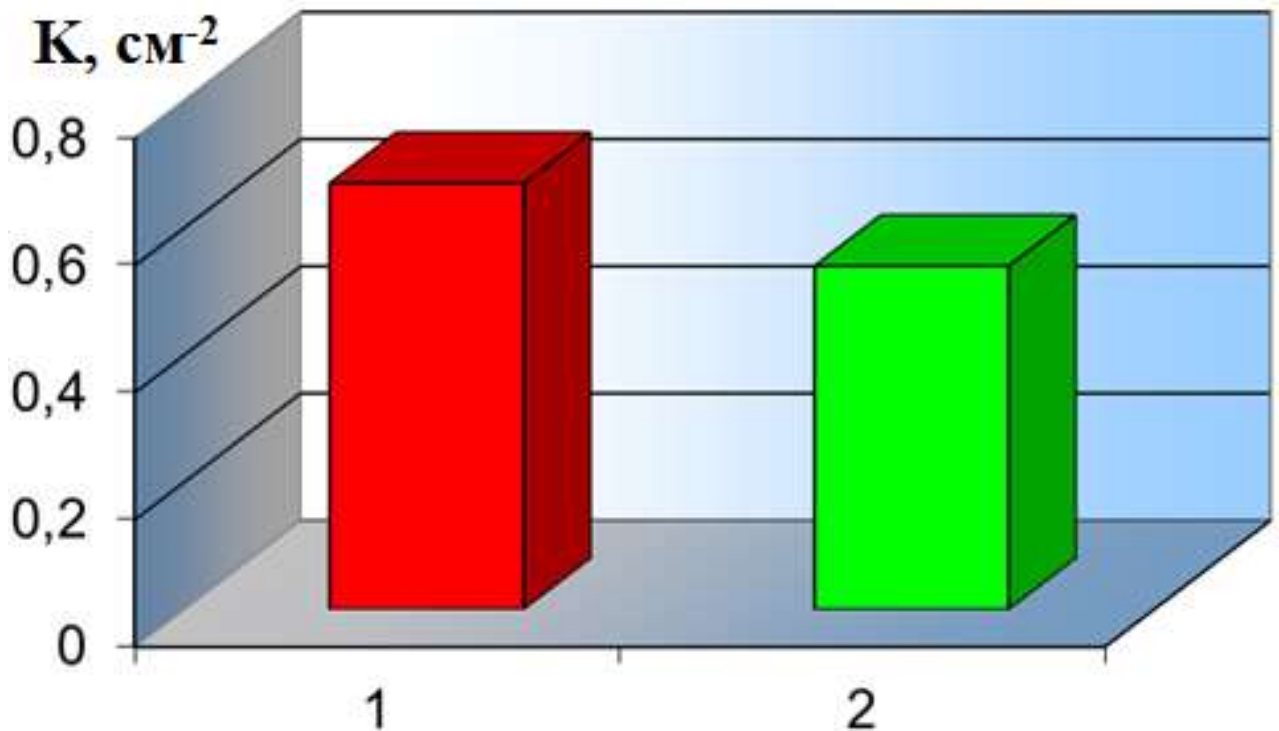


Рисунок 4.33 – Блок-схема компьютерного расчета конструктивных и режимных параметров установки терморadiационной обработки полимерных покрытий [214]

Дефектность покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С (состав №1), обработанных конвективным и терморadiационным способами

На рисунке 4.34 показаны концентрация пор (количество пузырьков на площади в 1 см²) в покрытиях после термической обработки конвективным и тер-

морационным способами. Показатель дефектности снизился в 1,24 раза. Размеры пор уменьшились на 15%.



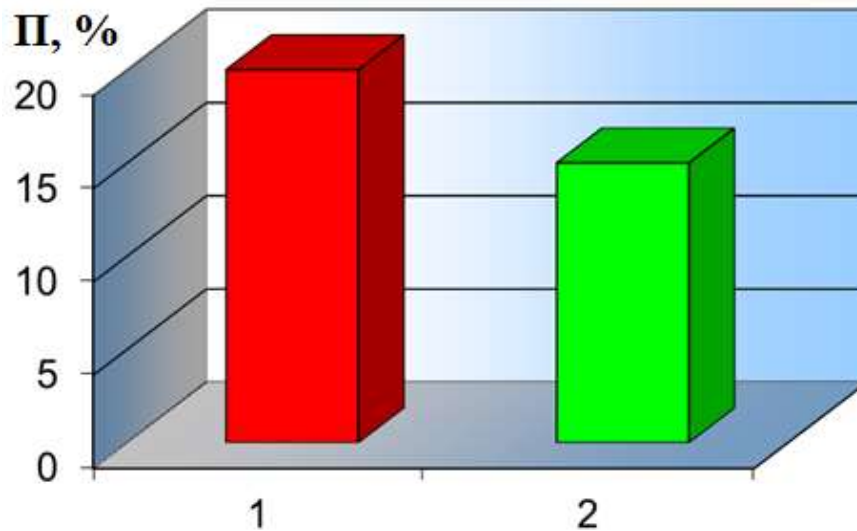
1 – конвективный способ; 2 – терморационный способ

Рисунок 4.34 – Концентрация пузырьков в покрытиях нанокompозита эластомера Ф-40С после термической обработки [157, 214]

На рисунке 4.35 показаны площадь разрушенного покрытия в покрытиях после термической обработки конвективным и терморационным способами. Показатель дефектности уменьшился в 1,33 раза.

Вывод

В сравнении с конвективным способом, термическая обработка покрытий нанокompозита эластомера Ф-40С терморационным способом существенно повышает качество покрытий: площадь разрушенного покрытия уменьшилась в 1,33 раза, концентрация пор в покрытии – в 1,24 раза, размер пор – на 15%.



1 – конвективный способ; 2 – терморadiационный способ

Рисунок 4.35 – Площадь разрушенного покрытия нанокompозита эластомера Ф-40С после термической обработки [157, 214]

4.3 Обеспечение точностных характеристик отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях

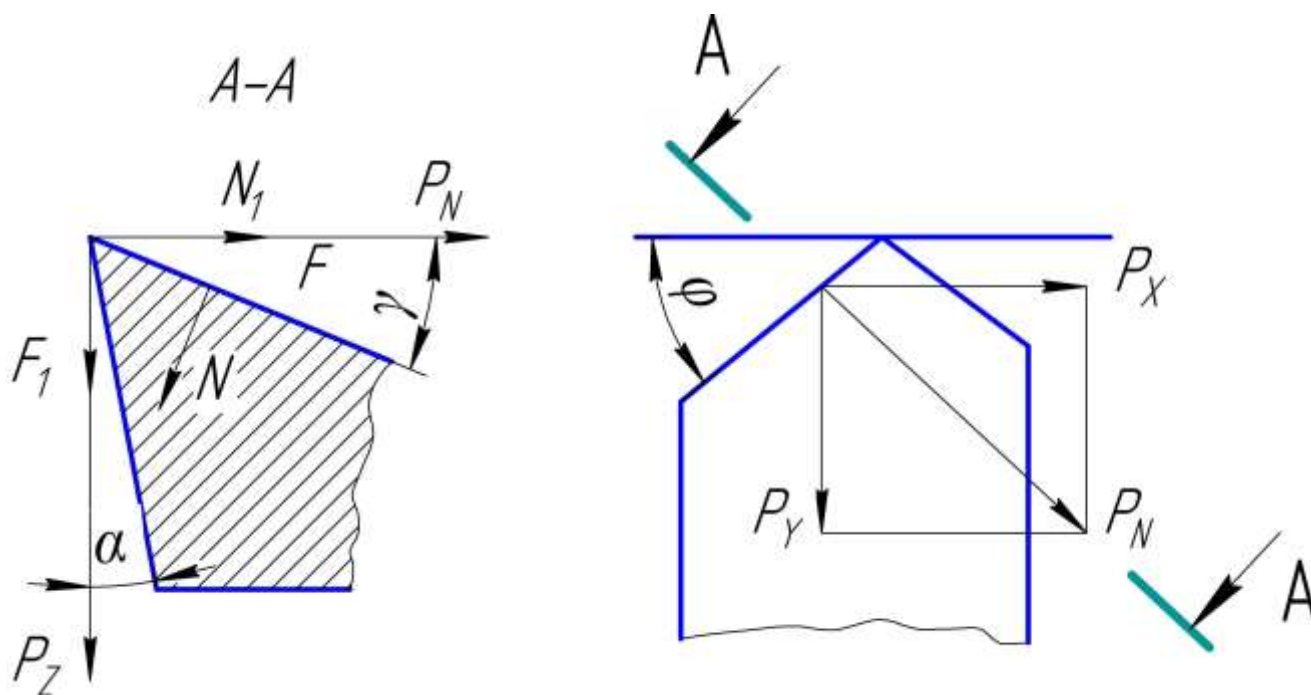
4.3.1 Изменение усилия резания покрытий эластомерных нанокompозитов при различных передних углах режущей кромки калибра-резца

«При механической обработке резанием полимерного материала на режущий клин инструмента действуют силы, приложенные к передним N и F и задним N_l и F_l его поверхностям» [54] (рисунок 4.36).

«Силы, действующие на режущий клин инструмента, разделяют на три составляющие: P_z , P_y и P_x , каждая из которых является результатом сложения сил, приложенных к передней и задней поверхностям» [54].

Наиболее существенно влияет на силы резания передний угол режущего клина резца [186].

«Для каждого материала существует критический передний угол, при котором сила P_y равна нулю» [54].



N и F – силы, действующие на передней поверхности резца; N_1 и F_1 – силы, действующие на задней поверхности резца; P_x, P_y, P_z – составляющие сил резания, приложенных к передней и задней поверхностям; α, γ, ϕ – задний и передний углы; ϕ – главный угол в плане

Рисунок 4.36 – Силы, действующие на режущий клин инструмента [54, 186, 271-273]

Существенное влияние на силы резания оказывает задний угол режущего клина резца. «Увеличение заднего угла приводит к уменьшению сил резания P_x, P_y, P_z » [54].

«Поэтому для обеспечения наилучшей точности размеров и шероховатости полимерных покрытий при калибровании необходимо экспериментально определить значение критического переднего и заднего углов режущего клина калибра-резца» [54].

На первом этапе исследований экспериментально изучали изменение усилия резания покрытий эластомерных нанокомпозитов при различных углах режущей кромки калибрующего инструмента. В качестве рациональных геометри-

ческих параметров режущей кромки калибра-резца приняты такие, при которых обеспечивается минимальное усилие резания.

Исследовали покрытия эластомерных нанокомпозитов трех составов:

состав №1: Ф-40 – 100 масс.ч., Al – 1,9 масс. ч. и Cu – 1,8 масс. ч.; состав №2: Ф-40С – 100 масс.ч., Al – 0,09 масс. ч. и Cu – 0,03 масс. ч.; состав №3: Ф-40С – 100 масс.ч., Al – 0,075 масс. ч.

На рисунках 4.37 и 4.38 показаны зависимости усилия резания покрытий составом № 1, 2 и 3 от переднего угла режущей кромки калибра-резца [2].

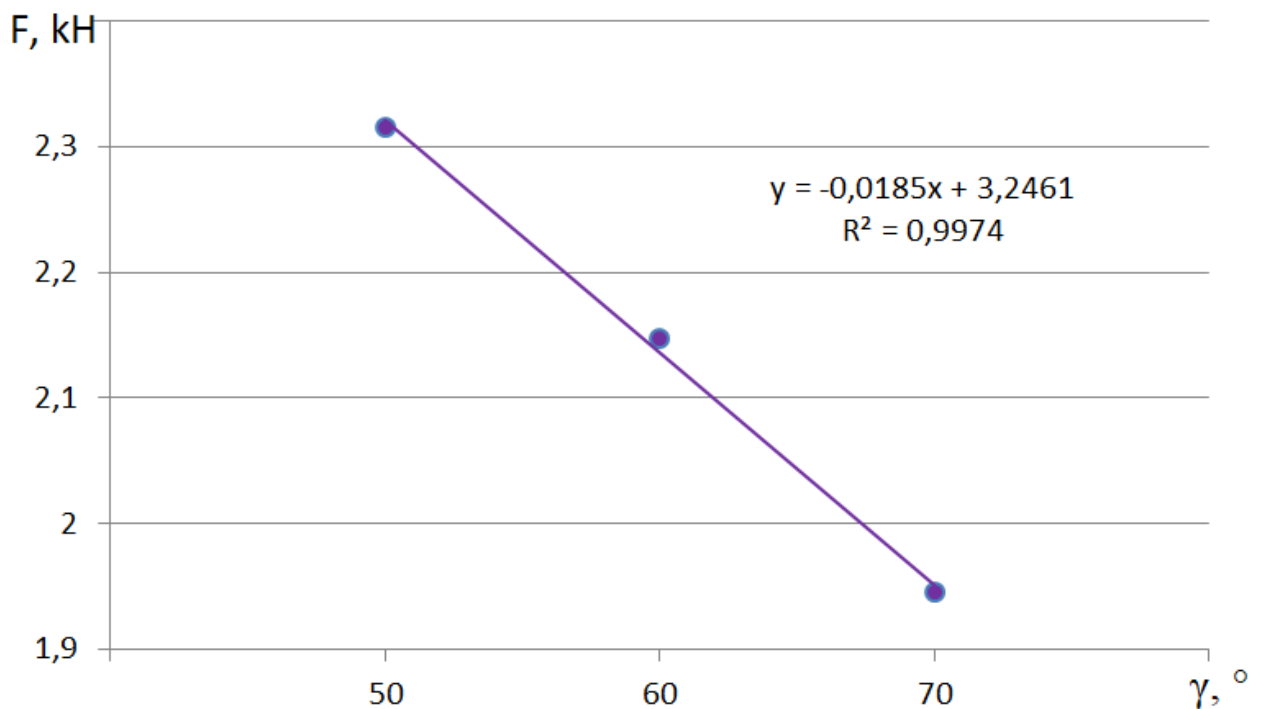
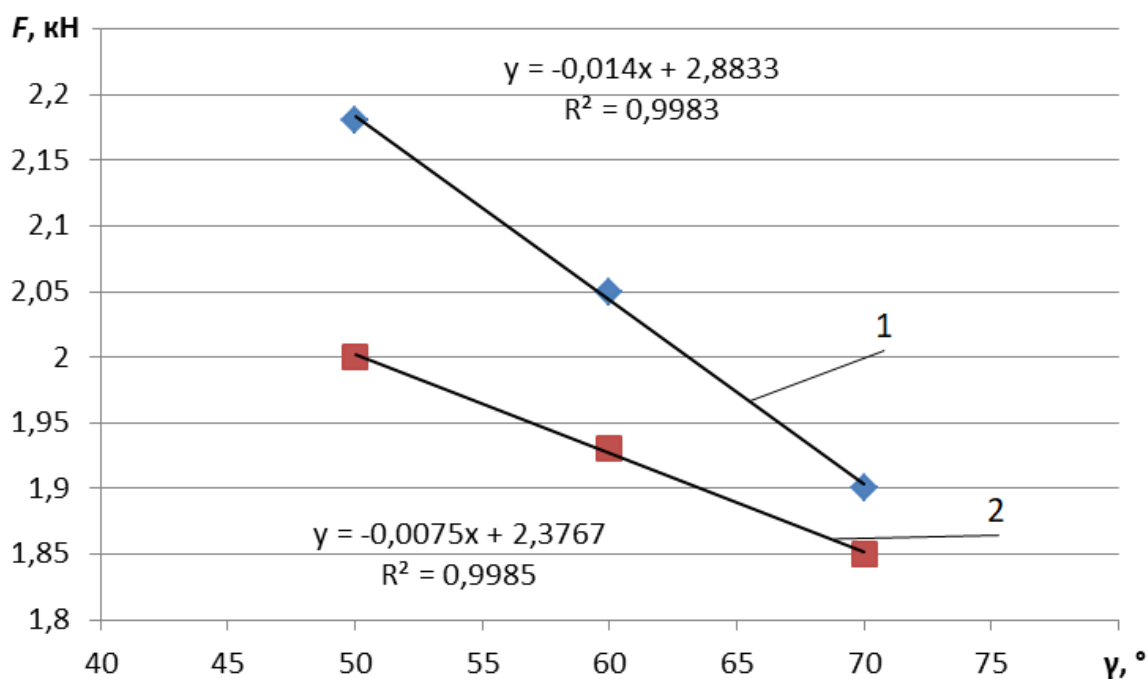


Рисунок 4.37 – Зависимость усилия резания F покрытия нанокомпозита эластомера Ф-40 (состав №1) от переднего угла режущей кромки калибра-резца γ [2]

Как следует из рисунков 4.37 и 4.38 увеличение переднего угла режущей кромки калибра-резца γ приводит к уменьшению усилия резания F покрытий эластомерных нанокомпозитов. Экспериментальные зависимости носят линейный характер.



1 – состав №2; 2 – состав №3

Рисунок 4.38 – Изменение усилия резания F покрытий эластомерных нанокompозитов при различных передних углах режущей кромки калибрующего инструмента γ

Обработка покрытий с наименьшим значением переднего угла режущей кромки калибра-резца $\gamma = 50^{\circ}$ требует наибольших значений усилия резания. Максимальное значение усилия резания $F = 2,32 \text{ кН}$ имеет место при обработке покрытий состава №1 (рисунок 4.37). Усилие резания при обработке покрытий составов №2 и №3 составляет соответственно: 2,18 и 2,0 кН (рисунок 4.38). Чем меньше содержание металлических наночастиц в композите, тем меньше усилие резания. Поэтому при калибровании покрытий состава №3 фиксируется наименьшее значения усилия резания $F = 2,0 \text{ кН}$.

Усилие резания при обработке покрытий составов №2 и №3 составляет соответственно: 2,05 и 1,93 кН, т.е. увеличение переднего угла γ до 60° снизило усилие резания на 7 и 4 % соответственно (рисунок 4.38).

Максимальное значение переднего угла режущей кромки калибрующего инструмента $\gamma = 70^{\circ}$ ограничивается условием прочности и долговечности режу-

щего инструмента [54, 180]. При дальнейшем увеличении переднего угла γ ресурс инструмента резко снижается.

При максимальном значении переднего угла режущей кромки калибра-резца $\gamma = 70^\circ$ обработка покрытий эластомерных нанокompозитов проводится с минимальным усилием резания. Усилие резания покрытий состава №1 составляет $F = 1,94 \text{ кН}$ (рисунок 4.37). В отличие от значений передних углов калибров $\gamma = 50$ и 60° величина F снизилась на 21 и 10% соответственно.

Усилие резания при обработке покрытий составов №2 и №3 составляет соответственно: 1,90 и 1,85 кН (рисунок 4.38). В сравнении с передними углами калибров $\gamma = 50$ и 60° величина F снизилась на 15 и 8% для покрытий состава №2 и 8 и 5% для покрытий состава №3.

На рисунке 4.39 показаны результаты исследования зависимости усилия резания F покрытий эластомера Ф-40С от переднего угла калибра-резца γ , которые проведены в работе Кирсанова Ф.А. [54, 188].

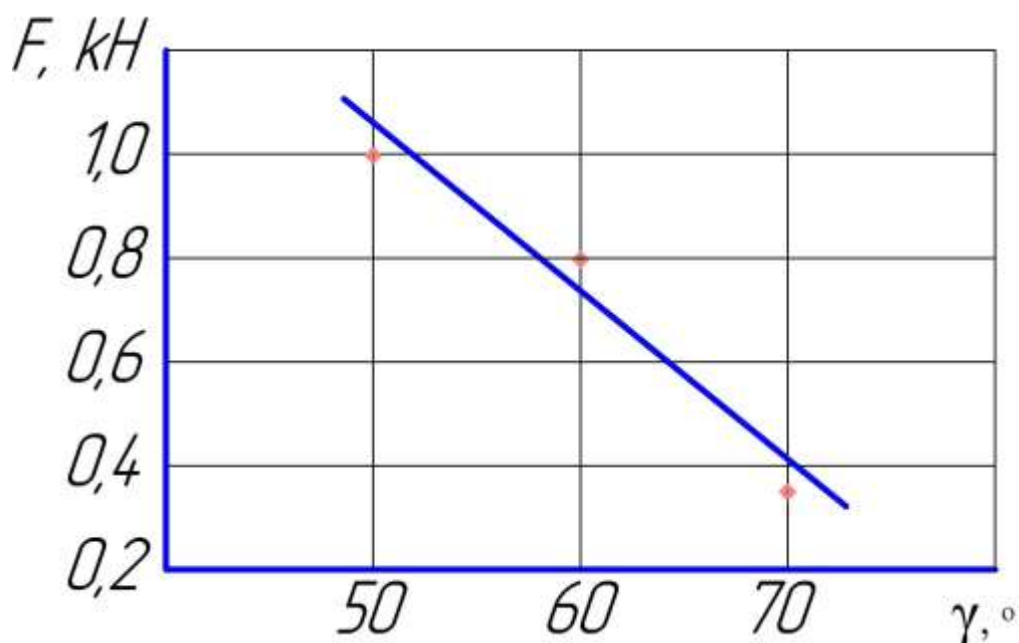


Рисунок 4.39 – Зависимость усилия резания F эластомера Ф-40С от переднего угла калибра-резца γ [188]

Как и в нашем случае, графическая зависимость линейная и с увеличением переднего угла режущей кромки усилие резания уменьшается.

Выводы

1) Определены рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца, которые обеспечивают минимальное значение радиальной составляющей силы резания покрытий эластомерных нанокомпозитов: передний угол $\gamma = 70^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$; при которых образуется сливная стружка, которая является непременным условием обеспечения высокого качества обработки поверхности полимерного покрытия.

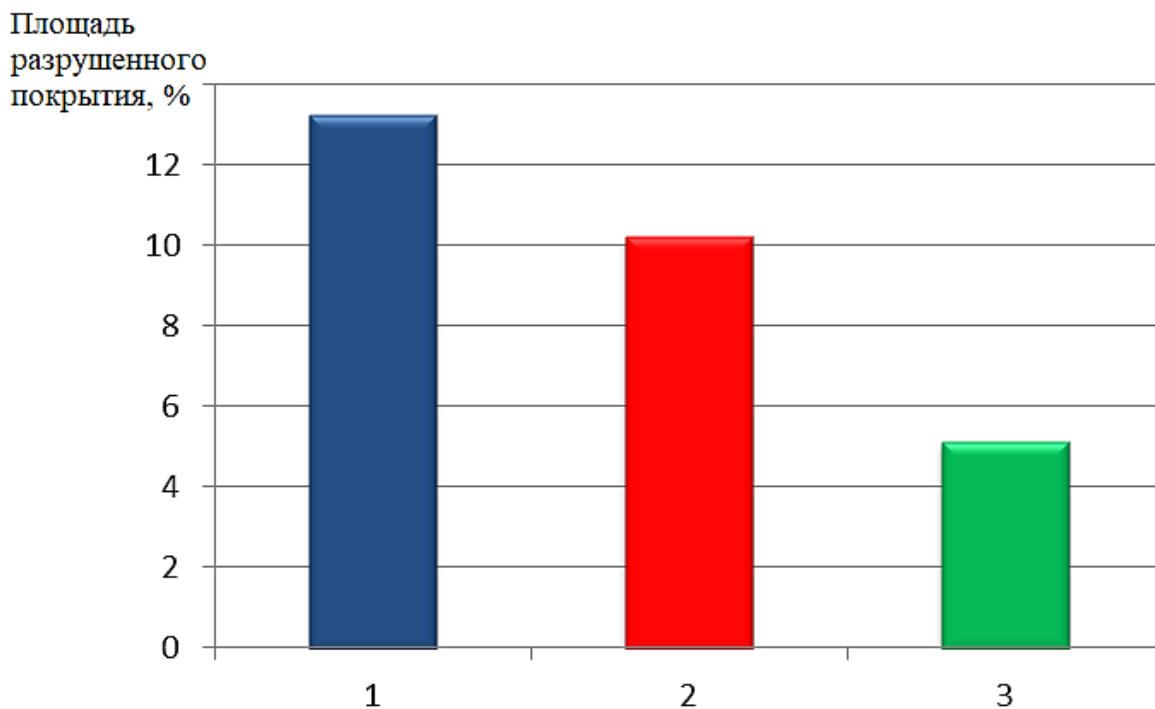
2) С увеличением модуля упругости и геометрических размеров отверстия усилие резания при калибровании полимерных покрытий многократно увеличивается.

4.3.2 Исследование повреждаемости и точностных характеристик покрытий эластомерных нанокомпозитов после калибрования

«Калибрование отверстий с полимерным покрытием может приводить к появлению дефектов: растрескивание, отслаивание, сморщивание, которые в ходе эксплуатации снижают долговечность восстановленной посадки и соответственно ресурс подшипникового узла» [2]. Поэтому калибрование полимерного покрытия должно обеспечивать минимальную повреждаемость. При этом отверстие с полимерным покрытием должно иметь заданные точностные характеристики.

Цель данных экспериментальных исследований – изучить каким образом угол заточки режущей кромки калибра влияет на качество и точностные характеристики отверстий с полимерным покрытием.

Изменение площади разрушенного покрытия после калибрования покрытий эластомерного нанокомпозита состава №1 режущим инструментом с различными значениями переднего угла представлено на рисунке 4.40.

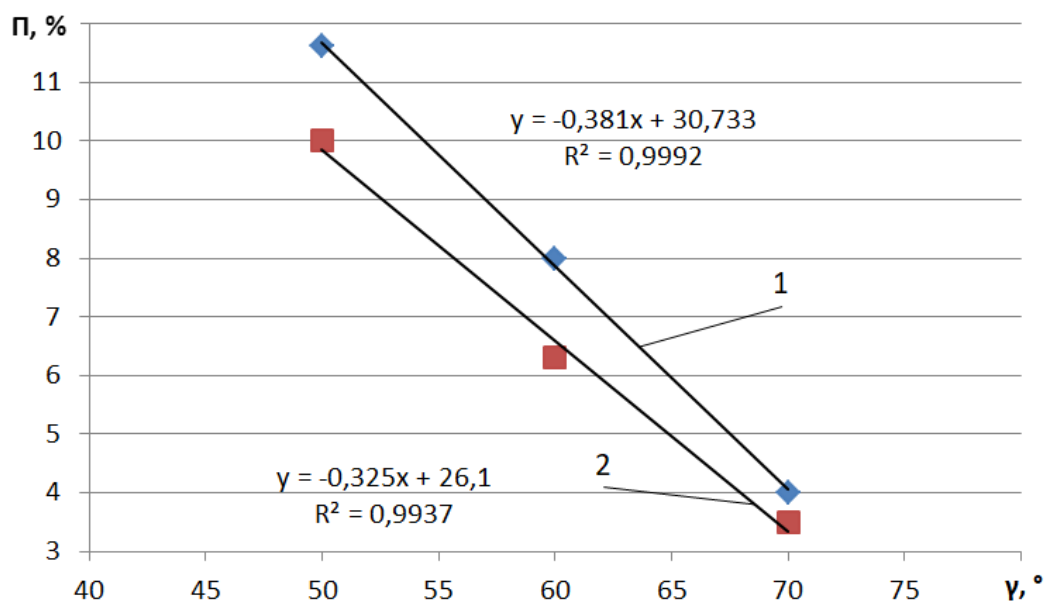


1) передний угол $\gamma = 50^\circ$; 2) передний угол $\gamma = 60^\circ$; 3) передний угол $\gamma = 70^\circ$

Рисунок 4.40 – Площадь разрушенного покрытия эластомерного нанокompозита (состав №1) после механической обработки калибром-резцом [2]

При калибровании покрытия нанокompозита режущим инструментом с рациональными геометрическими параметрами (передний угол $\gamma = 70^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$) получили наилучшее качество обработки. Площадь разрушения покрытия составила 5,12 %.

Аналогичный характер имеют зависимости изменения площади разрушенного покрытия после калибрования покрытий эластомерных нанокompозитов составов №2 и №3 (рисунок 4.41). Покрытия эластомерных нанокompозитов имеют наибольшие повреждения после калибрования режущим инструментом с передним углом $\gamma = 50^\circ$. Площадь разрушенного покрытия (угол 50°) составов №2 и №3 имеет значения соответственно 11,62 и 10,0%.



1 – состав №2; 2 – состав №3

Рисунок 4.41 – Изменение площади разрушенного покрытия П эластомерных нанокompозитов после обработки калибрующим инструментом с различным передним углом режущей кромки γ

Повреждения меньше, чем у покрытия состава №1 (рисунок 4.40). Причина заключается в различном содержании металлических наночастиц наполнителя. Чем оно меньше, тем меньше усилие резания, тем меньше повреждаемость покрытия при калибровании.

Наименьшие повреждения имеют покрытия эластомерных нанокompозитов составов №2 и №3 после обработки калибром-резцом с передним углом режущей кромки $\gamma = 70^{\circ}$. Площадь разрушения покрытия уменьшилась, по сравнению с углами $\gamma = 50$ и 60° , в 2,9 и 2,0 раза, до 4% для состава №2, и 2,85 и 1,8 раза, до 3,5% - состава №3.

Далее исследовали, каким образом изменяется овальность отверстий с эластомерным покрытием после калибрования с различным передним углом режущей кромки калибра-резца. На рисунке 4.42 показана зависимость овальности O отверстий с покрытием нанокompозита состава №1 после калибрования режущим инструментом с различным передним углом γ .

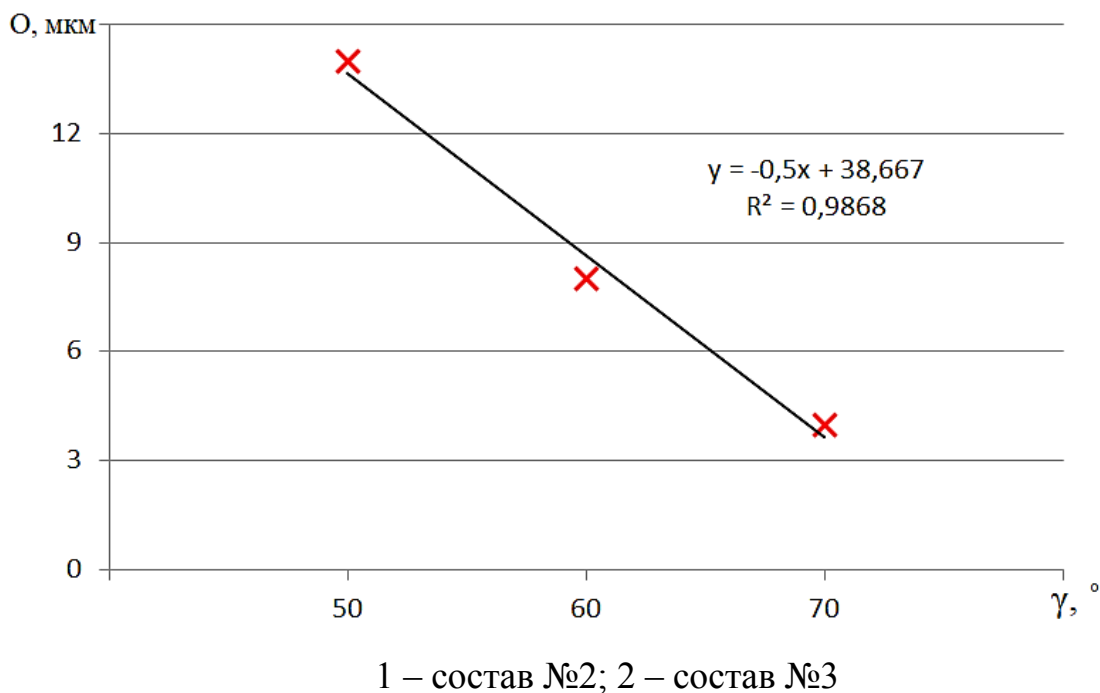


Рисунок 4.42 – Овальность O отверстий с покрытием нанокompозита эластомера Ф-40 (состав №1) после механической обработки калибром-резцом с различным передним углом γ [2]

Отверстие с полимерным покрытием имеет наибольшую овальность $O = 14$ мкм после калибрования инструментом с передним углом режущей кромки $\gamma = 50^\circ$. Калибрование отверстия с полимерным покрытием инструментом с передним углом режущей кромки $\gamma = 60^\circ$ снижает овальность в 1,75 раза, до значения 8 мкм.

Минимальную овальность имеют отверстия с полимерным покрытием после калибрования инструментом с передним углом режущей кромки $\gamma = 70^\circ$. Относительно калибрования инструментами с передними углами режущей кромки $\gamma = 50$ и 60° этот параметр сократился в 2,6 и 2,0 раза, до значения 4 мкм.

Подобная картина имеет место у зависимостей изменения овальности O отверстий после калибрования покрытий эластомерных нанокompозитов составов №2 и №3 инструментом с различными значениями переднего угла режущей кромки (рисунок 4.43). Отверстия с покрытием эластомерных нанокompозитов имеют наибольшую овальность после калибрования режущим инструментом с

передним углом $\gamma = 50^\circ$. Величина O для отверстий с покрытием составов №2 и №3 имеет значения соответственно 13 и 11 мкм. Овальность меньше, чем у покрытия состава №1 (рисунок 4.42). Причина заключается в различном содержании металлических наночастиц наполнителя.

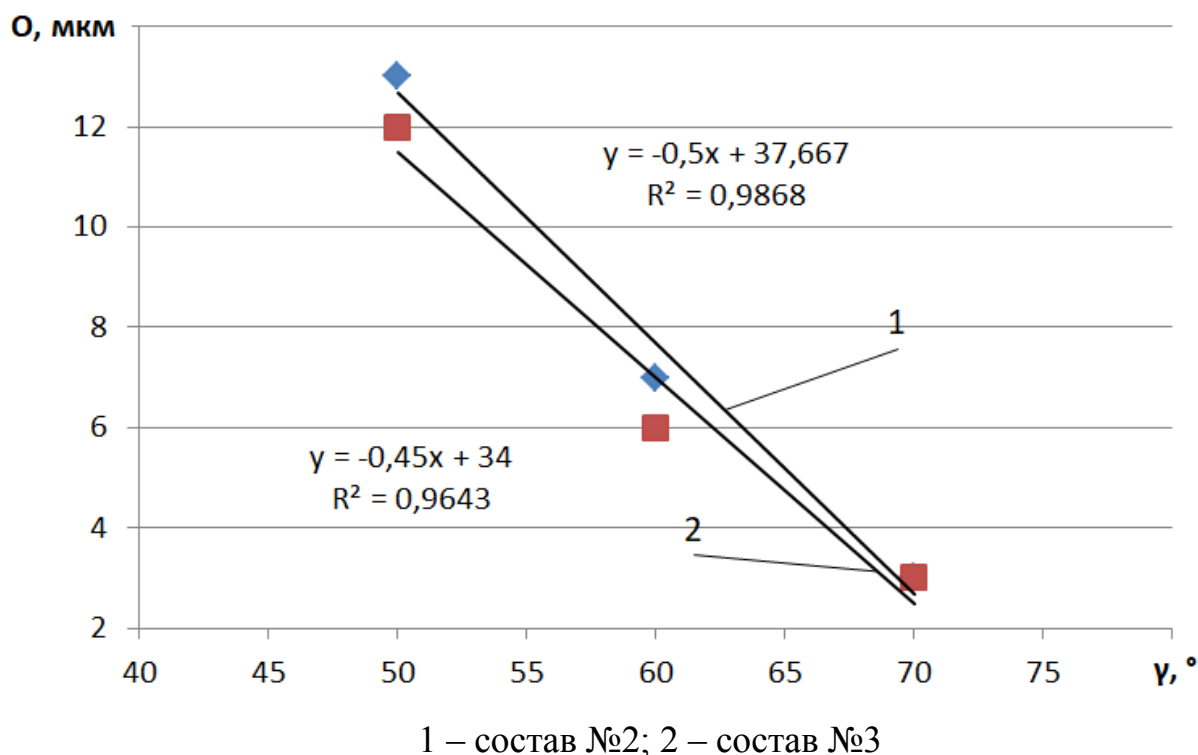


Рисунок 4.43 – Изменение овальности O отверстий с покрытием эластомерных нанокompозитов после обработки калибрующим инструментом с различным передним углом режущей кромки γ

Чем оно меньше, тем меньше усилие резания, тем меньше нарушение геометрии отверстия с покрытием при калибровании.

Овальность отверстия (угол режущей кромки $\gamma = 60^\circ$) с полимерным покрытием уменьшилась в 1,86 раза, до 7 мкм для состава №2 и, в 2,2 раза, до 5 мкм – состава №3 (рисунок 4.43).

Наименьшую овальность имеют отверстия с покрытием эластомерных нанокompозитов составов №2 и №3 после обработки калибром-резцом с передним углом режущей кромки $\gamma = 70^\circ$. Овальность уменьшилась, по сравнению с угла-

ми $\gamma = 50$ и 60° , в 4,3 и 2,3 раза, до 3 мкм для состава №2, и в 3,67 и 1,67 раза, до 3 мкм – состава №3.

Отверстие с полимерным покрытием имеет наибольшее отклонение от заданного размера $\Delta = 30$ мкм после калибрования инструментом с передним углом режущей кромки $\gamma = 50^\circ$ (рисунок 4.44). Калибрование отверстия с полимерным покрытием инструментом с передним углом режущей кромки $\gamma = 60^\circ$ уменьшает отклонение в 1,25 раза, до значения $\Delta = 25$ мкм.

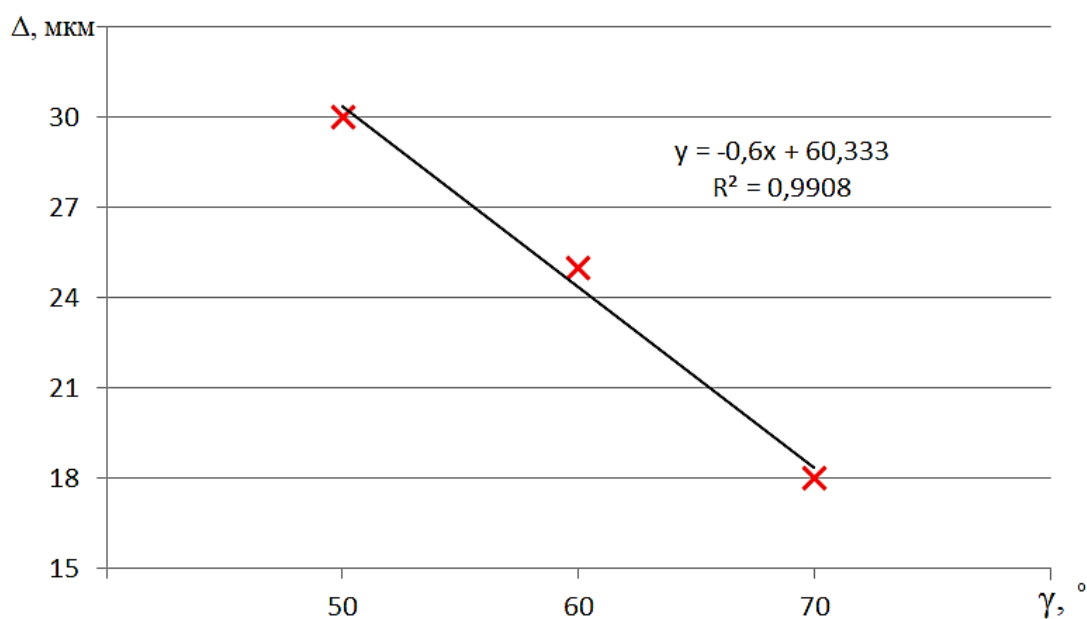


Рисунок 4.44 – Отклонение от заданного размера Δ отверстий с покрытием из эластомерного нанокompозита состава №1 после обработки калибром-резцом с различным передним углом режущей кромки γ [2]

Минимальное отклонение от заданного размера имеют отверстия с полимерным покрытием после калибрования инструментом с передним углом режущей кромки $\gamma = 70^\circ$. Относительно калибрования инструментами с передними углами режущей кромки $\gamma = 50$ и 60° этот параметр сократился в 1,67 и 1,39 раза, до значения $\Delta = 18$ мкм.

Аналогичный характер имеют зависимости отклонения от заданного размера отверстий с покрытиями эластомерных нанокомпозитов составов №2 и №3 после калибровки инструментом с различными значениями переднего угла режущей кромки (рисунок 4.45).

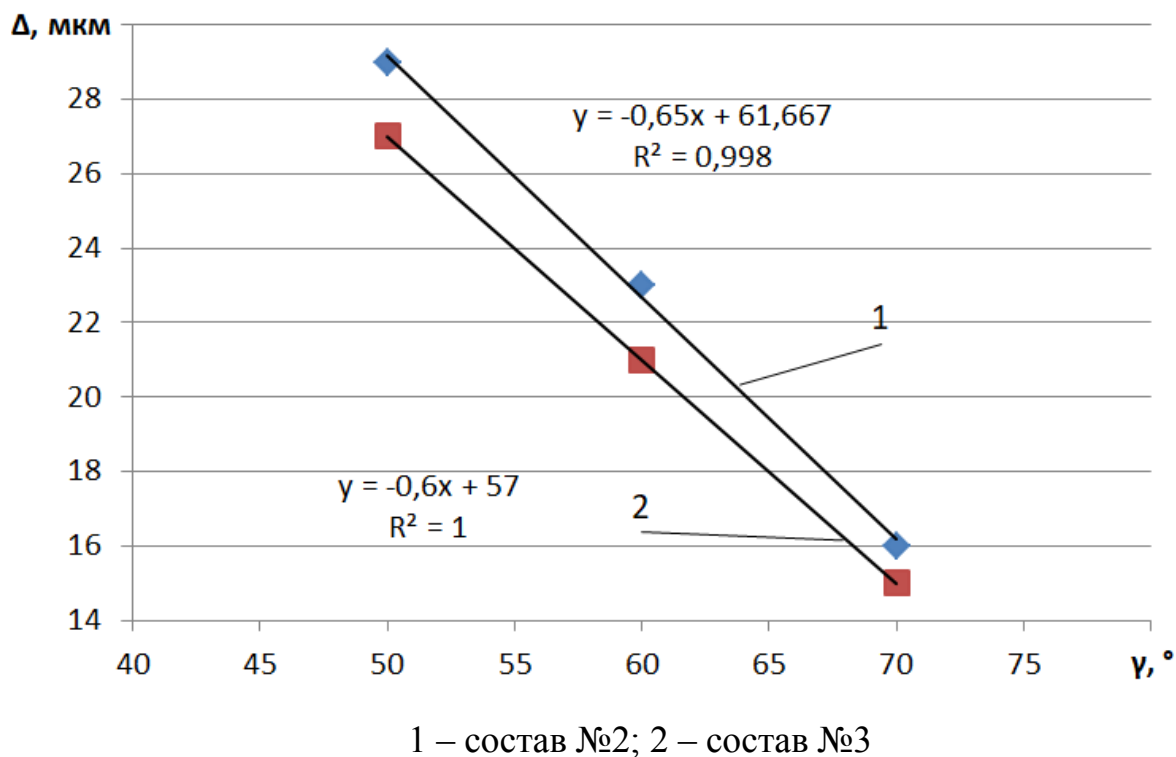


Рисунок 4.45 – Отклонение от заданного размера Δ отверстий с покрытием из эластомерных нанокомпозитов после обработки калибром-резцом с различным передним углом режущей кромки γ

Покрyтия эластомерных нанокомпозитов имеют наибольшие отклонения после калибрования режущим инструментом с передним углом $\gamma = 50^\circ$. Отклонение от заданного размера у отверстий с покрытиями составов №2 и №3 имеет значения соответственно $\Delta = 29$ и 27 мкм. Отклонения меньше, чем у отверстия с покрытием состава №1 (рисунок 4.44). Причина заключается в различном содержании металлических наночастиц наполнителя. Чем оно меньше, тем меньше усилие резания, тем меньше отклонение от заданного размера при калибровании.

Отклонение от заданного размера (угол режущей кромки $\gamma = 60^\circ$) уменьшилось в 1,26 раза, до $\Delta = 23 \text{ мкм}$ для состава №2 и в 1,28 раза, до $\Delta = 21 \text{ мкм}$ – состава №3 (рисунок 4.45).

Наименьшие отклонения от заданного размера имеют отверстия с покрытиями эластомерных нанокомпозитов составов №2 и №3 после обработки калибром-резцом с передним углом режущей кромки $\gamma = 70^\circ$. Отклонение от заданного размера уменьшилось, по сравнению с углами $\gamma = 50$ и 60° , в 1,7 и 1,3 раза, до $\Delta = 17 \text{ мкм}$ для состава №2, и 1,68 и 1,31 раза, до $\Delta = 16 \text{ мкм}$ – состава №3.

Выводы

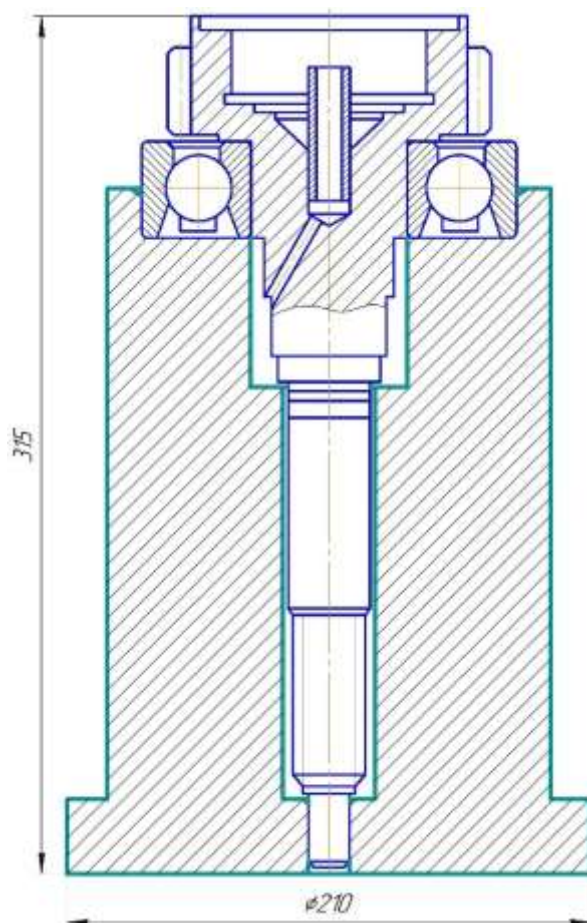
1. С увеличением угла режущей кромки резца-калибра дефектность отверстий с покрытиями эластомерных нанокомпозитов уменьшается. Минимальную дефектность (площадь разрушения покрытия, овальность, отклонение от заданного размера) имеют отверстия с покрытием после калибрования резцом с рациональным углом режущей кромки $\gamma = 70^\circ$.

2. С повышением содержания наполнителей в нанокомпозите дефектность отверстий с композитным покрытием увеличивается. Поэтому максимальные значения площади разрушения покрытия, овальности, отклонения от заданного размера имеют отверстия с покрытиями состава №1, а минимальные – состава №3.

4.4 Расчет точностных характеристик центрирующих приспособлений для клеевых соединений типа «вал-подшипник»

Центрирующее приспособление для сборки клеевого соединения первичного вала с подшипником 170412 коробки передач КАМАЗ-4310

Для центрирования деталей клеевого соединения «первичный вал-подшипник 170412» коробки передач КАМАЗ-4310, разработано приспособление, обеспечивающее требуемые характеристики сопряжения (рисунок 4.46).



1 – первичный вал; 2 – подшипник; 3 – центрирующее приспособление

Рисунок 4.46 – Сборка и центрирование деталей клеевого соединения «первичный вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310

Приспособление изготавливали из стали 10 ГОСТ 1050-2013. Необходимое положение первичного вала осуществляется по наименьшему диаметру хвостовика вала в нижней части центрирующего приспособления. Требуемое расположение подшипника осуществляется по наибольшему диаметру приспособления в верхней его части.

После нанесения на внутреннее кольцо подшипника 170412 нанокompозита герметика АН-111, подшипник по наружному кольцу устанавливают в приспособление. Далее устанавливают вал в приспособление, предварительно нанеся адгезив на изношенное посадочное место.

Для определения характеристик центрирующего приспособления устанавливаем отклонение от соосности деталей клеевого соединения «первичный вал-

подшипник 170412» в пределах 50 мкм (сборочная размерная цепь представлена на рисунке 4.47, замыкающее звено – смещение оси подшипника 170412).

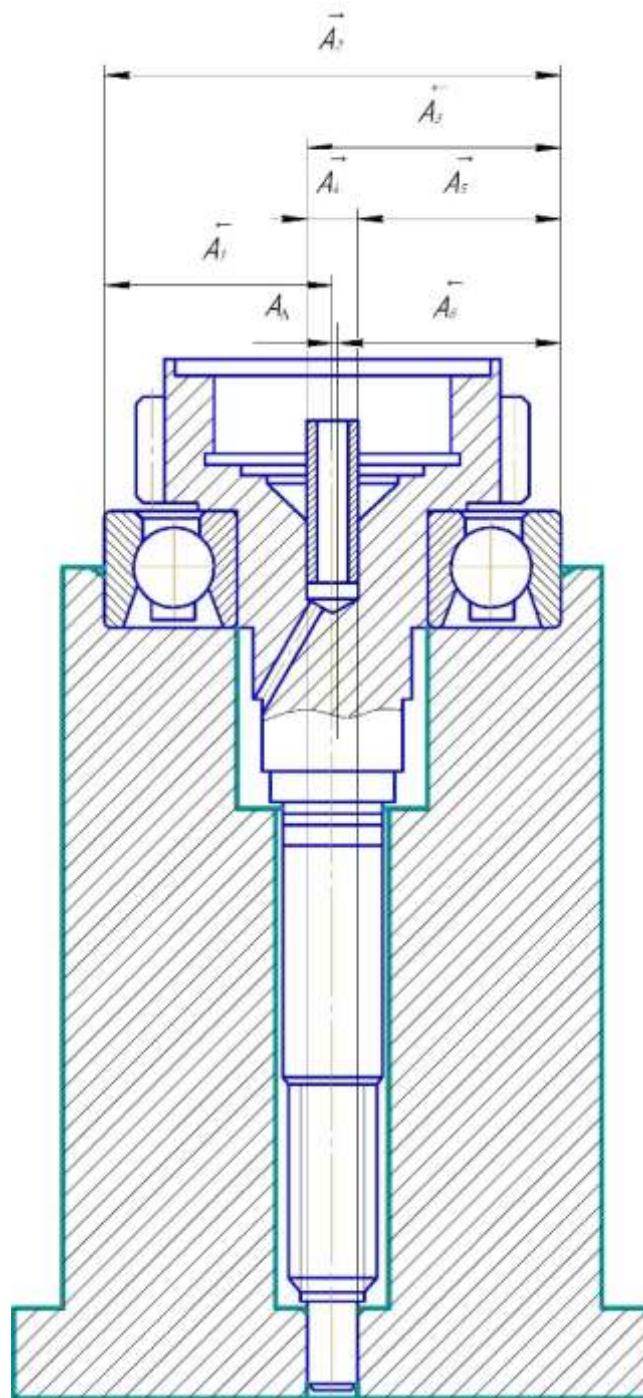


Рисунок 4.47 – Сборочная размерная цепь

Номинальные размеры составляющих звеньев размерной цепи

$A_1 = 75$ мм; $A_2 = 150$ мм; $A_3 = 87,5$ мм; $A_4 = 25$ мм; $A_5 = 62,5$ мм; $A_6 = 75$ мм.

Проверка правильности определения номинальных размеров

$$\sum A_{\text{ув}} - \sum A_{\text{ум}} - \sum A_{\Delta} = 0 \quad (4.39)$$

$$150 + 25 + 62,5 - 75 - 87,5 - 75 - 0 = 0$$

«При сопряжении деталей их соосность зависит от номинальных размеров звеньев цепи, требуемой точности изготовления центрирующего приспособления и т.д.» [53] Приняли:

$$A_{\Delta\text{min}} = 0 \text{ мм}; A_{\Delta\text{max}} = 0,05 \text{ мм}$$

Допуск замыкающего звена

$$T_{\Sigma} = A_{\Delta\text{max}} - A_{\Delta\text{min}} = 0,05 - 0 = 0,05 \text{ мм} = 50 \text{ мкм}$$

Обоснование выбора методики расчета точностных характеристик центрирующего приспособления (расчёт размерной цепи методом максимума-минимума и вероятностным методом) проводили по известным методикам [274, 275], расчет представлен в приложении Ж.

По технико-экономическим показателям наиболее оптимальным является вероятностный метод расчета способом одного качества. Данный метод обеспечивает необходимую точность звеньев для обеспечения требуемой величины соосности вала и подшипника.

*Центрирующее приспособление для сборки клеевого
соединения «первичный вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310*

Центрирующее приспособление выполнено в виде четырехступенчатой втулки и изготавливается из стали 10 ГОСТ 1050-88 (рисунок 4.48).

Для монтажа подшипника, с нанесенным нанокompозитом, по наружному диаметру в ступень диаметром 150 мм сделана фаска. Посадка подшипника по

наружному кольцу с приспособлением – посадка с зазором Н6/16 (минимальный 0 мм, а максимальный – 0,050 мм).

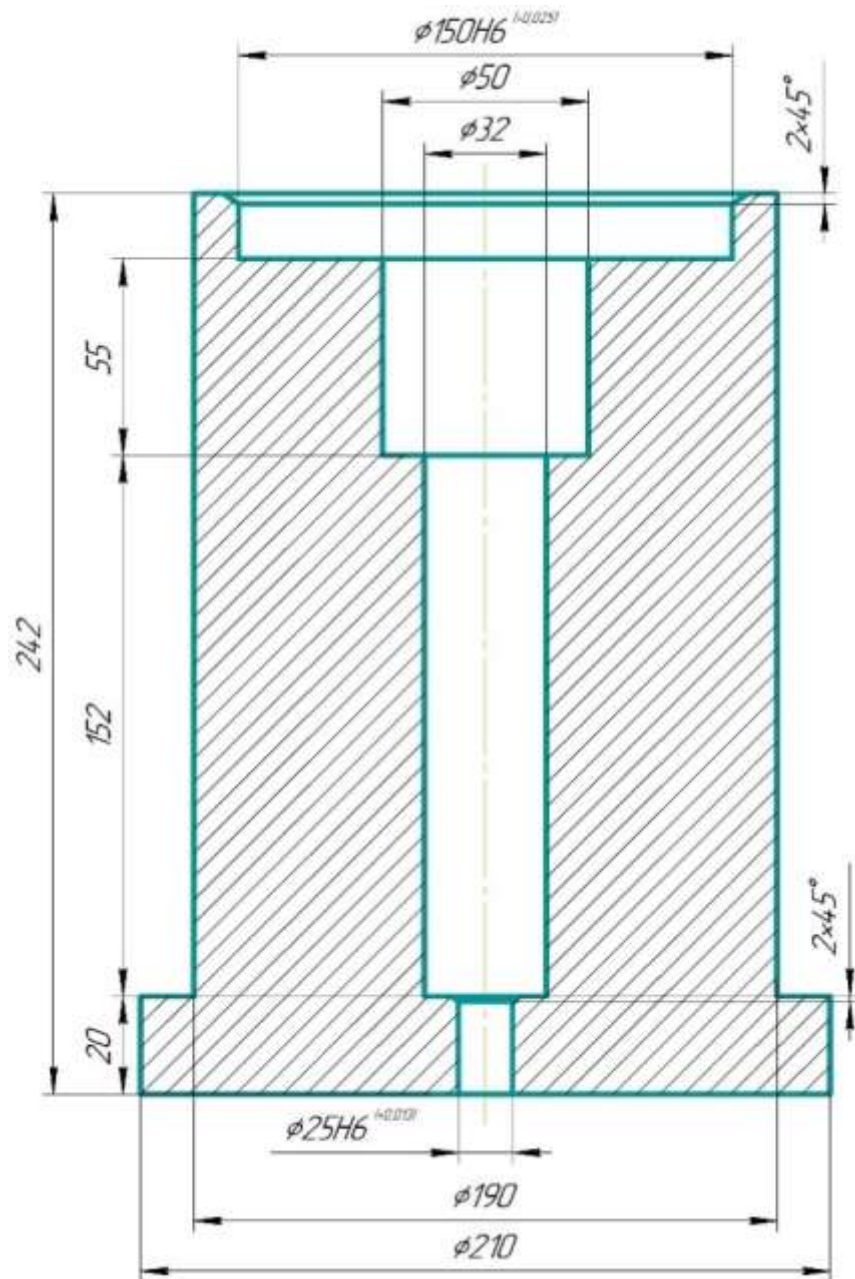


Рисунок 4.48 – Центрирующее приспособление для сборки деталей клеевого соединения «первичный вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310

Посадка хвостовика вала с приспособлением – посадка с зазором Н6/ф6 (минимальный 0,020 мм, а максимальный – 0,046 мм).

В приложении Ж представлены расчеты центрирующих приспособлений для сборки деталей клеевого соединения правой опоры ведомого вала с подшип-

ником 50412, а также промежуточного вала с подшипником 12213 коробки передач КАМАЗ-4310.

Вывод

По технико-экономическим показателям наиболее оптимальным является вероятностный метод расчета способом одного качества. Данный метод обеспечивает требуемую соосность деталей клеевых соединений в центрирующем приспособлении. В сравнении с методом максимума-минимума, вероятностный метод значительно сокращает затраты на изготовление центрирующего приспособления, поэтому окончательно выбрали эту методику расчета.

4.5 Исследование трибологических параметров и контактных напряжений в подшипниках качения с посадками восстановленными нанокompозитом эластомера Ф-40С

4.5.1 Исследование коэффициента Кирхгофа и коэффициента податливости покрытий из нанокompозита эластомера Ф-40С

«Многочисленными исследованиями установлено, что в подшипнике с полимерной посадкой параметры контакта нагруженных тел с дорожкой качения существенно отличаются от аналогичных параметров стандартного подшипника.» [157] Параметры контакта в наших исследованиях рассчитывали по методике [158]. При расчете необходимы значения коэффициента Кирхгофа η . «В виду того, что полимерный слой имеет предельную толщину не более 0,1...0,15 мм его нельзя рассматривать как упругое полупространство с не ограниченными размерами во всех направлениях» [157]. Поэтому известные формулы для расчета коэффициента Кирхгофа η дают не корректный результат и его следует определять опытным путем [16, 158, 159, 276].

Изменения коэффициента Кирхгофа η с увеличением толщины полимерной подложки h показаны на рисунке 4.49.

Зависимости, как в случае подложки из эластомера Ф-40С, так и нанокompозитов на его основе, линейные. При максимальной толщине подложки $h = 0,15\text{мм}$ коэффициент Кирхгофа имеет наибольшее значение. Для состава №1, $\eta = 8,2 \times 10^{-5} \text{мм}^2 / \text{Н}$; состава №2, $\eta = 7,7 \times 10^{-5} \text{мм}^2 / \text{Н}$. Превышение, в сравнении с подложкой из эластомера, минимальное и составляет соответственно 9,3 и 2,7% ($\eta = 7,5 \times 10^{-5} \text{мм}^2 / \text{Н}$).

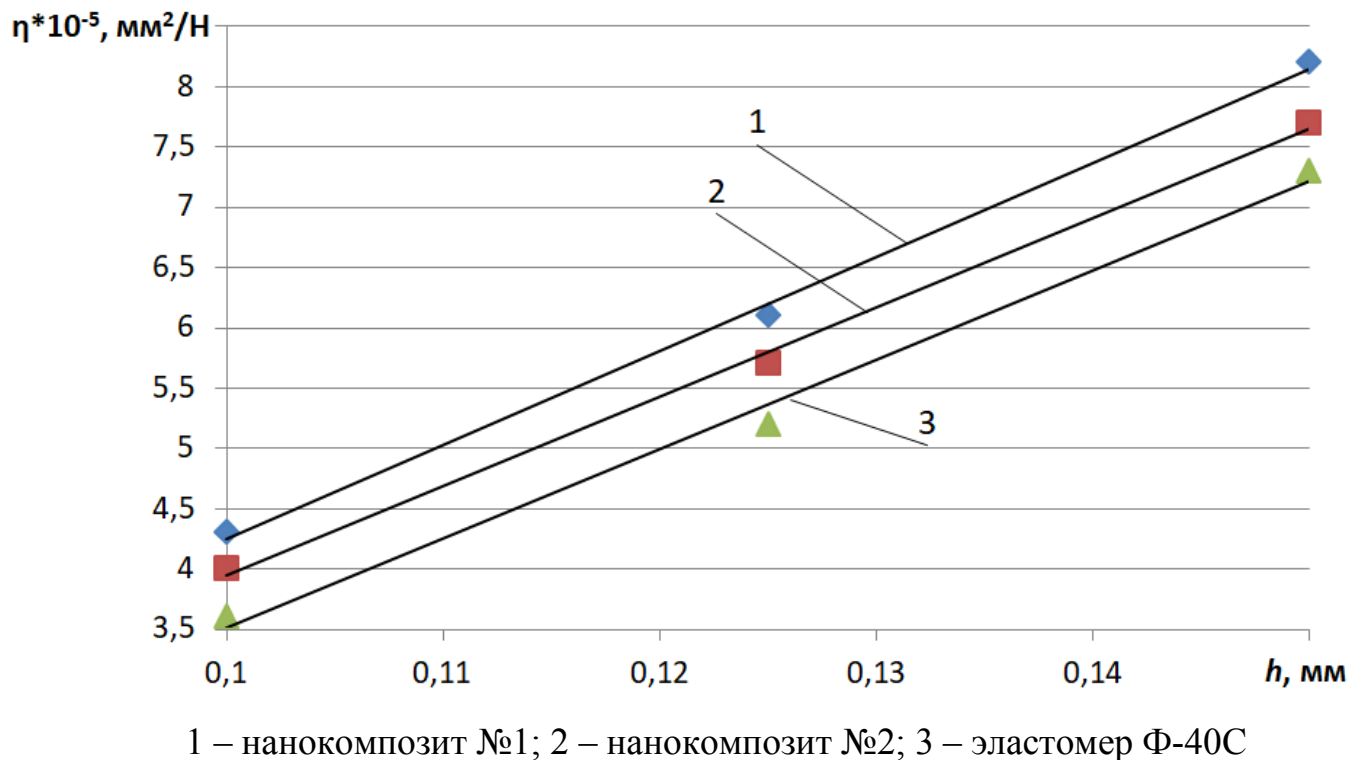
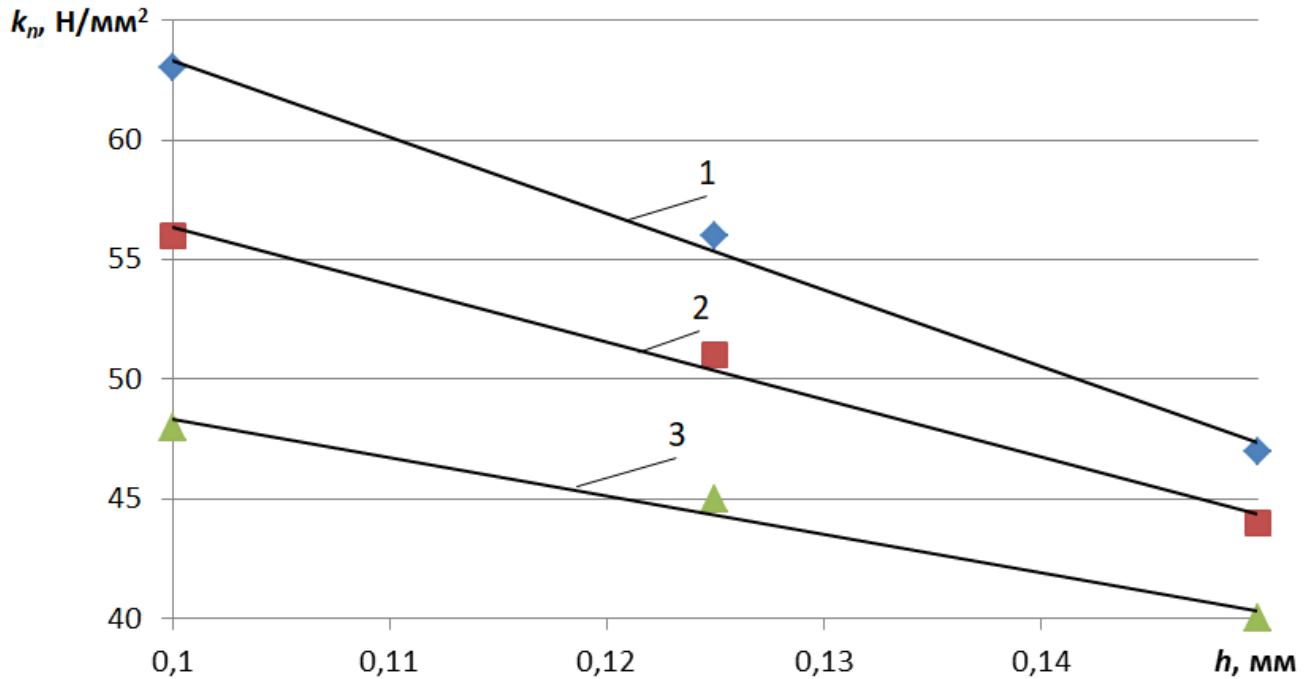


Рисунок 4.49 – Зависимость коэффициента Кирхгофа η от толщины полимерной подложки h

Зависимости коэффициента податливости упругого основания $k_{\text{п}}$ от толщины полимерной подложки h показаны на рисунке 4.50.

При максимальной толщине подложки $h = 0,15\text{мм}$ для состава №2 $k_{\text{п}} = 47\text{Н} / \text{мм}^2$, состава №1 $k_{\text{п}} = 44\text{Н} / \text{мм}^2$.



1 – наноккомпозит №2; 2 – наноккомпозит №1; 3 – эластомер Ф-40С

Рисунок 4.50 – Зависимость коэффициента податливости упругого основания k_n от толщины полимерной подложки h

Выводы

1. Повышение деформационно-прочностных свойств наноккомпозитов, в сравнении с не наполненным эластомером, является основной причиной увеличения коэффициента Кирхгофа до 19,4%. Соответственно увеличивается пятно контакта нагруженных тел с дорожками качения и снизятся контактные напряжения в подшипниках с посадкой из наноккомпозитов.

2. Благодаря более высоким значениям модуля упругости наноккомпозита увеличится жесткость опоры и будет меньше смещение осей сопрягаемых деталей подшипникового узла при радиальном нагружении.

**4.5.2 Исследование контактных напряжений и долговечности
подшипников качения с посадками восстановленными
наноккомпозитом эластомера Ф-40С**

В таблицах 4.9 и 4.10 представлены результаты исследования трибологических параметров в подшипниках 209 с посадками из наноккомпозитов составов №1 и №2.

Таблица 4.9 – Параметры площади пятна контакта нагруженных тел с дорожкой наружного кольца и коэффициент распределения нагрузки в подшипнике 209 с посадкой из наноккомпозита состава №1 на основе эластомера Ф-40С

Обозначение	Нагрузка, 3471 Н	Нагрузка, 4166 Н	Нагрузка, 4860 Н
Центральное тело качения			
a_0 , мм (большая полуось эллипса площади контакта)	3,33 (2,30)*	3,53 (2,44)	3,72 (2,57)
b_0 , мм (малая полуось эллипса площади контакта)	0,46 (0,32)	0,48 (0,33)	0,51 (0,35)
S_0 , мм ² (площади контакта)	4,81 (2,31)	5,37 (2,53)	5,96 (2,82)
Первое боковое тело качения			
a_1 , мм (большая полуось эллипса площади контакта)	3,0 (2,01)	3,2 (2,14)	3,36 (2,25)
b_1 , мм (малая полуось эллипса площади контакта)	0,41 (0,28)	0,44 (0,29)	0,46 (0,31)
S_1 , мм ² (площади контакта)	3,88 (1,76)	4,42 (1,95)	4,86 (2,19)
Второе боковое тело качения			
a_2 , мм (большая полуось эллипса площади контакта)	1,77 (-)	1,88 (-)	1,98 (-)
b_2 , мм (малая полуось эллипса площади контакта)	0,24 (-)	0,26 (-)	0,27 (-)
S_2 , мм ² (площади контакта)	1,34 (-)	1,53 (-)	1,68 (-)

*В скобках указаны расчетные значения для подшипника 209 со стандартной посадкой

Таблица 4.10 – Параметры площади пятна контакта нагруженных тел с дорожкой наружного кольца и коэффициент распределения нагрузки в подшипнике 209 с посадкой из нанокompозита состава №2 на основе эластомера Ф-40С

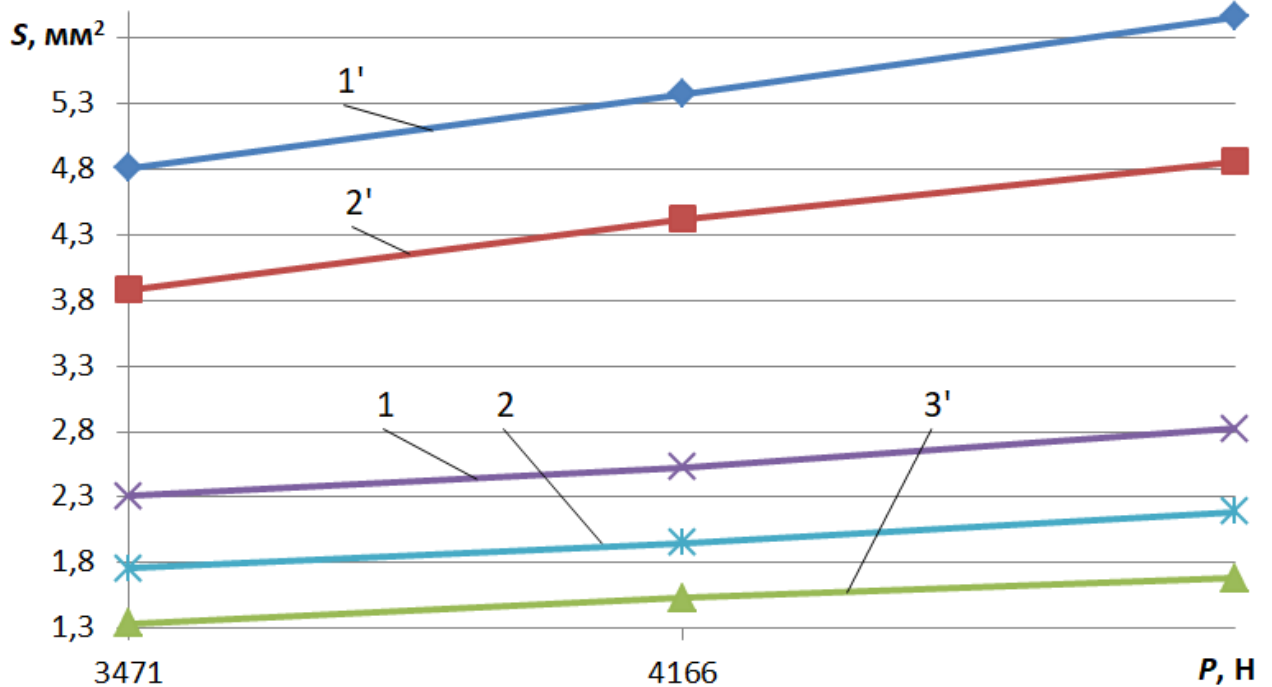
Обозначение	Нагрузка, 3471 Н	Нагрузка, 4166 Н	Нагрузка, 4860 Н
Центральное тело качения			
a_0 , мм (большая полуось эллипса площади контакта)	3,27 (2,30)*	3,47 (2,44)	3,66 (2,57)
b_0 , мм (малая полуось эллипса площади контакта)	0,45 (0,32)	0,48 (0,33)	0,50 (0,35)
S_0 , мм ² (площади контакта)	4,62 (2,31)	5,23 (2,53)	5,74 (2,82)
Первое боковое тело качения			
a_1 , мм (большая полуось эллипса площади контакта)	2,93 (2,01)	3,11 (2,14)	3,28 (2,25)
b_1 , мм (малая полуось эллипса площади контакта)	0,40 (0,28)	0,43 (0,29)	0,45 (0,31)
S_1 , мм ² (площади контакта)	3,7 (1,76)	4,20 (1,95)	4,62 (2,19)
Второе боковое тело качения			
a_2 , мм (большая полуось эллипса площади контакта)	1,7 (-)	1,80 (-)	1,90 (-)
b_2 , мм (малая полуось эллипса площади контакта)	0,23 (-)	0,25 (-)	0,26 (-)
S_2 , мм ² (площади контакта)	1,24 (-)	1,41 (-)	1,55 (-)

*В скобках указаны расчетные значения для подшипника 209 со стандартной посадкой [219]

Площадь пятна контакта нагруженных тел с дорожками качения наружных колец подшипников 209, с посадками из эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2, увеличиваются (рисунки 4.51 и 4.52).

В подшипнике, нагруженным радиальной нагрузкой $P = 3471$ Н, площадь пятна контакта центрального тела с дорожкой качения с посадкой: из состава №1 составила 4,81 мм² (рисунок 4.51); состава №2 – 4,62 мм² (рисунок 4.52), т.е. увеличилась соответственно в 2,1 и 2,0 раза в сравнении со стандартной посадкой

(2,31 мм²). Площадь пятна контакта первых боковых тел также увеличилась, а также часть нагрузки перераспределилась на вторые боковые тела.

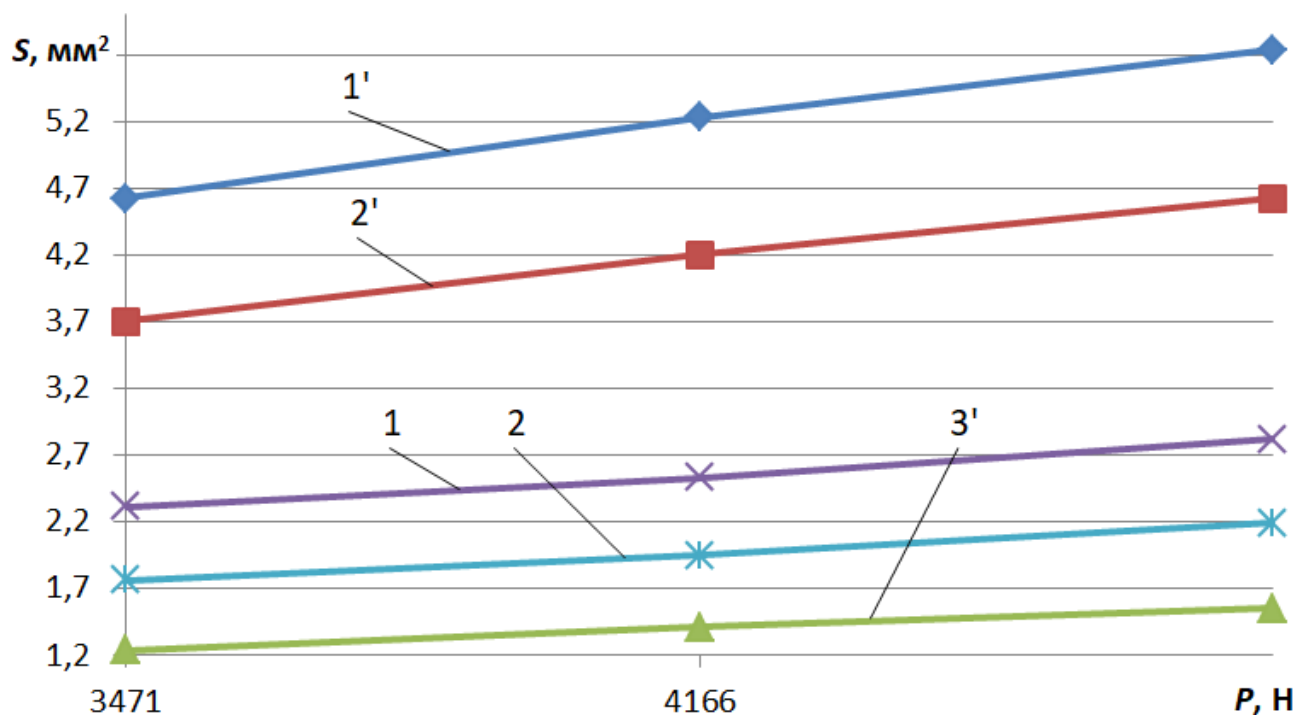


1, 2 – площадь пятна контакта центрального и первого бокового тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника 209 со стандартной посадкой (расчетные значения); 1', 2', 3' – площадь пятна контакта центрального, первого и второго боковых тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника с посадкой нанокompозита состава №1

Рисунок 4.51 – Зависимость площади S пятна контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника 209 от радиальной нагрузки P

Аналогичная картина наблюдается при радиальной нагрузке $P = 4166$ Н и $P = 4860$ Н

В таблицах 4.11 и 4.12 представлены результаты исследования распределения нагрузки между телами качения и контактные напряжения в подшипнике 209 со стандартной посадкой и аналогичных подшипниках с посадками из нанокompозитов составов №1 и №2.



1, 2 – площадь пятна контакта центрального и первого бокового тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника 209 со стандартной посадкой (расчетные значения); 1', 2', 3' – площадь пятна контакта центрального, первого и второго боковых тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника с посадкой нанокompозита состава №2

Рисунок 4.52 – Зависимость площади S пятна контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца подшипника 209 от радиальной нагрузки P

На рисунке 4.53 показано распределение нагрузки между телами качения в подшипнике 209 и аналогичном подшипнике с посадкой из нанокompозита состава №1. Зависимости 1, 2 и 3 получены расчетным путем для стандартного подшипника, с учетом значений радиальной нагрузки: 3471; 4166 и 4860 Н. Подшипник выбран с нормальным радиальным зазором и смонтирован в отверстии корпусной детали с нулевым зазором посадки [219].

Как видно из рисунка 4.53, наличие упругой полимерной подложки приводит к снижению нагрузки на центральное тело: 1) при $P = 3471$ Н – уменьшилась в 1,28 раза; 2) при $P = 4166$ Н – уменьшилась в 1,27 раза; 3) при $P = 4860$ Н – уменьшилась в 1,28 раза.

Таблица 4.11 – Распределение нагрузки между телами качения и контактные напряжения в подшипнике 209 со стандартной посадкой и аналогичном подшипнике с посадкой из эластомерного нанокompозита состава №1

Обозначение	Нагрузка, 3471 Н	Нагрузка, 4166 Н	Нагрузка, 4860 Н
Центральное тело качения			
Нагрузка P_0 , Н	1588 (2036)	1924 (2443)	2224 (2850)
Контактное напряжение σ_0 , Н/мм ²	330 (881)	358 (966)	373 (1011)
Первое боковое тело качения			
Нагрузка P_0 , Н	1175 (936)	1416 (1124)	1665 (1311)
Контактное напряжение σ_0 , Н/мм ²	303 (532)	320 (576)	338 (599)
Второе боковое тело качения			
Нагрузка P_0 , Н	238 (-)	286 (-)	334 (-)
Контактное напряжение σ_0 , Н/мм ²	177 (-)	187 (-)	199 (-)
Коэффициент распределения нагрузки			
$K_{рн}$	0,74 (0,46)	0,74 (0,46)	0,74 (0,46)

*В скобках указаны расчетные значения для подшипника 209 со стандартной посадкой [219]

По вышеуказанным причинам в подшипнике с полимерной посадкой нагрузка на первые боковые тела качения увеличилась: при $P = 3471$ Н – в 1,25 раза, при $P = 4166$ Н. в 1,26 раза, при $P = 4860$ Н в 1,27 раза.

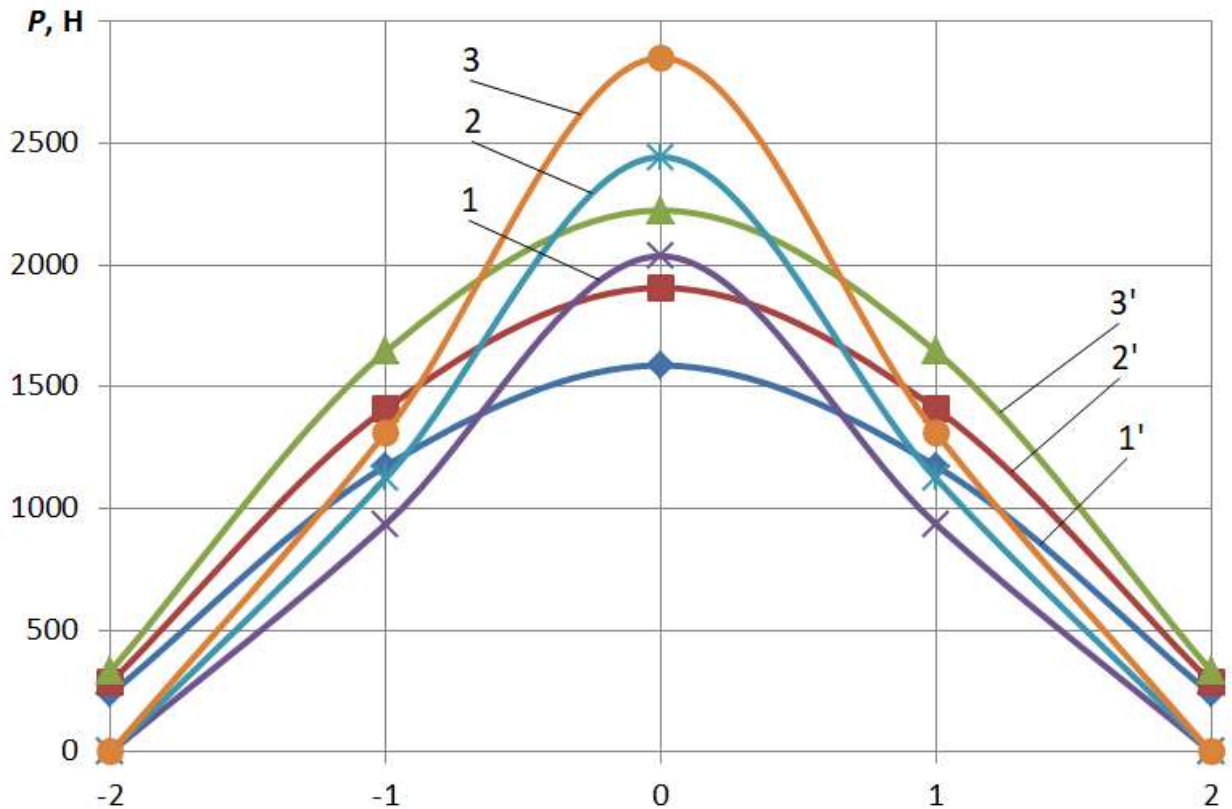
Часть радиальной нагрузки на подшипник перераспределяется на вторые боковые тела качения: при $P = 3471$ Н нагрузка составляет 238 Н; при $P = 4166$ Н – 286 Н, при $P = 4860$ Н – 334 Н.

Таблица 4.12 – Распределение нагрузки между телами качения и контактные напряжения в подшипнике 209 со стандартной посадкой и аналогичном подшипнике с посадкой из эластомерного нанокompозита состава №2

Обозначение	Нагрузка, 3471 Н	Нагрузка, 4166 Н	Нагрузка, 4860 Н
Центральное тело качения			
Нагрузка P_o , Н	1613 (2036)	1924 (2443)	2259 (2850)
Контактное напряжение σ_o , Н/мм ²	349 (881)	368 (966)	393 (1011)
Первое боковое тело качения			
Нагрузка P_o , Н	1162 (936)	1405 (1124)	1652 (1311)
Контактное напряжение σ_o , Н/мм ²	314 (532)	334 (576)	357 (599)
Второе боковое тело качения			
Нагрузка P_o , Н	226 (-)	271 (-)	316 (-)
Контактное напряжение σ_o , Н/мм ²	182 (-)	192 (-)	204 (-)
Коэффициент распределения нагрузки			
$K_{рн}$	0,72 (0,46)	0,72 (0,46)	0,72 (0,46)

*В скобках указаны расчетные значения для подшипника 209 со стандартной посадкой [219]

На рисунке 4.54 показано распределение нагрузки между телами качения в подшипнике 209 и аналогичном подшипнике с посадкой из нанокompозита состава №2. Зависимости 1, 2 и 3 получены расчетным путем для стандартного подшипника, нагруженным радиальным усилием: 3471; 4166 и 4860 Н. Подшипник выбран с нормальным радиальным зазором и смонтирован в отверстии корпусной детали с нулевым зазором посадки [219].



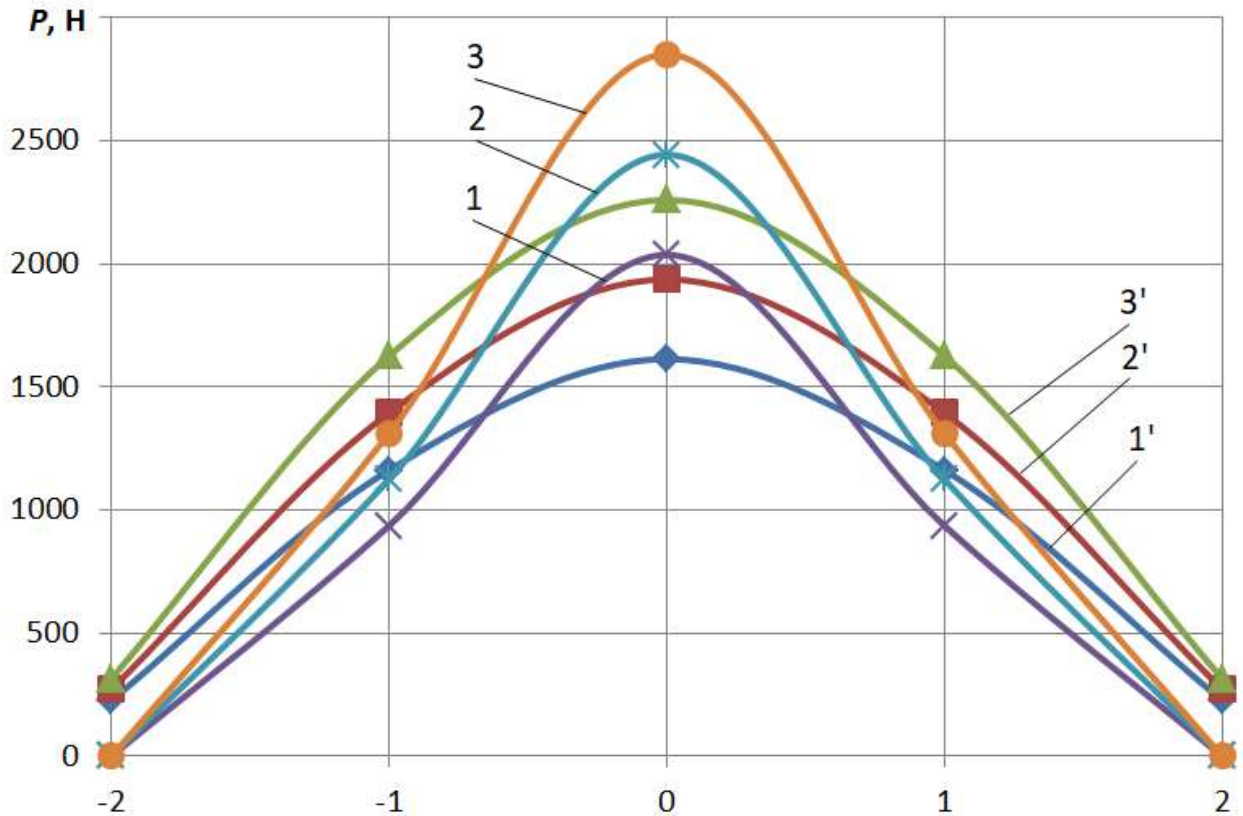
0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения;

1, 2, 3 – нагрузка на тела в подшипнике со стандартной посадкой под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н, соответственно; 1', 2', 3' – соответственно, нагрузка на тела в подшипнике с посадкой из нанокompозита состава №1 под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н

Рисунок 4.53 – Распределение нагрузки между телами качения в подшипнике 209

Как видно из рисунка 4.54, наличие упругой полимерной подложки приводит к снижению нагрузки на центральное тело: 1) при $P = 3471$ – Н уменьшилась в 1,26 раза; 2) при $P = 4166$ Н – уменьшилась в 1,27 раза; 3) при $P = 4860$ Н – уменьшилась в 1,28 раза.

В подшипнике с полимерной посадкой нагрузка на первые боковые тела качения увеличилась: при $P = 3471$ Н – в 1,24 раза, при $P = 4166$ Н. в 1,25 раза, при $P = 4860$ Н в 1,26 раза.



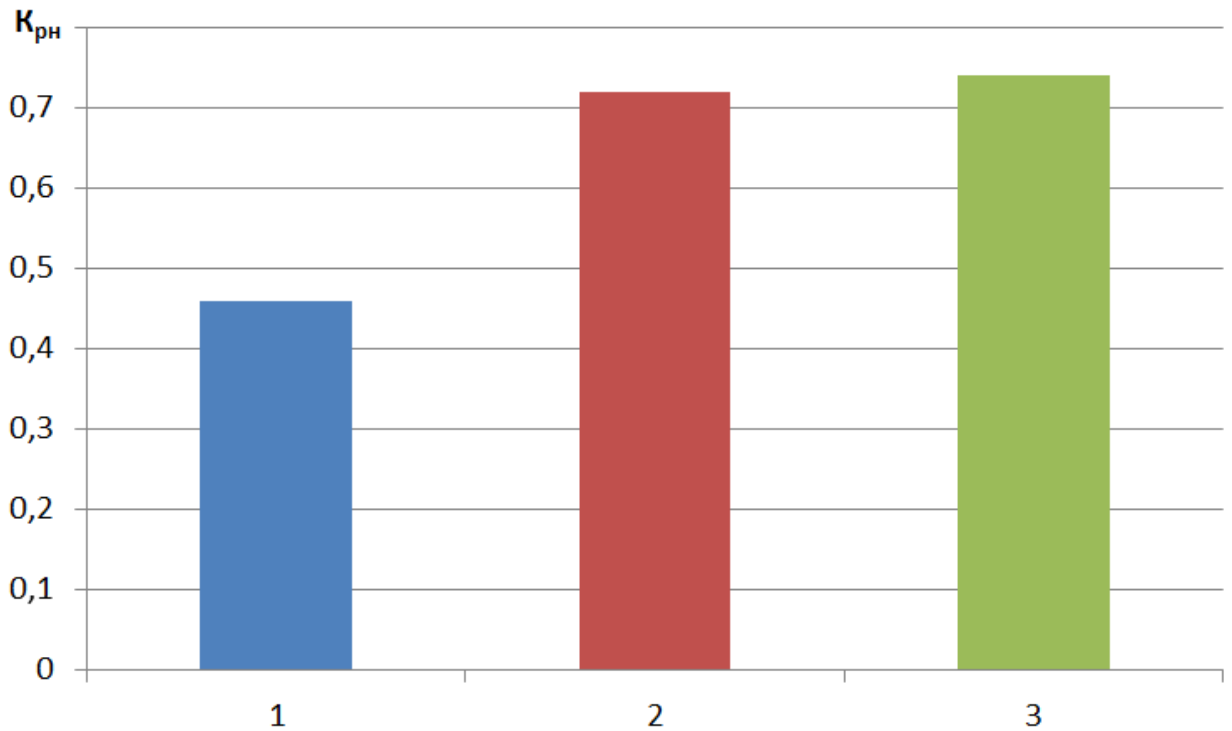
0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения;

1, 2, 3 – нагрузка на тела в подшипнике со стандартной посадкой под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н, соответственно; 1', 2', 3' – соответственно, нагрузка на тела в подшипнике с посадкой из нанокompозита состава №2 под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н

Рисунок 4.54 – Распределение нагрузки между телами качения в подшипнике 209

Нагрузка на вторые боковые тела качения: при $P = 3471$ Н – 226 Н; при $P = 4166$ Н – 271 Н, при $P = 4860$ Н – 316 Н.

Коэффициент распределения нагрузки в подшипниках с посадками из нанокompозитов составов №1 и №2, в сравнении со стандартным подшипником с нулевым зазором посадки, увеличился от 0,46 до 0,72 для состава №2 и до 0,74, для состава №1, т.е. в 1,56 и 1,6 раза соответственно (рисунок 4.55).



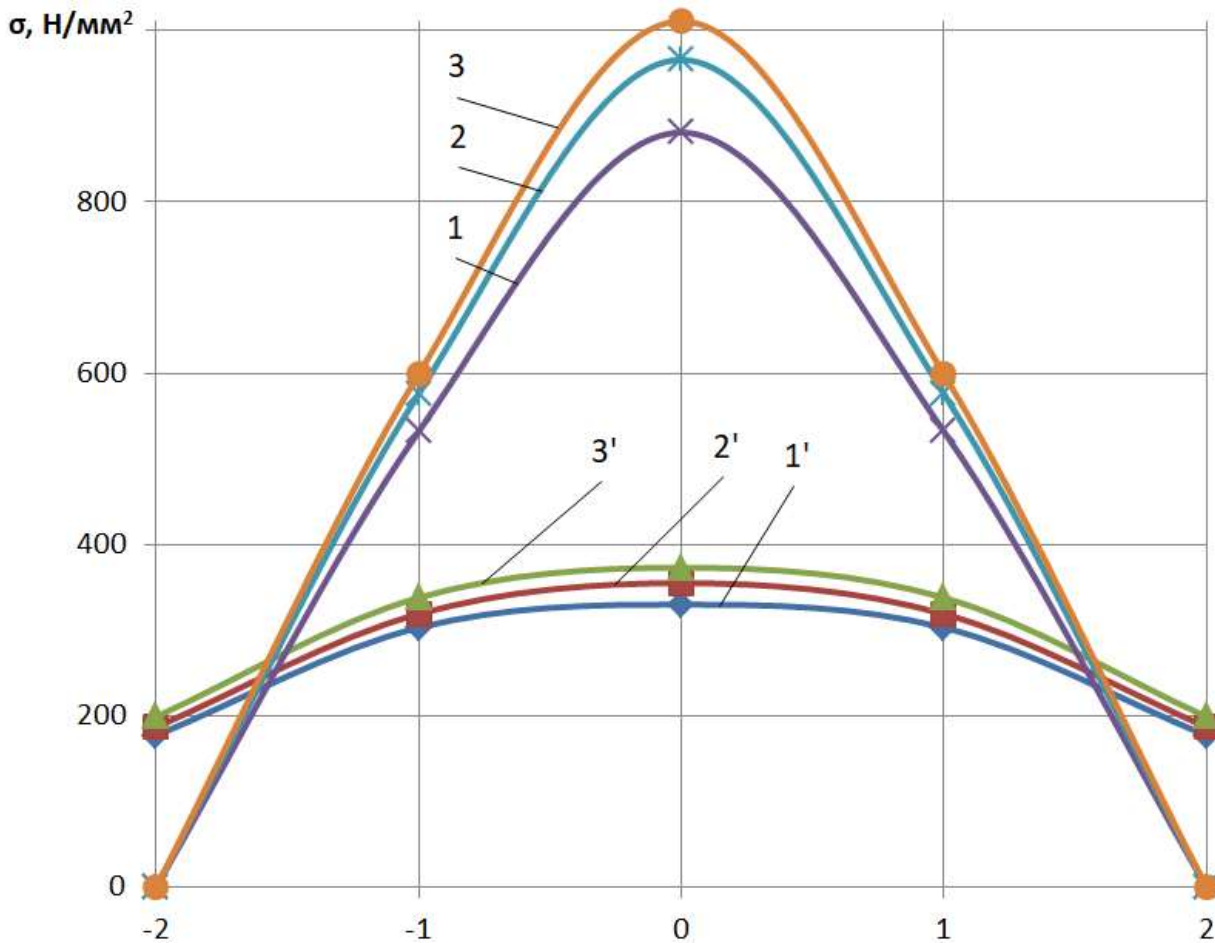
1 – подшипник 209 со стандартной посадкой; 2 – подшипник с посадкой из состава №2; 2 – подшипник с посадкой из состава №1

Рисунок 4.55 – Коэффициент распределения нагрузки $K_{рн}$

Контактные напряжения в подшипниках 209 со стандартной посадкой и посадками из нанокompозитов составов №1 и №2 представлены на рисунках 4.56 и 4.57.

При радиальной нагрузке на подшипник $P = 3471$ Н напряжение в подшипнике с посадкой состава №1 на центральное тело качения, по сравнению со стандартным подшипником, снизилось с 881 до 330 Н/мм², т.е. в 2,67 раза (при $P = 4166$ Н – снизилось в 2,72 раза; при $P = 4860$ Н – снизилось в 2,70 раза).

При радиальной нагрузке на подшипник $P = 3471$ Н напряжение на первых боковых телах качения, по сравнению со стандартным подшипником, снизилось с 532 до 303 Н/мм², т.е. в 1,75 раза (при $P = 4166$ Н – снизилось в 1,8 раза; при $P = 4860$ Н – снизилось в 1,77 раза).



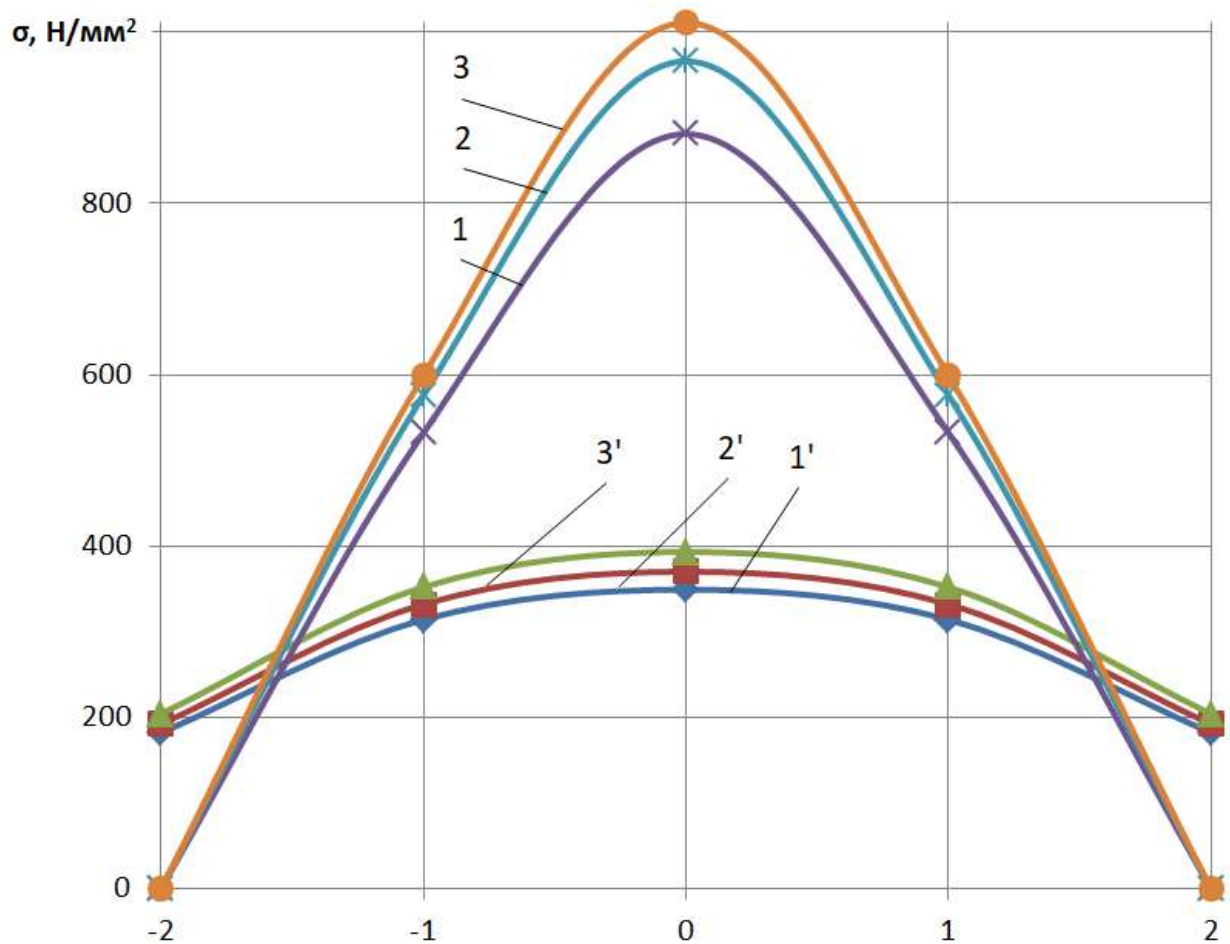
0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения;

1, 2, 3 – нагрузка на тела в подшипнике со стандартной посадкой под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н, соответственно; 1', 2', 3' – соответственно, нагрузка на тела в подшипнике с посадкой из нанокompозита состава №1 под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н

Рисунок 4.56 – Контактные напряжения в подшипнике 209

В подшипнике с посадкой из эластомерного нанокompозита, нагруженном радиальными нагрузками 3471; 4166 и 4860 Н напряжения в зоне контакта вторых боковых тел с дорожкой качения наружного кольца составили соответственно 177; 187 и 199 Н/мм².

Аналогичная картина имеет место в подшипнике с полимерной посадкой из состава №2 (рисунок 4.57). При $P = 3471$ Н напряжение снизилось в 2,52 раза, при $P = 4166$ Н – снизилось в 2,62 раза, при $P = 4860$ Н – снизилось в 2,57 раза).



0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения;

1, 2, 3 – нагрузка на тела в подшипнике со стандартной посадкой под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н, соответственно; 1', 2', 3' – соответственно, нагрузка на тела в подшипнике с посадкой из нанокompозита состава №2 под радиальной нагрузкой $P = 3471$; 4166 и 4860 Н

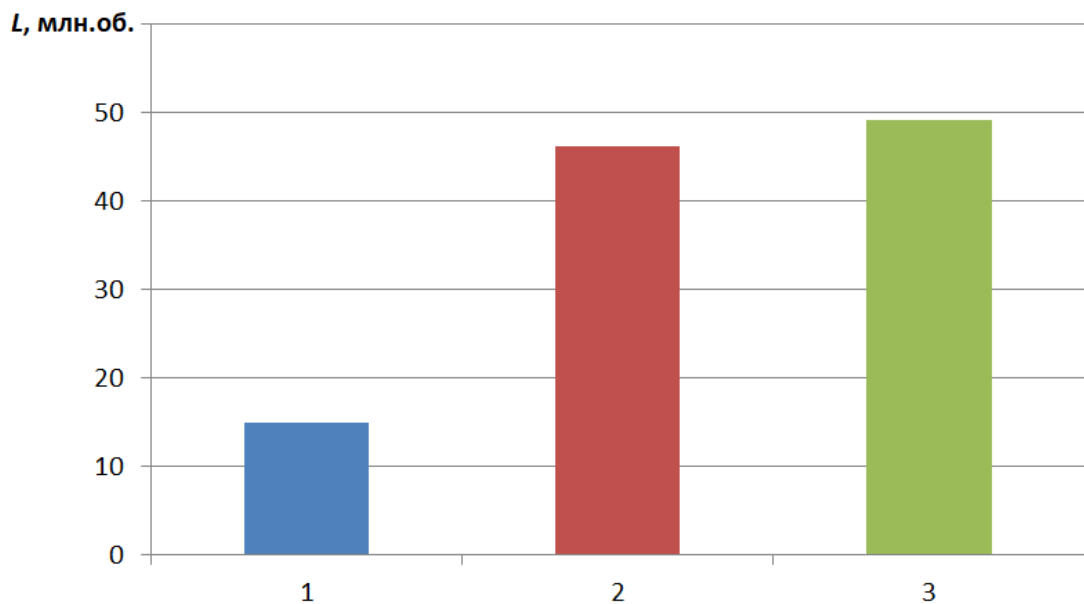
Рисунок 4.57 – Контактные напряжения в подшипнике 209

При радиальной нагрузке на подшипник $P = 3471$ Н напряжение на первых боковых телах качения, по сравнению со стандартным подшипником, снизилось в 1,69 раза, при $P = 4166$ Н – снизилось в 1,72 раза, при $P = 4860$ Н – снизилось в 1,67 раза.

В подшипнике с посадкой из эластомерного нанокompозита, нагруженном радиальными нагрузками 3471; 4166 и 4860 Н напряжения в зоне контакта вторых боковых тел с дорожкой качения наружного кольца составили соответственно 177; 187 и 199 Н/мм².

На завершающем этапе эксперимента исследовали долговечность подшипников 209 с посадками из нанокompозитов составов №1 и №2 при местном нагружении наружного кольца подшипника радиальной нагрузкой на подшипник $P = 10450$ Н.

Ресурс подшипников 209 в условиях местного нагружения наружного кольца показан на рисунке 4.58. Долговечность подшипников 209 с посадками, восстановленными нанокompозитами: состава №1 составляет 49,18 млн. об.; состава №2 – 46,12 млн. об., что в 3,3 и 3,1 раза больше расчетного ресурса (14,87 млн.об.).



1 – расчётная; 2 – долговечность подшипника с полимерной посадкой состава №2; 3 – долговечность подшипника с полимерной посадкой состава №1

Рисунок 4.58 – Долговечность подшипника 209

Выводы

1. В подшипниках 209 с посадками из эластомерных нанокompозитов составов №1 и №2, по сравнению со стандартной посадкой, увеличивается площадь пятна контакта нагруженных тел с дорожками качения наружного кольца. В зависимости от радиальной нагрузки на подшипник площадь пятна контакта цен-

трального тела с дорожкой качения увеличилась от 2,0 до 2,12 раза, первых боковых тел качения увеличилась от 2,1 до 2,27 раза.

2. Благодаря наличию упругой полимерной посадки, кольцо подшипника при радиальном нагружении деформируется, что приводит к перераспределению нагрузки с центрального, наиболее нагруженного, на первые и вторые боковые тела качения. В зависимости от радиальной нагрузки на подшипник нагрузка на центральное тело качения снизилась от 1,26 до 1,28 раза, на первые боковые тел качения увеличилась от 1,24 до 1,27 раза. При этом часть радиальной нагрузки на подшипник перераспределилась на вторые боковые тела качения.

3. Коэффициент распределения нагрузки в подшипниках 209 с посадками из эластомерных нанокомпозитов составов №1 и №2, по сравнению с подшипником с нулевым зазором посадки, увеличился от 0,46 до 0,74 и 0,72, т.е. в 1,6 и 1,56 раза соответственно.

4. Благодаря увеличению площади пятна контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца, в подшипниках 209 с посадками из эластомерных нанокомпозитов составов №1 и №2, по сравнению со стандартной посадкой, уменьшились контактные напряжения. В зависимости от радиальной нагрузки на подшипник контактное напряжение на центральном теле качения снизилось с 2,72 до 2,52 раза, на первых боковых телах качения с 1,8 до 1,67 раза.

5. Ресурс подшипника 209 с посадками, восстановленными нанокомпозитами: состава №1 составляет 49,18 млн. об.; состава №2 – 46,12 млн. об., что в 3,3 и 3,1 раза больше расчетного ресурса (14,87 млн.об.).

4.6 Исследование долговечности посадок, восстановленных полимерными нанокомпозитами

На завершающем этапе экспериментальных исследований изучали ресурс посадок подшипников, восстановленных эластомерами и нанокомпозитами на их основе, определили максимально допустимую толщину полимерных покрытий при восстановлении посадочных отверстий корпусных деталей различными со-

ставами эластомерных нанокомпозитов, исследовали тепловой баланс восстановленных подшипниковых узлов.

Экспериментальными исследованиями многих авторов установлено, что ресурс t посадок подшипников качения, восстановленных полимерными материалами, во многом определяется толщиной полимерного слоя h в сопряжении «подшипник-деталь» [10, 16]. Чем больше величина h , тем меньше ресурс t . Графическая зависимость при этом не линейная. Такая графическая зависимость называется кривой Веллера. Механизм формирования подобной зависимости носит вероятностный характер. Чем больше толщина полимерного покрытия, тем больше объем материала, тем больше вероятность появления в нем дефектов в виде пор, микротрещин, агломератов (в случае композита) и др., являющихся причиной снижения прочности, выносливости и соответственно ресурса материала

На рисунке 4.59 представлены результаты исследования долговечности восстановленных посадок подшипников 209 при различной толщине полимерного покрытия нанокомпозита на основе эластомера Ф-40, нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН. [2]

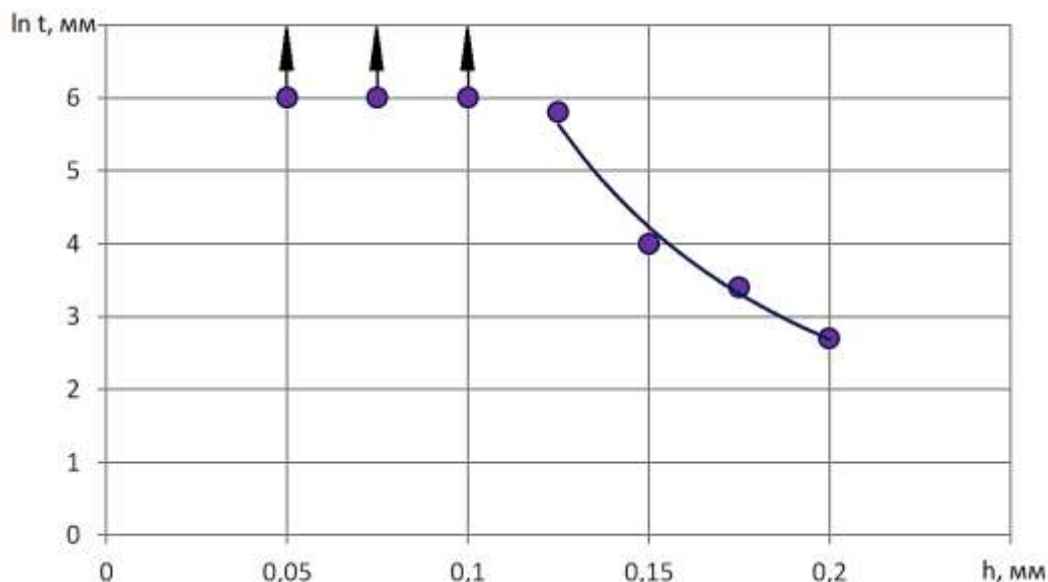
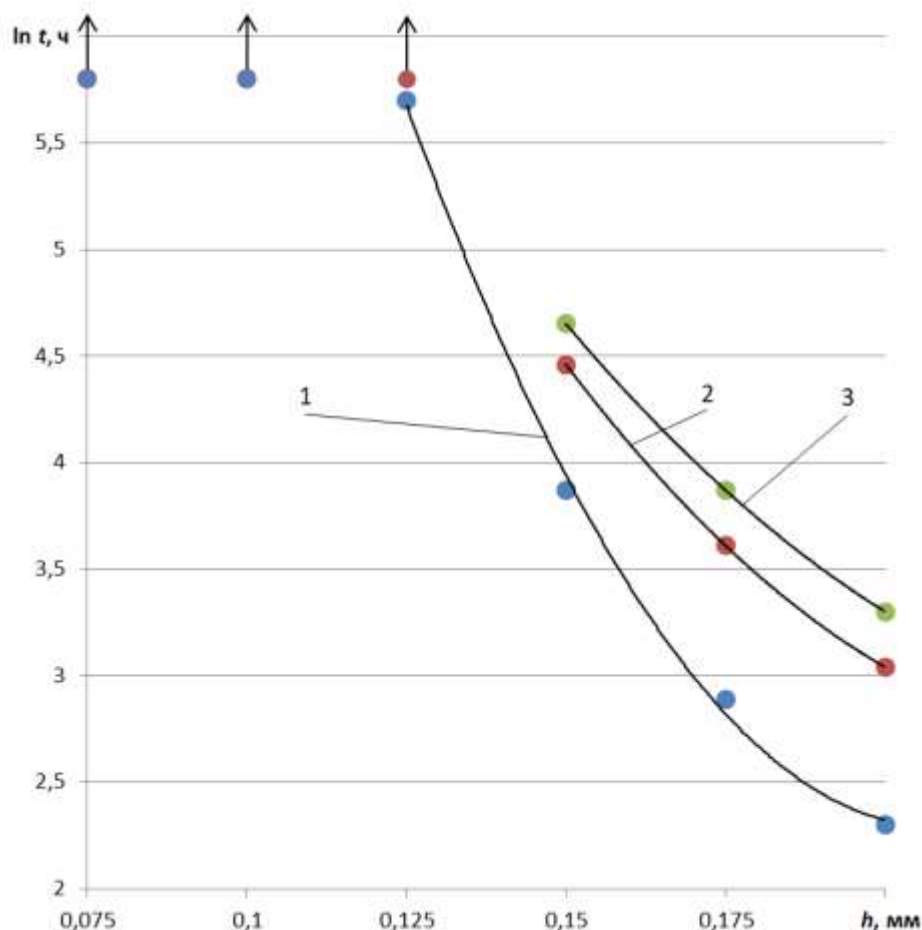


Рисунок 4.59 – Ресурс полимерных посадок t подшипника 209 при различной толщине полимерного покрытия из нанокомпозита на основе эластомера Ф-40, нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН [2]

Посадка с толщиной полимерного покрытия 0,12 мм сохранила свою работоспособность в течение всей базы испытаний (330 ч работы станда). Сдвиг наружного кольца подшипника в отверстии корпусной детали в течение 330 ч ($e^{5,8} = 330$) стандовых испытаний отсутствовал. Стрелки на графике показывают, что полимерные посадки с толщинами полимерного покрытия меньше 0,12 мм, оставались работоспособными в течение всего периода стандовых испытаний.

На рисунке 4.60 представлены результаты исследования долговечности восстановленных посадок подшипников 209 при различной толщине полимерных покрытий эластомера Ф-40С и нанокompозитов состава №1 и №2, нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН.



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

Рисунок 4.60 – Ресурс полимерных посадок t подшипника 209 при различной толщине полимерного покрытия h , нагруженных циклической радиальной нагрузкой 20 кН

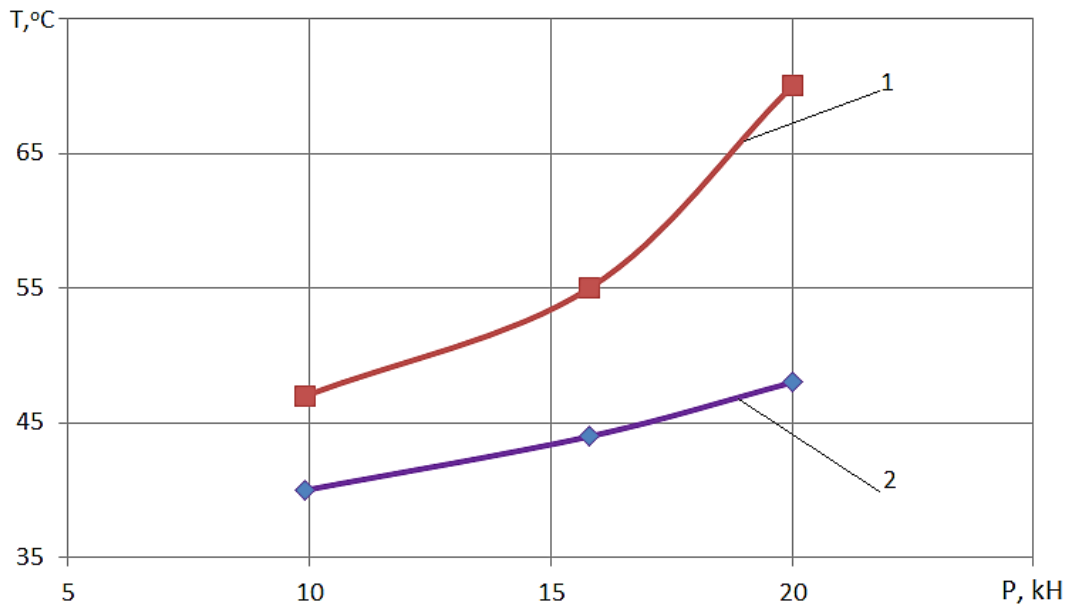
Из рисунка 4.60 видно, что ресурс посадки подшипника из эластомера Ф-40С при наибольшей толщине покрытия $h = 0,2\text{мм}$ является минимальным и составляет 10 ч. Долговечность посадок эластомерных нанокомпозитов выше и для состава №2 составляет 21, состава №1 – 27 ч, что в 2,1 и 2,7 раза больше ресурса посадки из не наполненного эластомера. С уменьшением толщины покрытия ресурс посадок повышается. Ресурс посадки подшипника из эластомера с толщиной покрытия $h = 0,175\text{мм}$ увеличился, в сравнении с посадкой максимальной толщины, в 1,8 раза и составил 18 ч. Долговечность посадок эластомерных нанокомпозитов соответственно выше и для состава №2 составляет 37, состава №1 – 48 ч, что в 2,05 и 2,67 раза больше ресурса посадки из не наполненного эластомера.

Аналогичная картина наблюдается при дальнейшем уменьшении толщины полимерных покрытий. Ресурс посадки подшипника из эластомера с толщиной покрытия $h = 0,15\text{мм}$ повысился, в сравнении с посадкой толщиной $h = 0,175\text{мм}$, в 2,67 раза и составил 48 ч. Долговечность посадок эластомерных нанокомпозитов соответственно многократно выше и для состава №2 составляет 87 ч, состава №1 – 105 ч, что в 1,81 и 2,18 раза больше ресурса посадки из не наполненного эластомера.

Посадка с толщиной полимерного покрытия 0,125 мм сохранила свою работоспособность в течение всей базы испытаний (330 ч работы стенда). Сдвиг наружного кольца отсутствовал.

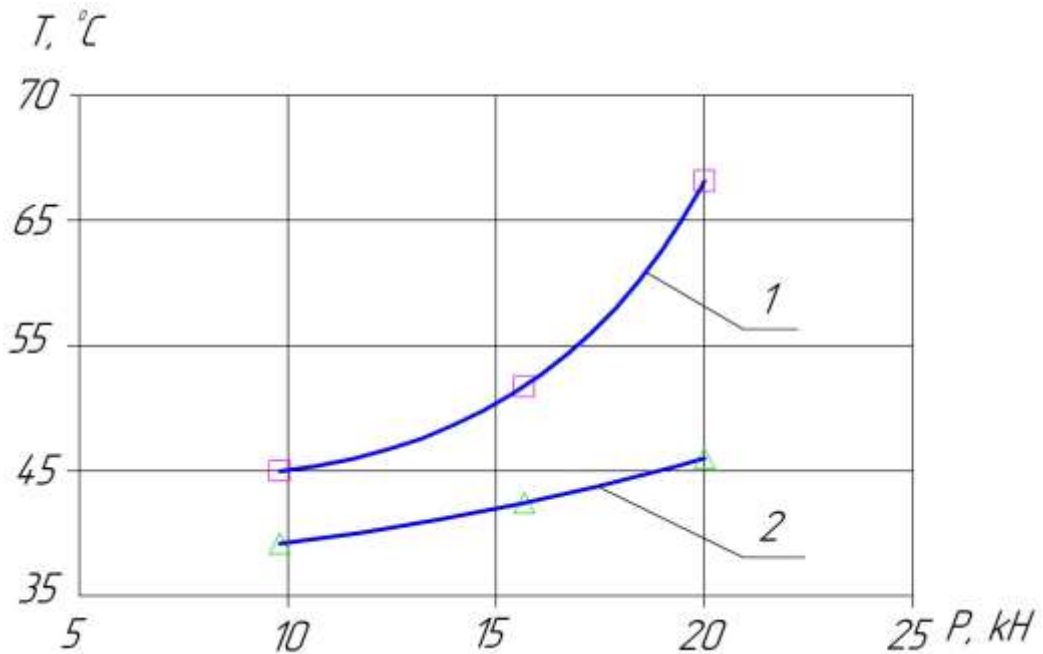
Поэтому предельный диаметральный износ посадочных отверстий подшипников в корпусных деталях, подлежащий компенсации при восстановлении эластомером Ф-40С составляет 0,24 мм, нанокомпозитами составов №1 и №2 – 0,25 мм.

Затем исследовали зависимости температуры T деталей подшипниковых узлов, с полимерными посадками из эластомеров Ф-40 и Ф-40С (рисунок 4.61) и нанокомпозитов на их основе (рисунки 4.62 и 4.63), от значений циклической радиальной нагрузки P .



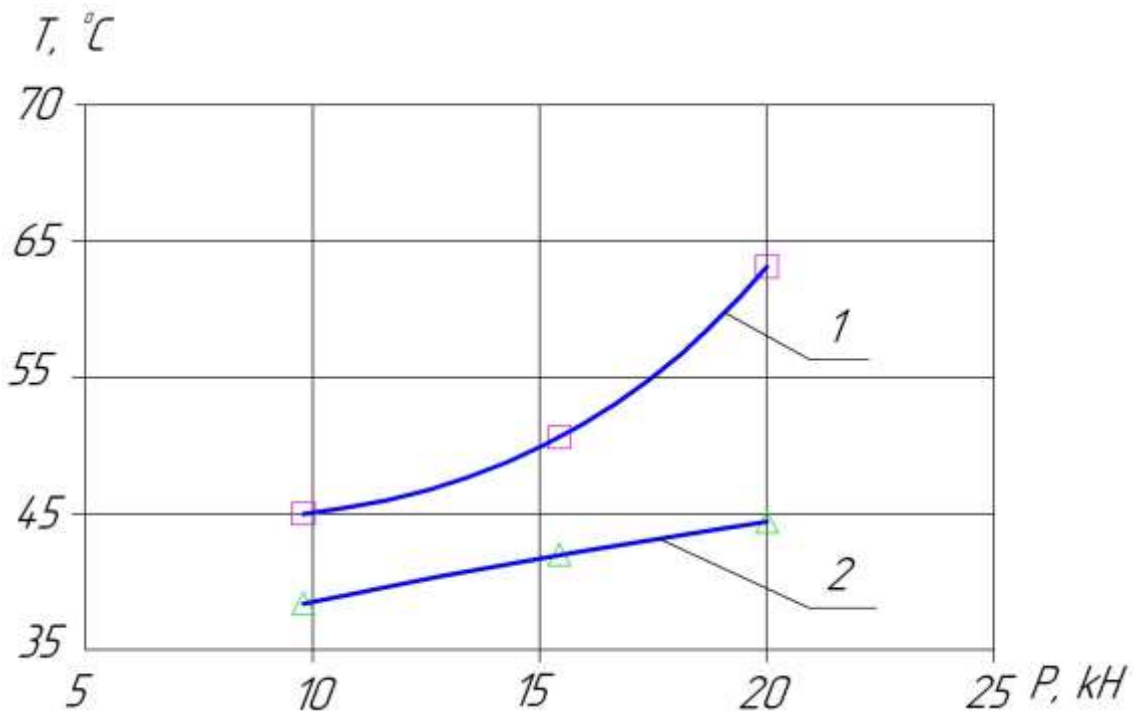
1 – втулка; 2 – наружное кольцо подшипника 209

Рисунок 4.61 – Температура T деталей подшипникового узла с посадкой, восстановленной эластомером Φ -40, при переменной, радиальной циклической нагрузке P [2]



1 – втулка; 2 – наружное кольцо подшипника 209

Рисунок 4.62 – Температура T деталей подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Φ -40С (состав №1), при переменной, радиальной циклической нагрузке P



1 – втулка; 2 – наружное кольцо подшипника 209

Рисунок 4.63 – Температура T деталей подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40С (состав №2), при переменной, радиальной циклической нагрузке P

При значениях радиальной циклической нагрузки $P = 9,9; 15,8$ и $20,0$ кН температура втулки составила $T = 46, 55$ и 70°C соответственно.

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 состава №1 на основе эластомера Ф-40С, уменьшилась на 2,2, 5,5 и 4,3% в сравнении с не наполненным эластомером (рисунок 4.62). Температура наружного кольца на 2,5, 4,5 и 4,2% меньше, чем у не наполненного эластомера.

Температура втулки подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом состава №2 на основе эластомера Ф-40С, уменьшилась на 2,2;

7,3 и 10% в сравнении с не наполненным эластомером (рисунок 4.63). Температура наружного кольца на 5, 4,5 и 8,3% меньше чем у не наполненного эластомера.

Выводы

1. Исследования показали, что рекомендуется восстанавливать корпусные детали техники с диаметральной износом посадочных отверстий под подшипники:

- нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 до 0,24 мм;

- нанокompозитами на основе эластомера Ф-40С составов №1 и №2 до 0,25 мм.

2. Наполнение эластомеров Ф-40 и Ф-40С нанопорошками алюминия и меди повышает теплопроводность материала и значительно увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура деталей подшипникового узла, с посадками, восстановленными нанокompозитами ниже:

- до 16°C в сравнении с эластомером Ф-40;

- до 5,5°C для состава №1 и до 10°C для состава №2 в сравнении с эластомером Ф-40С.

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-40С и АН-111 (технологические карты представлены в приложениях З и И).

Технология восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С прошла производственную проверку в ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александровского района Рязанской области. Восстанавливались (рисунок 5.1) картеры коробок передач автомобилей КАМАЗ, картеры коробок передач тракторов МТЗ и др.

Автомобили и трактора, с восстановленными корпусными деталями, в период с марта 2020 по октябрь 2021 г. проходили в хозяйстве эксплуатационные испытания, которые показали высокую надежность техники. За указанный период испытаний отказы техники из-за низкого ресурса восстановленных корпусных деталей, отсутствовали (приложение К).

Также технология внедрена в ООО «Сосновка-Зернопродукт» Мичуринского района Тамбовской области. Автомобили и трактора, с восстановленными корпусными деталями, в период с февраля 2021 по ноябрь 2021 г. проходили в хозяйстве эксплуатационные испытания, которые показали высокую надежность техники. За указанный период испытаний отказы техники из-за низкого ресурса восстановленных корпусных деталей, отсутствовали (приложение Л).



Рисунок 5.1 – Картеры коробок передач автомобиля КАМАЗ и трактора МТЗ под восстановление

Технология восстановления посадок подшипников качения полимерным нанокompозитом на основе анаэробного герметика АН-111 внедрена в ФГБУ «ОС «Мичуринская» Мичуринского района Тамбовской области. Для оценки надежности восстановленных посадок подшипников качения с марта 2016 г. по ноябрь 2017 г. проводили эксплуатационные испытания техники. За период испытаний отказов машин по причине недостаточной долговечности восстановленных посадок подшипников качения не наблюдалось (приложение М).

Технология восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 прошла производственную проверку в ЗАО «Агрофирма «Русь» с. Слободка Лебедянского района Липецкой области [2].

Новые нанокompозиты и технологии восстановления посадок подшипников внедрены и используются при ремонте технологического оборудования в промышленных и машиностроительных предприятиях ООО «Липецкий механический завод» г. Липецк (приложение Н), АО «Центр технологической компетенции

аддитивных технологий» г. Воронеж (приложение О), ООО «ИНОКС РЕМ» г. Воронеж (приложение П).

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ при изучении дисциплин: «Основы технологии производства и ремонта транспортно-технологических машин и оборудования», «Нанотехнологии в техническом сервисе», «Технология ремонта машин», «Монтаж, эксплуатация и ремонт технологического оборудования», «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

5.2 Расчет экономической эффективности технологии восстановления корпусных деталей нанокompозитами на основе эластомера Ф-40С и АН-111 в ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александрo-Невского района Рязанской области, ООО «Сосновка-Зернопродукт» Мичуринского района Тамбовской области и ФГБУ «ОС «Мичуринская» Мичуринского района Тамбовской области

«Полную себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстия нанокompозитом эластомера Ф-40С» [2] (для условий ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александрo-Невского района Рязанской области в ценах 2021 года) рассчитывали по известным методикам [277-280] (расчет представлен в приложении Р).

«Полная себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстий в корпусной детали нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С» [2] составила

$$C_{II} = 56,6 + 7,61 + 2,83 + 113,2 + 55,58 + 6,36 = 242,18 \text{руб/дм}^2$$

«Годовые затраты на восстановление нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С изношенных посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях сельскохозяйственной техники» [2] определяли по формуле

$$Z_H = N \cdot C_{II}, \quad (5.11)$$

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

В ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» в 2021 г корпусные детали не восстанавливали, а заменяли на новые. По результатам выбраковки корпусных деталей общая площадь изношенной поверхности, подлежащей восстановлению, составила $N = 1530 \text{дм}^2$.

«Годовые затраты при восстановлении корпусных деталей сельскохозяйственной техники» [61], по новой, разработанной в диссертации технологии, составит

$$Z_H = 1530 \cdot 242,18 = 370535,4 \approx 370535 \text{руб.}$$

«Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники» [61] составит

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

где Z_2 – годовые затраты на приобретение новых деталей, $Z_2 \approx 798500$ руб.;

Z_1 – годовые затраты на восстановление корпусных деталей по новой технологии, $Z_1 = 370535 \text{руб.}$

«Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С» [2] составит

$$C_{\text{Год}} = 798500 - 370535 = 427965 \approx 430 \text{тыс.руб.}$$

В расчете на 1 дм^2 площади восстановленных поверхностей корпусных де-

талей экономия составляет 281 рубль.

Также произведен расчет эффективности восстановления для условий ООО «Сосновка-Зернопродукт» (при выполнении операций восстановления корпусной детали приняли четвертый разряд слесаря со сдельной оплатой труда и часовым тарифом в 140 руб/ч, коэффициент дополнительной оплаты составляет 10 % от основной зарплаты рабочего). Годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С составил в ценах 2021 года 240 тыс. руб.

Расчет эффективности восстановления для условий ФГБУ «ОС «Мичуринская» Мичуринского района Тамбовской области показал годовой экономический эффект от внедрения технологии восстановления нанокompозитом на основе АН-111 составил в ценах 2017 года 425 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методология исследования и выбора на основе фрактального анализа дисперсных наночастиц наполнителей для полимерных композитов, предназначенных для восстановления посадочных мест подшипников качения, расчета теплофизических и механических свойств полимерных нанокомпозитов.

2. Наночастицы меди и алюминия являются ингибиторами термоокисления эластомеров на основе бутадиен-нитрильных каучуков и поэтому повышают их термостойкость. Коэффициенты старения нанокомпозита, наполненного алюминиевыми наночастицами, по прочности в 1,17 раза, а по деформации в 1,2 раза больше аналогичных показателей не наполненного эластомера Ф-40С, у нанокомпозита, наполненного алюминиевыми и медными наночастицами, по прочности в 1,22 раза, а по деформации в 1,4 раза больше соответствующих показателей полимерной матрицы.

В нанокомпозитах образуются межфазные области с пониженной, «замороженной» молекулярной подвижностью полимера. Это приводит к повышению модуля упругости эластомерных нанокомпозитов, в сравнении с матрицей до 2,1 раз. Увеличение модуля упругости повышает термостойкость нанокомпозитов, в сравнении с не наполненным эластомером, от 1,1 до 1,23 раза.

Теплопроводность двух- и трехкомпонентных полимерных нанокомпозитов следует определять по формуле Бургера с использованием поправочного коэффициента. Расхождение расчетных значений с фактическими не превышает 7%.

3. Наночастицы и межфазные области являются армирующим элементом в структуре полимерного нанокомпозита, повышающим его модуль упругости. Предложены формулы для расчета модуля упругости нанокомпозитов на основе эластомеров и анаэробных герметиков. В формулах учтены деформационно-прочностные свойства полимерной матрицы, объемное содержание и фрактальная размерность (шероховатость) поверхности наночастиц наполнителя.

4. Выполнен фрактальный анализ: наночастиц наполнителей – размерности поверхности d_s , размерности структуры наночастиц d_f и размерности структуры

нанокompозитов d_f^k . Предложена формула расчета величины d_s для эластомерных нанокompозитов.

Фрактальная размерность поверхности наночастиц алюминия и меди составляет $d_{sAl}=2,17$ и $d_{sCu}=2,20$, а размерность структуры наночастиц – $d_{fAl}=2,77$ и $d_{fCu}=2,82$, что позволяет сделать вывод, что наночастицы алюминия и меди следует отнести к усиливающим наполнителям, обеспечивающим более чем двукратное усиление модуля упругости нанокompозитов на растяжение, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С.

Размерность «неэкранированной» поверхности наночастиц наполнителей составляет: $d_u^{Al-\phi}=0,42$ и $d_u^{Al+Cu-\phi}=0,41$, что подтверждает достаточно высокую реакционную способность наночастиц алюминия и меди при взаимодействии с растворами эластомеров.

Фрактальная размерность структуры композитов d_f^k составляет: у нанокompозита, наполненного алюминиевыми наночастицами $d_f^k=2,9$; у нанокompозита, наполненного алюминиевыми и медными наночастицами – $d_f^k=2,88$. Характеристики наночастиц алюминия и меди d_s и d_f , структуры нанокompозитов d_f^k отличаются незначительно, что объясняет достаточно близкие значения степени усиления материалов.

5. Увеличение модуля упругости повышает предел текучести нанокompозитов. Наполнение эластомера Ф-40С алюминиевым нанопорошком увеличивает предел текучести материала в 1,11 раза, от 14,1 до 15,7 МПа, с алюминиевым и медным нанопорошками – в 1,14 раза, от 14,1 до 16,1 МПа.

Наполнение эластомера Ф-40С дисперсными, алюминиевыми наночастицами увеличивает прочность нанокompозита в 1,53 раза, до $\sigma=21,64$ МПа, алюминиевыми и медными наночастицами в 1,68 раза, до $\sigma=23,75$ МПа, в сравнении с не наполненным эластомером. Предложена формула для расчета прочности эластомерных нанокompозитов. Расхождение расчетных значений прочности с фактическими не превышает 14%.

Наполнение анаэробных герметиков дисперсными, металлическими наночастицами повышает поверхностную энергию разрушения материала. Образование

на поверхности частиц наполнителя межфазных областей полимера с пониженной («замороженной») молекулярной подвижностью приводит к увеличению модуля упругости и, соответственно, прочности нанокомпозита до $\tau=32,6\text{МПа}$, что в 1,23 раза больше прочности полимерной матрицы.

6. В отличие от микрокомпозитов, в полимерных нанокомпозитах, наполненных дисперсными металлическими наночастицами увеличивается деформация. Благодаря низкому объемному содержанию, наночастицы свободно перемещаются с полимерной матрицей, которая свободно растягивается. Вязкое сопротивление перемещению наночастиц с высокой адгезией к полимерной матрице увеличивает деформацию нанокомпозита при разрыве.

Деформация эластомера Ф-40С с алюминиевыми наночастицами увеличилась, в 1,4 раза, до значения $\varepsilon=240\%$, алюминиевыми и медными наночастицами в 1,34 раза, до значения $\varepsilon=230\%$.

Деформация анаэробного нанокомпозита, наполненного алюминиевыми наночастицами, в сравнении с не наполненным герметиком АН-111, увеличилась в 1,2 раза, до $\varepsilon=10,2\%$.

Увеличение прочности и деформации нанокомпозитов, в сравнении с матрицей, однозначно увеличивает их удельную работу разрушения, характеризующую выносливость материала. Наполнение эластомеров дисперсными наночастицами алюминия и меди существенно повышает выносливость и долговечность материала. Удельная работа разрушения нанокомпозита, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40С, наполненного наночастицами алюминия и меди увеличилась в 1,55 раза, до значения $\alpha_p=42,19\text{МДж/м}^3$, наполненного алюминиевыми наночастицами в 1,94 раза, до значения $\alpha_p=52,95\text{МДж/м}^3$. Удельная работа разрушения нанокомпозита на основе анаэробного герметика АН-111 в 1,28 раза больше матрицы и достигает значения $\alpha_p=91,4\text{МДж/м}^3$.

7. На основании полученных регрессионных моделей зависимости удельной работы разрушения пленок эластомерных нанокомпозитов от режима термической обработки и состава наполнителей определены:

- оптимальный режим термической обработки эластомерного нанокомпозита Ф-40С, наполненного алюминиевыми наночастицами: температура $T = 140^{\circ}\text{C}$, время $t = 3,0$ ч., при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства $\alpha_p = 52,0 \text{ МДж/м}^3$.

- оптимальный состав нового эластомерного нанокомпозита: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевые наночастицы – 0,09 масс.ч.; медные наночастицы – 0,03 масс.ч., при котором пленки материала имеют наиболее высокие деформационно-прочностные свойства, $\alpha_p = 42,0 \text{ МДж/м}^3$.

8. Исследованы физические свойства растворов эластомерных нанокомпозитов и определен рациональный режим ультразвуковой обработки: мощность озвучивания $N = 55$ Вт; время УЗО растворов нанокомпозитов $t = 6$ мин. Установлено, что в растворах эластомерных нанокомпозитов после ультразвукового диспергирования, в зависимости от содержания наполнителей, в сравнении с ручным механическим смешением, количество испарившегося растворителя превышает аналогичный параметр на 12 – 13%, дефектность значительно снижается, а качество полимерных покрытий повышается: площадь разрушенного покрытия уменьшается до 1,36 раза, размер пор уменьшается до 2 раз, а концентрация пор снижается до 30 %.

Исследования структуры и элементного состава показали, что с повышением содержания наполнителей в составе нанокомпозитов размеры агрегатов наночастиц увеличиваются. Ультразвуковое диспергирование, по сравнению с ручным смешением, обеспечивает многократное от 2,05 до 3,6 раза уменьшение размеров агрегатов и выравнивание их по размерам. Определен рациональный режим механизированного диспергирования при изготовлении нанокомпозита на основе герметика АН-111: частота вращения рабочего органа $n = 1490 \text{ мин}^{-1}$, время обработки материала $t = 3$ мин.

9. Получены математические модели инфракрасного нагрева подшипниковых щитов электродвигателей и корпусных деталей автотракторной техники, на их основе разработаны методы и компьютерные программы расчета конструктивных и режимных параметров установок инфракрасной сушки полимерных покры-

тий в корпусных деталях. Исследования показали, что в сравнении с конвективным способом, у покрытий нанокompозита эластомера Ф-40С после инфракрасной сушки значительно повышается качество покрытий: площадь разрушенного покрытия уменьшилась в 1,33 раза, концентрация пор в покрытии – в 1,24 раза, размер пор – на 15%.

10. В ходе экспериментальных исследований зависимости усилия резания покрытий эластомерных нанокompозитов от переднего угла режущей кромки калибра-резца получили рациональные геометрические параметры режущей кромки калибра-резца, которые обеспечивают минимальное значение радиальной составляющей силы резания, наиболее высокие качество и точностные характеристики покрытий эластомерных нанокompозитов: передний угол $\gamma=70^\circ$, задний угол $\alpha=10^\circ$. Разработан метод расчета размерных цепей и точностных характеристик деталей технологической оснастки для центрирования деталей клеевых соединений типа «вал-подшипник».

11. Благодаря повышению деформационно-прочностных свойств нанокompозитов, в сравнении с не наполненным эластомером, увеличивается коэффициент Кирхгофа 19,4% и коэффициент податливости упругого основания соответственно 31,2%. По этим причинам снижаются контактные напряжения в подшипниках и увеличивается жесткость опор, уменьшается смещение осей сопрягаемых деталей подшипникового узла при радиальном нагружении. В зависимости от состава нанокompозита и радиальной нагрузки на подшипник контактное напряжение на центральном теле качения снизилось до 2,52 и 2,72 раза, на первых боковых телах качения до 1,67 и 1,8 раза. Ресурс подшипников 209 с посадками, восстановленными нанокompозитами: состава №1 составляет 49,18 млн. об.; состава №2 – 46,12 млн. об., что в 3,3 и 3,1 раза больше расчетного ресурса (14,87 млн. об.).

Наполнение эластомеров Ф-40 и Ф-40С нанопорошками алюминия и меди повышает теплопроводность материала и значительно увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура деталей подшипникового узла, с посадками, восстановленными нанокompозитами, в сравнении с

не наполненными эластомерами ниже на 5,5...10 °С. Исследования на выносливость посадок эластомерных нанокompозитов показали, что рекомендуется восстанавливать корпусные детали техники с диаметральным износом посадочных отверстий под подшипники: нанокompозитом на основе эластомера Ф-40 до 0,24 мм; нанокompозитами на основе эластомера Ф-40С составов №1 и №2 до 0,25 мм.

Нанокompозитом на основе герметика АН-111 рекомендуется восстанавливать посадочные места подшипников на валах с износом до 0,12 мм, в корпусных деталях – до 0,25 мм.

12. Разработаны технологии восстановления посадок подшипников в корпусных деталях и на валах нанокompозитами на основе эластомеров Ф-40, Ф-40С и герметика АН-111. Технологии восстановления внедрены в ООО «Сосновка-Зернопродукт», ФГБУ «ОС «Мичуринская» Мичуринского района Тамбовской области, ЗАО «Агрофирма «Русь» Лебедянского района Липецкой области и ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» Александрo-Невского района Рязанской области. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения новых технологий составил около 1,5 млн. руб. Новые нанокompозиты и технологии восстановления посадок подшипников внедрены и используются при ремонте технологического оборудования в промышленных и машиностроительных предприятиях Центрально-Черноземного региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бобович, Б. Б.** Утилизация автомобилей и автокомпонентов : учебное пособие / Б. Б. Бобович. – Москва : Форум, 2011. – 167 с. – Текст : непосредственный.
2. **Киба, М. Р.** Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники нанокompозитом 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 / Киба Мария Романовна ; ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет». – Мичуринск, 2020. – 176 с. – Текст : непосредственный.
3. **Черноиванов, В. И.** Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В. И. Черноиванов, И. Г. Голубев. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с. – Текст : непосредственный.
4. **Ли, Р. И.** Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники : учебное пособие / Р. И. Ли – Липецк : Издательство ЛГТУ, 2014. – 379 с. – Текст : непосредственный.
5. **Поляченко, А. В.** Увеличение долговечности восстанавливаемых деталей контактной приваркой износостойких покрытий в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Поляченко Анатолий Васильевич ; Всесоюзное научно-производственное объединение по восстановлению изношенных деталей ВНПО «Ремдеталь». – Москва, 1984. – 44 с. – Текст : непосредственный.
6. **Черноиванов, В. И.** Совершенствование технологии и повышение качества восстанавливаемых деталей сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Черноиванов Вячеслав Иванович ; Всесоюзное научно-

производственное объединение по восстановлению изношенных деталей ВНПО «Ремдеталь». – Москва, 1984. – 53 с. – Текст : непосредственный.

7. **Бурумкулов, Ф. Х.** Совершенствование методов и средств оценки работоспособности и долговечности восстанавливаемых соединений и деталей машин (на примере автотракторных двигателей) : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Бурумкулов Фархад Хикматович. – Москва, 1986. – 38 с. – Текст : непосредственный.

8. **Бугаев, В. Н.** Восстановление деталей и повышение ресурса топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Бугаев Вячеслав Николаевич ; Госагропром СССР, Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1987. – 32 с. – Текст : непосредственный.

9. **Авдеев, М. В.** Повышение эффективности восстановления деталей сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Авдеев Михаил Васильевич . – Челябинск, 1987. – 46 с. – Текст : непосредственный.

10. **Курчаткин, В. В.** Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Курчаткин Вячеслав Викторович ; Московский Ордена Трудового Красного Знамени институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1989, – 407 с. – Текст : непосредственный.

11. **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники плазменной наплавкой : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соис-

кание ученой степени доктора технических наук / Сидоров Алексей Иванович ; Всесоюзный сельскохозяйственный институт заочного образования. – Москва, 1989. – 34 с. – Текст : непосредственный.

12. **Мошенский, Ю. А.** Технологические основы повышения надежности автотракторных валов при восстановлении их наплавкой и термической обработкой : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Мошенский Юрий Ананьевич ; Ленинградский государственный аграрный университет. – Пушкин, 1990. – 43 с. – Текст : непосредственный.

13. **Черновол, М. И.** Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Черновол Михаил Иванович ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1992. – 35 с. – Текст : непосредственный.

14. **Мельниченко, И. М.** Восстановление и повышение долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов и покрытий : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Мельниченко Игорь Михайлович ; Челябинский государственный агроинженерный университет. – Гомель, 1991. – 389 с. – Текст : непосредственный.

15. **Котин, А. В.** Восстановление точности размерных цепей сборочных единиц применением нежестких компенсаторов износа : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Котин Александр Владимирович ; Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева. – Саранск, 1998. – 391 с. – Текст : непосредственный.

16. **Ли, Р. И.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ли Роман Иннакентьевич ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 2001, – 340 с. – Текст : непосредственный.

17. **Башкирцев, В. Н.** Восстановление деталей машин и оборудования адгезивами : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Башкирцев Владимир Иванович ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 2004, – 397 с. – Текст : непосредственный.

18. **Гаджиев, А. А.** Технологическое обеспечение долговечности подшипниковых узлов машин применением полимерных материалов : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Гаджиев Алиасхаб Алиевич ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 2005. – 35 с. – Текст : непосредственный.

19. **Зазуля, А. Н.** Справочник инженера по техническому сервису машин и оборудования в АПК / А. Н. Зазуля ; под редакцией доктора сельскохозяйственных наук, профессора С. М. Бунина. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 604 с. – Текст : непосредственный.

20. **Кузнецов, Ю. А.** Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования АПК микродуговым оксидированием : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кузнецов Юрий Алексеевич ; Российский государственный аграрный заочный университет. – Москва, 2006. – 35 с. – Текст : непосредственный.

21. **Казанцев, С. П.** Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Казанцев Сергей Павлович ; Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. – Москва, 2006. – 32 с. – Текст : непосредственный.

22. **Фархшатов, М. Н.** Ресурсосберегающие технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники и оборудования электроконтактной приваркой коррозионностойких и износостойких материалов : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Фархшатов Марс Нуруллович ; Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева. – Саранск, 2007. – 32 с. – Текст : непосредственный.

23. **Гвоздев, А. А.** Технология повышения долговечности узлов трения при ремонте сельскохозяйственной техники с использованием модифицированных полимерных композиций : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гвоздев Александр Анатольевич ; Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка. – Москва, 2011, – 377 с. – Текст : непосредственный.

24. **Кононенко, А. С.** Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Кононенко Александр Сергеевич ; Московский государственный агроинженерный университет. – Москва, 2012, – 405 с. – Текст : непосредственный.

25. **Ли, Р. И.** Технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники и оборудования перерабатывающих предприятий : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Технология обслуживания и ремонта машин в агропромышленном комплексе» / Р. И. Ли. – Липецк: Издательство ЛГТУ, 2008. – 321 с. – Текст : непосредственный.

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

27. **Жачкин, С. Ю.** Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий / С. Ю. Жачкин, М. Н. Краснова, Н. А. Пеньков, А. И. Краснов. – Текст : непосредственный // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 120. – С. 130–134.

28. **Рассказов, М. Я.** Современные тенденции организации ремонта сельскохозяйственной техники : книга / М. Я. Рассказов. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 100 с. – Текст : непосредственный.

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

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

31. **Карагодин, В. И.** Организация и технология централизованного ремонта автомобильных двигателей по техническому состоянию : монография / В. И. Карагодин. – Москва : РУСАЙНС, 2023. – 108 с. – Текст : непосредственный.

32. **Карагодин, В. И.** Техническое состояние систем, агрегатов, деталей и механизмов автомобиля : учебник / В. И. Карагодин. – Москва : КНОРУС, 2020. – 160 с. – Текст : непосредственный.

33. **Голего, Н. Л.** Физико-химическая механика фреттинг-коррозии / Н. Л. Голего. – Текст : непосредственный // Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия. – Киев, 1973. – С. 4–5.

34. **Голего, Н. Л.** Фреттинг-коррозия металлов : книга / Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля. – Киев : Техніка, 1974. – 270 с. – Текст : непосредственный.

35. **Алябьев, А. Я.** Исследование основных стадий разрушения поверхности металла при фреттинг-коррозии / А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля, К. В. Маркевич, М. Н. Рожков. – Текст : непосредственный // Сборник трудов: Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей. – Киев, 1971. – Выпуск 1. – с. 45–50.

36. **Уотерхауз, Р. Б.** Фреттинг-коррозия : книга / Р. Б. Уотерхауз ; [перевод с английского Е. А. Хейна, А. В. Ильина] ; под редакцией Г. Н. Филимонова – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1976. – 271 с. – Текст : непосредственный.

37. **Рябченков, А. В.** Фреттинг-коррозия и защита металлов : обзор отечественной и зарубежной литературы / А. В. Рябченков, О. Н. Муравкин. – Москва : ЦБТИ, 1957. – 59 с. – Текст : непосредственный.

38. Fretting fatigue / Edited by R. B. Waterhouse. – London : Applied Science Publishers Ltd, 1981. – 244 pp., ill. – Текст : непосредственный.

39. **Brown, S. R.** Materials evaluation under fretting conditions : American Society for Testing and Material. Committee G-2 on Erosion and Wear / S. R. Brown. – Warminster, 1982 – 182 p. – Текст : непосредственный.

40. **Онопrienко, В. П.** Исследование влияния некоторых физико-механических и химических факторов на изнашивание металлов при фреттинг-коррозии : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Оноприенко Виктор Павлович ; Киевский институт инженеров гражданской авиации. – Киев, 1973. – 174 с. – Текст : непосредственный

41. **Щербина, Д. А.** Исследование структурно-энергетических особенно-

стей изнашивания металлов при фреттинг-коррозии : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Щербина Дмитрий Александрович ; Киевский институт инженеров гражданской авиации. – Киев, 1975. – 248 с. – Текст : непосредственный.

42. **Waterhouse, R. B.** Freatise and materials science and technology / R. B. Waterhouse. – Текст : непосредственный // Fretting. – London, 1979. – P. 259–286.

43. **Алябьев, А. Я.** Влияние условий виброконтактного нагружения на изнашивание титановых сплавов при фреттинг-коррозии / А. Я. Алябьев, А. И. Духота. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 1982. – Т.3 – №5. – С. 821–826.

44. **Айбиндер, С. Б.** Влияние полимерных покрытий на развитие фреттинг-коррозии / С. Б. Айбиндер, О. С. Жеглов, Л. М. Либерман. – Текст : непосредственный // Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия : тезисы докладов. – Киев, 1973. – С. 143–144.

45. **Hoerner, D. W.** Fretting fatigue considerations in engineering design / D. W. Hoerner, F. L. Gates. – Текст : непосредственный // «Wear». – 1981. – V. 70 – № 2. – P. 155–164.

46. **Алябьев, А. Я.** Фреттинг-коррозия металлов и ее структурно-энергетическое описание / А. Я. Алябьев – Текст : непосредственный // Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей : сборник трудов. – Киев, 1971. – Вып.1. – С. 35–39.

47. **Алябьев, А. Я.** Влияние внешних факторов на фреттинг-коррозию армо-железа и стали / А. Я. Алябьев, К. А. Крылов, В. П. Оноприенко. – Текст : непосредственный // Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей : сборник трудов. – Киев, 1971. – Вып.1. – С. 51–55.

48. **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника: Износ и безызносность : учебник / Д. Н. Гаркунов – Москва : Машиностроение, 2001. – 614 с. – Текст : непосредственный.

49. **Мироненко, А. В.** Повышение долговечности роликоподшипниковых узлов в корпусных деталях автомобилей, восстановленных композицией адгезива АН-110 : специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» :

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мироненко Александр Вячеславович : Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева. – Липецк, 2017. – 179 с. – Текст : непосредственный.

50. **Ли, Р. И.** Технологии восстановления деталей металлургических машин и оборудования : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Металлургические машины и оборудование» / Р. И. Ли, А. П. Жильцов ; Федеральное агентство по образованию ; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Липецкий государственный технический университет. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2007. – 315 с. – Текст : непосредственный.

51. Утверждена государственная программа «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» – Текст : электронный // Правительство России : [сайт]. – 2019. – URL: <http://government.ru/docs/36310/> (дата обращения: 17.06.2019)

52. **Российская Федерация. Постановление.** Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» : Постановление Правительства российской Федерации № 377 от 29 марта 2019 года. – Москва, 2019 – URL: <https://base.garant.ru/72216664> (дата обращения: 20.06.2019) – Текст : электронный

53. **Малюгин, В. А.** Восстановление посадок подшипников качения автомобилей нанокompозитом на основе анаэробного герметика АН-111 : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Малюгин Владимир Андреевич ; ФГБОУ ВО Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2019. – 169 с. – Текст : непосредственный.

54. **Кирсанов, Ф. А.** Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях трансмиссии сельскохозяйственной техники эластомером Ф-40С : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кирсанов Филипп Александрович : Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2019. – 169 с. – Текст : непосредственный.

ный университет. – Липецк, 2015. – 181 с. – Текст : непосредственный.

55. **Бочаров, А. В.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бочаров Александр Викторович ; Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2009. – 150 с. – Текст : непосредственный.

56. **Машин, Д. В.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники композицией на основе эластомера Ф-40С : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Машин Дмитрий Владимирович ; Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2013. – 148 с. – Текст : непосредственный.

57. **Купреев, М. П.** Повышение долговечности соединений подшипниковых узлов отремонтированной сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Купреев Михаил Петрович ; Всесоюзный сельскохозяйственный институт заочного образования. – Гомель, 1988. – 233 с. – Текст : непосредственный.

58. **Кондрашин, С. И.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники анаэробными герметиками с дисперсными минеральными наполнителями : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кондрашин Сергей Иванович ; Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2009. – 119 с. – Текст : непосредственный.

59. **Щетинин, М. В.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивом Анатерм-105 : специаль-

ность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Щетинин Максим Владимирович ; Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2008. – 146 с. – Текст : непосредственный.

60. **Бутин, А. В.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимер-полимерными композициями : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бутин Антон Владимирович ; Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2012. – 127 с. – Текст : непосредственный.

61. **Колесников, А. А.** Повышение качества восстановления корпусных деталей автомобилей полимерными композиционными материалами после ультразвуковой обработки : специальность 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Колесников Александр Анатольевич : Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева. – Липецк, 2017. – 166 с. – Текст : непосредственный.

62. **Патент № 2604238 Российская Федерация, МПК В23Р 6/00 (2006.01), В29С 73/02 (2006.01), В29С 41/30 (2006.01).** Устройство для калибрования посадочных отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях: № 2015103846/05 : заявл. 05.02.2015 : опубл. 10.12.2016 / Ли Р. И., Кирсанов Ф. А., Киба М. Р. ; заявитель ЛГТУ. – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.

63. **Ибилдаев, Б.** Долговечность подшипников качения сельскохозяйственной техники с посадками, восстановленными герметиком 6Ф : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ибилдаев Бисен ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1986. – 205 с. – Текст : непосредственный.

64. **Поляченко, А. В.** Перспективы развития восстановления и упрочнения деталей машин контактной приваркой металлического слоя / А. В. Поляченко. –

Текст : непосредственный // Тезисы докладов на научно-технической конференции стран-членов СЭВ и СФРЮ «Современное оборудование и технологические процессы для восстановления изношенных деталей машин»-«Ремдеталь-83». – Москва : ЦНИИТЭИ, 1983. – С.131-132.

65. **Мирзоян, Х. А.** Исследование и обоснование способа восстановления изношенных поверхностей чугунных корпусных деталей приваркой стальной ленты: на примере блоков цилиндров тракторных двигателей СМД-14 и СМД-60 : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мирзоян Хорен Арамаисович ; Государственный научно-исследовательский институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка. – Москва, 1978. – 20 с. – Текст : непосредственный.

66. **Авдеев, М. В.** Технология ремонта машин и оборудования : учебник [по специальности 1509 «Механизация сельского хозяйства»] / М. В. Авдеев, Е. Л. Воловик, И. Е. Ульман. – Москва : Агропромиздат, 1986. – 246 с. – Текст : непосредственный.

67. **Ли, Р. И.** Применение полимерных материалов в подшипниковых узлах при изготовлении и ремонте машин : монография / Р. И. Ли ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации ; федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет». – Мичуринск : Мичуринский государственный аграрный университет, 2010. – 160 с. – Текст : непосредственный.

68. **Шубин, А. Г.** Повышение долговечности посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники, восстановленных герметиком 6Ф : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шубин Александр Григорьевич ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1980. – 15 с. – Текст : непосредственный.

69. **Тоиров, И. Ж.** Восстановление неподвижных соединений подшипников

качения сельскохозяйственной техники анаэробными герметиками : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тоиров Илхом Жураевич ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства. – Москва, 1990. – 172 с. – Текст : непосредственный.

70. **Аязбаев, М. Д.** Долговечность неподвижных соединений типа вал – подшипник качения, восстановленных герметиком 6Ф в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аязбаев Марат Дильдабекович ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1984. – 193 с. – Текст : непосредственный.

71. **Сиднина, Т. И.** Восстановление посадок подшипников в щитах асинхронных электродвигателей на ремонтных предприятиях Госагропрома СССР : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сиднина Татьяна Ивановна ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1986. – 159 с. – Текст : непосредственный.

72. **Аль-Ассех, Р. Ф.** Обоснование выбора полимерного материала для восстановления и повышения долговечности неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аль-Ассех Рашад Фахад ; Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1989. – 186 с. – Текст : непосредственный.

73. Составы анаэробные уплотняющие (герметики): Клеи акриловые : каталог. – Черкассы, 1988. – 22 с. – Текст : непосредственный.

74. **Хамидулова, З. С.** Новые анаэробные герметики для автомобилестроения / З. С. Хамидулова, И. П. Рогачева, А. Ф. Мурох, Д. А. Аронович, А. П. Синен

оков – Текст : непосредственный // Пластические массы. – № 6. – 1999. – С. 40.

75. Акционерное общество «Научно-исследовательский институт химии и технологии полимеров имени академика В.А. Каргина с опытным заводом» : официальный сайт. – Дзержинск, 2023. – URL: <http://www.nicr.ru> (дата обращения 10.05.2018). – Текст : электронный.

76. ООО «Индастриал Партнер» : официальный сайт. – Москва, 2023. – URL: <http://loctite.gluesale.ru> (дата обращения 12.09.2018). – Текст : электронный.

77. ООО «Элком» : официальный сайт. – Москва, 2023. – URL: <https://threebond.su> (дата обращения 12.09.2018). – Текст : электронный.

78. Демин, В. Е. Совершенствование технологии восстановления сопряженных опор корпусных деталей с подшипниками качения применением композиционных анаэробных материалов (на примере корпуса КП трактора Т-150К) : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Демин Владимир Евгеньевич ; Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 2007. – 19 с. – Текст : непосредственный.

79. Патент № 2418025 Российская Федерация, МПК C09J 11/00 (2006.01), C09J 4/02 (2006.01). Клей для соединения однородных изделий из металла, стекла, пластмасс и керамики: № 2009120637/05 : заявл. 29.05.2009 : опубл. 10.12.2010 / Ли Р. И., Кондрашин С. И., Бутин А. В., Шипулин М. А. ; заявитель ФГОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет». – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.

80. Ли, Р. И. Деформационно-прочностные свойства полимер-полимерной композиции для восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники / Р. И. Ли, А. В. Бутин – Текст : непосредственный // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции 13-14 мая 2010 г. – Мичуринск : Издательство Мичуринского ГАУ. – 2011. – С. 169 – 174.

81. Акционерное общество «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова» :

официальный сайт. – Москва, 2023. – URL: <http://instplast.ru> (дата обращения 10.10.2018). – Текст : электронный.

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

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

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

85. **Ли, Р. И.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники при модификации эластомеров / Р. И. Ли, Д. В. Машин, Ф. А. Кирсанов, А. А. Колесников – Текст : непосредственный // Труды ГОСНИТИ. – Москва : Издательство ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 111, Ч. 2. – С. 134-136.

86. **Машин, Д. В.** Новый полимерный композиционный материал для восстановления корпусных деталей автотракторной техники / Д. В. Машин, Р. И. Ли – Текст : непосредственный // Особенности технического оснащения современного сельскохозяйственного производства : материалы к международной научно-практической конференции 04-05 апреля 2013 г. – Орел : Издательство ОрелГАУ. – 2013. – С. 319-322.

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

88. **Li, R. I.** A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly

and Repair of Equipment / R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, No. 3. – PP. 261-265.

89. **Ли, Р. И.** Modification of Anaerobic Sealants by Metal Nanoparticles / R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, No. 4. – PP. 376-380.

90. **Ричардсон, М.** Промышленные полимерные композиционные материалы / М. Ричардсон, Д. Филлипс, Б. Харрис [и др.] ; под редакцией М. Ричардсона. – Москва : Химия, 1980. – 472 с. – Текст : непосредственный.

91. **Ли, Р. И.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники при модификации эластомеров / Р. И. Ли, Д. В. Машин, Ф. А. Кирсанов, А. А. Колесников – Текст : непосредственный // Труды ГОСНИТИ. – Москва : Издательство ГОСНИТИ – 2013. – Т. 111, Ч. 2, – С. 134-136.

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

93. **Козлов, Г. В.** Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокомпозитов / Г. В. Козлов – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185. – №1. – С. 35-64.

94. **Ахматова, О. В.** Композиционные материалы на основе модифицированного эпоксидного олигомера и нанонаполнителей : специальность 05.17.06 «Технология и переработка полимеров и композитов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ахматова Оксана Владимировна : Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева. – Москва, 2011. – 16 с. – Текст : непосредственный.

95. **Бобрышев, А. Н.** Синергетика композитных материалов / А. Н. Бобрышев, В. Н. Козомазов, Л. О. Бабин, В. И. Соломатов ; под редакцией В. И. Соломатова. – Липецк : НПО «ОРИУС», 1994. – 151 с. – Текст : непосредственный.

96. **Козлов, Г. В.** Физико-механические свойства наноструктурированных полимерных композитов в рамках фрактального и мультифрактального описаний : монография / Г. В. Козлов, Ю. Г. Яновский, Ю. Н. Карнет. – Москва : OneBook, 2013. – 340 с. – Текст : непосредственный.

97. **Козлов, Г. В.** Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных композитов: фрактальный анализ : монография / Г. В. Козлов, Ю. Г. Яновский, Ю. Н. Карнет. – Москва : Альянстраснатом, 2008. – 363 с. – Текст : непосредственный.

98. Nanostructured & Amorphous Materials, Inc : официальный сайт. – Техас, 2022. – URL: <http://www.nanoamor.com/nanopowders> (дата обращения 15.06.2019). – Текст : электронный.

99. **Микитаев, А. К.** Полимерные нанокомпозиты. Многообразие структурных форм и приложений / А. К. Микитаев, Г. В. Козлов, Г. Е. Заиков ; Российская академия наук ; Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля. – Москва : Наука, 2009. – 277 с. – Текст : непосредственный.

100. **Томас, Д.** Полимерные смеси / Д. Томас [и др.] ; под редакцией Д. Пола, С. Ньюмена. – Москва : Мир, 1981. – Т. 1. – 550 с. – Текст : непосредственный.

101. **Ahmed, S.** A review of particulate reinforcement theories for polymer composites / S. Ahmed, F. R. Jones – Текст : непосредственный // Journal of materials science. – 1990. – Vol. 25. – PP. 4933-4942

102. **Кац, Г. С.** Наполнители для полимерных композиционных материалов : справочное пособие / Г. С. Кац, Д. В. Милевски ; под редакцией П. Г. Бабаевского ; [перевод с английского П. Г. Бабаевского]. – Москва : Химия, 1981. – 736 с. – Текст : непосредственный.

103. **Zaikov, G. E.** Polymer Yearbook-2011. Polymers, Composites and Nanocomposites / G. E. Zaikov, C. Sirghie, R. Kozlowski. – New York : Nova Science Publishers, 2011. – 253 p. – Текст : непосредственный.

104. **Pethrick, R.** Handbook of High- and Low-Molecular Compounds / R. Pethrick, G. Zaikov – New York : Nova Science Publishers, 2008. – 260 p. – Текст : непосредственный.

105. **Дульнев, Г. Н.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов : справочная книга / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк – Ленинград : Энергия. Ленинградское отделение, 1974. – 264 с. – Текст : непосредственный.

106. **Михеев, В. А.** Моделирование теплопроводности трехкомпонентных композиций / В. А. Михеев, В. Ш. Сулаберидзе, В. Д. Мушенко – Текст : непосредственный // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, №7. – С. 584-590.

107. **Михеев, В. А.** Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями / В. А. Михеев, В. Ш. Сулаберидзе, В. Д. Мушенко – Текст : непосредственный // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 571–575.

108. **Ерохин, М. Н.** Нанотехнологии и наноматериалы в агроинженерии : учебное пособие / М. Н. Ерохин [и др.]. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 300 с. – Текст : непосредственный.

109. **Nalwa, H. S.** Nanostructured Materials and Nanotechnology / H. S. Nalwa. – San Diego : Academic Press, 2002. – 859 p. – Текст : непосредственный.

110. **Гороховский, А. В.** Композитные наноматериалы : учебное пособие / А. В. Гороховский. – Саратов : ФГОУ ВПО СГТУ, 2008. – 76 с. – Текст : непосредственный.

111. **Микитаев, А. К.** Нанокompозитные полимерные материалы на основе органоглин / А. К. Микитаев, А. А. Каладжян, О. Б. Леднев, М. А. Микитаев – Текст : электронный // Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». – 2004. – С. 912 – 922. – URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/083.pdf> (дата обращения: 07.12.2019).

112. **Тренисова, А. Л.** Получение композиционных материалов на основе эпоксидного олигомера и нанонаполнителей : специальность 05.17.06 «Технология и переработка полимеров и композитов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тренисова Анастасия Львовна : Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева. – Москва, 2009. – 16 с. – Текст : непосредственный.

113. **Blumstain, A.** Text / A. Blumstein – Текст : непосредственный // Bulletin of the Chemical Society. – 1961. – N 6. – P. 899-905.

114. **Shepherd, P. D.** Clay layers / P. D. Shepherd, F. Y. Golemba, F. W. Maine – Текст : непосредственный // Advances in Chemistry Series. – 1974. – Vol. 134, N 1. – P. 41-49.

115. **Usuki, A.** Synthesis of nylon 6-clay hybrid / A. Usuki, Y. Kojima, M. Kawasumi, A. Okada, Y. Fukushima, T. Kurauchi, O. Kamigaito – Текст : непосредственный // Journal of Materials Research. – 1993. – Vol. 8, N 6. – P. 1179-1184.

116. **Kojima, Y.** Mechanical properties of nylon 6-clay hybrid / Y. Kojima, A. Usuki, M. Kawasumi, A. Okada, Y. Fukushima, T. Kurauchi, O. Kamigaito – Текст : непосредственный // Journal of Materials Research. – 1993. – Vol. 8, N 6. – P. 1185-1194.

117. **Yano, K.** Synthesis and properties of polyimide/ clay hybrid / K. Yano, A. Usuki, A. Okada, T. Kurauchi, O. Y. Kamigaito – Текст : непосредственный // Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry. – 1993. – Vol. 31, N 12. – P. 2493-2516.

118. **Dennis, H. R.** Effect of Melt Processing Conditions on the Extent of Exfoliation in Organoclay-Based Nanocomposites / H. R. Dennis, D. L. Hunter, D. Chand [et al.] – Текст : непосредственный // Polymer (Guildf). – 2001. – Vol. 42, N 24. – P. 9513-9522.

119. **Антипов, Е. В.** Структура и деформационное поведение нанокомпозитов на основе полипропилена и модифицированных глин / Е. В. Антипов, М. А. Гусева, В. А. Герасин [и др.] – Текст : непосредственный // Высокомолекулярные соединения. – 2003. – Т. 45, № 11. – С. 1885-1889.

120. **Антипов, Е. В.** Структура и деформационное поведение нанокомпозитов на основе полиэтилена низкой плотности и модифицированных глин / Е. В. Антипов, М. А. Гусева, В. А. Герасин [и др.] – Текст : непосредственный // Высокомолекулярные соединения. – 2003. – Т. 45, № 11. – С. 1874-1884.

121. **Chand, J-H.** Polyimide nanocomposites with organo-montmorillonites, preparation and characterization / J-H. Chand J-H, K. D. Park, D. Cho [et al.] – Текст :

непосредственный // *Polymer Engineering and Science*. – 2001. – Vol. 41, N 9. – P. 1514-1519.

122. **Chang, J.-H.** Poly (butylene terephthalate)/ Organoclay Nanocomposites Prepared by In Situ Interlayer Polymerization and Its Fiber / J.-H. Chang, Y. U. An, S. J. Kim, S. Im – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2003. – Vol. 44, N 15. – P. 5655-5661.

123. **Bafna, A.** 3D Hierarchical orientation in polymer-clay nanocomposite films / A. Bafna, G. Beaucage, F. Mirabella, S. Mehta – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2003. – Vol. 44, N 3. – P. 1103-1115.

124. **Chang, J.-H.** Poly(ethylene terephthalate) nanocomposites by in situ interlayer polymerization: the thermo-mechanical properties and morphology of the hybrid fibers / J.-H. Chang, S. J. Kim, Y. L. Joo, S. Im – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2004. – Vol. 45, N 3. – P. 919-926

125. **Fermeglia, M.** Computer simulation of nylon-6/organoclay nanocomposites: prediction of the binding energy / M. Fermeglia, M. Ferrone, S. Priol – Текст : непосредственный // *Fluid Phase Equilibria*. – 2003. – Vol. 212, V 2. – P. 315-329.

126. **Yoon, P. J.** Polycarbonate nanocomposites. Part 1. Effect of organoclay structure on morphology and properties / P. J. Yoon, D. L. Hunter, D. R. Paul – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2003. – Vol.44, N 18. – P. 5323-5339.

127. **Yoon, P. J.** Polycarbonate nanocomposites: Part 2. Degradation and color formation / P. J. Yoon, D. L. Hunter, D. R. Paul – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2003. – Vol.44, N 18. – P. 5341-5354.

128. **Yang, Y.** Preparation and properties of hybrids of organo-soluble polyimide and montmorillonite with various chemical surface modification methods / Y. Yang, Z. Zhu, J. Yin [et al.] – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 1999. – Vol. 40, N 15. – P. 4407-4414.

129. **Tyan, H.-L.** Enhancement of imidization of poly(amic acid) through forming poly(amic acid)/organoclay nanocomposites / H.-L. Tyan, Y.-C. Liu, K.-H. Wei – Текст : непосредственный // *Polymer*. 1999. – Vol. 40, N 17. – P. 4877-4886.

130. **Delozier, D. M.** Preparation and characterization of polyimide/organoclay

nanocomposites / D. M. Delozier, R. A. Orwoll, J. F. Cahoon, N. J. Johnston, J. G. Smith, J. W. Connell – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2002. – Vol. 43, N 3. – P. 813-882.

131. **Liang, Z.-M.** Polyimide/montmorillonite nanocomposites based on thermally stable, rigid-rod aromatic amine modifiers / Z.-M. Liang, J. Yin, H.-J. Xu – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2003. – Vol. 44, N 5. – P. 1391-1399.

132. **Delozier, D. M.** Polyimide nanocomposites prepared from high-temperature, reduced charge organoclays / D. M. Delozier, R. A. Orwoll, J. F. Cahoon [et al.] – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2003. – Vol. 44, N 8. – P. 2231-2241.

133. **Huang, J.** Polyimide/POSS nanocomposites: interfacial interaction, thermal properties and mechanical properties / J. Huang, C. He, Y. Xiao, K. Y. Mya [et al.] – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2003. – Vol. 44, N 16. – P. 4491-4499.

134. **Liang, Z.-M.** Polyimide/montmorillonite nanocomposites with photolithographic properties / Z.-M. Liang, J. Yin, J.-H. Wu [et al.] – Текст : непосредственный // *European Polymer Journal*. – 2004. – Vol. 40, N 2. – P.307-314.

135. **Chang, J.-H.** An exfoliation of organoclay in thermotropic liquid crystalline polyester nanocomposites / J.-H. Chang, B.-S. Seo, D.-H. Hwang – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2002. – Vol. 43, N 10. – P. 2969-2974.

136. **Chin, I. J.** On exfoliation of montmorillonite in epoxy / I. J. Chin, T. Albrecht, H. C. Kim [et al.] – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2001. – Vol. 42, N 13. – P. 5947-5952.

137. **Wu, G.** Structure and property studies of poly(trimethylene terephthalate) high-speed melt spun fibers / G. Wu, H. Li, Y. Wu, J. A. Cuculo – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2002. – Vol.43, N 18. – P. 4915-4922.

138. **Kim, B. K.** Morphology and properties of waterborne polyurethane/clay nanocomposites / B. K. Kim, J. W. Seo, H. M. Jeong – Текст : непосредственный // *European Polymer Journal*. – 2003. – Vol. 39, N 1. – P. 85-91.

139. **Ma, J.** A new approach to polymer/montmorillonite nanocomposites / J. Ma, J. Xu, J. H. Ren [et al.] – Текст : непосредственный // *Polymer*. – 2003. – Vol. 44, N

16. – P. 4619-4624.

140. Фракталы в физике / под редакцией Л. Пьетронеро, Э. Тозатти ; труды VI Международного симпозиума по фракталам в физике. – Москва : Мир, 1988. – 670 с. – Текст : непосредственный.

141. **Мищенко, С. В.** Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – Москва : Машиностроение, 2008. – 320 с. – Текст : непосредственный.

142. **Елецкий, А. В.** Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе / А. В. Елецкий – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 3. – С. 233-274.

143. Компания "ХИМПРОМ ТЕХНОЛОГИЯ" : официальный сайт. – Дзержинск, 2023. – URL: <http://chemind-tec.ru> (дата обращения 15.08.2019). – Текст : электронный.

144. **Кононенко, А. С.** Долговечность полимерных композиционных материалов на основе анаэробного герметика АН-111 / А. С. Кононенко, Д. Н. Псарев, А. Б. Рожнов – Текст : непосредственный // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В. П. Горячкина». – 2018. – №6(88). – С. 45-50.

145. **Кононенко, А. С.** Стойкость к старению и вибрационным нагрузкам полимерного композиционного материала на основе анаэробного герметика «АН-111» / А. С. Кононенко, Д. Н. Псарев, А. Б. Рожнов – Текст : непосредственный // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В. П. Горячкина». – 2019. – №5(93). – С. 4-8.

146. Патент № **2678063** Российская Федерация, МПК **C09J 133/00 (2006.01), C09J 11/04 (2006.01), B28B 1/00 (2006.01), B82Y 30/00 (2011.01), B82Y 40/00 (2011.01)**. Композиция для склеивания металлических изделий: № 2018100453 : заявл. 09.01.2018 : опубл. 22.01.2019 / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Малюгин В. А., Быконя А. Н. ; заявитель ФГБОУ ВО «ЛГТУ». – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.

147. Патент № **2757271** Российская Федерация, МПК **C09D 5/08 (2006.01), C09D 7/61 (2018.01), C09D 161/14 (2006.01), C09D 109/02 (2006.01), B82Y 30/00 (2011.01)**. Композиция для покрытия металлических изделий: №

2020134361 : заявл. 19.10.2020 : опубл. 12.10.2021 / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Киба М. Р., Быконя А. Н., Мельников А. Ю., Ерохин В. Е. ; заявитель ФГБОУ ВО «ЛГТУ». – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

148. **Охлопкова, А. А.** Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А. А. Охлопкова, А. В. Виноградов, Л. С. Пинчук. – Гомель : ИММС, 1999. – 162 с. – Текст : непосредственный.

149. **Михайлюк, А. Е.** Разработка эластомерных материалов на основе этиленпропиленовых каучуков, модифицированных высокодисперсными частицами металлов : специальность 02.00.06 «Высокомолекулярные соединения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Михайлюк Алла Евгеньевна : Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2014. – 140 с. – Текст : непосредственный.

150. **Помогайло, А. Д.** Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – Москва : Химия, 2000. – 672 с. – Текст : непосредственный.

151. **Кособудский, И. Д.** Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации / И. Д. Кособудский – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. – 2000. – Т. 43 (4). – С. 3-18.

152. **Сергеев, Г. Б.** Нанохимия металлов / Г. Б. Сергеев – Текст : непосредственный // Успехи химии. – 2001. – Т. 70, №10. – С. 915-933.

153. **Li, R. I.** Theoretical Concerns in Selection of Metal Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. / R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, No. 1. – PP. 15-19.

154. **Ли, Р. И.** Полимерные композиционные материалы для фиксации подшипников качения в узлах машин : монография / Р. И. Ли. – Липецк : ЛГТУ, 2017. – 224 с. – Текст : непосредственный.

155. **Ли, Р. И.** Параметры ультразвукового диспергирования растворов полимерных композиционных материалов / Р. И. Ли, А. А. Колесников, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Все материалы. Энциклопедический справочник. –

Москва : ООО «Наука и технологии», 2016. – №9. – С. 23-28.

156. **Ли, Р. И.** Повышение качества восстановления корпусных деталей автомобильной техники полимерными композитами, обработанными в ультразвуковом поле / Р. И. Ли, А. А. Колесников – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин – 2017. – №1(57). – С. 16-21.

157. **Быконя, А. Н.** Повышение качества восстановления корпусных деталей автомобилей эластомерными нанокompозитами после инфракрасной обработки : специальность 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Быконя Андрей Николаевич ; ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева». – Липецк, 2022. – 185 с. – Текст : непосредственный.

158. Справочник по триботехнике: в 3 томах : Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / под общей редакцией М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1990. – 411 с. – Текст : непосредственный.

159. **Ли, Р. И.** Расчет параметров контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца в металлополимерном роликоподшипнике / Р. И. Ли, А. В. Мироненко – Текст : непосредственный // Известия МГТУ «МАМИ» – 2015. – №4(26), Т. 1 – С. 65-70.

160. **Ли, Р. И.** Программа расчета контактных напряжений в роликоподшипниковых узлах восстановленных полимерными материалами / Р. И. Ли, А. В. Мироненко – Текст : непосредственный // Вестник МичГАУ. – 2015. – № 4. – С. 181-186.

161. **Ли, Р. И.** Исследование распределения нагрузки между телами качения в металлополимерном роликоподшипнике / Р. И. Ли, А. В. Мироненко – Текст : непосредственный // Известия МГТУ «МАМИ» – 2016. – №1(27), Т. 1 – С. 38-41.

162. **Кузнецов, М. М.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» в узлах сельскохозяйственной техники цианакрилатным клеем ТК-200 : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание

ученой степени кандидата технических наук / Кузнецов Михаил Михайлович : Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2013. – 142 с. – Текст : непосредственный.

163. **Баурова, Н. И.** Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин : учебное пособие / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – Москва : МАДИ, 2016. – 264 с. – Текст : непосредственный.

164. **Клинков, А. С.** Проектирование смесителей периодического действия при получении композитов заданного качества из отходов термопластов / А. С. Клинков, М. В. Соколов, В. Г. Однолько, П. С. Беляев. – Москва : Издательский дом «Спектр», 2012. – 196 с. – Текст : непосредственный.

165. **Барбалат, Ю. А.** Новый справочник химика и технолога. Аналитическая химия / Ю. А. Барбалат [и др.] ; под общей редакцией И. П. Калинин, В. И. Мосичева. – Санкт-Петербург : АНО НПО «Мир и Семья», 2002. – Ч. 1 – 964 с. – Текст : непосредственный.

166. **Агранат, Б. А.** Ультразвуковая технология : учебное пособие / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский, Н. Н. Хавский. – Москва : издательство «Металлургия», 1974. – 503 с. – Текст : непосредственный

167. **Агранат, Б. А.** Основы физики и техники ультразвука : учебное пособие для вузов / Б. А. Агранат [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1987. – 352 с. – Текст : непосредственный.

168. **Бараш, Ю. С.** Силы Ван-дер-Ваальса / Ю. С. Бараш. – Москва : Наука, 1988. – 344 с. – Текст : непосредственный.

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

170. **Ли, Р. И.** Особенности исследования физических свойств раствора композиции эластомера при определении режима ультразвукового диспергирования / Р. И. Ли, А. А. Колесников – Текст : непосредственный // Все материалы. Энциклопедический справочник. – Москва : ООО «Наука и технологии», 2016. –

№8. – С. 25-28.

171. **Ли, Р. И.** Параметры ультразвукового диспергирования растворов полимерных композиционных материалов / Р. И. Ли, А. А. Колесников, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Все материалы. Энциклопедический справочник. – Москва : ООО «Наука и технологии», 2016. – №9. – С. 23-28.

172. **Розенберг Л. Д.** Физические основы ультразвуковой технологии / Л. Д. Розенберг [и др.]. – Москва : Наука, 1970. – Т.3. – 689 с. – Текст : непосредственный.

173. **Курчаткин, В. В.** Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин, Н. Ф. Тельнов, К. А. Ачкасов, А. Н. Батищев ; под редакцией В. В. Курчаткина. – Москва : Колос, 2000. – 776 с. – Текст : непосредственный.

174. **Кузовлев, В. А.** Техническая термодинамика и основы теплопередачи / В. А. Кузовлев ; под редакцией Л. Р. Стоцкого. – Москва : Высшая школа, 1983. – 335 с. – Текст : непосредственный.

175. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики. Том 2: Термодинамика и молекулярная физика : учебное пособие / Д. В. Сивухин. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с. – Текст : непосредственный.

176. Компания «Nordberg» : официальный сайт. – Москва, 2023. – URL: <https://nordberg.ru> (дата обращения 25.04.2020). – Текст : электронный.

177. ООО «ВИДЕРКРАФТ РУС» : официальный сайт. – Санкт-Петербург, 2023. – URL: <https://wiederkraft.ru> (дата обращения 25.04.2020). – Текст : электронный.

178. ООО «Евростор» : официальный сайт. – Санкт-Петербург, 2023. – URL: <https://гаражное.рф> (дата обращения 29.04.2020). – Текст : электронный.

179. **Кричевский, М. Е.** Применение полимерных материалов при ремонте сельскохозяйственной техники / М. Е. Кричевский. – Москва : Росагропромиздат, 1988. – 143 с. – Текст : непосредственный.

180. **Li, R. I.** Technology and Equipment for High-Precision Polymer Restoration of Fitment Holes in Automotive Housing Parts / R. I. Li, F. A. Kirsanov, M. R. Ki-ba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2016. – Vol. 9, No. 3.

– РР. 312-316.

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

182. **Ли, Р. И.** Деформационно-прочностные и адгезионные свойства эластомера Ф-40С / Р. И. Ли, Ф. А. Кирсанов – Текст : непосредственный // Бюллетень научных работ. Выпуск 34. – Белгород : БелГСХА, 2013. – С. 93-97.

183. **Икрамов, У. А.** Допустимые перекосы и непараллельности осей валов коробки передач / У. А. Икрамов – Текст : непосредственный // Автомобильный транспорт. – 1962 – №7. – С. 29-32.

184. **Ли Р. И.** Неразрушающий контроль качества неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники, восстановленных анаэробными герметиками : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ли Роман Иннакентьевич : Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1990. – 220 с. – Текст : непосредственный.

185. **Ли, Р. И.** Методические указания к лабораторной работе «Восстановление деталей полимерными материалами при ремонте машин и оборудования» / Р. И. Ли, С. И. Кондрашин. – Мичуринск : МичГАУ, 2007. – 24 с. – Текст : непосредственный.

186. **Штучный, Б. П.** Механическая обработка пластмасс : справочник / Б. П. Штучный. – Москва : Машиностроение, 1987. – 152 с. – Текст : непосредственный.

187. **Попов, С. А.** Заточка режущего инструмента : учебное пособие / С. А. Попов. – Москва : Высшая школа, 1970. – 320 с. – Текст : непосредственный.

188. **Ли, Р. И.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий корпусных деталей сельскохозяйственной техники при модификации эластомеров / Р. И. Ли, Ф. А. Кирсанов, Д. В. Машин, А. А. Колесников – Текст : непосредственный // Труды ГОСНИТИ. – Москва : ГОСНИТИ, 2013. – Т. 111. – Ч.

2. – С. 134-136.

189. **Ли, Р. И.** Технологические аспекты повышения эффективности восстановления корпусных деталей автотракторной техники эластомерами / Р. И. Ли, Ф. А. Кирсанов – Текст : непосредственный // Труды ГОСНИТИ. – Москва : ГОСНИТИ, 2014. – Т. 114. – С. 100-103.

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

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

192. **Баскаков, В. Н.** Долговечность неподвижных цилиндрических соединений сельскохозяйственных тракторов и пути ее повышения : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Баскаков Валерий Николаевич : Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В. П. Горячкина. – Москва, 1986. – 201 с. – Текст : непосредственный.

193. ООО «ПЕРЕДОВЫЕ ПОРОШКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» : официальный сайт. – Томск, 2023. – URL: <http://www.nanosized-powders.com> (дата обращения 29.07.2020). – Текст : электронный.

194. **ГОСТ 14236-81.** Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 9 февраля 1981 г. № 556 : взамен ГОСТ 14236-69 : дата введения 01.07.1981 / разработан и внесен Министерством химической промышленности. – Москва : Издательство стандартов Ордена «Знак Почета», 1989. – 9 с. – Текст : непосредственный.

195. **Аскадский, А. А.** Деформация полимеров / А. А. Аскадский. – Москва : Химия, 1973. – 448 с. – Текст : непосредственный.
196. **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – Москва : Наука, 1976. – 607 с. – Текст : непосредственный.
197. **Ли, Р. И.** Основы научных исследований : учебное пособие / Р. И. Ли. – Липецк : ЛГТУ, 2013. – 190 с. – Текст : непосредственный.
198. **Крассовский, Г. И.** Планирование эксперимента / Г. И. Крассовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с. – Текст : непосредственный.
199. **Хайлис, Г. А.** Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис, М. М. Коваль. – Москва : Колос, 1994. – 169 с. – Текст : непосредственный.
200. **Аугамбаев, М. И.** Основы планирования научно-исследовательского эксперимента : учебное пособие / М. И. Аугамбаев, А. З. Иванов, Ю. И. Терехов ; под редакцией Г. М. Рудакова. – Ташкент : Укитувчи, 2004. – 336 с. – Текст : непосредственный.
201. **Ли, Р. И.** Исследование машин и оборудования металлургического производства : учебное пособие / Р. И. Ли. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – 343 с. – Текст : непосредственный.
202. **ГОСТ 9550-81.** Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26 августа 1981 г. № 4058 : взамен ГОСТ 9550-71 : дата введения 01.07.1982 / разработан и внесен Министерством химической промышленности. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2000. – 7 с. – Текст : непосредственный.
203. **Спицын, Н. А.** Подшипники качения : справочное пособие / Н. А. Спицын ; под редакцией Н. А. Спицына, А. И. Спришевского. – Москва : Машгиз, 1961. – 628 с. – Текст : непосредственный.
204. **Шашков, А. Г.** Методы определения теплопроводности и температу-

ропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. Н. Абраменко, В. П. Козлов ; под редакцией А. В. Лыкова – Москва : Энергия, 1973. – 336 с. – Текст : непосредственный.

205. **ГОСТ 859-2014.** Медь. Марки : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 августа 2014 г. № 865-ст : взамен ГОСТ 859-2001 : дата введения 01.07.2015 / разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 368 «Медь». – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2015. – 8 с. – Текст : непосредственный.

206. **ГОСТ 3900–1985.** Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20 декабря 1985 г. № 4544 : взамен ГОСТ 3900-47 : дата введения 01.01.1987 / разработан и внесен Министерством химической и нефтеперерабатывающей промышленности СССР. – Москва : издательство стандартов, 2000. – 37 с. – Текст : непосредственный.

207. **ГОСТ 2405–1988.** Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры. Общие технические условия : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 23.12.1988 № 4530 : взамен ГОСТ 2405-80, ГОСТ 2648-78, ГОСТ 7919-80, ГОСТ 8625-77, ГОСТ 12716-76, ГОСТ 12733-83, ГОСТ 24844-81, ГОСТ 13717-84 в части манометров, вакуумметров, мановакуумметров, напорометров, тягомеров и тягонапорометров : дата введения 01.07.1989 / разработан и внесен Министерством приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР. – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2008. – 30 с. – Текст : непосредственный.

208. **ГОСТ 1756–2000.** Нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие постановлением Государственного комитета Российской Федерации по

стандартизации, метрологии от 3 ноября 2000 г. № 286-ст : взамен ГОСТ 1756-52 : дата введения 01.07.2001 / разработан Техническим комитетом 31 «Нефтяные топлива и смазочные материалы». – Минск : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2005. – 16 с. – Текст : непосредственный.

209. **ГОСТ 18249-72.** Пластмассы. Метод определения вязкости разбавленных растворов полимеров : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР от 23.11.72 № 2122 : введен впервые : дата введения 01.01.1974 / разработан и внесен Министерством химической промышленности СССР. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1995. – 6 с. – Текст : непосредственный.

210. Весы лабораторные ВК : руководство по эксплуатации. – Санкт-Петербург : АО «МАССА-К», 2008. – 16 с. – Текст : непосредственный.

211. Пирометр Testo 830-T4 : руководство пользователя. – Москва : ООО «Тэсто Рус», 2014 – 9 листов. – Текст : непосредственный.

212. **Li, R. I.** A Mathematical Model of Infrared Heating of Auto Body Parts during Restoration by a Polimer Material / R. I. Li, D. N. Psarev, A. N. Bykonya – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2020. – Vol. 13, No. 2. – PP. 172-176.

213. **Li, R. I.** Calculation of Structural and Operational Parameters of a Facility for Infrared Heating of Base Parts during Restoration with a Polymer Material / R. I. Li, Yu. N. Rizaeva, D. N. Psarev, A. N. Bykonya – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2020. – Vol. 13, No. 4. – PP. 387-390.

214. **Li, R. I.** A Mathematical Model of Thermal Irradiation Processing of Polymer Coatings during Restoration of Automobile Body Parts / R. I. Li, D. N. Psarev, A. N. Bykonya, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2021. – Vol. 14, No. 3. – PP. 376-380.

215. **Li, R. I.** A Method for Calculating the Parameters of a Unit for Thermoradiation Treatment of Polymer Coatings in the Restoration of Car Body Parts / R. I. Li, Yu. N. Rizaeva, D. N. Psarev, A. N. Bykonya, M. R. Kiba – Текст : непосредственный.

ный // Polymer Science, Series D. – 2021. – Vol. 14, No. 4. – PP. 517-521.

216. **ГОСТ 12423-2013.** Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб) : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1069-ст : взамен ГОСТ 12423-66 : дата введения 01.01.2015 / внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 230 «Пластмассы, полимерные материалы, методы их испытаний». – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2014. – 8 с. – Текст : непосредственный.

217. **ГОСТ 9.407-2015.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 июня 2015 г. № 618-ст : введен впервые : дата введения 01.03.2016 / внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 290 «Покрытия лакокрасочные». – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2015. – 40 с. – Текст : непосредственный.

218. **Патент № 2719624 Российская Федерация, МПК G01M 13/04 (2006.01).** Стенд для испытания подшипников качения на долговечность: № 2019121503 : заявл. 08.07.2019 : опубл. 21.04.2020 / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Ризаева Ю. Н., Пчельников А. В., Быконя А. Н., Мельников А. Ю. ; заявитель ФГБОУ ВО «ЛГТУ». – 16 с. : ил. – Текст : непосредственный.

219. **Перель, Л. Я.** Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор : справочник / Л. Я. Перель. – Москва : Машиностроение, 1983. – 543 с. – Текст : непосредственный.

220. Вибраторы электромеханические общего назначения ИВ-98Б, ИВ-98Н, ИВ-99Б, ИВ-99Н, ИВ-99Б-П, ИВ-105-2.2, ИВ-107А, ИВ-107Н, ИВ-107А-П, ИВ-107А-1.5 : руководство по эксплуатации 2-1.003 РЭ. – Ярославль : ОАО «Ярославский завод «Красный Маяк». – 2003. – 18 с. – Текст : непосредственный.

221. **Ли, Р. И.** Теоретические аспекты выбора металлических наноразмерных наполнителей для композиции эластомера Ф-40 / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Клеи. Герметики, Технологии. – 2018. – № 8. –

С. 38-43.

222. **Гладышев, Г. П.** Стабилизация термостойких полимеров / Г. П. Гладышев, Ю. А. Ершов, О. А. Шустова. – Москва : Химия, 1979. – 271 с. – Текст : непосредственный.

223. **Фойгт, И. Ф.** Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла / И. Ф. Фойгт ; под редакцией Б. М. Коварской ; [перевод с немецкого А. Б. Блюменфельда]. – Ленинград : Химия. Ленинградское отделение, 1972. – 544 с. – Текст : непосредственный.

224. **Брык, М. Т.** Деструкция наполненных полимеров / М. Т. Брык. – Москва : Химия, 1989. – 190 с. – Текст : непосредственный.

225. **Пиотровский, К. Б.** Старение и стабилизация синтетических каучуков и вулканизаторов / К. Б. Пиотровский, З. Н. Тарасова. – Москва : Химия, 1980. – 264 с. – Текст : непосредственный.

226. **Львов, Ю. А.** Влияние металлов переменной валентности на стабильность бутадиен-нитрильного каучука в условиях термоокисления / Ю. А. Львов, К. Б. Пиотровский, Т. А. Авдеевич – Текст : непосредственный // Каучук и резина. – 1972. – № 9. – С. 18–22.

227. **Kablov, V. F.** Low Flammability Polymeric Materials / V. F. Kablov, A. N. Gaidadin, I. P. Petryuk. – New York : Nova Science. – 1999. – 281 p. – Текст : непосредственный.

228. **Корнев, Ю. В.** Влияние модификации технического углерода на свойства резин / Ю. В. Корнев [и др.] – Текст : непосредственный // Каучук и резина. – 2008. – №01 – С. 14-18.

229. **Натансон, Э. М.** Металлополимеры / Э. М. Натансон, М. Т. Брык – Текст : непосредственный // Успехи химии. – 1972. – Т. 41. – № 8. – С. 1465-1493.

230. **Долгополова, К. И.** Применение высокодисперсных порошков металлов в резиновых смесях / К. И. Долгополова, Г. А. Блох, В. М. Чегорян [и др.] – Текст : непосредственный // Известия вузов, серия химическая. – 1968. – № 5. – С. 604–608.

231. **Halpin, J. C.** Molecular Theory for the Tensile Strength of Gum Elasto-

mers / J. C. Halpin, F. Bueche – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physics. – 1964. – Vol. 35. – P. 3133-3142.

232. **Ли, Р. И.** Перспективный нанокompозит на основе эластомера Ф-40 для восстановления корпусных деталей машин / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Клеи. Герметики, Технологии. – 2018. – № 10. – С. 40-44.

233. **Li, R. I.** Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines / R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba – Текст : непосредственный // Polymer Science, Series D. – 2019. – Vol. 12, No. 2. – PP. 128-132.

234. **Ли, Р. И.** Термостойкость посадок подшипников качения, восстановленных эластомерными нанокompозитами / Р. И. Ли, Ю. Н. Ризаева, А. Ю. Мельников, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Наука в Центральной России. – 2022. – №4 (58). – С. 122-130.

235. Усиление эластомеров : сборник статей / под редакцией Дж. Крауса. – Москва : Химия. 1968. – 483 с. – Текст : непосредственный.

236. **Новаков, И. А.** Использование металлических частиц различной дисперсности в эластомерных композитах / И. А. Новаков, В. Ф. Каблов, И. П. Петрюк, А. Е. Михайлюк – Текст : непосредственный // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – Том 7, № 2(62). – С. 90-96.

237. **Ли, Р. И.** Исследование теплопроводности полимерных нанокompозитов / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников, А. Н. Быконя – Текст : непосредственный // Наука в Центральной России. – 2022. – №1 (55). – С. 81-91.

238. **Чудновский, А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – Москва : Физматгиз, 1962. – 456 с. – Текст : непосредственный.

239. **Counto, U. J.** The effect of the elastic modulus of the aggregate on the elastic modulus, creep and creep recovery of concrete / U. J. Counto – Текст : непосредственный // Magazine of Concrete Research. – 1964. – Vol. 16, No. 48. – PP. 129-138.

240. **Kozlov, G. V.** Structure of the polymer amorphous state / G. V. Kozlov, G. E. Zaikov. – Utrecht, Boston : VSP. – 2004. – 465 p. – Текст : непосредственный.

241. **Wu, S.** Polymer Interface and Adhesion / S. Wu. – New York : CRC Press, 1982. – 630 p. – Текст : непосредственный.
242. **Липатов, Ю. С.** Физическая химия наполненных полимеров / Ю. С. Липатов. – Москва : Химия, 1977. – 304 с. – Текст : непосредственный.
243. Edwards, D. C. Polymer-filler interaction in rubber reinforcement – Текст : непосредственный // Journal of Materials Science. – 1990. – Vol. 25, №12. – PP. 4175-4185.
244. Доклады Академии наук СССР / Академия наук СССР. – Ленинград : Наука. Ленинградское отделение, 1988. – Т. 303, №2. – 1379 с. – Текст : непосредственный.
245. **Баланкин, А. С.** Теория упругости и энтропийной высокоэластичности фракталов / А. С. Баланкин – Текст : непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 1991. – Т. 17, №17. – С.68-72.
246. **Баланкин, А. С.** Синергетика деформируемого тела / А. С. Баланкин. – Москва : МО СССР, 1991. – 404 с. – Текст : непосредственный.
247. **Козлов, Г. В.** Фрактальная модель усиления эластомерных нанокомпозитов/ Г. В. Козлов, А. И. Буря, Ю. С. Липатов. – Текст : непосредственный // Механика композитных материалов. – 2006. – Т. 42, №6. – С. 797-802.
248. **Козлов, Г. В.** Структурный анализ реакционной способности / Г. В. Козлов, Г. Б. Шустов – Текст : непосредственный // Химическая технология. – 2006. – №1. – С. 24-26.
249. **Dolbin, I. V.** The structure and thermal stability of polymer materials: a fractal model / I. V. Dolbin, A. I. Burya, G. V. Kozlov – Текст : непосредственный // HIGH TEMPERATURE. – 2007. – Vol. 45, No 3. – PP. 313-316.
250. **Козлов, Г. В.** Структура аморфного состояния полимеров / Г. В. Козлов, Е. Н. Овчаренко, А. К. Микитаев. – Москва : Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2009. – 391 с. – Текст : непосредственный.
251. Успехи коллоидной химии : сборник статей / АН СССР, АН УзССР ; под редакцией И. В. Петрянова-Соколова, К. С. Ахмедова. – Москва : Наука,

1977. – 340 с. – Текст : непосредственный.

252. Композиционные полимерные материалы : лекции школы-семинара / под редакцией Ю. С. Липатова [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1975. – 190 с. – Текст : непосредственный.

253. **Муллинз, Л.** Структура и механические свойства наполненных резин / Л. Муллинз – Текст : непосредственный // Каучук и резина. – 1968. – № 7. – С. 18-24.

254. **Догодкин, Б. А.** Химия эластомеров / Б. А. Догодкин, А. А. Донцов, В. А. Шершнев. – Москва : Химия, 1981. – 376 с. – Текст : непосредственный.

255. **Бартенев, Г. М.** Физика и механика полимеров : учебное пособие для вузов / Г. М. Бартенев, Ю. В. Зеленев. – Москва : Высшая школа, 1983. – 391 с. – Текст : непосредственный.

256. **Бондалетова, Л. И.** Полимерные композиционные материалы : учебное пособие / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 111 с. – Текст : непосредственный.

257. **Сивергин, Ю. М.** Синтез и свойства олигоэфир(мет)акрилатов / Ю. М. Сивергин, С. М. Усманов. – Москва : Химия, 2000. – 419 с. – Текст : непосредственный.

258. **Нарисава, И.** Прочность полимерных материалов / И. Нарисава : под редакцией Т. Екобори. – Москва : Химия, 1987 – 397 с. – Текст : непосредственный.

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

260. **Бронин, Ф. А.** Исследование кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел в ультразвуковом поле высокой интенсивности : специальность 05.00.00 «Технические науки» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бронин Фридрих Александрович ; Московский институт стали и сплавов. – Москва, 1966. – 294 с. – Текст : непосредственный.

261. **Крауткремер, Й.** Ультразвуковой контроль материалов : справочник / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – Москва : Металлургия, 1991. – 750 с. – Текст : непосредственный.

262. **Дьяченко, Д. И.** О возможности получения порошков сверхвысокой дисперсности в кавитирующей среде / Д. И. Дьяченко – Текст : непосредственный // Вестник ВолГУ. – 2012. – №6. – 56 с.

263. **Ли, Р. И.** Ультразвуковая обработка растворов полимерных композиционных материалов при восстановлении корпусных деталей машин / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. А. Колесников – Текст : непосредственный // Научный журнал «Научное обозрение». – 2017. – №8. – С. 57-62.

264. **Малюгин, В. А.** Полимерный нанокомпозит для восстановления посадок подшипников качения автомобилей / В. А. Малюгин, Д. Н. Псарев, А. В. Бутин – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – №3 (62) – С. 34-40.

265. **Кузовлев, В. А.** Техническая термодинамика и основы теплопередачи : учебник / В. А. Кузовлев ; под редакцией Л. Р. Стоцкого. – Москва : Высшая школа, 1983. – 335 с. – Текст : непосредственный.

266. **Ли, Р. И.** Теоретические аспекты терморadiационного нагрева изношенных корпусных деталей техники при восстановлении / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. Н. Быконя, А. В. Пчельников, А. Ю. Мельников – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2020. – №1(43). – С. 50-59.

267. **Ли, Р. И.** Оптимизация состава и режима термической обработки эластомерного нанокомпозита для восстановления корпусных деталей техники / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба, А. Ю. Мельников, А. Н. Быконя – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №2(56). – С. 87-98.

268. **Ли, Р. И.** Механические свойства и качество эластомерных покрытий после инфракрасной обработки / Р. И. Ли, Ю. Н. Ризаева, А. Н. Быконя, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №4(58). – С. 110-121.

269. **Ли, Р. И.** Метод расчета установок инфракрасной обработки полимерных покрытий при восстановлении корпусных деталей автотракторной техники / Р. И. Ли, Ю. Н. Ризаева, А. Н. Быконя, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба – Текст : непосредственный // Наука в центральной России. – 2022. – №5(59). – С. 110-119.

270. **Ли, Р. И.** Улучшение эластомерного нанокompозита при восстановлении корпусных деталей автомобилей после инфракрасной обработки / Р. И. Ли, Д. Н. Псарев, А. Н. Быконя – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – №1(76). – С. 24-30.

271. **Псарев, Д. Н.** Технология нанесения полимерных покрытий на подшипники качения для восстановления посадок корпусных деталей сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Псарев Дмитрий Николаевич ; Мичуринский государственный аграрный университет. – Мичуринск, 2015. – 178 с. – Текст : непосредственный.

272. **Псарев, Д. Н.** Технология механизированного нанесения полимерных покрытий на подшипники качения / Д. Н. Псарев, Р. И. Ли, В. В. Хатунцев [и др.] – Текст : непосредственный // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – Т.30, №5. – С. 86-88.

273. **Псарев, Д. Н.** Способ восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники с использованием полимерных материалов / Д. Н. Псарев, В. В. Хатунцев, С. Ю. Астапов, М. М. Мишин – Текст : электронный // Молочнохозяйственный вестник ; электронный периодический теоретический и научно-практический журнал ; редакция А. Л. Бирюкова ; ФГБОУ ВПО ВГМХА имени Н. В. Верещагина. – 2017. – №1. – С. 127-133. – URL: <http://molochnoe.ru/journal> (дата обращения 30.03.2017).

274. **Серый, И. С.** Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения [Текст] / И. С. Серый. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 366с. – Текст : непосредственный.

275. **Мягков, В. Д.** Допуски и посадки : справочник : в 2 частях / В. Д. Мягков, М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский : под редакцией В. Д. Мягкова. – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1982. – Ч.1. – 543 с. – Текст : непосредственный.

276. **Машин, Д. В.** Теоретические аспекты снижения податливости опор качения при восстановлении посадочных отверстий эластомерами / Д. В. Машин, Р. И. Ли – Текст : непосредственный // Особенности технического оснащения современного с.х. производства ; материалы к международной научно-практической конференции 04-05 апреля 2013 г. – Орел : Издательство ОрелГАУ, 2013. – С. 314-318.

277. **Шпилько, А. В.** Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / А. В. Шпилько, В. И. Драгайцев, П. Ф. Тулапин [и др.]. – Москва : РИЦ ГОСНИТИ, 1998. – 331 с. – Текст : непосредственный.

278. **Сергеев, И. В.** Экономика предприятия : учебное пособие / И. В. Сергеев. – Москва : Финансы и статистика, 2005. – 303 с. – Текст : непосредственный.

279. **Конкин, Ю. А.** Экономическое обоснование внедрения мероприятий научно-технического прогресса в АПК : методические рекомендации и примеры расчета / Ю. А. Конкин, А. Ф. Пацкалев, А. И. Лысюк [и др.]. – Москва : Конаковская типография Тверского упрполиграфиздата, 1991. – 79 с. – Текст : непосредственный.

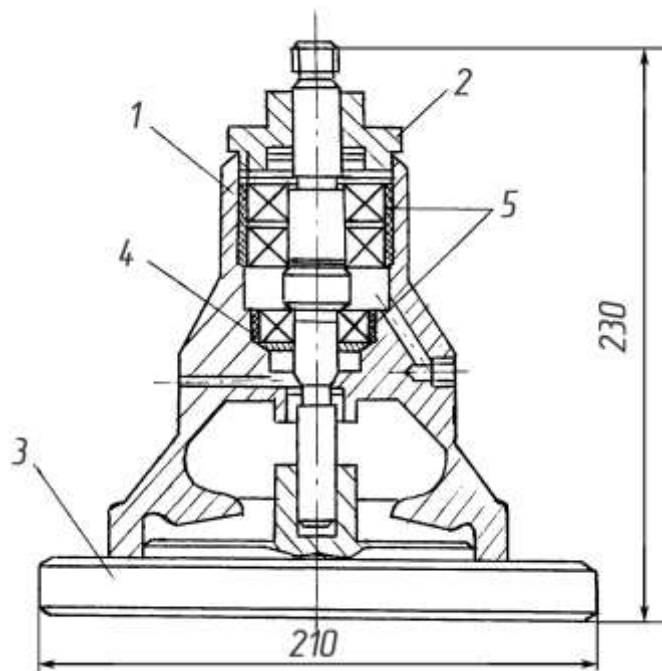
280. **Кравченко, И. Н.** Техничко-экономическое обоснование инженерных решений по эксплуатации и ремонту машин : учебное пособие / И. Н. Кравченко [и др.]. – Москва : Триада, 2006. – 144с. – Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А (справочное)

Способы восстановления подшипниковых отверстий в корпусных деталях полимерными материалами

Для обеспечения соосности сопрягаемых деталей при восстановлении клеями посадок подшипников качения с диаметральным зазором в сопряжении до склеивания более 0,05 мм необходимо применение специальных центрирующих приспособлений [16, 67, 179]. На рисунке А.1 показано приспособление для центрирования вала с подшипниками 304 и 305 относительно корпуса водяного насоса при восстановлении адгезивом [16, 179].



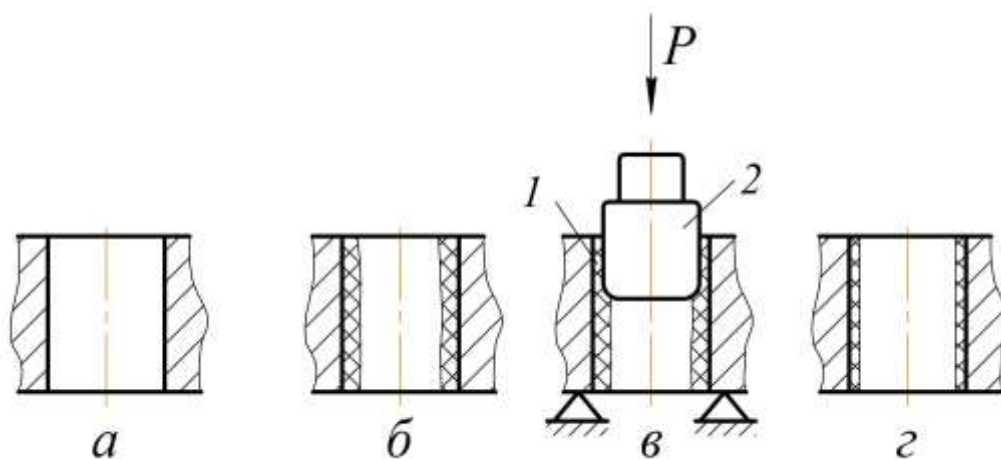
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – основание; 4, 5 – адгезив

Рисунок А.1 – Приспособление для центрирования вала с подшипниками 304 и 305 относительно корпуса водяного насоса при восстановлении адгезивом [179]

Чтобы равномерно распределить адгезив в зазоре между сопрягаемыми деталями, их устанавливают вертикально. В случае, когда восстанавливают адгезивом посадки подшипников в корпусных деталях агрегатов трансмиссии сельско-

хозяйственной техники задача центрирования сопрягаемых деталей значительно усложняется. Затруднена фиксация в вертикальном положении вала с подшипниками и шестернями, ограничен выбор технологических баз и др. В связи с этим задача обеспечения соосности осей сопрягаемых деталей представляет основную технологическую проблему в вопросе восстановления корпусных деталей агрегатов трансмиссии адгезивами.

В ГОСНИТИ разработана технология восстановления изношенных подшипниковых отверстий в корпусных деталях полимерным покрытием, включающая операцию калибрования [179]. На рисунке А.2 показана последовательность этапов восстановления изношенного отверстия: подготовка поверхности посадочного отверстия, включающая ее зачистку и обезжиривание, приготовление эпоксидного композита и нанесение слоя толщиной 1...1,5 мм на поверхность отверстия, отверждение покрытия до пластичного состояния, калибрование под требуемый размер, полное отверждение композита, удаление наплывов и визуальный контроль качества покрытия.



а – подготовленное изношенное отверстие; б – нанесенный, частично отвержденный слой эпоксидного состава; в – калибрование; 1 – эпоксидный композит; 2 – калибр; г – полимерное покрытие после полного отверждения

Рисунок А.2 –Этапы восстановления отверстия в корпусной детали калиброванием

Калибр показан на рисунке А.2, в. Заходная часть детали закруглена. Размеры калибра приняты с учетом усадки полимера, которую определяют опытным путем.

Рабочие поверхности калибра подвергают хромированию, шлифованию и полированию. На них протачивают одну или две маслосточные канавки. Для исключения прилипания эпоксидного состава рабочая поверхность калибра перед использованием покрывается тонким слоем масла АКЗ_п-6.

Для восстановления изношенных подшипниковых отверстий корпусных деталей предложены композиты на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (в масс.ч.):

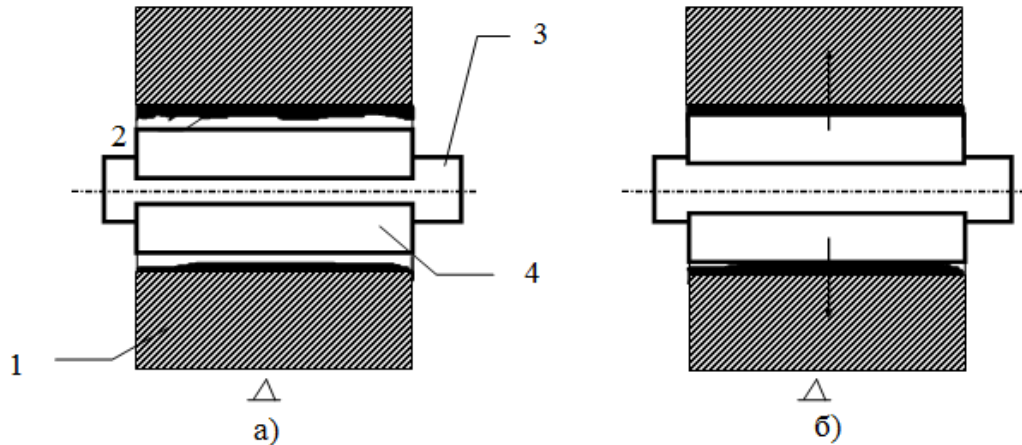
- эпоксидная смола ЭД-16 – 100, железный порошок – 120, портландцемент марки 500 – 60, олигоамид Л-19 – 35;

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

При калибровании отверстий с полимерным покрытием используют механические или гидравлические прессы, вертикально-расточные и сверлильные станки, а также калибры заданных размеров.

Профессором Котиным А. В. и сотрудниками (МГУ им. Н.П. Огарева) разработан способ формования отверстия с полимерным покрытием в корпусных деталях автомобилей и технология восстановления. На рисунке А.3 представлена схема формования отверстия с полимерным покрытием [15].

Восстановление изношенной корпусной детали проводят следующим образом: устанавливают корпусную деталь 1 в приспособление; зачищают и обезжиривают посадочную поверхность изношенных отверстий; наносят слой полимера; формируют полимерное покрытие. При формировании используют специальную цилиндрическую оправку 3 (скалку). Для исключения осевого выдавливания полимера скалка оснащена раздвижными полукольцами 4. В момент ввода скалки 3 в отверстие с полимерным покрытием раздвижные полукольца 4 находятся в сжатом состоянии.



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

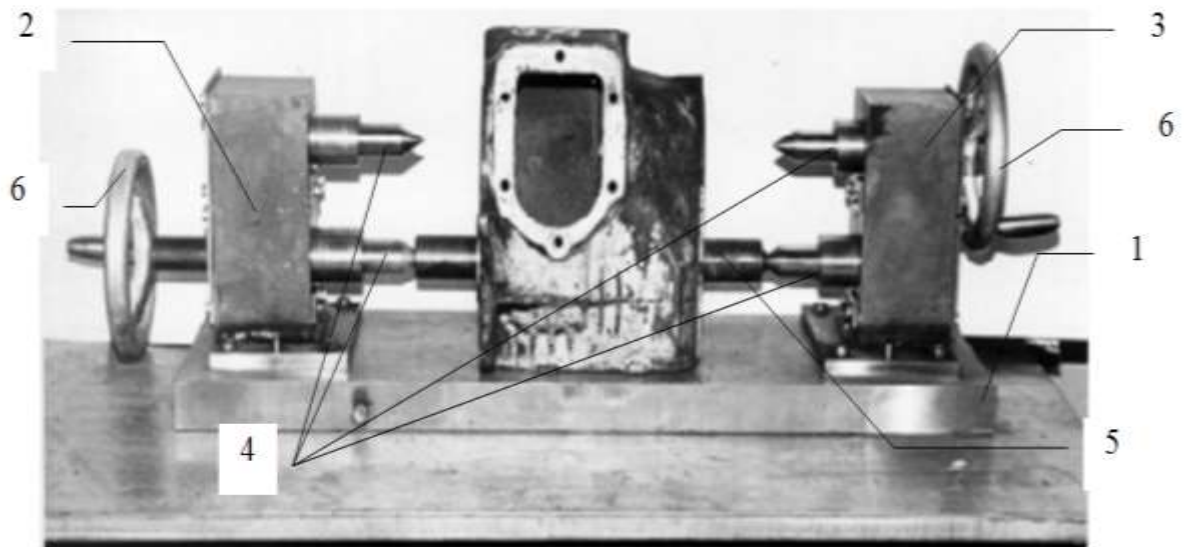
Рисунок А.3 – Схема формирования полимерного покрытия после нанесения на изношенное посадочное отверстие корпусной детали [15]

Во избежание прилипания полимерного композита поверхность полуколец покрыта тонким слоем масла марки АКЗп-6. После введения скалки в отверстие полукольца разжимают и полимерное покрытие формируется под заданный размер.

По завершении полимеризации композита выполняют сжатие полуколец и скалка выводится из отверстия корпусной детали.

Разработана технологическая оснастка для восстановления корпуса коробки передач автомобиля ГАЗ-53 (рисунок А.4). Оснастка включает плиту 1 с закрепленными на ней левой 2 и правой 3 стойками. Стойки имеют по два центра 4 для центрирования скалок 5. Маховиком 3 выполняют перемещение центров 4 стоек в осевом направлении. Расстояние между центрами приспособления составляет $100,625^{+0,05}$ мм. [15]

Допускается перекос и не параллельность общей оси центров на базовой длине 250 мм не более 0,04 мм.



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

Рисунок А.4 – Приспособление для восстановления отверстий корпуса коробки передач автомобиля ГАЗ-53 [15]

Приложение Б

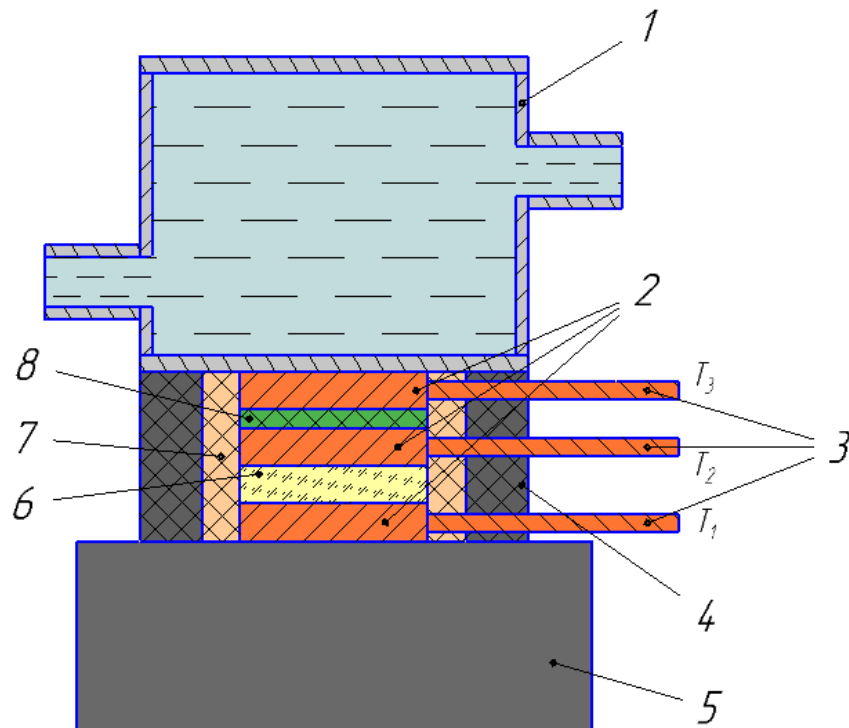
Устройство и принцип работы установки для исследования теплопроводности полимерных материалов

Устройство установки (рисунок Б.1): холодильник 1 с проточной водопроводной водой, три медных диска 2, диск из полимерного материала 8, диск из оргстекла 6, и электрический нагреватель 5. Диска 2 изготовлены из меди марки М1. Размеры дисков: диаметр 15 мм, толщина 3 мм. Для теплоизоляции дисков 2, 6 и 8 от окружающей среды используют теплоизолирующую трубу из ПВХ 7, которая охватывает эти диски, и дополнительно резиновую втулку 4, опоясывающую трубу 7. С медными дисками соединены пайкой медные стержни 3, покрытые теплоизоляцией. На протяжении эксперимента инфракрасным пирометром Testo 830-T4 на свободных концах стержней 3 измеряли температуру: T_1 , T_2 и T_3 .

Образцы изготовили из эластомеров Ф-40, Ф-40С и нанокompозитов на их основе в виде дисков. Размер дисков: диаметр 15,0 и толщина 0,5 мм.

Образец 8 размещают между верхним и средним медными дисками. Между нижним и средним медными дисками размещают диск 6 из оргстекла СО-95-К.

После сборки узел нижним торцом устанавливают на нагревательную поверхность электрической плиты 5, а на его верхний торец устанавливают холодильник. После включения электрической нагревательной плиты, открывают подачу охлаждающей воды в холодильник 1. По достижении установившегося температурного режима инфракрасным пирометром марки Testo 830-T4 измеряют температуру на медных дисках: 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 Б.1 – Принципиальная схема установки для исследования теплопроводности полимерных материалов

Приложение В

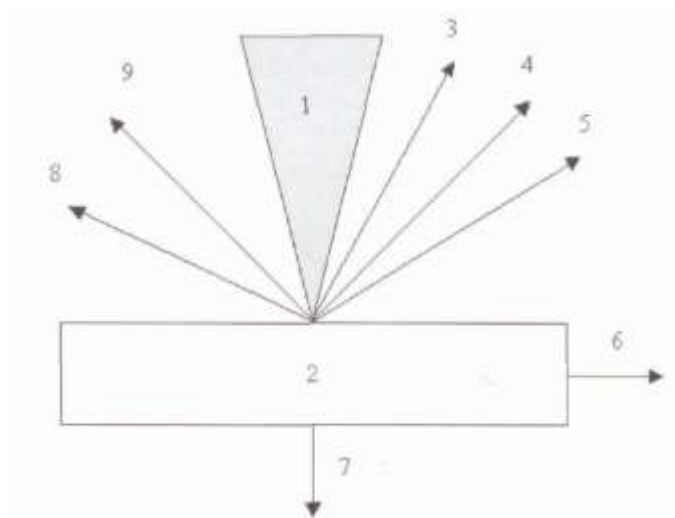
Описание и принцип работы электронного микроскопа «Quanta 600 FEG»

Энерго-дисперсионный анализатор рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенный в растровый электронный микроскоп «Quanta 600 FEG», обеспечил получение спектров характеристического рентгеновского излучения в различных точках по поперечному шлифу образца.

Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) позволяет определить элементный состав микрообъектов по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению. При анализе характеристического спектра в РСМА применяют два типа спектрометров: бескристалльный или с кристаллом-анализатором. В качестве базы для РСМА используют электронно-оптическую систему растрового электронного микроскопа. При взаимодействии электронного зонда с образцом (рисунки В.1 и В.2) одним из возбуждаемых сигналов является рентгеновское излучение двух видов: характеристическое и тормозное.

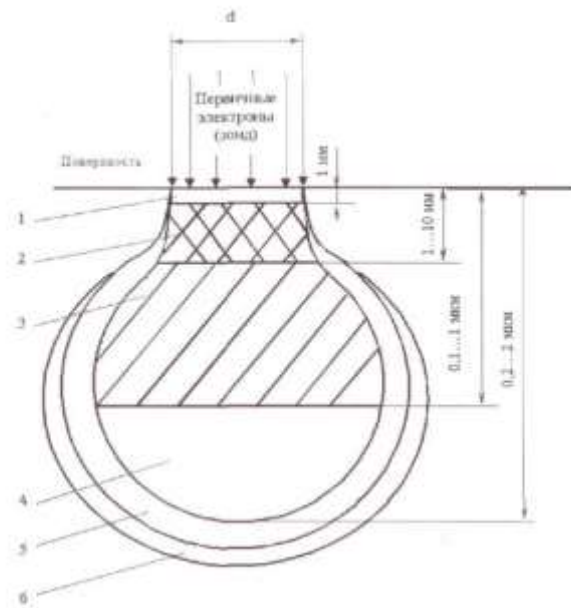
Тормозное рентгеновское излучение является следствием торможения первичных электронов в электрическом (кулоновском) поле атомов анализируемого материала. Кинетическая энергия первичных электронов частично или полностью преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Это непрерывное рентгеновское излучение т.к. оно обладает непрерывным спектром с энергией от нуля до энергии падающего электрона. При рентгеноспектральном микроанализе тормозное излучение нежелательно, так как вносит основной вклад в увеличение уровня фона и не может быть исключено. При проникновении первичных электронов в образец они тормозятся не только электрическим полем атомов, но и непосредственным столкновением с электронами атомов материала. В результате этого первичные электроны могут выбивать электроны с внутренних К-, L-, или M-оболочек, оставляя атом образца в энергетически возбужденном состоянии. Образующие вакансии заполняются переходами электронов с более высоких энергетических уровней. Атом переходит в основное состояние, избыточная энергия вы-

деляется в виде кванта рентгеновского излучения. Поскольку энергия возникающего кванта зависит только от энергии участвующих в процессе электронных уровней, а они являются характерными для каждого элемента, возникает характеристическое рентгеновское излучение. Так каждый атом имеет вполне определенное конечное число уровней, между которыми возможны переходы только определенного типа, характеристическое рентгеновское излучение дает дискретный линейчатый спектр.



1 – электронный луч; 2 – объект; 3 – отраженные электроны; 4 – вторичные электроны; 5 – Оже-электроны; 6 – ток поглощенных электронов; 7 – прошедшие электроны; 8 – катодолуминисцентное излучение; 9 – рентгеновское излучение

Рисунок В.1 – Эффекты взаимодействия электронного луча с объектом



Области генерации: 1 – Оже-электронов; 2 – вторичных электронов; 3 – отраженных электронов; 4 – характеристического рентгеновского излучения; 5 – тормозного рентгеновского излучения; 6 – флуорисценции

Рисунок В.2 – Области сигналов и пространственное разрешение при облучении поверхности объекта потоком электронов (зонд)

Приложение Г

Принцип работы стенда для исследования контактных напряжений и долговечности подшипников качения

Первоначально со стенда демонтировали электродвигатель. На посадочные отверстия электродвигателя смонтировали четыре опорные стойки на которые опирается толстостенная крышка толщиной в 5 мм. Внутренняя поверхность крышки имеет посадочное место под гидроцилиндр. Гидроцилиндр, обеспечивающий радиальное нагружение, фиксируют в посадочном месте крышки. К штоку гидроцилиндра крепится специальная нагрузочная вилка, передающая радиальную нагрузку на шарик диаметром $D=12,7$ мм (рисунок Г.1). Шарик фиксируется сферической выемкой выполненной в нагрузочной пластине.

Давление в гидроцилиндре создает насос 1, а усилие на шарик контролируется манометром 6 (рисунок 2.28).

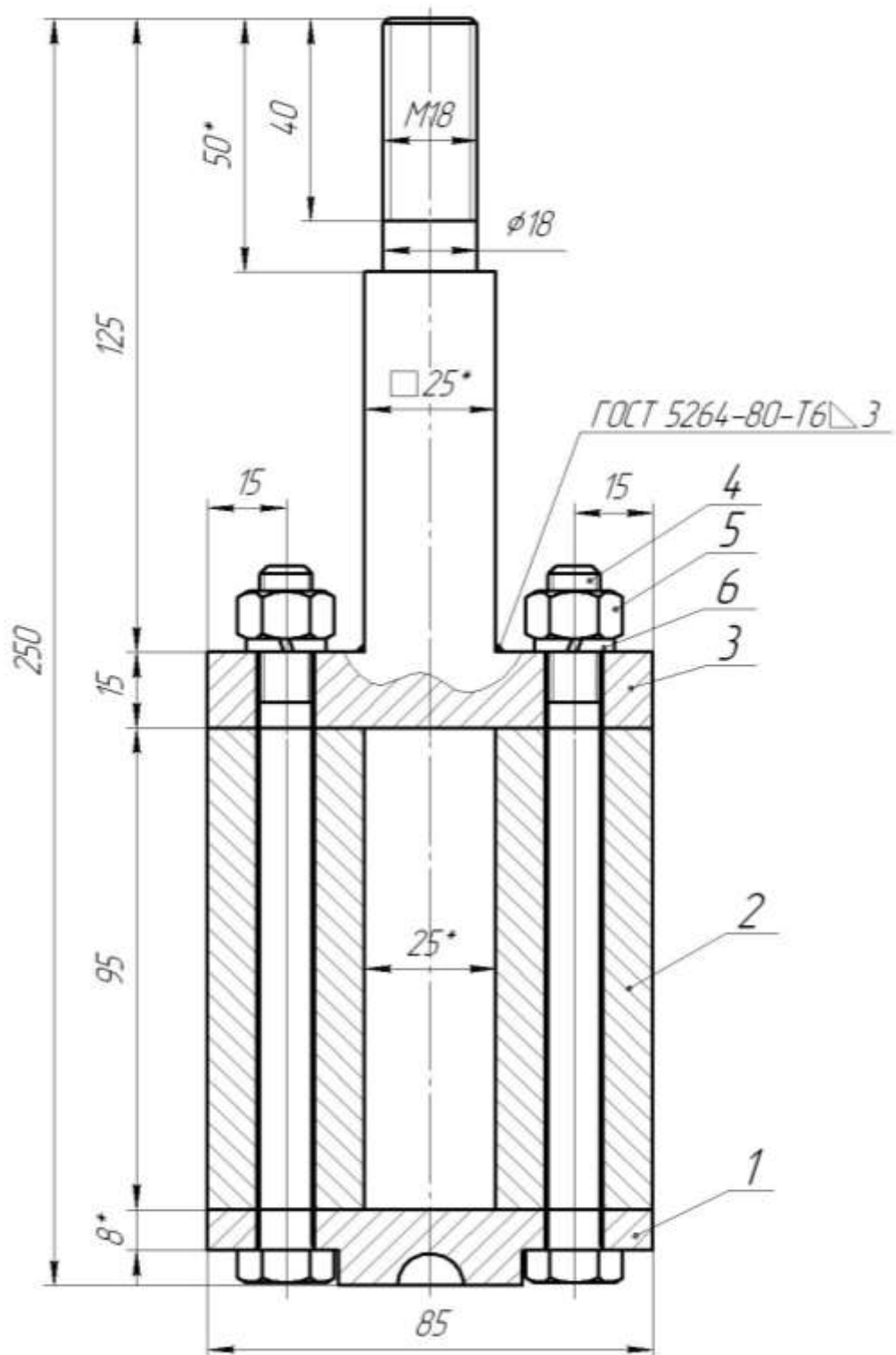
На опорную раму стенда установили поперечную плиту 2-1-250×250 ГОСТ 10905-75. Затем на последнюю металлическую пластину с полимерной подложкой вниз.

Чтобы получить оттиск пятна контакта, между пластиной и нагружающим шариком размещали полоску копировальной бумаги марки МВ-16 ГОСТ 489-88.

Коэффициент Кирхгофа рассчитывали по размеру пятна контакта шарика с поверхностью стальной пластины, используя формулу

$$\eta = \frac{D_{нк}^3}{3PD_{ш}}$$

где $D_{нк}$ – диаметр пятна контакта, мм; P – нагрузка шарик, Н; $D_{ш}$ – диаметр шарика, $R=12,7$ мм.



- 1 – пластина нагрузочная; 2 – втулка квадратная; 3 – хвостовик;
 4 – шпилька M10×135; 5 – гайка M10 ГОСТ 15526-70;
 6 – шайба пружинная 10 Н ГОСТ 6402-70

Рисунок Г.1 – Специальная нагрузочная вилка для исследования коэффициента Кирхгофа и коэффициента постели К

Диаметр пятна контакта измеряли с помощью микроскопа МПБ-2, который обеспечивает 24-х кратное увеличение, и имеет цену деления 0,05 мм.

Для определения коэффициента постели K деформацию пластины от нагруженного шарика, измеряли индикатором ИЧЦ 0-10-0,001 с ценой деления 0,001 мм (рисунок Г.2). Повторность опытов пятикратная.

Диаметр пятна контакта определяли микроскопом МПБ-2, обеспечивающим 24-х кратное увеличение, с ценой деления 0,05 мм.

Коэффициент постели K рассчитывали по формуле

$$K = 4\beta^4 EJ, \text{ Н/мм}^3$$

где β – коэффициент, определяемый по формуле $\beta = \sqrt[3]{\frac{P}{8EJu_0}}$;

E – модуль упругости материала стальной пластины $E=2,15 \cdot 10^5$ Н/мм²;

P – нагрузка на шарик, Н;

u_0 – измеренная деформация пластины при радиальном нагружении шариком, мм.

Коэффициент податливости k_n определяли по формуле

$$k_n = \frac{K}{b},$$

где b – ширина балки (пластины).



Рисунок Г.2 – Исследование коэффициента постели К

Приложение Д

Устройство и принцип работы стенда для испытаний подшипниковых узлов при циклическом нагружении

Электромеханический вибратор является асинхронным короткозамкнутым электродвигателем. На каждом конце вала ротора установлены по два дебаланса, создающих возмущающие колебания. Разведением дебалансов на различные углы друг относительно друга изменяют радиальную циклическую нагрузку на подшипник. Нагрузка при этом может составлять: 9,9; 15,8 и 20,0 кН [220].

Вибратор крепят четырьмя болтами к сдвоенным металлическим плитам. Масса каждой плиты составляет 50 кг, а ее размеры: 500×500×25 мм. Нижняя плита-основание имеет размеры: 500×500×10 мм и к ней сваркой приварены четыре посадочные втулки. В эти втулки устанавливают четыре винтовые пружины высотой в 121 мм. Противоположными концами пружины вставляют во втулки верхней металлической плиты.

Амплитуда колебаний вибростенда составляет 1,4 мм. Дебалансы в ходе испытаний создавали на каждый подшипник 209 радиальную циклическую нагрузку в 20 кН [59]. Частота вращения вала составляет 3000 мин⁻¹. Количество циклов нагружения фиксировали с помощью счетчика, аксиально соединенного с валом вибростенда.

В предварительно расточенные подшипниковые щиты запрессованы сменные чугунные втулки (СЧ-20 ГОСТ 1412-80).

Зазор в сопряжении «подшипник-корпус», для имитации износа до восстановления, получали расточкой посадочного отверстия втулки под подшипник.

Приложение Е

Регрессионная модель зависимости удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С от концентрации наполнителей

В качестве функции отклика Y приняли удельную работу разрушения α_p , МДж/м³ пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С, а независимыми факторами: X_1 – концентрацию алюминиевого нанопорошка, масс.ч., X_2 – медного нанопорошка, масс.ч. На основе предварительных экспериментов выбрали уровни и интервалы варьирования факторов, которые приведены в таблице Е.1.

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

Таблица Е.1 – План В₂ и результаты активного эксперимента

№ п/п	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃	\bar{Y}	\hat{y}_i	S _g ²
1	-1	-1	24,47	24,36	24,43	31,17	31,10	0,3724
2	+1	-1	24,68	24,63	24,52	33,62	33,6134	0,3367
3	-1	+1	35,25	35,24	35,05	31,66	31,6667	0,3783
4	+1	+1	35,45	35,32	35,37	35,67	35,7401	0,3661
5	-1	0	30,08	29,96	29,99	33,30	33,3634	0,5113
6	+1	0	29,86	29,9	29,64	36,8	36,6567	0,3541
7	0	-1	30,1	30,03	29,99	39,30	39,3767	0,2263
8	0	+1	40,73	40,84	40,83	40,80	40,7233	0,3193

Расчет дисперсий среднего значения

$$S_1^2 = \frac{(31,77 - 31,17)^2 + (31,19 - 31,17)^2 + (30,55 - 31,17)^2}{3 - 1} = 0,3724$$

$$S_2^2 = \frac{(33,03 - 33,62)^2 + (33,64 - 33,62)^2 + (34,19 - 33,62)^2}{3 - 1} = 0,3367$$

$$S_3^2 = \frac{(32,27 - 31,66)^2 + (31,67 - 31,66)^2 + (31,04 - 31,66)^2}{3 - 1} = 0,3783$$

$$S_4^2 = \frac{(35,06 - 35,67)^2 + (35,68 - 35,67)^2 + (36,27 - 35,67)^2}{3 - 1} = 0,3661$$

$$S_5^2 = \frac{(34,01 - 33,3)^2 + (33,31 - 33,3)^2 + (32,58 - 33,3)^2}{3 - 1} = 0,5113$$

$$S_6^2 = \frac{(36,73 - 36,72)^2 + (37,31 - 36,72)^2 + (36,12 - 36,72)^2}{3 - 1} = 0,3541$$

$$S_7^2 = \frac{(39,79 - 39,3)^2 + (38,84 - 39,3)^2 + (39,27 - 39,3)^2}{3 - 1} = 0,2263$$

$$S_8^2 = \frac{(41,37 - 40,8)^2 + (40,24 - 40,8)^2 + (40,79 - 40,8)^2}{3 - 1} = 0,3193$$

$$\sum S_g^2 = 0,3724 + 0,3367 + 0,3783 + 0,3661 + 0,5113 + 0,3541 + 0,2263 + 0,3193 = 2,8645$$

Коэффициент Кохрена, определенный расчетным путем

$$G_p = \frac{0,5113}{2,8645} = 0,1785$$

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

Уровень значимости принят $P = 0,05$. Коэффициент Кохрена, определенный по таблице составляет $\sigma_T = 0,5157$. Так как коэффициент Кохрена, определенный расчетом меньше табличного, дисперсии являются однородными.

Дисперсия воспроизводимости эксперимента

$$S_e^2 = \frac{2,8645}{8} = 0,3580$$

Расчет оценок коэффициентов регрессии

Значения вспомогательных коэффициентов:

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

Значения коэффициентов регрессии

$$b_0 = 1,25(31,17 + 33,62 + 31,66 + 35,67 + 33,30 + 36,72 + 39,30 + 40,8) = 1,25 * 282,24 - 0,75(202,14 + 212,22) = 352,8 - 310,77 = +42,03;$$

$$b_1 = 0,16667(-31,17 + 33,62 - 31,66 + 35,67 - 33,30 + 36,72) = 0,16667 * 9,88 = +1,6467$$

$$b_2 = 0,16667(-31,17 - 33,62 + 31,66 + 35,67 - 39,30 + 40,8) = 0,16667 * 4,04 = +0,6733;$$

$$b_{12} = 0,25(+31,17 - 33,62 - 31,66 + 35,67) = 0,25 * 1,56 = +0,39;$$

$$b_{11} = 0,5 * 202,14 + 0,25(202,14 + 212,22) - 0,75 * 282,24 = 101,07 + 103,59 - 211,68 = -7,02;$$

$$b_{22} = 0,5 * 212,22 + 0,25(202,14 + 212,22) - 0,75 * 282,24 = 106,11 + 103,59 - 211,68 = -1,98$$

$$b_0 = +42,03 \quad b_1 = +1,6467; \quad b_2 = +0,6733; \quad b_{12} = +0,39; \quad b_{11} = -7,02; \quad b_{22} = -1,98$$

Расчет дисперсий оценок коэффициентов регрессии

$$S_{b_0}^2 = 1,25 \frac{0,358}{3} = 0,1492;$$

$$S_{b_1}^2 = S_{b_2}^2 = 0,16667 \frac{0,358}{3} = 0,0199;$$

$$S_{b_{12}}^2 = 0,25 \frac{0,358}{3} = 0,0298;$$

$$S_{b_{11}}^2 = S_{b_{22}}^2 = 0,75 \frac{0,358}{3} = 0,0895$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии

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

После расчета значений доверительных интервалов получены следующие соотношения:

$$\Delta b_0 = 0,8189 \langle b_0 = 42,03; \Delta b_1 = \Delta b_2 = 0,299 \langle b_1 = +1,6467 \text{ и } \langle b_2 = +0,6733;$$

$$\Delta b_{12} = 0,366 \langle b_{12} = +0,39; \Delta b_{11} = \Delta b_{22} = 0,6342 \langle b_{11} = -7,02 \text{ и } \langle b_{22} = -1,98.$$

$$b_0 = 42,03; b_1 = +1,6467; b_2 = +0,6733; b_{12} = +0,39; b_{11} = -7,02; b_{22} = -1,98$$

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

Уравнение регрессии в кодированных значениях

$$b_0 = +42,03 \quad b_1 = +1,6467; \quad b_2 = +0,6733; \quad b_{12} = +0,39; \quad b_{11} = -7,02; \quad b_{22} = -1,98$$

$$Y = +42,03 + 1,6467X_1 + 0,6733X_2 + 0,39X_1X_2 - 7,02X_1^2 - 1,98X_2^2$$

После раскодирования уравнения регрессии получено уравнение регрессии в натуральных единицах

$$Y = -1,3624 + 816,2925X_1 + 286,79X_2 + 487,5X_1X_2 - 4387,5X_1^2 - 4950X_2^2$$

$$b_0 = -1,3624 \quad b_1 = +816,2925; \quad b_2 = +286,79; \quad b_{12} = +487,5; \quad b_{11} = -4387,5; \quad b_{22} = -4950$$

Расчетные значения отклика в точках плана

$$\hat{y}_1 = 31,10; \quad \hat{y}_2 = 33,6134; \quad \hat{y}_3 = 31,6667; \quad \hat{y}_4 = 35,7401;$$

$$\hat{y}_5 = 33,3634; \quad \hat{y}_6 = 36,6567; \quad \hat{y}_7 = 39,3767; \quad \hat{y}_8 = 40,7233$$

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

$$S^2 = \frac{(31,17 - 31,10)^2 + (33,62 - 33,6134)^2 + (31,66 - 31,6667)^2 + (35,67 - 35,7401)^2 + (33,30 - 33,3634)^2 + (36,8 - 36,6567)^2 + (39,30 - 39,3767)^2 + (40,8 - 40,7233)^2}{8 - 6} = \frac{0,046}{2} = 0,0230$$

Проверка адекватности уравнения регрессии проведена по критерию Фишера.

Условие адекватности имеет вид $F_p < F_T$.

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

Расчетное значение F - критерия

$$F_p = \frac{2 \cdot 0,023}{0,358} = 0,1285$$

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

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

$$\bar{Y} = \frac{282,32}{8} = 35,29$$

$$R^2 = \frac{3 \cdot ((31,17 - 35,29)^2 + (33,62 - 35,29)^2 + (31,66 - 35,29)^2 + (35,67 - 35,29)^2 + (33,30 - 35,29)^2) + (36,8 - 35,29)^2 + (39,30 - 35,29)^2 + (40,8 - 35,29)^2 - (8 - 6)0,023}{- (36,8 - 35,29)^2 + (39,3 - 35,29)^2 + (40,8 - 35,29)^2 + 8(3 - 1)0,358} = \frac{3(85,765 - 0,046)}{3 \cdot 85,765 + 16 \cdot 0,358} = \frac{257,157}{257,295 + 5,728} = \frac{257,157}{263,023} = 0,9777$$

$$R^2 = 0,9777 > 0,75$$

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

На рисунке Е.1 показана зависимость удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С от концентрации алюминиевых и медных наночастиц (поверхность отклика).

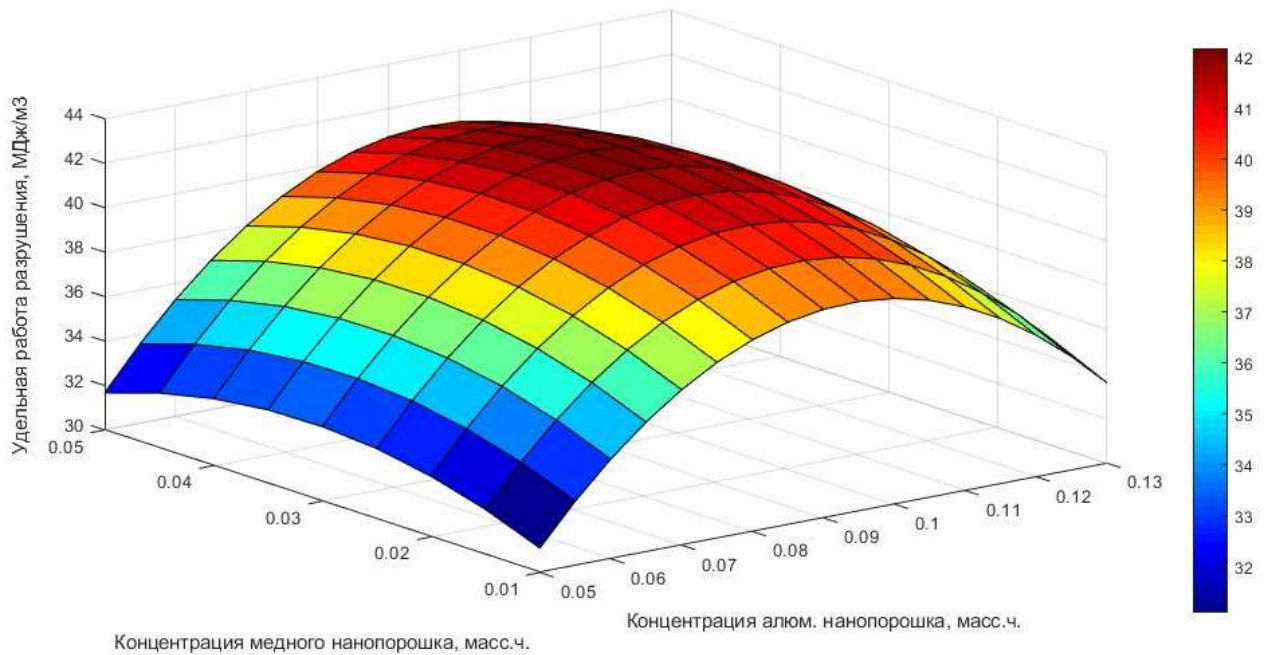


Рисунок Е.1 – Зависимость удельной работы разрушения пленок нанокompозита на основе эластомера Ф-40С от концентрации наночастиц алюминия и меди

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

$$Y = +42,03 + 1,6467X_1 + 0,6733X_2 + 0,39X_1X_2 - 7,02X_1^2 - 1,98X_2^2$$

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = b_1 + b_{12} \cdot x_2 + 2 \cdot b_{11} \cdot x_1 = 0 \\ \frac{dy}{dx_2} = b_2 + b_{12} \cdot x_1 + 2 \cdot b_{22} \cdot x_2 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 1,6467 + 0,39 \cdot x_2 - 2 \cdot 7,02 \cdot x_1 = 0 \\ \frac{dy}{dx_2} = 0,6733 + 0,39 \cdot x_1 - 2 \cdot 1,98 \cdot x_2 = 0 \end{cases}$$

После решения системы уравнений определены координаты экстремума в натуральных единицах: $x_{1s} = 0,085 \text{ масс.ч.}$, $x_{2s} = 0,026 \text{ масс.ч.}$. Значение отклика в точке экстремума составляет $y_s = 42,19 \text{ МДж/м}^3$

Угол поворота новых осей относительно старых

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} 2\alpha &= \frac{487,5}{-4387,5 + 4950} = +0,867 \\ \alpha &= +40,9^\circ \end{aligned}$$

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

Коэффициенты регрессии в канонической форме B_{11} и B_{22} (на основе уравнения регрессии в кодированных значениях)

$$b_0 = +42,03 \quad b_1 = +1,6467; \quad b_2 = +0,6733; \quad b_{12} = +0,39; \quad b_{11} = -7,02; \quad b_{22} = -1,98$$

$$Y = +42,03 + 1,6467X_1 + 0,6733X_2 + 0,39X_1X_2 - 7,02X_1^2 - 1,98X_2^2$$

$$f(B) = \begin{vmatrix} b_{11} - B & \frac{1}{2}b_{12} \\ \frac{1}{2}b_{12} & b_{22} - B \end{vmatrix} = B^2 - (b_{11} + b_{22})B + (b_{11}b_{22} - \frac{1}{4}b_{12}^2) = 0$$

$$f(B) = B^2 - (-7,02 - 1,98)B + (7,02 * 1,98 - \frac{1}{4}0,39^2) = B^2 - 9B + 13,8616 = 0$$

$$x^2 + px + q = 0$$

$$x_{1,2} = -p/2 \pm \sqrt{(\frac{p}{2})^2 - q}$$

$$B_{11} = -4,5 + \sqrt{4,5^2 - 13,8616} = -1,9725; \quad B_{22} = -4,5 - \sqrt{4,5^2 - 13,8616} = -7,0275$$

Корректность вычислений оценили, сравнивая суммы коэффициентов при квадратичных членах

$$-1,9725 - 7,0275 = -9,0;$$

$$-7,02 - 1,98 = -9,0$$

Суммы коэффициентов при квадратичных членах равны.

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

$$Y - 42,19 = -1,9725X_1^2 - 7,0275X_2^2$$

Уравнение регрессии в канонической форме (в натуральных значениях) имеет следующий вид

$$Y - 42,19 = -1,9725X_1^2 - 7,0275X_2^2$$

Рассчитали координаты основных точек для построения двумерного сечения поверхности отклика в кодированных значениях (таблица Е.2).

После раскодировки получили координаты основных точек для построения двумерного сечения поверхности отклика в натуральных значениях (таблица Е.3).

Используя таблицу Е.3, построили двумерное сечение поверхности отклика, которая представляет собой изолинии – кривые равного выхода (рисунок Е.2).

Анализируя двумерное сечение определили область оптимума критерия оптимизации.

Таблица Е.2 – Таблица расчета координат основных точек для построения двумерного сечения поверхности отклика (кодированные значения)

Значение отклика Y	Значение фактора X ₁	Значение фактора X ₂
42,19	0	0
42,1	0	±0,1132
42,1	±0,2136	0
42,0	0	±0,1644
42,0	±0,3104	0
41,9	0	±0,2031
41,9	±0,3834	0
41,8	0	±0,2356
41,8	±0,4446	0
41,7	0	±0,2640
41,7	±0,4984	0
41,6	0	±0,2898
41,6	±0,5469	0
41,3	0	0,3559
41,3	±0,6717	0
41,0	0	±0,4115
41,0	±0,7767	0

Таблица Е.3 – Таблица расчета координат основных точек для построения двумерного сечения поверхности отклика (натуральные значения)

Значение отклика Y	Значение фактора X ₁	Значение фактора X ₂
42,19	0	0
42	±0,007	0
42	0	±0,005
41	±0,022	0
41	0	±0,011
40	±0,029	0
40	0	±0,016
39	±0,036	0
39	0	±0,019

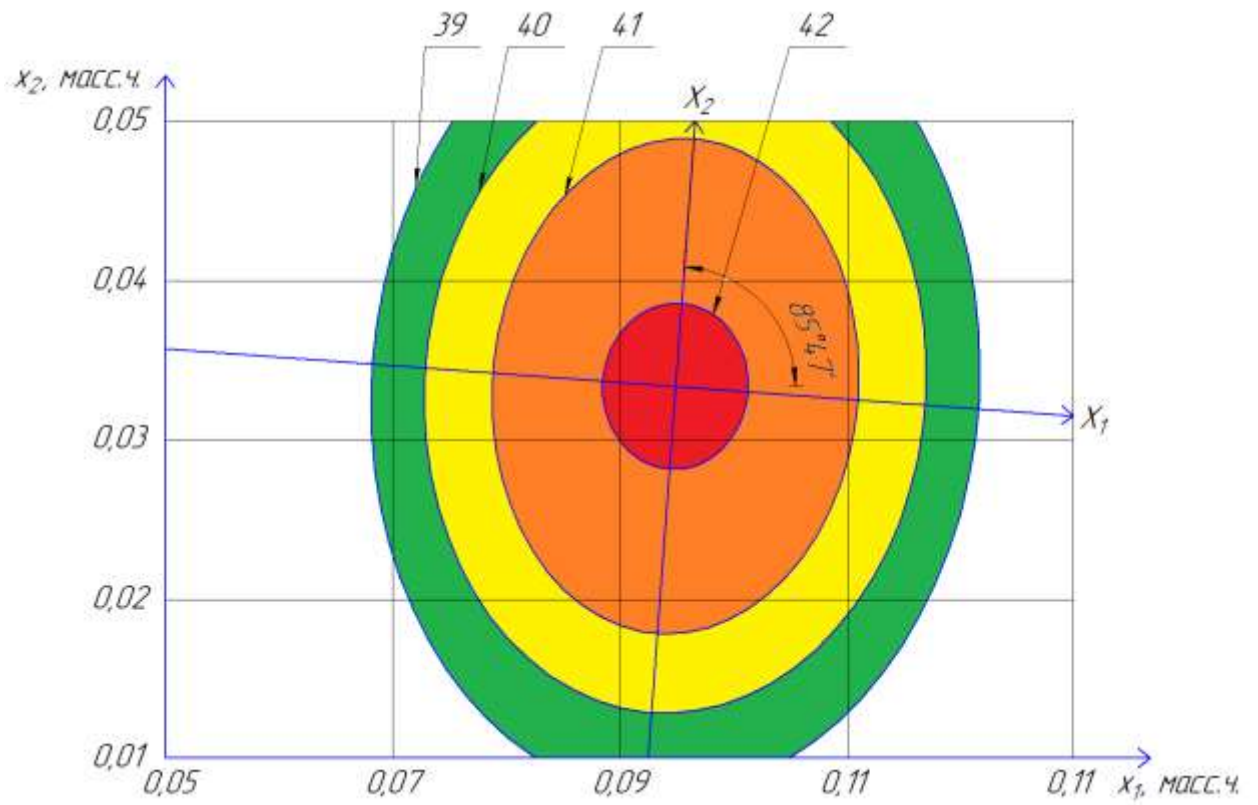


Рисунок Е.2 – Двумерное сечение поверхности отклика

Приложение Ж

Обоснование выбора методики расчета точностных характеристик центрирующего приспособления

Расчёт размерной цепи методом максимума-минимума [274]

Способ равных допусков

Предполагали, что все звенья имеют равные допуски

$$T_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{m+n}, \quad (\text{Ж.1})$$

где T_{cp} – средний допуск составляющих звеньев, мкм; T_{Δ} – допуск замыкающего звена, мкм; m – количество увеличивающих звеньев; n – количество уменьшающих звеньев.

$$T_{cp} = \frac{50}{6} = 8,33 \text{ мкм}$$

При выборе допусков руководствовались условием

$$T_{\Sigma} \geq \sum_{i=1}^{m+n} T_i, \quad (\text{Ж.2})$$

Стандартные допуски звеньев [275]

$$T_1 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_2 = 8 \text{ мкм (3 кв.)}; T_3 = 10 \text{ мкм (4 кв.)};$$

$$T_4 = 6 \text{ мкм (4 кв.)}; T_5 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_6 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}.$$

Сумма допусков

$$\Sigma T_i = 8 + 8 + 10 + 6 + 8 + 8 = 48 \text{ мкм}$$

Так как $\Sigma T_i = 48$ мкм, условие (Ж.2) выполняется.

Таким образом, определены предельные отклонения и размеры звеньев [275].

$$A_1 = 75_{-0,008}; A_2 = 150^{+0,008}; A_3 = 87,5_{-0,01};$$

$$A_4 = 25^{+0,006}; A_5 = 62,5^{+0,008}; A_6 = 75_{-0,008};$$

Способ одного качества

Среднее число единиц допуска рассчитывали по формуле

$$a_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^{m+n} j_i}, \quad (\text{Ж.3})$$

где j_i – единица допуска на размер.

$$a_{cp} = \frac{50}{1,86 + 2,52 + 2,17 + 1,31 + 1,86 + 1,86} = 4,32$$

Ближайшим является 4-й квалитет, со стандартным числом единиц допуска $a = 5,1$ [275]. Допуски составляющих звеньев имеют значения:

$$T_1 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_2 = 12 \text{ мкм (4 кв.)}; T_3 = 10 \text{ мкм (4 кв.)};$$

$$T_4 = 6 \text{ мкм (4 кв.)}; T_5 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_6 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}.$$

Сумма допусков

$$\Sigma T_i = 8 + 12 + 10 + 6 + 8 + 8 = 52 \text{ мкм}$$

Так как $\Sigma T_i = 52$ мкм, условие (Ж.2) не выполняется, необходима корректировка допусков.

$$T_1 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_2 = 8 \text{ мкм (3 кв.)}; T_3 = 10 \text{ мкм (4 кв.)};$$

$$T_4 = 6 \text{ мкм (4 кв.)}; T_5 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_6 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}.$$

Сумма допусков

$$\Sigma T_i = 8 + 8 + 10 + 6 + 8 + 8 = 48 \text{ мкм}$$

Так как $\Sigma T_i = 48$ мкм, условие (Ж.2) выполняется.

Таким образом, определены предельные отклонения и размеры звеньев [275].

$$A_1 = 75_{-0,008}; A_2 = 150^{+0,008}; A_3 = 87,5_{-0,01};$$

$$A_4 = 25^{+0,006}; A_5 = 62,5^{+0,008}; A_6 = 75_{-0,008};$$

Вероятностный метод расчёта размерных цепей [274]

Способ равных допусков

Средний допуск составляющих звеньев

$$T_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{t_{\Sigma} \lambda_i \sqrt{m+n}}, \quad (\text{Ж.4})$$

где t_{Σ} – коэффициент, зависящий от процента риска (брака);

λ_i – коэффициент относительного рассеивания размеров (при мелкосерийном производстве $\lambda_i = 1/\sqrt{3}$).

Приняли нормальный закон распределения размеров с $\lambda_i = 1/\sqrt{3}$ и процентом брака $P = 5\%$ для мелкосерийного и индивидуального производства. Соответ-

ственно, табличное значение коэффициента, зависящего от процента риска $t_{\Sigma} = 1,96$.

$$T_{\text{ср}} = \frac{50}{1,96 \cdot 1/\sqrt{3} \cdot \sqrt{3+3}} = 18,03$$

Ближайшие стандартные допуски:

$$T_1 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_2 = 18 \text{ мкм (5 кв.)}; T_3 = 15 \text{ мкм (5 кв.)};$$

$$T_4 = 21 \text{ мкм (7 кв.)}; T_5 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_6 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}.$$

Коэффициент t_{Σ} рассчитывали по формуле

$$t_{\Sigma} = \frac{T_{\Sigma}}{\lambda_i \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} T_i^2}}, \quad (\text{Ж.5})$$

$$t_{\Sigma} = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 18^2 + 15^2 + 21^2 + 19^2 + 19^2}} = 1,9$$

При таком значении $t_{\Sigma p}$ процент риска превышает 5%, необходима корректировка допусков.

$$T_1 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_2 = 18 \text{ мкм (5 кв.)}; T_3 = 15 \text{ мкм (5 кв.)};$$

$$T_4 = 13 \text{ мкм (6 кв.)}; T_5 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_6 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}.$$

Тогда

$$t_{\Sigma} = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 18^2 + 15^2 + 13^2 + 19^2 + 19^2}} = 2,04$$

Значение $t_{\Sigma} = 2,04$, следовательно, риск менее 5%.

Тогда

$$A_1 = 75_{-0,019}; A_2 = 150^{+0,018}; A_3 = 87,5_{-0,015};$$

$$A_4 = 25^{+0,013}; A_5 = 62,5^{+0,019}; A_6 = 75_{-0,019};$$

Способ одного качества

Среднее число единиц допуска

$$a_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{t_{\Sigma} \lambda_i \sqrt{\sum_{i=1}^{m+n} j_i^2}} \quad (\text{Ж.6})$$

Приняли нормальный закон распределения размеров для мелкосерийного и индивидуального производства $\lambda_i = 1/\sqrt{3}$ и процентом брака $P = 5\%$ ($t_{\Sigma_{табл.}} = 1,96$).

$$a_{cp} = \frac{50}{1,96 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1,86^2 + 2,52^2 + 2,17^2 + 1,31^2 + 1,86^2 + 1,86^2}} = 9,18$$

Ближайшим качеством является 6 ($a_{cp}=10$)

Стандартные допуски

$T_1 = 19$ мкм (6 кв.); $T_2 = 25$ мкм (6 кв.); $T_3 = 19$ мкм (6 кв.);

$T_4 = 13$ мкм (6 кв.); $T_5 = 19$ мкм (6 кв.); $T_6 = 19$ мкм (6 кв.).

Расчетный коэффициент $t_{\Sigma p}$

$$t_{\Sigma p} = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 25^2 + 19^2 + 13^2 + 19^2 + 19^2}} = 1,83$$

При таком значении $t_{\Sigma p}$ процент риска превышает 5%, необходима корректировка допусков.

$$T_1 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_2 = 18 \text{ мкм (5 кв.)}; T_3 = 19 \text{ мкм (6 кв.)};$$

$$T_4 = 13 \text{ мкм (6 кв.)}; T_5 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_6 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}.$$

Тогда

$$t_{\Sigma p} = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 18^2 + 19^2 + 13^2 + 19^2 + 19^2}} = 1,97$$

Расчетные значения $t_{\Sigma} = 1,97$. Следовательно, при установленных допусках составляющих звеньев риск менее 5%.

Предельные отклонения и размеры:

$$A_1 = 75_{-0,019}; A_2 = 150^{+0,018}; A_3 = 87,5_{-0,019};$$

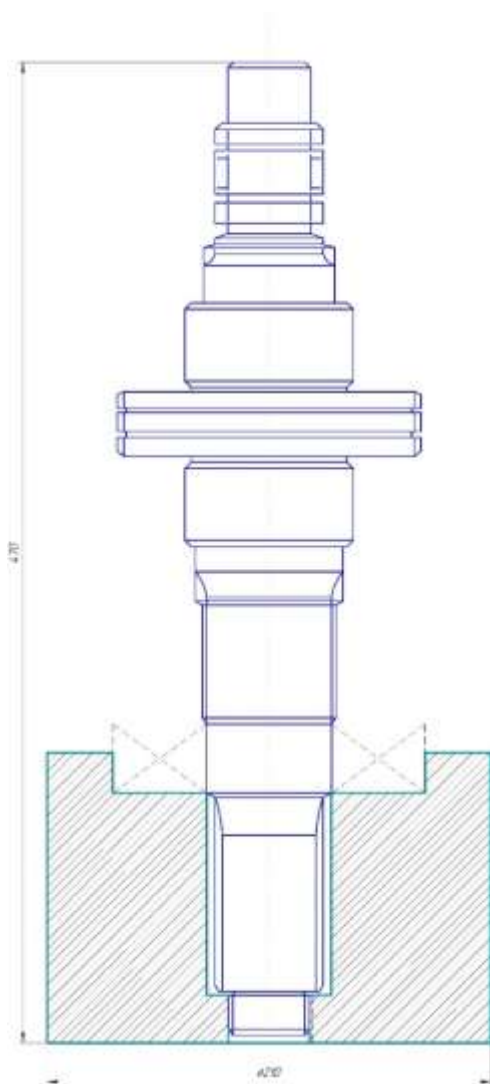
$$A_4 = 25^{+0,013}; A_5 = 62,5^{+0,019}; A_6 = 75_{-0,019};$$

***Центрирующее приспособление для сборки деталей клевого
соединения правой опоры ведомого вала с подшипником 50412 коробки
передат КАМАЗ-4310***

Центрирующее приспособление в сборе с ведомым валом и подшипником 50412 коробки передач КАМАЗ-4310 изображено на рисунке Ж.1.

Центрирующее приспособление изготовлено из стали 10 ГОСТ 1050-88. Нанокompозит герметика АН-111 наносится на внутреннее кольцо подшипника 50412, после чего подшипник устанавливается в приспособление. Ведомый вал посредством наружной резьбы монтируется в центрирующее приспособление, которое в свою очередь имеет внутреннюю резьбу. Перед установкой вала в приспособ-

собрание, предварительно необходимо нанести адгезив на изношенное посадочное место под подшипник. Базирование вала осуществляется по резьбовому соединению.



1 – ведомый вал; 2 – подшипник 50412; 3 – центрирующее приспособление

Рисунок Ж.1 – Сборка и центрирование деталей клеевого соединения

«ведомый вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310

Составили сборочную размерную цепь (рисунок Ж.2) и определили номинальные размеры составляющих звеньев. В качестве замыкающего звена приняли значение смещения оси подшипника относительно оси ведомого вала (несоосность). Затем провели расчет размерной цепи согласно методикам рассмотренным выше.

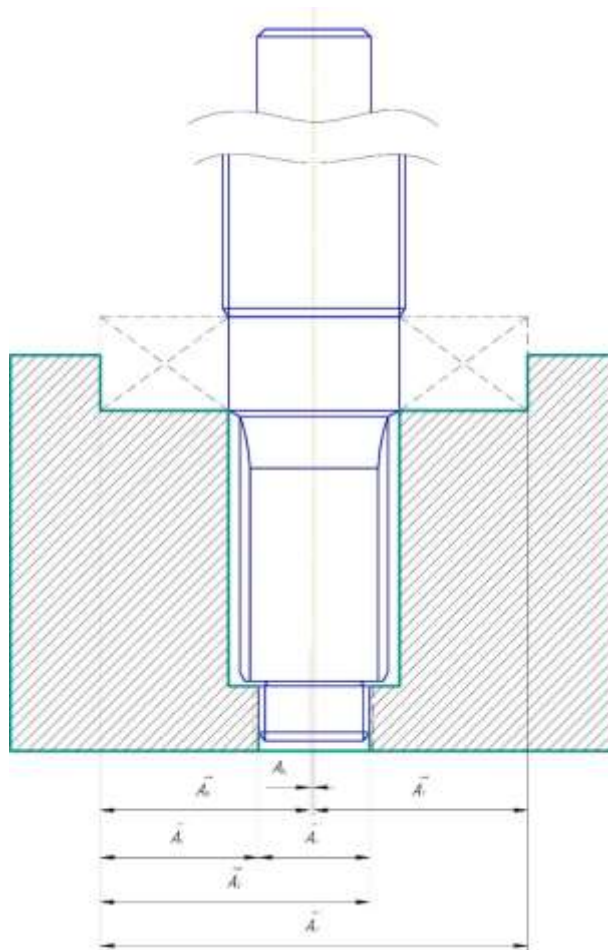


Рисунок Ж.2 – Сборочная размерная цепь

Номинальные размеры составляющих звеньев размерной цепи

$A_1 = 75 \text{ мм}$; $A_2 = 150 \text{ мм}$; $A_3 = 94,5 \text{ мм}$; $A_4 = 39 \text{ мм}$; $A_5 = 55,5 \text{ мм}$; $A_6 = 75 \text{ мм}$.

Проверка правильности определения номинальных размеров

$$150 + 55,5 + 39 - 75 - 94,5 - 75 - 0 = 0$$

Требуемую точность изготовления центрирующего приспособления приняли:

$$A_{\Delta\min} = 0 \text{ мм}; A_{\Delta\max} = 0,05 \text{ мм}$$

Допуск замыкающего звена

$$T_{\Sigma} = A_{\Delta\max} - A_{\Delta\min} = 0,05 - 0 = 0,05 \text{ мм} = 50 \text{ мкм}$$

Обоснование выбора методики расчета точностных характеристик центрирующего приспособления

Расчёт размерной цепи методом максимума-минимума

Способ равных допусков

Предполагали, что все звенья имеют равные допуски

$$T_{\text{ср}} = \frac{50}{6} = 8,33 \text{ мкм}$$

Стандартные допуски звеньев

$$T_1 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_2 = 8 \text{ мкм (3 кв.)}; T_3 = 10 \text{ мкм (4 кв.)};$$

$$T_4 = 7 \text{ мкм (4 кв.)}; T_5 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_6 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}.$$

Сумма допусков

$$\Sigma T_i = 8 + 8 + 10 + 7 + 8 + 8 = 49 \text{ мкм}$$

Так как $\Sigma T_i = 49$ мкм, условие (Ж.2) выполняется.

Таким образом, определены предельные отклонения и размеры звеньев.

$$A_1 = 75_{-0,008}; A_2 = 150^{+0,008}; A_3 = 94,5_{-0,01};$$

$$A_4 = 39^{+0,007}; A_5 = 55,5^{+0,008}; A_6 = 75_{-0,008};$$

Способ одного качества

Среднее число единиц допуска рассчитывали по формуле (Ж.3)

$$a_{\text{cp}} = \frac{50}{1,86 + 2,52 + 2,17 + 1,56 + 1,86 + 1,86} = 4,27$$

Ближайшим является 4-й квалитет, со стандартным числом единиц допуска $a = 5,1$. Допуски составляющих звеньев имеют значения:

$$T_1 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_2 = 12 \text{ мкм (4 кв.)}; T_3 = 10 \text{ мкм (4 кв.)};$$

$$T_4 = 7 \text{ мкм (4 кв.)}; T_5 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_6 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}.$$

Сумма допусков

$$\Sigma T_i = 8 + 12 + 10 + 7 + 8 + 8 = 53 \text{ мкм}$$

Так как $\Sigma T_i = 53$ мкм, условие (Ж.2) не выполняется, необходима корректировка допусков.

$$T_1 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_2 = 8 \text{ мкм (3 кв.)}; T_3 = 10 \text{ мкм (4 кв.)};$$

$$T_4 = 7 \text{ мкм (4 кв.)}; T_5 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_6 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}.$$

Сумма допусков

$$\Sigma T_i = 8 + 8 + 10 + 7 + 8 + 8 = 49 \text{ мкм}$$

Так как $\Sigma T_i = 49$ мкм, условие (Ж.2) выполняется.

Таким образом, определены предельные отклонения и размеры звеньев.

$$A_1 = 75_{-0,008}; A_2 = 150^{+0,008}; A_3 = 94,5_{-0,01};$$

$$A_4 = 39^{+0,007}; A_5 = 55,5^{+0,008}; A_6 = 75_{-0,008};$$

Вероятностный метод расчёта размерных цепей

Способ равных допусков

Приняли нормальный закон распределения размеров с $\lambda_i = 1/\sqrt{3}$ и процентом брака $P = 5\%$ для мелкосерийного и индивидуального производства. Соответственно, табличное значение коэффициента, зависящего от процента риска $t_\Sigma = 1,96$.

Средний допуск составляющих звеньев определили по формуле (Ж.4)

$$T_{\text{ср}} = \frac{50}{1,96 \cdot 1/\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} + 3} = 18,03$$

Ближайшие стандартные допуски:

$$T_1 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_2 = 18 \text{ мкм (5 кв.)}; T_3 = 15 \text{ мкм (5 кв.)};$$

$$T_4 = 16 \text{ мкм (6 кв.)}; T_5 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_6 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}.$$

Коэффициент t_Σ рассчитывали по формуле Ж.5

$$t_\Sigma = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 18^2 + 15^2 + 16^2 + 19^2 + 19^2}} = 1,99$$

Значение $t_\Sigma = 1,99$, следовательно, риск менее 5%.

Тогда

$$A_1 = 75_{-0,019}; A_2 = 150^{+0,018}; A_3 = 94,5_{-0,015};$$

$$A_4 = 39^{+0,016}; A_5 = 55,5^{+0,019}; A_6 = 75_{-0,019};$$

Способ одного качества

Приняли нормальный закон распределения размеров для мелкосерийного и индивидуального производства $\lambda_i = 1/\sqrt{3}$ и процентом брака $P = 5\%$ ($t_{\Sigma \text{ табл.}} = 1,96$).

Среднее число единиц допуска определили по формуле (Ж.6)

$$a_{cp} = \frac{50}{1,96 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1,86^2 + 2,52^2 + 2,17^2 + 1,56^2 + 1,86^2 + 1,86^2}} = 9,04$$

Ближайшим квалитетом является 6 ($a_{cp}=10$)

Стандартные допуски

$T_1 = 19$ мкм (6 кв.); $T_2 = 25$ мкм (6 кв.); $T_3 = 19$ мкм (6 кв.);

$T_4 = 16$ мкм (6 кв.); $T_5 = 19$ мкм (6 кв.); $T_6 = 19$ мкм (6 кв.).

Расчетный коэффициент $t_{\Sigma p}$

$$t_{\Sigma p} = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 25^2 + 19^2 + 16^2 + 19^2 + 19^2}} = 1,79$$

Расчетное значения $t_{\Sigma} = 1,79$. При таком значении $t_{\Sigma p}$ процент риска превышает 5%, необходима корректировка допусков.

$T_1 = 19$ мкм (6 кв.); $T_2 = 18$ мкм (5 кв.); $T_3 = 15$ мкм (5 кв.);

$T_4 = 16$ мкм (6 кв.); $T_5 = 19$ мкм (6 кв.); $T_6 = 19$ мкм (6 кв.).

Тогда

$$t_{\Sigma p} = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 18^2 + 15^2 + 16^2 + 19^2 + 19^2}} = 1,99$$

Следовательно, при установленных допусках составляющих звеньев риск менее 5%.

Предельные отклонения и размеры:

$$A_1 = 75_{-0,019}; A_2 = 150^{+0,018}; A_3 = 94,5_{-0,015};$$

$$A_4 = 39^{+0,016}; A_5 = 55,5^{+0,019}; A_6 = 75_{-0,019};$$

По технико-экономическим показателям наиболее оптимальным является вероятностный метод расчета способом одного квалитета. Данный метод обеспечивает необходимую точность звеньев для обеспечения требуемой величины соосности вала и подшипника. В сравнении с методом максимума-минимума, вероятностный метод значительно сокращает затраты на изготовление центрирующего приспособления, поэтому окончательно выбрали эту методику расчета.

*Центрирующее приспособление для сборки клеевого
соединения «ведомый вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310*

Вероятностным методом одного квалитета проведен расчет точностных характеристик центрирующего приспособления для сборки клеевого соединения «ведомый вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310.

Центрирующее приспособление изображено на рисунке Ж.3.

Центрирующее приспособление изготавливается из стали 10 ГОСТ 1050-2013. В ступени максимального диаметра 150 мм предусмотрена фаска для монтажа. Предварительно нанеся на его внутреннее кольцо нанокompозит устанавливали в данную ступень подшипник 50412. Подшипник устанавливается в приспособление с зазором Н6/16 (минимальный 0 мм, а максимальный 0,050 мм). Для базирования вала в оправке предусмотрена внутренняя резьба М39х2. После нанесения нанокompозита на посадочное место под подшипник, вал вворачивается в оправку по резьбе. Во время ввинчивания вала в оправку нанокompозит в зазоре распределяется равномерно.

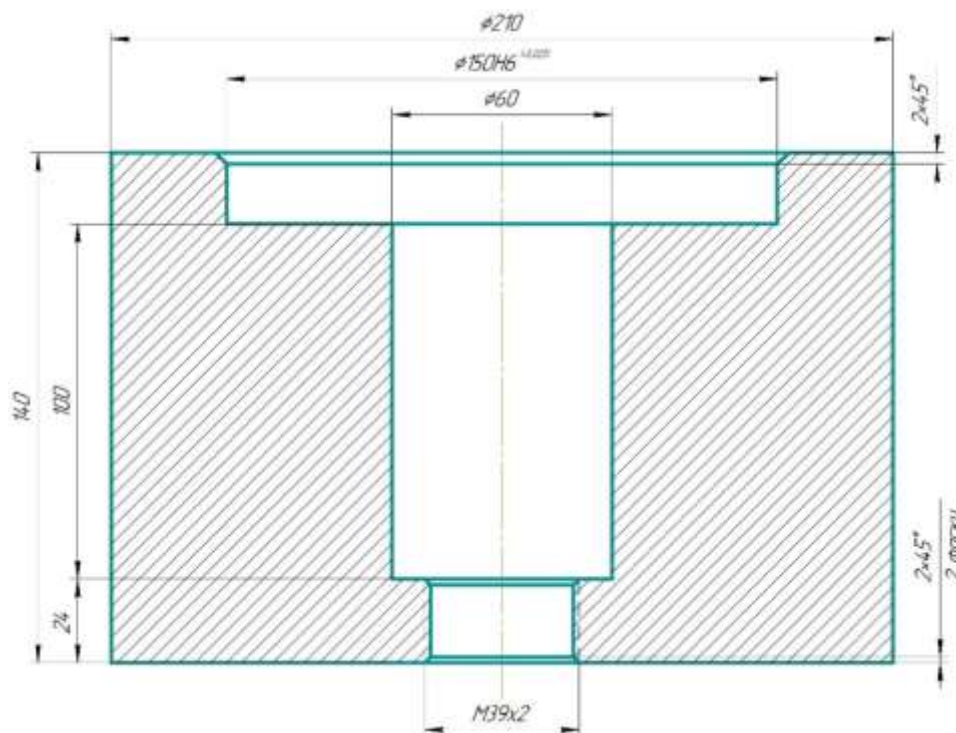
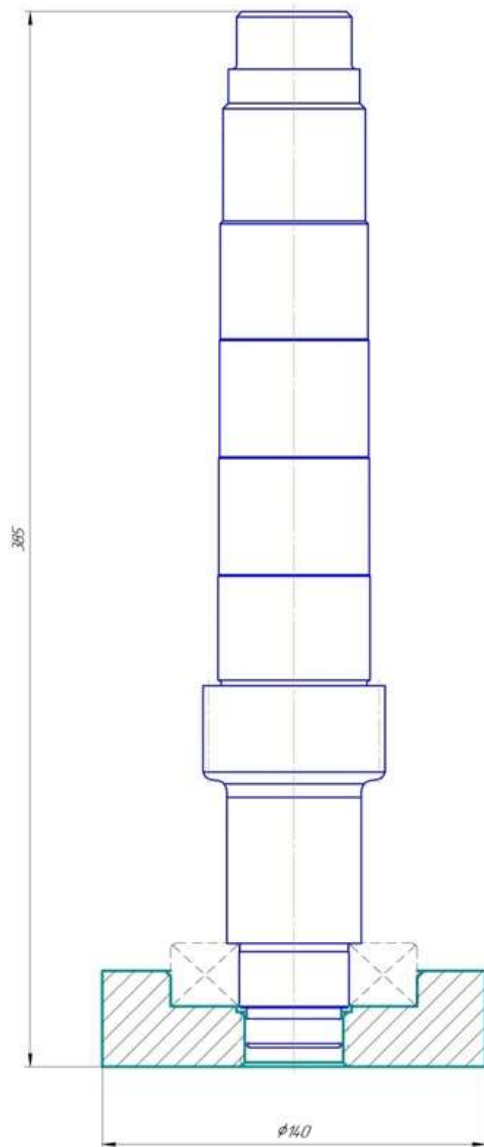


Рисунок Ж.3 – Центрирующее приспособление для сборки деталей клеевого соединения «промежуточный вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310

Центрирующее приспособление для сборки клеевого соединения промежуточного вала с подшипником 12213 коробки передач КАМАЗ-4310

Центрирующее приспособление в сборе с промежуточным валом и подшипником 12213 коробки передач КАМАЗ-4310 изображено на рисунке Ж.4.

Центрирующее приспособление изготовлено из стали 10 ГОСТ 1050-2013. Подшипник 12213 с нанесенным нанокompозитом на внутреннее кольцо сопрягается с промежуточным валом в центрирующем приспособлении. Перед установкой вала в приспособление, предварительно необходимо нанести адгезив на изношенное посадочное место под подшипник. Необходимое положение подшипника определяется по поверхности отверстия наибольшего диаметра центрирующего приспособления.



- 1 – промежуточный вал; 2 – подшипник 12213;
3 – центрирующее приспособление

Рисунок Ж.4 – Сборка и центрирование деталей клеевого соединения
«промежуточный вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310

Составили сборочную размерную цепь (рисунок Ж.5) и определили номинальные размеры составляющих звеньев. В качестве замыкающего звена приняли значение смещения оси подшипника относительно оси ведомого вала (несоосность). Затем провели расчет размерной цепи согласно методикам из п.4.4.

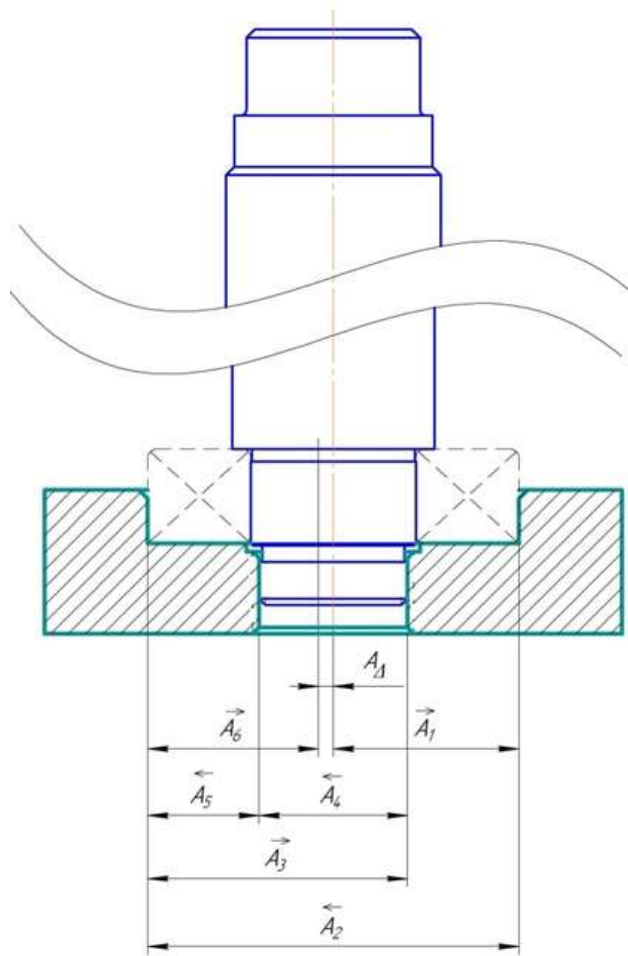


Рисунок Ж.5 – Сборочная размерная цепь

Номинальные размеры составляющих звеньев размерной цепи

$A_1 = 60 \text{ мм}$; $A_2 = 120 \text{ мм}$; $A_3 = 80 \text{ мм}$; $A_4 = 40 \text{ мм}$; $A_5 = 40 \text{ мм}$; $A_6 = 60 \text{ мм}$.

Проверка правильности определения номинальных размеров

$$120 + 40 + 40 - 60 - 80 - 60 - 0 = 0$$

При сопряжении деталей их соосность зависит от номинальных размеров звеньев цепи, требуемой точности изготовления центрирующего приспособления и т.д. Приняли:

$$A_{\Delta\min} = 0 \text{ мм}; A_{\Delta\max} = 0,05 \text{ мм}$$

Допуск замыкающего звена

$$T_{\Sigma} = A_{\Delta\max} - A_{\Delta\min} = 0,05 - 0 = 0,05 \text{ мм} = 50 \text{ мкм}$$

Обоснование выбора методики расчета точностных характеристик центрирующего приспособления

Расчёт размерной цепи методом максимума-минимума

Способ равных допусков

Предполагали, что все звенья имеют равные допуски

$$T_{\text{ср}} = \frac{50}{6} = 8,33 \text{ мкм}$$

Стандартные допуски звеньев

$$T_1 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_2 = 10 \text{ мкм (4 кв.)}; T_3 = 8 \text{ мкм (4 кв.)};$$

$$T_4 = 7 \text{ мкм (4 кв.)}; T_5 = 7 \text{ мкм (4 кв.)}; T_6 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}.$$

Сумма допусков

$$\Sigma T_i = 8 + 10 + 8 + 7 + 7 + 8 = 48 \text{ мкм}$$

Так как $\Sigma T_i = 48 \text{ мкм}$, условие (Ж.2) выполняется.

Таким образом, определены предельные отклонения и размеры звеньев.

$$A_1 = 60_{-0,008}; A_2 = 120^{+0,01}; A_3 = 80_{-0,008};$$

$$A_4 = 40^{+0,007}; A_5 = 40^{+0,007}; A_6 = 60_{-0,008};$$

Способ одного качества

Среднее число единиц допуска рассчитывали по формуле (Ж.3)

$$a_{\text{ср}} = \frac{50}{1,86 + 2,17 + 1,86 + 1,56 + 1,56 + 1,86} = 4,6$$

Ближайшим является 4-й квалитет, со стандартным числом единиц допуска $a = 5,1$. Допуски составляющих звеньев имеют значения:

$$T_1 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}; T_2 = 10 \text{ мкм (4 кв.)}; T_3 = 8 \text{ мкм (4 кв.)};$$

$$T_4 = 7 \text{ мкм (4 кв.)}; T_5 = 7 \text{ мкм (4 кв.)}; T_6 = 8 \text{ мкм (4 кв.)}.$$

Сумма допусков

$$\Sigma T_i = 8 + 10 + 8 + 7 + 7 + 8 = 48 \text{ мкм}$$

Так как $\Sigma T_i = 48$ мкм, условие (Ж.2) выполняется.

Таким образом, определены предельные отклонения и размеры звеньев.

$$A_1 = 60_{-0,008}; A_2 = 120^{+0,01}; A_3 = 80_{-0,008};$$

$$A_4 = 40^{+0,007}; A_5 = 40^{+0,007}; A_6 = 60_{-0,008};$$

*Вероятностный метод расчёта размерных цепей**Способ равных допусков*

Приняли нормальный закон распределения размеров с $\lambda_i = 1/\sqrt{3}$ и процентом брака $P = 5\%$ для мелкосерийного и индивидуального производства. Соответственно, табличное значение коэффициента, зависящего от процента риска $t_\Sigma = 1,96$.

Средний допуск составляющих звеньев определили по формуле (Ж.4)

$$T_{\text{ср}} = \frac{50}{1,96 \cdot 1/\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} + 3} = 18,03$$

Ближайшие стандартные допуски:

$$T_1 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_2 = 15 \text{ мкм (5 кв.)}; T_3 = 19 \text{ мкм (6 кв.)};$$

$$T_4 = 16 \text{ мкм (6 кв.)}; T_5 = 16 \text{ мкм (6 кв.)}; T_6 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}.$$

Коэффициент t_{Σ} рассчитывали по формуле Ж.5

$$t_{\Sigma} = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 15^2 + 19^2 + 16^2 + 16^2 + 19^2}} = 2,03$$

Значение $t_{\Sigma} = 2,03$, следовательно, риск менее 5%.

Тогда

$$A_1 = 60_{-0,019}; A_2 = 120^{+0,015}; A_3 = 80_{-0,019};$$

$$A_4 = 40^{+0,016}; A_5 = 40^{+0,016}; A_6 = 60_{-0,019};$$

Способ одного качества

Приняли нормальный закон распределения размеров для мелкосерийного и индивидуального производства $\lambda_i = 1/\sqrt{3}$ и процентом брака $P = 5\%$ ($t_{\Sigma \text{табл.}} = 1,96$).

Среднее число единиц допуска определили по формуле (Ж.6)

$$a_{\text{ср}} = \frac{50}{1,96 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1,86^2 + 2,17^2 + 1,86^2 + 1,56^2 + 1,56^2 + 1,86^2}} = 9,9$$

Ближайшим качеством является 6 (аср=10)

Стандартные допуски

$$T_1 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}; T_2 = 22 \text{ мкм (6 кв.)}; T_3 = 19 \text{ мкм (6 кв.)};$$

$$T_4 = 16 \text{ мкм (6 кв.)}; T_5 = 16 \text{ мкм (6 кв.)}; T_6 = 19 \text{ мкм (6 кв.)}.$$

Расчетный коэффициент $t_{\Sigma p}$

$$t_{\Sigma p} = \frac{50}{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{19^2 + 22^2 + 19^2 + 16^2 + 16^2 + 19^2}} = 1,97$$

Расчетное значения $t_{\Sigma} = 1,97$. Следовательно, при установленных допусках составляющих звеньев риск менее 5%.

Предельные отклонения и размеры:

$$A_1 = 60_{-0,019}; A_2 = 120^{+0,022}; A_3 = 80_{-0,019};$$

$$A_4 = 40^{+0,016}; A_5 = 40^{+0,016}; A_6 = 60_{-0,019};$$

По технико-экономическим показателям наиболее оптимальным является вероятностный метод расчета способом одного качества. Данный метод обеспечивает необходимую точность звеньев для обеспечения требуемой величины осности вала и подшипника 12213. В сравнении с методом максимума-минимума, вероятностный метод значительно сокращается затраты на изготовление центрирующего приспособления, поэтому окончательно выбрали эту методику расчета.

*Центрирующее приспособление для сборки клеевого
соединения «промежуточный вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-
4310*

Вероятностным методом расчета способом одного качества проведен расчет точностных характеристик центрирующего приспособления для сборки клеевого соединения «промежуточный вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310.

Центрирующее приспособление изображено на рисунке Ж.6.

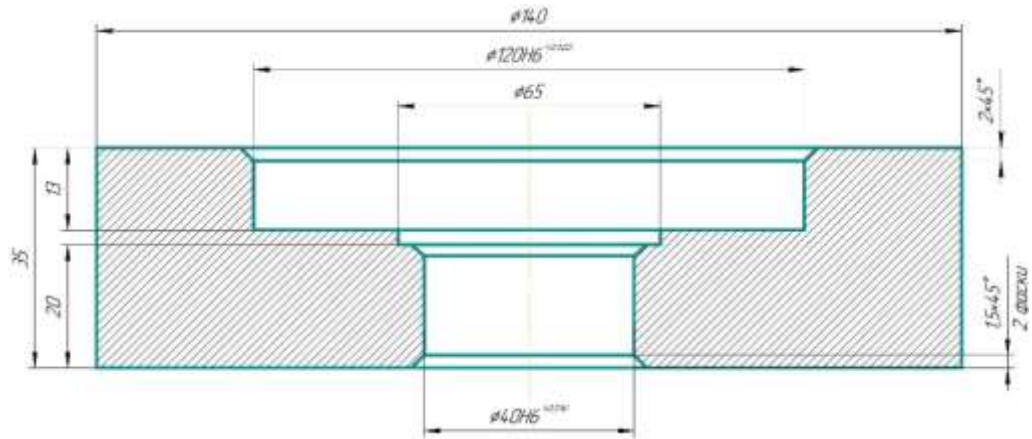


Рисунок Ж.6 – Центрирующее приспособление для сборки деталей клевого соединения «промежуточный вал-подшипник» коробки передач КАМАЗ-4310

Центрирующее приспособление изготавливается из стали 10 ГОСТ 1050-2013. В ступени максимальным диаметром 120 мм предусмотрена фаска для удобства монтажа. В данную ступень после нанесения нанокompозита устанавливается подшипник 12213, после нанесения на его внутреннее кольцо нанокompозита. Посадка наружного кольца подшипника 12213 с приспособлением – посадка зазором Н6/16 (минимальный 0 мм, а максимальный – 0,044 мм).

В ступени с минимальным диаметром 40 мм также предусмотрена фаска. Данная ступень необходима для необходимого расположения вала по неизношенной поверхности хвостовика. Посадка хвостовика вала с центрирующим приспособлением – посадка с зазором Н6/f6 (минимальный – 0,025 мм, а максимальный – 0,057 мм).

Приложение 3
(рекомендуемое)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях

нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С

№ 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 ОПГ 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-40С	Лак Ф-40С (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-40С – 100 масс. ч., нанопорошок алюминия – 0,09 масс. ч., нанопорошок меди – 0,03 масс. ч.
5	Провести ультразвуковое диспергирование (УЗД) раствора нанокompозита	Ультразвуковая ванна «GRAD 0,5 HOME STYLE»	Время обработки $t = 6$ мин. Мощность УЗД, $W = 55$ Вт. Уровень раствора в ванне $h \leq 14$ мм.
6	Нанести послойно покрытие из нанокompозита на посадочные отверстия в корпусной детали	Кисть волосяная №4...5, раствор нанокompозита на основе эластомера Ф-40С	Каждый слой сушить 5...10 минут.
7	Провести термическую обработку нанесенных полимерных покрытий	Излучатели QTS, и отражатели марки QTSR	Термическую обработку проводить при температуре 140°C в течение 3,0 ч
8	Калибровать отверстия с полимерным покрытием	Технологическая оснастка для калибрования	Размер отверстия после калибрования должен обеспечивать посадку подшипника с натягом 0,03 мм
9	Провести контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали	Лупа 8-10 кратного увеличения	Визуальный осмотр

Приложение И
(рекомендуемое)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях

нанокомпозитом на основе герметика АН-111

№ 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 поверхности посадочных отверстий от следов коррозии	Верстак слесарный ОРГ 1468А, шкурка шлифовальная Э5М1А №16	Обработать поверхности до металлического блеска
3	Обезжирить поверхности 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. Выдерживать на воздухе в течение 10 мин.
4	Приготовить нанокомпозит	Анаэробный герметик АН-111 (ТУ 2257-274-00208947-96), нанопорошок алюминия (ТУ 1791-003-36280340-2008), весы ВК 3000.1, стеклянная емкость	Состав нанокомпозита: АН-111 – 100 масс. ч., нанопорошок алюминия – 0,075 масс. ч.
5	Провести механизированное диспергирование раствора нанокомпозита	Механическая мешалка	Частота вращения рабочего органа 1490 об/мин, время обработки материала 3 мин
6	Нанести покрытие из нанокомпозита на посадочные места сопрягаемых деталей	Кисть волосяная №6...8	-
7	Собрать соединение и провести центрирование	Центрирующее приспособление	Время полного отверждения клеевого соединения 1,5; 1,0 и 0,75 ч. при температурах 20; 30 и 40 °С, соответственно
8	Разобрать центрирующее приспособление и провести контроль качества соединения	Лупа 8-10 кратного увеличения	Визуальный осмотр

Приложение К (справочное)

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ПХ ОКА МОЛОКО – Южное

ООО «ОКА МОЛОКО»

Крупский С.И.

10 марта 2020 г.



АКТ

на проведение производственных испытаний

10 марта 2020 г.

п. Каширин, Александр-Невский район, Рязанская область

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» главный инженер Зайцев В.В. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., инженер Быконя А.Н. с другой, составили настоящий акт о том, что на предприятии ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» проведена производственная проверка технологии восстановления посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях автомобилей КАМАЗ-68901Е, КАМАЗ-45143, УАЗ-374195 и тракторов МТЗ-1221.2, МТЗ-82/1 полимерным композитом на основе эластомера Ф-40С.

Восстановлены посадочные отверстия под подшипники качения в следующих деталях:

картер коробки передач автомобилей КАМАЗ-68901Е и КАМАЗ-45143 (141701015) – 4 шт., картер раздаточной коробки КАМАЗ-68901Е и КАМАЗ-45143 (65111-1802010) – 3 шт., картер коробки передач автомобиля УАЗ-374195 (3741-1700010) – 3 шт., картер коробки передач трактора МТЗ-1221.2 (80-1701025-А) – 4 шт., картер коробки передач трактора МТЗ-82/1 (50-1701025-А) – 3 шт. В результате собраны четыре опытных коробки передач автомобилей КАМАЗ-68901Е и КАМАЗ-45143, три опытных раздаточных коробки автомобилей КАМАЗ-68901Е и КАМАЗ-45143, три опытных коробки передач автомобиля УАЗ-374195, четыре опытных коробки передач трактора МТЗ-1221.2, три опытных коробки передач трактора МТЗ-82/1.

Наблюдения за опытными узлами будут осуществляться специалистами ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ.

Гл. инженер
д.т.н., профессор
к.т.н, доцент, докторант
инженер

Зайцев В.В.
Ли Р.И.
Псарев Д.Н.
Быконя А.Н.

Продолжение приложения К

«УТВЕРЖДАЮ»
 Директор ПХ ОКА МОЛОКО – Южное
 ООО «ОКА МОЛОКО»
 Крупский С.И.
 18 октября 2021 г.



АКТ
 эксплуатационных испытаний

18 октября 2021 г.

п. Каширин, Александров-Невский район, Рязанская область

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» главный инженер Зайцев В.В. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., инженер Быконя А.Н. с другой, составили настоящий акт об эксплуатационных испытаниях опытных агрегатов трансмиссии автомобилей и тракторов, у которых посадочные отверстия под подшипники качения восстановлены полимерной композитом на основе эластомера Ф-40С.

Таблица – Опытные агрегаты трансмиссии с восстановленными отверстиями под подшипники

Хоз.номер автомобиля, трактора	Марка автомобиля, трактора	Наработка объекта за период испытаний, мото-ч, км	Наименование узла
18	КАМАЗ-68901Е	94540 км	Коробка передач, раздаточная коробка
19	КАМАЗ-68901Е	108750 км	Коробка передач, раздаточная коробка
29	КАМАЗ-45143	104240 км	Коробка передач, раздаточная коробка
30	КАМАЗ-45143	92850 км	Коробка передач
1	УАЗ-374195	52630 км	Коробка передач
10	УАЗ-374195	45470 км	Коробка передач
11	УАЗ-374195	60150 км	Коробка передач
32	БЕЛАРУС-1221.2	4280 мото-ч	Коробка передач
33	БЕЛАРУС-1221.2	4270 мото-ч	Коробка передач
168	БЕЛАРУС-1221.2	3800 мото-ч	Коробка передач
169	БЕЛАРУС-1221.2	4190 мото-ч	Коробка передач
34	БЕЛАРУС-82/1	3740 мото-ч	Коробка передач
35	БЕЛАРУС-82/1	3980 мото-ч	Коробка передач
170	БЕЛАРУС-82/1	3710 мото-ч	Коробка передач

Время (календарная продолжительность) эксплуатации с марта 2020 года по октябрь 2021 года.

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

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

Гл. инженер
 д.т.н., профессор
 к.т.н., доцент, докторант
 инженер

Зайцев В.В.
 Ли Р.И.
 Псарев Д.Н.
 Быконя А.Н.

Продолжение приложения К

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ПХ ОКА МОЛОКО – Южное

ООО «ОКА МОЛОКО»

Крупский С.И.

18 октября 2021 г.



Акт внедрения (реализации) результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО» главный инженер Зайцев В.В. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., инженер Быковья А.Н. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты научной работы по теме «Исследование долговечности и разработка технологии восстановления корпусных деталей автотракторной техники композитом на основе эластомера Ф-40С» внедрены (реализованы) на предприятии.

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

Экономия материальных ресурсов: экономия запасных частей.

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

Результаты исследований используются на предприятии ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО».

Годовой экономической эффект от использования результатов НИР составляет 430 000 (четыреста тридцать тысяч) рублей.

Гл. инженер
д.т.н., профессор
к.т.н, доцент, докторант
инженер

Зайцев В.В.
Ли Р.И.
Псарев Д.Н.
Быковья А.Н.

Приложение Л (справочное)


 «УТВЕРЖДАЮ»
 Генеральный директор ООО «Сосновка-Зернопродукт»
 Кошаров А.Н.
 25 февраля 2021 г.

АКТ

на проведение производственных испытаний

25 февраля 2021 г. с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовская область

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «Сосновка-Зернопродукт» заведующий гаражом Баранов Г.В. с одной стороны и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., аспирант Мельников А.Ю. с другой, составили настоящий акт о том, что на предприятии ООО «Сосновка-Зернопродукт» проведена производственная проверка технологии восстановления посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях автомобилей КАМАЗ-45143 и тракторов МТЗ-1221, МТЗ-1525, МТЗ-2022 полимерным композитом на основе эластомера Ф-40С.

Восстановлены посадочные отверстия под подшипники качения в следующих деталях:

картер коробки передач автомобилей КАМАЗ-45143 (141701015) – 2 шт., картер коробки передач трактора МТЗ-1221 (80-1701025-А) – 1 шт., картер коробки передач трактора МТЗ-1525 (1222-1702081) – 1 шт., картер коробки передач трактора МТЗ-2022 (2022-1701025Б) – 1 шт. В результате собраны две опытных коробки передач автомобиля КАМАЗ-45143, одна опытная коробка передач трактора МТЗ-1221, одна опытная коробка передач трактора МТЗ-1525, одна опытная коробка передач трактора МТЗ-2022.

Наблюдения за опытными узлами будут осуществляться специалистами ООО «Сосновка-Зернопродукт» и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ.

Зав. гаражом
д.т.н., профессор
к.т.н, доцент, докторант
аспирант






Баранов Г.В.
 Ли Р.И.
 Псарев Д.Н.
 Мельников А.Ю.

Продолжение приложения Л

Генеральный директор ООО «Сосновка-Зернопродукт»
Копылов А.Н.
22 ноября 2021 г.



АКТ
эксплуатационных испытаний

22 ноября 2021 г. с. Большая Сосновка, Мичуринский район, Тамбовская область

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «Сосновка-Зернопродукт» заведующий гаражом Баранов Г.В. с одной стороны и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., аспирант Мельников А.Ю. с другой, составили настоящий акт об эксплуатационных испытаниях опытных агрегатов трансмиссии автомобилей и тракторов, у которых посадочные отверстия под подшипники качения восстановлены полимерным композитом на основе эластомера Ф-40С.

Таблица – Опытные агрегаты трансмиссии с восстановленными отверстиями под подшипники качения

Хоз. номер автомобиля, трактора	Марка автомобиля, трактора	Наработка объекта за период испытаний, мото-ч, км	Наименование узла
1	КАМАЗ-45143	62458 км	Коробка передач
2	КАМАЗ-45143	65471 км	Коробка передач
3	МТЗ-1221	1940 мото-ч	Коробка передач
4	МТЗ-1525	1750 мото-ч	Коробка передач
5	МТЗ-2022	1770 мото-ч	Коробка передач

Время (календарная продолжительность) эксплуатации с февраля 2021 года по ноябрь 2021 года.

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

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

Зав. гаражом
д.т.н., профессор
к.т.н, доцент, докторант
аспирант


Баранов Г.В.

Ли Р.И.

Псарев Д.Н.

Мельников А.Ю.

Продолжение приложения Л


 «УТВЕРЖДАЮ»
 Генеральный директор ООО «Сосновка-Зернопродукт»
 Копылов А.Н.
 22 ноября 2021 г.

Акт внедрения (реализации) результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «Сосновка-Зернопродукт» заведующий гаражом Баранов Г.В. с одной стороны и ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент, докторант Псарев Д.Н., аспирант Мельников А.Ю. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты научной работы по теме «Исследование долговечности и разработка технологии восстановления корпусных деталей автотракторной техники композитом на основе эластомера Ф-40С» внедрены (реализованы) на предприятии.

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

Экономия материальных ресурсов: экономия запасных частей.

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

Результаты исследований используются на предприятии ООО «Сосновка-Зернопродукт».

Годовой экономической эффект от использования результатов НИР составляет 240 000 (двести сорок тысяч) рублей.

Зав. гаражом
 д.т.н., профессор
 к.т.н, доцент, докторант
 аспирант




Баранов Г.В.
 Ли Р.И.
 Псарев Д.Н.
 Мельников А.Ю.

Приложение М (справочное)



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУ «ОС «Мичуринская»

Белов Н. Г.

« 14 » 03 2016

А К Т

на проведение производственных испытаний

« 14 » 03 2016. деревня Красниково, Мичуринский район, Тамбовская область

Мы, нижеподписавшиеся, представитель предприятия ФГБУ «ОС «Мичуринская» начальник технического отдела Шаров И.А. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент Псарев Д.Н., аспирант Малюгин В.А. с другой, составили настоящий акт о том, что на предприятии ФГБУ «ОС «Мичуринская» проведена производственная проверка технологии восстановления нанокompозитом на основе анаэробного герметика АН-111 неподвижных соединений подшипников качения валов, корпусов коробок передач и раздаточной коробки автомобилей УАЗ-31519, ГАЗ-3307, ЗИЛ-45065, тракторов ДТ-75, МТЗ-80.

Восстановлены неподвижные соединения следующих подшипников качения:

1. УАЗ-31519:

Коробка передач: 50307 – 2 шт. – вала первичного (31606-1701026); 42305 – 2 шт., 692306 – 2 шт. – вала промежуточного (31606-1701046); 3056207 – 2 шт. – вала вторичного (31606-1701100).

Раздаточная коробка: 692306 – 4 шт. – вала привода переднего моста (452-1802082); 292305 – 4 шт. – вала промежуточного (452-1802092); 50307 – 2 шт., 692306 – 2 шт. – вала привода заднего моста (452-1802060).

2. ГАЗ-3307: 50209 – 2 шт. – вала первичного (52-1701030-20); 50307 – 2 шт., 60-42207 – 2 шт. – вала промежуточного (52-1701050-10); 50307 – 2 шт. – вала вторичного (53-12-1701105).

3. ЗИЛ-45065: 150212 – 1 шт. – вала первичного (130-1701025); 12208 – 1 шт., 150308 – 1 шт. – вала промежуточного (130-1701048); 50310 – 1 шт. – вала вторичного (130-1701105).

4. ДТ-75: 311 – 2 шт., 2311К – 2 шт. – вала первичного (77.37.125-1; 2612КМ – 2 шт. – вала вторичного (77.37.105); 407 – 2 шт. корпуса коробки передач (77.38.021-1А).

5. МТЗ-80: 50308 – 2 шт., 208 – 2 шт. – вала 1 передачи и заднего хода (70-1701382); 7610А – 2 шт., 207 – 2 шт. – вала первичного (1701030-А); 67512К1 – 2 шт. – корпуса коробки передач (50-1701025-А).

В результате собраны две опытные КП и две опытные раздаточные коробки автомобиля УАЗ-31519, две опытные КП автомобиля ГАЗ-3307, одна опытная КП автомобиля ЗИЛ-45065, две опытные КП трактора ДТ-75 и две опытные КП трактора МТЗ-80.

Наблюдения за опытными узлами автомобилей и тракторов будут осуществляться специалистами ФГБУ «ОС «Мичуринская».

Начальник технического отдела

Д.т.н., профессор

К.т.н., доцент

Аспирант

Шаров И.А.

Ли Р.И.

Псарев Д.Н.

Малюгин В.А.

Продолжение приложения М



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУ «ОС «Мичуринская»

Белов Н. Г.

« 24 / 11 2017 г.

АКТ

эксплуатационных испытаний

Мы, нижеподписавшиеся, представитель предприятия ФГБУ «ОС «Мичуринская» начальник технического отдела Шаров И.А. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент Псарев Д.Н., аспирант Малогин В.А. с другой, составили настоящий акт об эксплуатационных испытаниях опытных узлов автомобилей и тракторов, у которых неподвижные соединения подшипников качения восстановлены нанокompозитом на основе анаэробного герметика АН-111.

Таблица 1 – Опытные узлы автомобилей и тракторов с восстановленными неподвижными соединениями подшипников качения

Инв. №	Марка автомобиля, трактора	Наработка объекта за период испытаний, км, мото-ч.	Наименование узла
01510034	ГАЗ-3307	58624	Коробка передач
01510035	ГАЗ-3307	60258	Коробка передач
01510032	УАЗ-31519	44856	Коробка передач, раздаточная коробка
01510033	УАЗ-31519	49324	Коробка передач, раздаточная коробка
01510031	ЗИЛ-45065	55257	Коробка передач
01310027	ДТ-75	328	Коробка передач
01310026	ДТ-75	293	Коробка передач
01310001	МТЗ-80	1035	Коробка передач
01310002	МТЗ-80	1172	Коробка передач

Время (календарная продолжительность) эксплуатации с марта 2016 г. по ноябрь 2017 г. За период эксплуатации отказов и простоев по причине недостаточной долговечности испытуемых соединений не наблюдалось.

Неподвижные соединения подшипников качения, восстановленные нанокompозитом на основе анаэробного герметика АН-111, находятся в работоспособном состоянии и пригодны для дальнейшей эксплуатации.

Начальник технического отдела

Д.т.н., профессор

К.т.н., доцент

Аспирант

 Шаров И.А.
 Ли Р.И.
 Псарев Д.Н.
 Малогин В.А.

Продолжение приложения М

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУ «ОС «Мичуринская»

Белов Н.Г.

«24» _____ 2017 г.



Акт внедрения (реализации) результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся, представитель предприятия ФГБУ «ОС «Мичуринская» начальник технического отдела Шаров И.А. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» д. т. н., профессор Ли Р. И., к.т.н., доцент Псарев Д. Н., аспирант Малюгин В. А. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы по теме «Восстановление неподвижных соединений подшипников качения автотракторной техники нанокompозитом на основе герметика АН-111» внедрены (реализованы) на предприятии.

Технические преимущества разработки: повышение долговечности неподвижных соединений подшипников качения, снижение себестоимости ремонта автомобилей и тракторов.

Экономия материальных ресурсов: экономия запасных частей.

Практическое использование результатов НИР: внедрена технология восстановления неподвижных соединений подшипников качения автомобилей и тракторов нанокompозитом на основе анаэробного герметика АН-111.

Результаты исследований используются на предприятии ФГБУ «ОС «Мичуринская».

Годовой экономический эффект от использования результатов НИР составляет 425000 (четыреста двадцать пять тысяч) рублей.

Начальник технического отдела
Д. т. н., профессор
К. т. н., доцент
Аспирант

Шаров И. А.
Ли Р. И.
Псарев Д. Н.
Малюгин В. А.

Приложение Н (справочное)

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. технического директора
по текущему сопровождению и
подготовке производства ООО «ЛМЗ»



В.А. Пивень

2023 г.

Акт внедрения (реализации) результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «Липецкий механический завод» гл. технолог Бирюков М.А., гл. конструктор Волокитин М.А. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент Псарев Д.Н., аспирант Ерохин В.Е. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты научной работы по теме «Разработка технологии восстановления посадок подшипников качения в корпусных деталях технологического оборудования нанокompозитом эластомера Ф-40С», «Разработка технологии восстановления посадок подшипников качения на валах технологического оборудования нанокompозитом анаэробного герметика АН-111» внедрены (реализованы) на предприятии.

Технические преимущества разработки: повышение долговечности подшипниковых узлов, корпусных деталей и валов, снижение себестоимости ремонта технологического оборудования.

Экономия материальных ресурсов: экономия запасных частей.

Практическое использование результатов НИР: внедрены технологии восстановления посадок подшипников качения нанокompозитами на основе эластомера Ф-40С и анаэробного герметика АН-111 при ремонте технологического оборудования.

Результаты исследований используются на предприятии ООО «Липецкий механический завод».

Главный технолог

Главный конструктор

Д. т. н., профессор

К.т.н., доцент

Аспирант

Бирюков М.А.

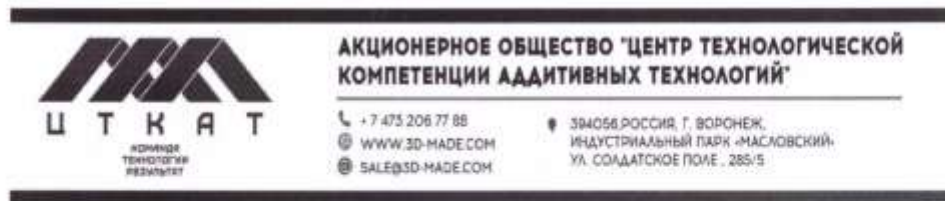
Волокитин М.А.

Ли Р. И.

Псарев Д.Н.

Ерохин В.Е.

Приложение О (справочное)



«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
АО «Центр технологической компетенции
аддитивных технологий»
Мазалов А.Б.
« 23 » 05 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ (реализации) результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся представители АО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий» руководитель производства Золотарев А.Г., экономист Трифонова А.Д. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент Псарев Д.Н. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты научных работ «Разработка технологии восстановления посадок подшипников качения в корпусных деталях технологического оборудования нанокompозитом эластомера Ф-40С» и «Разработка технологии восстановления посадок подшипников качения на валах технологического оборудования нанокompозитом анаэробного герметика АН-111» внедрены (реализованы) на предприятии.

Технические преимущества разработки: повышение долговечности подшипниковых узлов, корпусных деталей и валов, снижение себестоимости ремонта технологического оборудования.

Экономия материальных ресурсов: экономия запасных частей.

Практическое использование результатов НИР: внедрены технологии восстановления посадок подшипников качения нанокompозитами на основе эластомера Ф-40С и анаэробного герметика АН-111 при ремонте технологического оборудования.

Результаты исследований используются на предприятии АО «Центр технологической компетенции».

Руководитель производства
Экономист
Д. т. н., профессор
К.т.н., доцент

Золотарев А.Г.
Трифонова А.Д.
Ли Р. И.
Псарев Д.Н.

Приложение П (справочное)



Генеральный директор
 ООО «ИНОКС РЭМ»
 Богданов А.В.
 « 23 » 06 2023 г.

АКТ РЕАЛИЗАЦИИ

результатов научно-исследовательских работ (НИР)

Мы, нижеподписавшиеся представители ООО «ИНОКС РЭМ»: главный инженер С. Лопатин, инженер А. Менделев с одной стороны и представители ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ д.т.н., профессор Ли Р.И., к.т.н., доцент Псарев Д.Н. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты НИР «Разработка технологии восстановления посадок подшипников качения в корпусных деталях технологического оборудования нанокompозитом эластомера Ф-40С» и «Разработка технологии восстановления посадок подшипников качения на валах технологического оборудования нанокompозитом анаэробного герметика АН-111» реализованы на предприятии.

Технические преимущества, полученные в результате выполнения НИР: повышение долговечности подшипниковых узлов, корпусных деталей и валов, снижение себестоимости ремонта технологического оборудования, а также экономия запасных частей.

Практическое использование результатов НИР: внедрены технологии восстановления посадок подшипников качения нанокompозитами на основе эластомера Ф-40С и анаэробного герметика АН-111 при ремонте технологического оборудования.

Полученные результаты исследований используются на предприятии ООО «ИНОКС РЭМ».

Главный инженер
 Инженер
 Д. т. н., профессор
 К.т.н., доцент






С. Лопатин
 А. Менделев
 Р. Ли
 Д. Псарев

Приложение Р

Расчет себестоимости восстановления изношенной поверхности отверстия нанокompозитом эластомера Ф-40С

Себестоимость восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстия нанокompозитом эластомера Ф-40С рассчитывали по формуле [277-280]

$$C_{\Pi} = 3\Pi + C_M + \Pi_P + C_{OПV} + C_{ЭЛ} + A_{OБ},$$

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.;

$C_{OПV}$ – 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

$$3\Pi = 3\Pi_o + 3\Pi_d + H_{CC},$$

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

$3\Pi_d$ – затраты на дополнительную заработную плату рабочих, руб;

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

Основную заработную плату рабочих рассчитали по формуле

$$3\Pi_o = T_{OБ} \cdot C_q,$$

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 Н.1).

При выполнении операций восстановления корпусной детали приняли четвертый разряд слесаря со сдельной оплатой труда и часовым тарифом в 180 руб/ч (по данным ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО»)

$$ЗП_0 = 180 \cdot 0,21 = 37,8\text{руб/дм}^2$$

Таблица Н.1 – Норма времени на восстановление 1 дм^2 изношенной поверхности подшипниковых отверстий корпусной детали нанокompозитом на основе эластомера Ф-40С

№ п/п	Наименование операции	Норма времени, мин/дм ²
1	Обезжиривание поверхности	0,40
2	Отбор компонентов нанокompозита	2,0
3	УЗД нанокompозита	4,0
4	Нанесение покрытия из раствора нанокompозита на изношенное отверстие	0,5
5	ИК сушка	2,0
6	Калибрование отверстий с полимерным покрытием	5,0
7	Контроль	0,25
	Итого:	14,15 (0,24 ч/дм ²)

Дополнительную заработную плату рабочего определили по формуле

$$ЗП_д = ЗП_0 \cdot K_{д.п.},$$

где $K_{д.п.}$ – коэффициент дополнительной оплаты, который составляет 15 %

от основной зарплаты рабочего (по данным ПХ ОКА МОЛОКО – Южное ООО «ОКА МОЛОКО»)

$$ЗП_{д} = 37,8 \cdot 0,15 = 5,67 \text{руб/дм}^2$$

Начисления на социальное страхование рассчитывали по формуле

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

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

$$H_{CC} = (37,8 + 5,67) \cdot 0,302 = 13,13 \text{руб/дм}^2$$

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

$$ЗП = 37,8 + 5,67 + 13,13 = 56,6 \text{руб/дм}^2$$

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

$$C_M = H_M \cdot Ц_M, \quad (5.6)$$

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

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

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

Цена ремонтных материалов, используемых при восстановлении изношенных отверстий в корпусной детали, показана в таблице Н.2.

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

$$P_p = 0,05 \cdot 3P_o$$

$$P_p = 0,05 \cdot 56,6 = 2,83 \text{руб}$$

Таблица Н.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-40С	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

$$C_{OIV} = 3P_o \cdot K_{OIV}$$

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

$$C_{\text{опу}} = 56,6 \cdot 2 = 113,2 \text{руб}$$

Затраты на электроэнергию определяли по формуле

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

где W_{y1} и W_{y2} – установленная мощность потребления электроэнергии ультразвуковой ванны и сушильного шкафа СНОЛ-3.5,.3.5,3.5/3, кВт;

$T_{\text{оп1}}$ и $T_{\text{оп2}}$ – время на проведение операций ультразвукового диспергирования и термической обработки, ч;

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

$C_{\text{э}}$ – 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:

$$A_{\text{об}} = \frac{0,1 \cdot (C_{\text{н1}}T_{\text{осн1}} + C_{\text{н2}}T_{\text{осн2}} + C_{\text{н3}}T_{\text{осн3}})}{R\Phi_{\text{вр}}},$$

где $C_{\text{н1}}$, $C_{\text{н2}}$, $C_{\text{н3}}$ – цена новых: ультразвуковой ванны, инфракрасной сушилки, 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.

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

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

$$C_{\Pi} = 56,6 + 7,61 + 2,83 + 113,2 + 55,58 + 6,36 = 242,18\text{руб}/\text{дм}^2$$

Приложение С
(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. Ильин



Приложение Т
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2719624

**Стенд для испытания подшипников качения на
долговечность**

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

Авторы: *Ли Роман Иннакентьевич (RU), Псарев Дмитрий
Николаевич (RU), Ризаева Юлия Николаевна (RU),
Пчельников Андрей Витальевич (RU), Быкопя Андрей
Николаевич (RU), Мельников Антон Юрьевич (RU)*

Заявка № 2019121503

Приоритет изобретения 08 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 апреля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 08 июля 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Приложение У
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2751339

**Способ восстановления изношенных посадочных
отверстий в корпусных деталях покрытием из раствора
полимерного материала**

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

Авторы: *Ли Роман Иннакентьевич (RU), Псарев Дмитрий
Николаевич (RU), Ризаева Юлия Николаевна (RU), Киба Мария
Романовна (RU), Быконя Андрей Николаевич (RU), Мельников
Антон Юрьевич (RU)*

Заявка № 2020111470
Приоритет изобретения 18 марта 2020 г.
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 13 июля 2021 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 18 марта 2040 г.

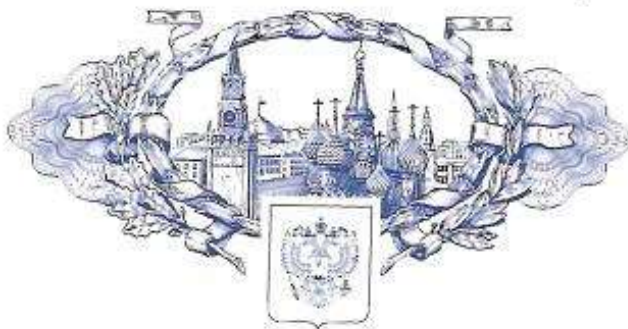
*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*


Г.П. Ивлиев



Приложение Ф
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2757271

Композиция для покрытия металлических изделий

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

Авторы: *Ли Роман Иннокентьевич (RU), Псарев Дмитрий Николаевич (RU), Киба Мария Романовна (RU), Быкопя Андрей Николаевич (RU), Мельников Антон Юрьевич (RU), Ерохин Виктор Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2020134361

Приоритет изобретения **19 октября 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **12 октября 2021 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **19 октября 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Налиев

