

ФГБОУ ВО ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



МИРОНЕНКО АЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

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

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

Липецк – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Анализ состояния вопроса, цель и задачи исследований	10
1.1 Способы повышения долговечности подшипников качения	10
1.2 Распределение нагрузки между телами качения и контактные напряжения в подшипнике с посадкой восстановленной полимерным материалом	15
1.3 Исследование натяга посадки «подшипник-корпус», восстановленной полимерным материалом	25
1.4 Полимерные композиционные материалы и технологическая оснастка для восстановления посадок подшипников качения в корпусных деталях	30
1.5 Выводы. Цель и задачи исследований	42
2 Теоретические предпосылки повышения эффективности восстановления роликоподшипниковых узлов полимерными материалами	45
2.1 Параметры контакта в роликоподшипнике с полимерным покрытием	45
2.2 Долговечность роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерными материалами	59
2.3 Расчет оптимального натяга посадки подшипника в отверстии с полимерным покрытием	69
2.4 Обоснование выбора компонентов полимер-полимерного композиционного материала	80
5.1 Способ калибрования отверстий с полимерным покрытием	85
3 Методика экспериментальных исследований	89
3.1 Общая методика исследований	89
3.2 Методика исследования деформационно-прочностных свойств пленок адгезива АН-110 и полимер-полимерной композиции на его основе	91

3.3 Методика исследования деформационно-прочностных свойств клеевых соединений адгезива АН-110 и полимер-полимерной композиции на его основе	94
3.4 Методика исследования процесса полимеризации клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-110 при различных условиях отверждения	97
3.5 Методика исследования усадки акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе	100
3.6 Методика исследования параметров контакта и распределения нагрузки между телами качения и зависимости данных параметров от радиального зазора в подшипнике	101
3.7 Методика исследования коэффициента податливости упругого основания	106
3.8 Методика исследования долговечности подшипниковых узлов, восстановленных полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110	110
4 Результаты экспериментальных исследований и их анализ	115
4.1 Исследование деформационно-прочностных свойств пленок адгезива АН-110 и полимер-полимерной композиции на его основе	115
4.2 Исследование деформационно-прочностных свойств клеевых соединений адгезива АН-110 и полимер-полимерной композиции на его основе	120
4.3 Исследования процесса полимеризации клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-110 при различных условиях отверждения	126
4.4 Исследование усадки акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе	128
4.5 Исследование параметров контакта и распределения нагрузки между телами качения и зависимости данных параметров от радиального зазора в подшипнике	129

4.6 Исследование коэффициента податливости упругого основания	141
4.7 Исследование долговечности роликовых подшипников с посадками, восстановленными полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-110 при местном нагружении наружного кольца подшипников.....	144
4.8 Исследование долговечности при циркуляционном нагружении посадок роликоподшипниковых узлов, восстановленных полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-110	146
5 Реализация результатов исследований и их технико-экономическая оценка.....	148
5.1 Технологическая оснастка для калибрования отверстий с полимерным покрытием из акрилового адгезива АН-110 в корпусных деталях.....	148
5.2 Метод расчета параметров контакта и долговечности роликоподшипника с полимерным покрытием	150
5.3 Технологические рекомендации.....	152
5.4 Расчет экономической эффективности технологии восстановления корпусных деталей композицией на основе адгезива АН-110 в ОАО «Добринское» Суровикинского района Волгоградской области	153
Заключение	159
Список литературы	161
Приложения	172

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильным транспортом осуществляется значительная часть грузопассажирских перевозок внутри страны. Кроме того постоянно растёт объем перевозимых грузов. Стоимость перевозок, а в конечном счете и стоимость перевозимых грузов в значительной степени зависит от затрат на поддержание автомобильного транспорта в исправном и работоспособном состоянии.

Срок эксплуатации автомобиля определяется качеством его технического обслуживания и условиями, обеспечивающими реализацию его функциональных возможностей. Восстанавливают работоспособность машины и обеспечивают её нормальное функционирование на протяжении всего срока службы в ходе технического обслуживания и ремонта. Долговечность машины зависит от ресурса её составных элементов. Ремонт может осуществляться как заменой изношенных деталей, так и их восстановлением, что позволяет в значительной степени снизить затраты. Особенно это актуально при ремонте крупногабаритных металлоёмких корпусных деталей трансмиссии, масса и стоимость которых может достигать 40...45% от массы и стоимости всего автомобиля в целом. Поэтому возникает необходимость создания и использования новых технологий восстановления, отвечающих современному уровню развития техники. Необходимо создавать и применять новые материалы, которые смогут обеспечить деталям, узлам и машине в целом повышенный послеремонтный ресурс [1...27].

Основными видами опор валов в машинах являются подшипники качения. Из-за отказов подшипниковых узлов техника простаивает, происходит потеря прибыли и увеличение стоимости продукции. Одной из основных причин отказа подшипников качения, является износ посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях. Применяются различные способы для восстановления посадочных мест подшипников: установка дополнительных деталей, сварочно-наплавочные методы, нанесение электролитических покрытий, различные виды напылений и другие [28...47]. Перечисленные способы требуют применения сложного технологического процесса, дорогостоящего технологического оборудования, механической обработки восстанавливаемых поверхностей, и в связи с

этим имеют высокую трудоемкость, энергоемкость и себестоимость. Кроме того при использовании данных способов восстановления не предотвращается фреттинг-коррозия, являющаяся основной причиной износа посадочных отверстий.

Способы восстановления посадочных отверстий под подшипники качения с использованием полимерных материалов лишены вышеуказанных недостатков. При этом полностью исключается появление фреттинг-коррозии, многократно повышается долговечность восстановленных деталей, значительно снижается себестоимость и трудоёмкость восстановления. Стоимость восстановления деталей полимерными материалами до 10 и более раз ниже, чем вышеперечисленными способами [48].

Химической промышленностью постоянно выпускаются новые полимерные материалы с различными физико-механическими свойствами. Необходимо проводить исследования новых материалов с целью оценки их пригодности для восстановления подшипниковых узлов машин и разработки новых эффективных технологических процессов восстановления. Перспективным направлением является создание полимерных композиционных материалов (ПКМ) с улучшенными потребительскими характеристиками и повышение эффективности восстановления деталей машин с их применением.

Степень разработанности темы. Вопросам диагностики и ремонта автомобилей посвящены труды Афанасьева Л.Л., Власова В.М., Денисова А.С., Зорина В.А., Карагодина В.И., Крамаренко Г.В., Кузнецова Е.С., Мирошникова Л.В. и др. отечественных ученых. Проблема восстановления корпусных деталей авто-тракторной техники полимерными материалами исследована в работах Ибилдаева Б.А., Курчаткина В.В., Ли Р.И., Котина А.В., Кононенко А.С., Башкирцева В.Н., Гаджиева А.А., Гвоздева А.А. и многих других отечественных ученых.

Литературный обзор показал, что в отличие от шарикоподшипников, вопрос восстановления посадочных мест роликоподшипников полимерными материалами практически не исследован. Недостаточно изучен вопрос распределения нагрузки между телами качения, формирования параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, долговечности роликоподшипников с посадками, восстановленными полимерными материалами. Не исследована ло-

кальная деформация дорожки качения в зоне контакта с телом качения, не учитывается изменение распределения нагрузки между телами качения от радиального зазора в подшипнике. Существующие технологии восстановления посадочных мест под подшипники качения в корпусных деталях требуют сложной технологической оснастки для обеспечения требуемой геометрической точности отверстий. Полимерные материалы, применяемые для восстановления изношенных посадочных мест, либо имеют недостаточные деформационно-прочностные показатели, либо требуют термической обработки, что приводит к увеличению расхода энергии при ремонте.

Диссертация посвящена повышению эффективности восстановления посадочных отверстий роликоподшипников корпусных деталей ПКМ на основе акрилового адгезива АН-110, который позволит обеспечить повышение долговечности корпусных деталей, и снизить себестоимость их восстановления.

Научная новизна заключается в теоретическом обосновании снижения контактных напряжений, оптимального натяга полимерной посадки, увеличения ресурса роликоподшипниковых узлов при восстановлении отверстий корпусных деталей полимерными материалами, разработанной модели формирования контакта нагруженных тел с дорожками качения в роликоподшипнике с полимерным покрытием, методе и компьютерной программе расчета параметров контакта, контактных напряжений и долговечности роликоподшипника с полимерным покрытием, результатах экспериментальных исследований деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений, выполненных акриловым адгезивом АН-110 и композицией на его основе, оптимальном составе композиции на основе адгезива АН-110, исследованных параметрах контакта нагруженных тел с дорожками качения и долговечности при местном и циклическом нагружении роликоподшипниковых узлов 42209 с посадками в корпусных деталях восстановленными композицией адгезива АН-110.

Практическая значимость заключается в новой технологии и технологической оснастке для восстановления корпусных деталей автомобильного транспорта композицией адгезива АН-110.

Объект исследований. Пленки, клеевые соединения, полимерные покрытия, роликподшипник 42209, корпусные детали с посадками «корпус-подшипник», восстановленными адгезивом АН-110 и композицией на его основе.

Предмет исследования. Деформационно-прочностные и адгезионные свойства ПКМ на основе акрилового адгезива АН-110, распределение нагрузки в роликподшипнике, с посадкой восстановленной ПКМ адгезива АН-110, долговечность роликподшипников и посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ на основе адгезива АН-110.

В диссертации разработана новая технология для восстановления корпусных деталей автотракторной техники композицией на основе акрилового адгезива АН-110 с наполнителем из эластомера Ф-40, которая внедрена в ОАО «Добринское» Суровикинского района, Волгоградской области.

Диссертация выполнена в соответствии с планом госбюджетных научно-исследовательских работ ЛГТУ на 2013...2016 годы по теме 05.02.01 «Разработка перспективных технологий восстановления и упрочнения деталей машин и технологического оборудования» на кафедре "Транспортные средства и техносферная безопасность".

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на:

- научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Липецкого государственного технического университета в 2013...2016 гг.;
- международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы инновационного развития животноводства», БелГСХА имени В.Я. Горина (г. Белгород) 2013 г.;
- международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК», МичГАУ (г. Мичуринск) 2015 г.;
- Липецком областном фестивале науки, при поддержке Союза молодых учёных (г. Липецк) 2015 г., получен диплом за первое место (приложение А);
- 6-ой международной научно-практической конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях», ЮЗГУ (г. Курск), 2016 г.;
- XII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы

научно-технического прогресса в АПК», СГАУ (г. Ставрополь), 2016г.;

– 2-ой Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте», ОГУ имени И.С.Тургенева (г. Орел), 2016 г.;

– 1-ой Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности и экологические аспекты использования ресурсов в сельскохозяйственном производстве», ФГБНУ ВНИИТиН (г. Тамбов), 2016 г.;

– заседании кафедры "Транспортные средства и техносферная безопасность" ЛГТУ в 2016 г.

Публикации. По результатам выполненной работы опубликовано – 14 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. По теме диссертации получены два патента РФ на изобретение №2537864 (приложение Б) и № 2569547 (приложение В).

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 179 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 9 таблиц, 5 приложений и библиографию из 120 наименований.

На защиту выносятся:

– теоретические предпосылки повышения ресурса роликоподшипниковых узлов при восстановлении полимерными материалами;

– результаты исследований деформационно-прочностных свойств пленок и клеевых соединений, выполненных акриловым адгезивом АН-110 и ПКМ на его основе, процесса полимеризации, коэффициента податливости упругого основания композиции, распределения нагрузки и параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения в роликоподшипнике с восстановленной посадкой, долговечности посадок «корпус-подшипник», выполненных ПКМ адгезива АН-110;

– технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях композицией на основе акрилового адгезива АН-110 и технико-экономическая эффективность ее использования.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Способы повышения долговечности подшипников качения

Подшипники качения широко используются при конструировании опор валов в трансмиссии автомобильного транспорта. От работоспособности подшипниковых узлов в значительной степени зависит работоспособность машины в целом. Актуальной задачей является увеличение срока службы подшипников. Одним из путей повышения долговечности подшипников качения является снижение контактных напряжений, возникающих в контакте тел и дорожки качения. Напряжения зависят от нагрузки на тела качения и размеров пятен контакта.

Известны различные конструкторские решения, позволяющие снизить контактные напряжения в подшипнике. Существует конструкция подшипника с полыми телами качения. В таком подшипнике, нагруженном радиальной нагрузкой, тела качения сильнее деформируются, пятна контакта имеют увеличенные размеры по сравнению с подшипником с обычными телами качения, в результате чего контактные напряжения уменьшаются. Такие подшипники хорошо воспринимают ударные нагрузки, однако чаще отказывают из-за разрушения тел качения [49, 50].

Известна конструкция подшипника, у которого на посадочных поверхностях колец вдоль всей окружности имеются выточки. Благодаря выточкам, в нагруженном подшипнике кривизна желоба дорожки качения в нагруженной зоне увеличивается, что приводит к снижению контактных напряжений [53].

Распределение давления в зоне контакта зависит от формы поверхностей контактирующих деталей. Поэтому форма поверхностей тел и дорожек качения значительно влияет на долговечность подшипников. В роликовых подшипниках применяют бомбинирование роликов. Ролику придают выпуклую бочкообразную форму с центром выпуклости, расположенным в поперечной для оси ролика плоскости его симметрии. В результате этого повышается нагрузочная способ-

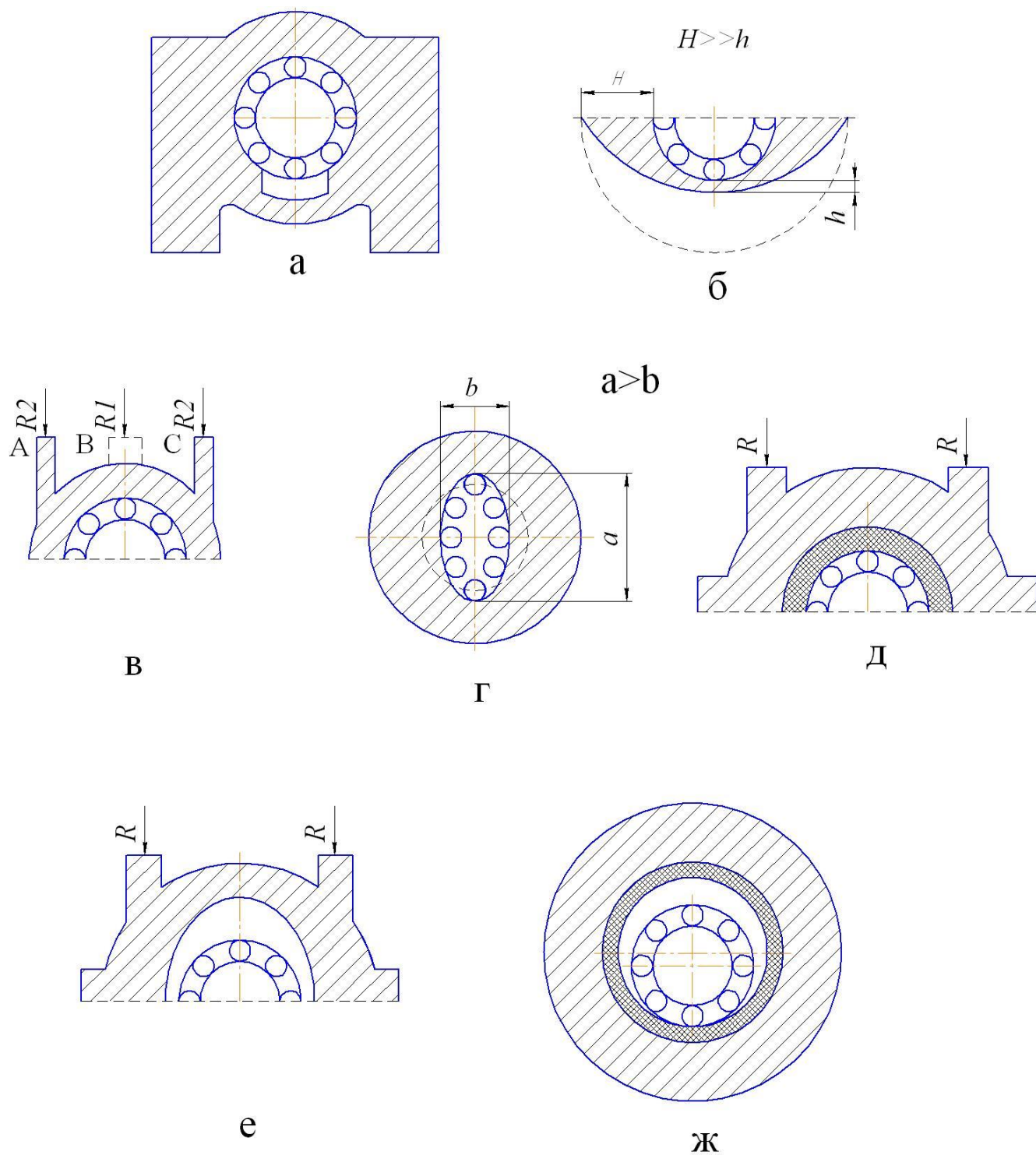
ность подшипника и снижается чувствительность к перекосам. Бомбинирование осуществляется только для роликов, а поверхность дорожек качения колец подшипника имеет прямолинейную образующую.

Повышения ресурса подшипников можно добиться перераспределением нагрузки между телами качения. На рисунке 1.1 представлена классификация способов, повышающих равномерность распределения нагрузки между телами качения в подшипнике [15, 16].

На рисунке 1.2 показаны технические решения, которые применяются для перераспределения нагрузки с центрального на боковые тела качения.



Рисунок 1.1 – Классификация способов снижения неравномерности распределения нагрузки между телами качения в подшипниках



а – подшипниковый щит переменной жесткости; б – изменение толщины корпуса;

в – увеличенная арка; г – овальное посадочное отверстие;

д, е, ж – резиновые колодки и пластмассовые втулки

Рисунок 1.2 – Способы повышения равномерности распределения нагрузки между телами качения в подшипниках

В корпусе с местным снижением жесткости (рисунок 1.2, а) выполнена проточка, расположенная под центральным наиболее нагруженным телом качения. Такая конструкция позволяет при приложении радиальной нагрузки наружному кольцу подшипника деформироваться, вследствие чего нагрузка с центрального тела качения перераспределяется на боковые тела качения, что приводит к соответствующему снижению контактных напряжений и увеличению долговечности подшипника. Применяют корпуса имеющие повышенную жесткость в зоне боковых тел качения (рисунок 1.2, б) [8]. В зоне центрального тела качения толщина стенки наименьшая. Под действием радиальной нагрузки корпус в месте наименьшей толщины совместно с наружным кольцом подшипника упруго деформируются, что приводит к снижению нагрузки на центральное тело качения и увеличению на боковые тела качения. Применяют корпус с увеличенным размером арки (рисунок 1.2, в). В таких корпусах схема передачи нагрузки меняется из точки В в точки А и С. При приложении радиальной нагрузки в точке В форма посадочного отверстия и наружного кольца подшипника меняются: наружное кольцо деформируется в эллипс с большой осью, совпадающей с направлением нагрузки, в результате чего нагрузка на центральное тело качения уменьшается и перераспределяется на боковые тела качения. Овальная форма посадочного отверстия (рисунок 1.2, г) обеспечивают благоприятное перераспределение нагрузки на тела качения в подшипнике, аналогично описанному выше.

При использовании упругого элемента между наружным кольцом подшипника и посадочным местом так же обеспечивается передача части нагрузки на боковые тела качения, с соответствующим уменьшением нагрузки на центральное тело. В качестве таких элементов могут использоваться резиновые колодки постоянной и переменной толщины, пластмассовые втулки (рисунок 1.2, д, е, ж). Данные элементы выполняют роль упругой подкладки и позволяют наружному кольцу деформироваться, что и приводит к перераспределению нагрузки между телами качения. Износ посадочных отверстий под подшипники обычно не превышает 0,3 мм, поэтому применение резиновых колодок и пластмассовых втулок

при восстановлении отверстий малоперспективно, так как при этом необходима расточка посадочных отверстий и возникает потребность в большой номенклатуре резиновых колодок и пластмассовых втулок.

Наиболее перспективным способом, обеспечивающим благоприятное распределение нагрузки между телами качения в подшипнике, считается нанесение полимерных покрытий на посадочное отверстие под подшипник в корпусной детали. Нанесение полимерных покрытий выгодно отличается простотой и эффективностью, не требует больших материальных затрат. При этом увеличивается равномерность распределения нагрузки между телами качения и повышается ресурс подшипников. В подшипнике с полимерным покрытием из герметика 6Ф неравномерность распределения нагрузки между телами качения уменьшается в 2,4 раза по сравнению с посадкой с зазором 0,33 мм. При этом ресурс подшипника увеличивается. Долговечность подшипника с покрытием из герметика 6Ф толщиной 0,1 мм в 3,6 раза, а при толщине покрытия 0,15 мм в 5,8 раза выше расчетного значения [18].

Полимерное покрытие практически исключает фреттинг-коррозию, которая является одной из основных причин износа посадочных мест подшипников. Нанесение полимерных покрытий позволяет эффективно компенсировать износ посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях, увеличить их ресурс и значительно сократить затраты на ремонт автомобильного транспорта. Поэтому способ нанесения полимерных покрытий следует рассматривать как наиболее перспективный способ увеличения ресурса подшипников качения, повышающий эффективность восстановления корпусных деталей при ремонте автомобильного транспорта.

Вывод

Нанесение полимерных покрытий является наиболее перспективным способом увеличения ресурса подшипников качения и повышения эффективности восстановления корпусных деталей при ремонте автомобильного транспорта.

1.2 Распределение нагрузки между телами качения и контактные напряжения в подшипнике с посадкой восстановленной полимерным материалом

В работах Ибилдаева Б.А. и Курчаткина В.В. проведены исследования деформация наружного кольца и распределения нагрузки между телами качения в шарикоподшипнике при различных видах посадки в корпусную деталь. При посадке с зазором наружное кольцо подшипника при радиальном нагружении деформируется в эллипс, большая ось которого перпендикулярна направлению нагрузки (рисунок 1.3).

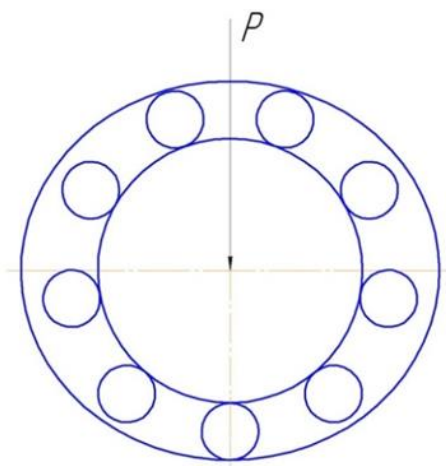
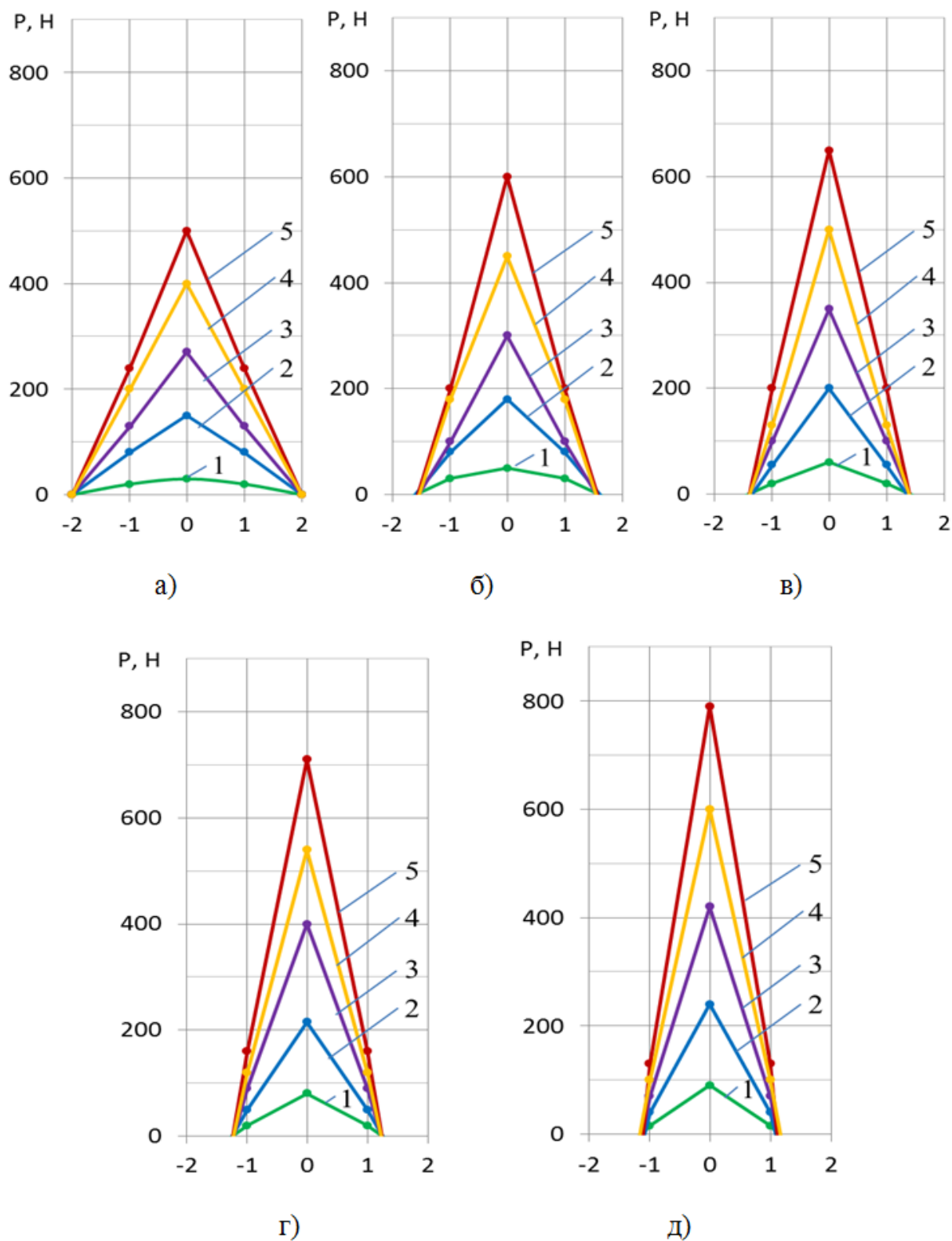


Рисунок 1.3 – Деформация наружного кольца подшипника при радиальной нагрузке при посадке в корпус с зазором

Благодаря этому нагрузка с боковых тел качения перераспределяется на центральное – наиболее нагруженное тело качения (рисунок 1.4). Из рисунка видно, что при зазоре посадки 0,057 мм с увеличением радиальной нагрузки от 143 до 1044Н, нагрузка на центральное тело качения повышается от 50 до 600Н. С увеличением зазора посадки, деформация наружного кольца подшипника увеличивается. При зазоре посадки 0,123мм с увеличением радиальной нагрузки от 143 до 1044Н, нагрузка на центральное тело качения возрастает с 65 до 650 Н, при зазоре посадки 0,236 мм – с 85 до 710Н, при зазоре посадки 0,335мм – с 95 до 790Н.

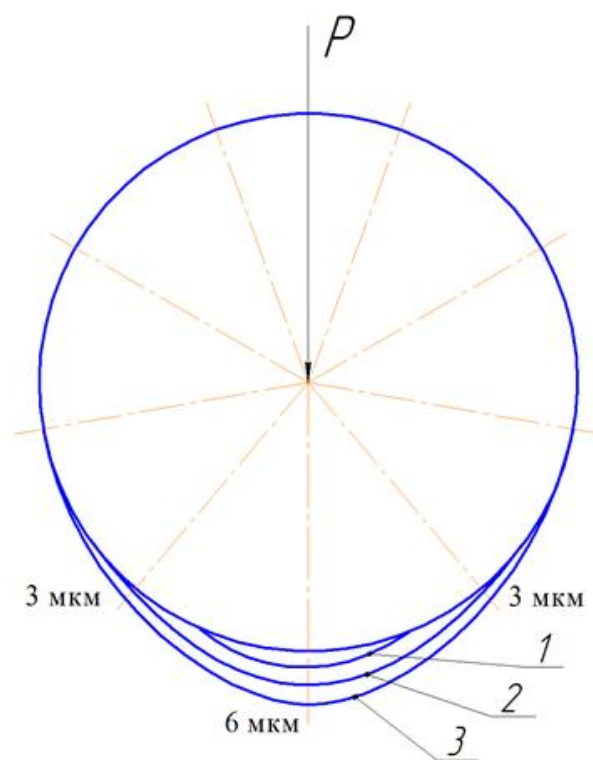
При посадке подшипника в корпус с натягом 0,005мм деформация наружного кольца при радиальной нагрузке значительно уменьшается (рисунок 1.5).



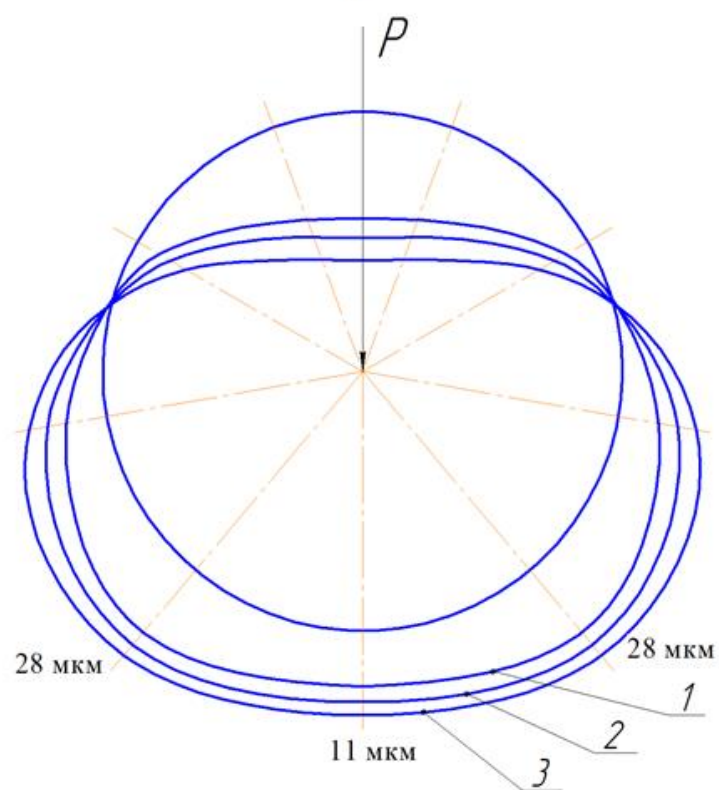
1, 2, 3, 4, 5 – радиальная нагрузка на подшипник 143, 406, 619, 831, 1044Н;

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

Рисунок 1.4 – Распределение нагрузки между телами качения при натяге посадки 0,005мм (а) и зазорах 0,057 (б), 0,123 (в), 0,236 (г), 0,335 мм (д) [16]



а)



б)

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

Рисунок 1.5 – Деформация наружного кольца подшипника 208 при натяге 0,005 мм (а) и зазоре 0,395 мм (б) [16]

При радиальной нагрузке 9 кН деформация наружного кольца под центральным телом качения составляет 2 мкм, что по сравнению с зазором посадки 0,395 мм в 3,5 раза меньше (7 мкм). При нагрузках 12 и 15 кН деформация наружного кольца составила 4 и 6 мкм соответственно, что по сравнению с зазором посадки 0,395 мм в 2,25 и 1,83 раза меньше (9 и 11 мкм).

Благодаря меньшей деформации наружного кольца, радиальная нагрузка на центральное тело качения значительно меньше по сравнению с зазором посадки (рисунок 1.4, а). С увеличением радиальной нагрузки от 143 до 1044 Н, нагрузка на центральное тело качения увеличивается от 25 до 510 Н. Максимальное значение нагрузки на центральное тело качения меньше на 90 Н, чем в подшипнике с зазором посадки 0,057 мм (600 Н), на 140 Н по сравнению с зазором посадки 0,123 мм (650 Н), на 200 Н по сравнению с зазором посадки 0,236 мм (710 Н) и на 270 Н по сравнению с зазором посадки 0,335 мм (790 Н).

Совершенно иная картина наблюдается в подшипнике с посадкой, восстановленной герметиком 6Ф. Наружное кольцо подшипника при радиальном нагружении принимает форму эллипса, большая ось которого совпадает с направлением радиальной нагрузки (рисунок 1.6). Такая деформация наружного кольца приводит к тому, что зазоры между боковыми телами и дорожкой качения выбираются раньше чем в случае посадки с зазором. Нагрузка на центральное тело качения уменьшается, а на боковые тела качения увеличивается.

При увеличении толщины полимерного покрытия, перераспределение нагрузки с центрального на боковые тела качения становится более выраженным (рисунок 1.7). При толщине полимерного покрытия 8 мкм нагрузки на тела качения очень близки к нагрузкам в подшипнике, запрессованном в корпус с натягом 0,005 мм без полимерного покрытия (рисунок 1.4а). При толщине покрытия 53 мкм при увеличении радиальной нагрузки на подшипник со 143 до 1044 Н происходит увеличение нагрузки на центральное тело качения с 30 до 480 Н, при этом нагрузка на первые боковые тела качения увеличивается с 20 до 260 Н. С увеличением толщины полимерного покрытия до 98 мкм, нагрузка на центральное тело

качения составляет от 30 до 400 Н, а на первые боковые тела качения – от 20 до 280 Н. При увеличении толщины покрытия до 139 мкм нагрузка на центральное тело качения возрастает от 25 до 380 Н, а на первые боковые тела качения – от 20 до 300 Н. При толщине покрытия 182 мкм нагрузка на центральное тело качения составляет от 25 до 330 Н, а на первые боковые тела качения – от 20 до 290 Н.

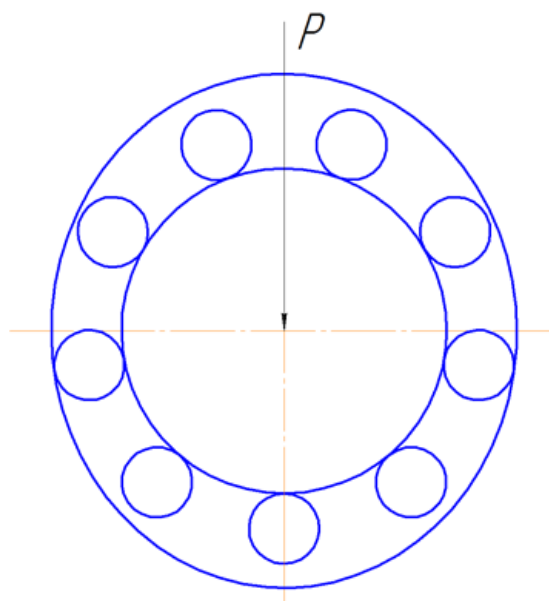
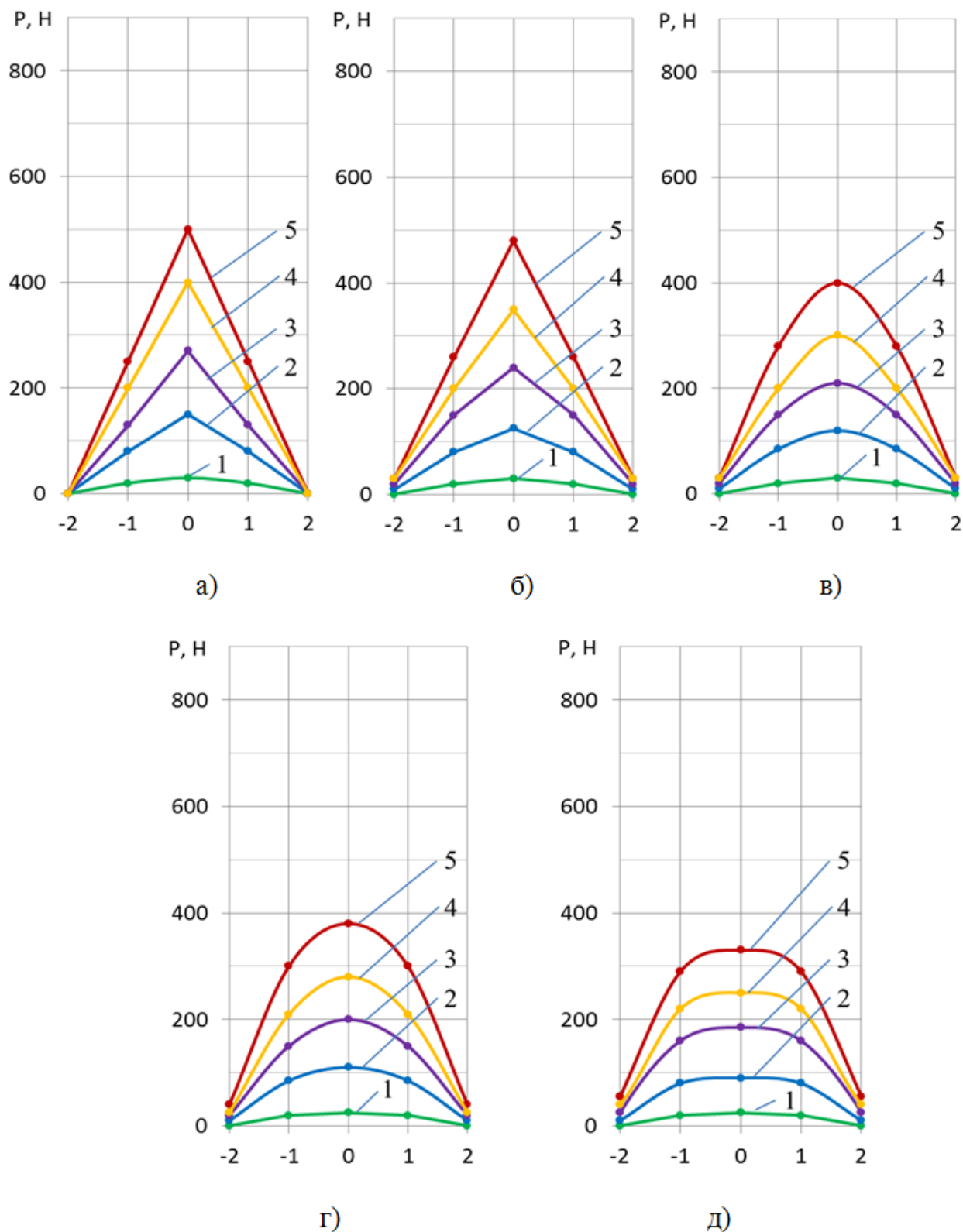


Рисунок 1.6 – Деформация наружного кольца подшипника при радиальной нагрузке с посадкой, восстановленной полимерным материалом

В подшипнике с полимерным покрытием толщиной 182 мкм нагрузка на центральное тело качения в 1,5 раза ниже в сравнении с нагрузкой на центральное тело качения подшипника без полимерного покрытия, установленного в корпус с натягом 0,005 мм и в 2,4 раза ниже в сравнение с подшипником, установленным в корпус с зазором 0,335 мм. Увеличение толщины полимерного покрытия приводит к увеличению нагрузки на боковые тела качения. Так при толщине полимерного слоя 182 мкм нагрузка на первые боковые тела качения при увеличении радиальной нагрузки на подшипник от 143 до 1044 Н возрастает от 20 до 300 Н, что больше чем в подшипнике, установленном в корпус с натягом 0,005мм в 1,25 раза, и больше чем в подшипнике, имеющим посадку с зазором 0,335мм в 2,3 раза. Нагрузка перераспределяется с центрального на боковые тела качения.



1, 2, 3, 4, 5 – радиальная нагрузка на подшипник 143, 406, 619, 813, 1044Н;
 0; ± 1 ; ± 2 – центральное, первые и вторые боковые тела качения;
 Рисунок 1.7 – Распределение нагрузки между телами качения при толщине
 полимерного покрытия 8 (а), 53 (б), 98 (в), 139 (г) и 182мкм (д) [16]

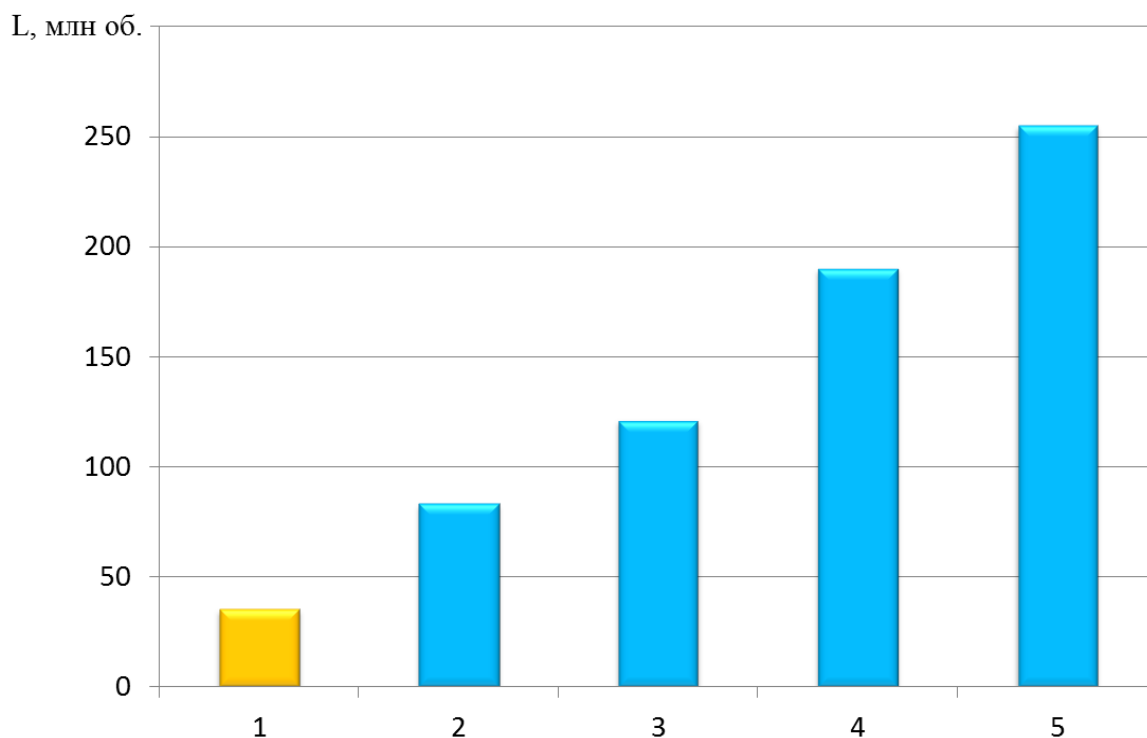
Авторы приводят формулу расчета долговечности подшипника в зависимости от нагрузки на центральное тело качения

$$L = \frac{\left(\frac{C}{z}\right)^{3,33} \frac{1}{n}}{P_0^{3,33}}, \quad (1.1)$$

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

Из формулы видно, что долговечность подшипника обратно пропорциональна нагрузке на центральное тело качения в степени 3,33. Относительно небольшое изменение нагрузки на наиболее нагруженное тело качения (обычно центральное) может привести к значительному изменению долговечности подшипника. При увеличении равномерности распределения внешней радиальной нагрузки между телами качения, уменьшается нагрузка на центральное тело качения и увеличивается долговечность подшипника.

Стендовые испытания показали, что долговечность подшипников качения с посадками, восстановленными полимерными материалами, выше чем у стандартного подшипника (рисунок 1.8). Как видно из рисунка использование полимерных материалов для восстановления посадок подшипников позволяет увеличить долговечность подшипников от 2,4 (при использовании герметика АН-6К) до 7,3 раз (с герметиком 6Ф). Научные исследования в данной области продолжены в работе Ли Р.И. Установлено что в подшипнике с посадкой, восстановленной полимерным материалом при радиальном нагружении изменяется не только распределение нагрузки между телами качения. При радиальной нагрузке на подшипник дорожка качения наружного кольца деформируется в большей степени чем в стандартном подшипнике. В результате площадь пятна контакта шарика с дорожкой качения увеличивается, что приводит к снижению контактных напряжений (рисунок 1.9).



1 – расчетная; 2 – герметик АН-6К; 3 – герметик АН-103;

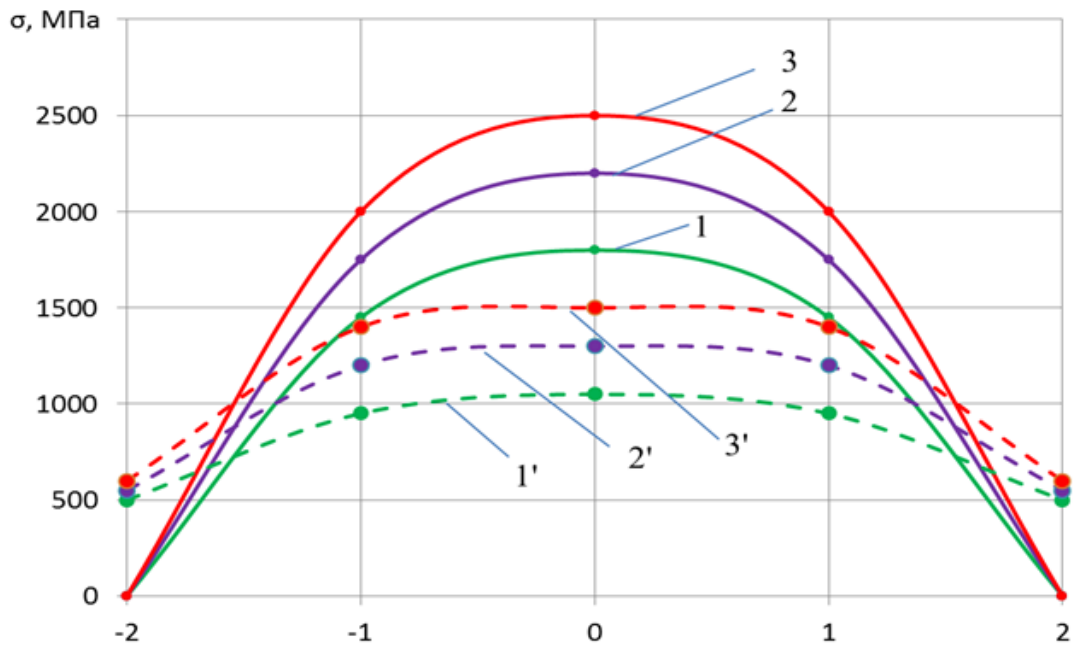
4, 5 – герметик 6Ф при толщине 0,14 и 0,18мм соответственно

Рисунок 1.8 – Долговечность подшипников качения L с посадками, восстановленными различными полимерными материалами при местном нагружении наружного кольца

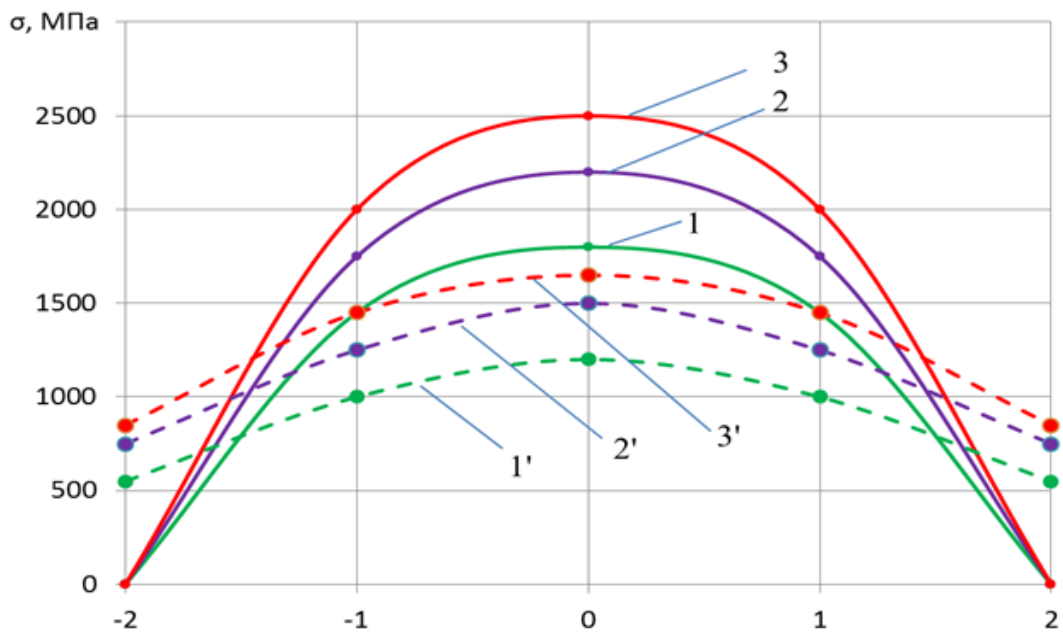
При радиальной нагрузке $P = 3479$ Н напряжение в контакте центрального тела с дорожкой качения наружного кольца по сравнению с подшипником без полимерного покрытия снижается в 1,55 раза с покрытием ВК-50 и в 1,76 раза с покрытием из герметика 6Ф. При $P = 6958$ Н напряжение в подшипнике с покрытием из ВК-50 снижается в 1,47, с покрытием из герметика 6Ф – в 1,74 раза. При $P = 10437$ Н в подшипнике с покрытием из ВК-50 – в 1,55 раза, с покрытием из герметика 6Ф в – 1,73 раза.

Долговечность подшипника зависит от контактных напряжений

$$L \sim \frac{1}{\sigma^6}. \quad (1.2)$$



а)



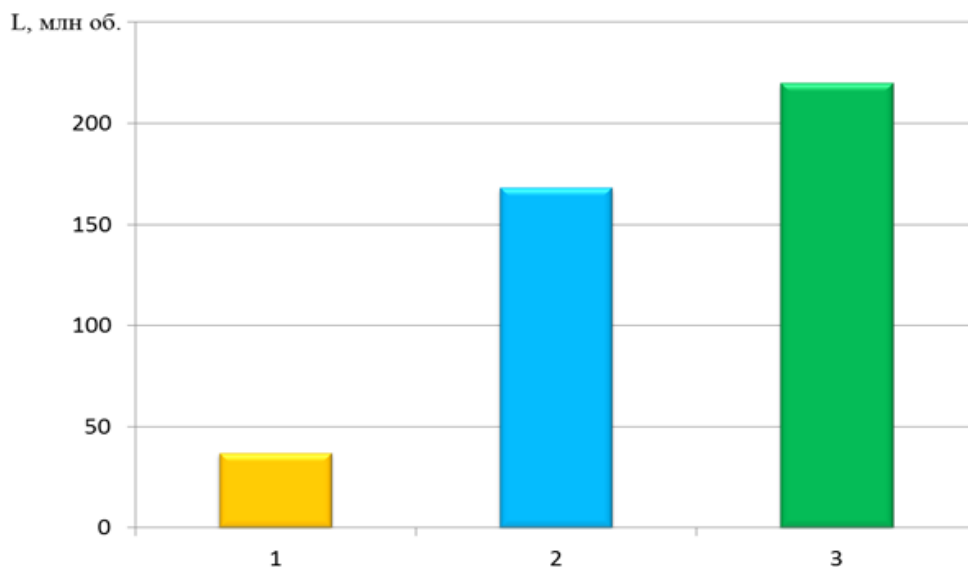
б)

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

Из формулы (1.2) следует, что незначительное снижение контактных напряжений значительно увеличивает долговечность подшипника. Стендовые испытания показали, что долговечность подшипника с посадкой, восстановленной герметиком 6Ф, составила 220 млн об., что в 5,4 раза выше по сравнению со стандартным подшипником (рисунок 1.10). У подшипника с посадкой, восстановленной ВК-50, ресурс составил 168 млн об., что в 4,1 раза выше расчетного.



1 – расчетный ресурс; 2 – покрытие из клея ВК-50 толщиной 0,09 мм;

3 – покрытие из эластомера 6Ф толщиной 0,125 мм

Рисунок 1.10 – Ресурс L подшипника 205 с посадкой, восстановленной полимерными материалами при местном нагружении наружного кольца [18]

Ли Р.И. получены расчетные формулы: долговечности шарикоподшипника с полимерным покрытием

$$L_{\text{шпп}} = \left(\frac{C_{r0\text{ппп}}}{P_{r0\text{ппп}}} \right)^3 = \left(\frac{C_{r0\text{ст}}}{P_{r0\text{ппп}}} \right)^3 \cdot \left(\frac{\eta_{\text{ппп}}}{\eta_{\text{ст}}} \right)^6; \quad (1.3)$$

долговечности роликоподшипника с полимерным покрытием

$$L_{\text{рпп}} = \left(\frac{C_{r0\text{ппп}}}{P_{r0\text{ппп}}} \right)^{10/3} = \left(\frac{C_{r0\text{ст}}}{P_{r0\text{ппп}}} \cdot \frac{\eta_{\text{ппп}}}{\eta_{\text{ст}}} \right)^{10/3}; \quad (1.4)$$

В данных формулах $P_{r0\text{ппп}}$ – нагрузка на центральное тело качения в подшипнике с полимерным покрытием, нагруженным эквивалентной динамической радиальной нагрузкой P_r ; $C_{r0\text{ст}}$ – нагрузка на центральное тело качения в стандартном подшипнике при внешней нагрузке, соответствующей базовой динамической радиальной грузоподъемности, Н; $\eta_{\text{ппп}}$, $\eta_{\text{ст}}$ – упругая постоянная материалов соприкасающихся тел в подшипнике с полимерным покрытием и в стандартном подшипнике соответственно.

Следует отметить, что вопрос исследования долговечности роликоподшипников с полимерным покрытием рассмотрен весьма ограниченно. Анализ формул (1.3) и (1.4) показал, что они требуют дальнейших изменений, так как перераспределение нагрузки между телами качения, снижение контактных напряжений благодаря наличию полимерного покрытия учитываются интегральным показателем – коэффициентом Кирхгофа η . Необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования зависимости долговечности подшипника от распределения нагрузки между телами качения, формирования пятна контакта нагруженного ролика с дорожкой качения в подшипнике с полимерным покрытием.

Выводы

1 Анализ литературных источников показал, что в отличие от шарикоподшипников недостаточно изучен вопрос распределения нагрузки между телами качения, формирования параметров контакта нагруженных тел с дорожками качения, долговечности в роликоподшипниках с посадками, восстановленными полимерными материалами исследован недостаточно.

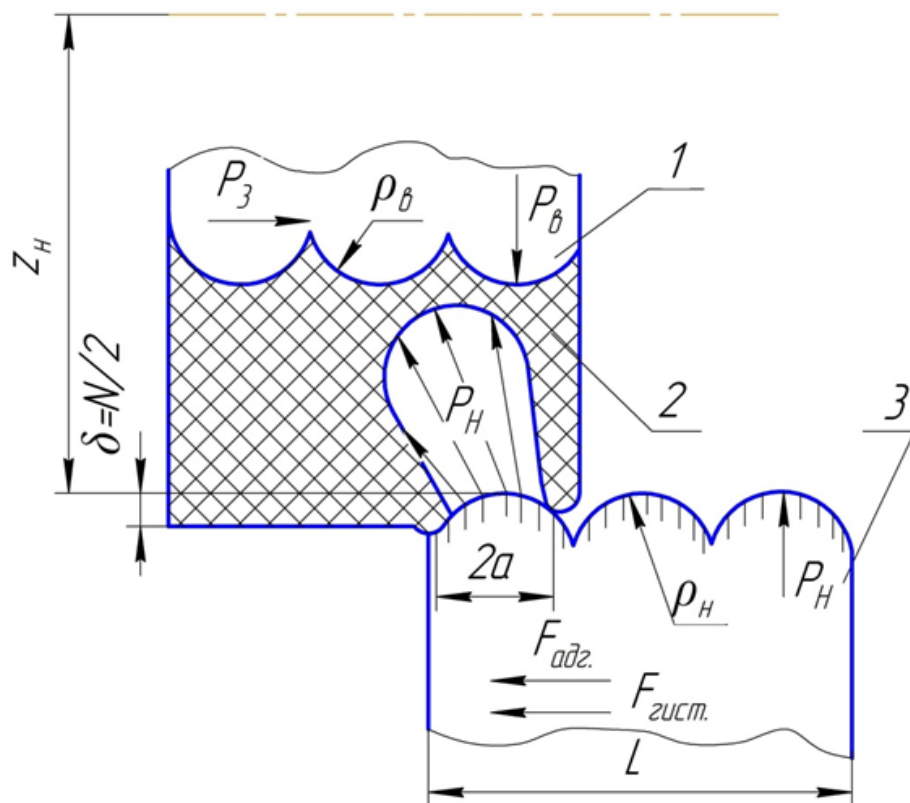
2 Необходимы дальнейшие исследования распределения нагрузки между телами качения, параметров контакта тел с дорожками качения и долговечности роликоподшипников с посадками, восстановленными полимерными материалами.

1.3 Исследование натяга посадки «подшипник-корпус» восстановленной полимерным материалом

Натяг посадки подшипника, создаваемый полимерным покрытием при восстановлении посадочных отверстий играет важную роль, так как в значительной

степени определяет как долговечность восстановленного соединения, так и ресурс самого подшипникового узла. Данный вопрос рассматривается в ряде работ с различных позиций.

Профессором Курчаткиным В.В. натяг полимерного покрытия рассматривается с позиции обеспечения неподвижности подшипника относительно корпуса [16]. Установлено, что усилие запрессовки подшипника с полимерным покрытием в отверстие зависит от геометрических параметров поверхности отверстия и наружного кольца подшипника, размеров выступов поверхностей отверстия и кольца подшипника (определяющих шероховатость поверхности), натяга посадки и свойств полимерного покрытия. На рисунке 1.11 приведена схема запрессовки подшипника с полимерным покрытием на наружном кольце в отверстие корпусной детали.



1 – наружное кольцо подшипника; 2 – полимерное покрытие;

3 – посадочное отверстие корпусной детали

Рисунок 1.11 – Схема запрессовки наружного кольца подшипника с полимерным покрытием в отверстие корпусной детали [16]

Получены расчетные формулы для определения натяга полимерного покрытия, усилия запрессовки подшипника в отверстие и давления между наружной поверхностью полимерного покрытия и внутренней поверхностью отверстия.

Натяг полимерного покрытия определяется по формуле

$$N = 2\delta = \frac{9\rho_H^{-\frac{1}{3}}(1-\nu^2)^{\frac{2}{3}}P_H^{\frac{2}{3}}}{8\left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{4}{3}}E'^{\frac{2}{3}}}, \quad (1.5)$$

где ν – коэффициент Пуассона; ρ_H – радиус сферической поверхности неровности; E' – действительная часть комплексного модуля упругости, равная отношению компоненты напряжения к компоненте деформации, совпадающей по фазе с приложенным напряжением; P_H – нормальная сила, действующая на сферический выступ, определяемая по формуле

$$P_H = \left[\frac{16\left(\frac{3}{4}\right)^{\frac{4}{3}}E'^{\frac{2}{3}}\delta}{9\rho_H^{\frac{1}{3}}(1-\nu^2)^{\frac{2}{3}}} \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (1.6)$$

где ρ_H – радиус сферических выступов отверстия.

Усилие запрессовки подшипника в отверстие определяется по формуле

$$F_{зап} = \frac{L(r_H + \rho_H)}{\rho_H^2} \left[2,5\rho_H N + \frac{0,098 E' N^2}{1-\nu^2} \right], \quad (1.7)$$

где L и r_H – длина и радиус отверстия.

Давление между наружной поверхностью полимерного покрытия и внутренней поверхностью отверстия определяют по формуле

$$p_{\epsilon} = \frac{0,28 E' N^{\frac{1}{2}} \rho_{\epsilon} (r_H + \rho_H)}{\rho_H^{\frac{3}{2}} (1 - \nu^2) (r_{\epsilon} + \rho_{\epsilon})} \quad (1.8)$$

где r_{ϵ} – радиус кольца подшипника; ρ_{ϵ} – радиус сферических выступов кольца подшипника.

Выражение (1.7) можно использовать при расчете прессового оборудования для сборки подшипниковых узлов с посадками, восстановленными полимерными материалами.

Исследование натяга посадки «корпус-подшипник» при восстановлении отверстий под подшипники полимерными материалами продолжено в работе профессора Ли Р.И. [18]. Автор рассматривает натяг полимерного покрытия исходя из обеспечения максимальной долговечности сопряжения "корпус-подшипник с полимерным покрытием". Установлено, что максимальная долговечность полимерного покрытия достигается при упругом насыщенном контакте, так как трение и теплообразование при этом минимальные.

Условие упругого насыщенного контакта

$$\frac{8 \cdot 10^{-2} \Delta^{1/2} E}{(b^{1/\nu} \nu)^{(2\nu+1)(2\nu-1)} (1 - \mu^2)} \leq P_{CH} < \frac{\alpha_{\tau} HB}{(b^{1/\nu} \nu)^{1/(\nu-1)}}, \quad (1.9)$$

где $\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^{1/\nu}}$ – безразмерный комплекс, характеризующий шероховатость поверхности; ν, b – параметры, зависящие от вида обработки; μ – коэффициент Пуассона; α_{τ} – коэффициент, учитывающий напряженное состояние в зоне контакта и кинематические особенности взаимодействия твердых тел. При упругом контакте $\alpha_{\tau} = 0,5$; HB – твердость полимерного материала.

После запрессовки подшипника в посадочное отверстие натягом полимерного покрытия должно создаваться такое давление, при котором обеспечивается упругий насыщенный контакт. Минимальный натяг полимерного покрытия при котором обеспечивается упругий насыщенный контакт предложено определять по формуле

$$N_{упр.нас.min} = 2R_{max} \left[\frac{1,14}{b^{1/3\nu} \left[(b^{1/\nu})^{(2\nu+1)(2\nu-1)} \right]^{2/3}} + \frac{\nu-1}{(b\nu^\nu)^{1/(\nu-1)}} \right] \quad (1.10)$$

где R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля;

Из формулы видно, что величина необходимого натяга зависит только от параметров обработки b и ν и шероховатости поверхности R_{max} отверстия корпусной детали.

Натяг полимерного покрытия влияет на радиальный зазор в подшипнике. Под действием давления, оказываемого полимерным покрытием, на наружное кольцо подшипника, последнее сближается с телами качения.

Исследования радиального зазора в шарикоподшипнике с полимерным покрытием проведены Кирсановым Ф.А. [52]. Получена формула для расчета радиального зазора в работающем шарикоподшипнике с учётом температуры, контактной деформации колец и тел качения, деформационно-прочностных свойств и натяга полимерного покрытия

$$e_p = e_n - \frac{4d\Delta}{D+3d} - \frac{(3D+d)}{4ER^{*2}} \times \frac{cE_{nu}Nh_{nn}}{1 - \left[0,25(3 + \frac{d}{D}) \right]^2} - \frac{\alpha(D+3d)\Delta t}{4} + \\ + (1,5\eta P)^{2/3} \left[\frac{n_{\delta}}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{5,9417}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} - D_w} \right)} + \frac{n_{\delta t}}{2} \sqrt[3]{\left(\frac{6}{D_w} + \frac{2}{\frac{D_0}{\cos \alpha} + D_w + u_0} \right)} \right], \quad (1.11)$$

где e_n – начальный радиальный зазор; d и D – внутренний и наружный диаметры подшипника; α – коэффициент температурного расширения колец подшипника;

t – разность температур колец подшипника; R^* – радиус срединной поверхности полимерного покрытия; $E_{\text{пм}}$ – модуль упругости полимерного материала; $h_{\text{пм}}$ – толщина полимерного покрытия; N – натяг полимерного покрытия; D_0 – приведенный диаметр наружного кольца; D_w – диаметр шарика; η – коэффициент Кирхгофа; u_0 – деформация наружного кольца напротив центрального тела качения.

Требует рассмотрения вопрос влияния натяга полимерного покрытия на радиальный зазор и распределение нагрузки между телами качения в роликоподшипнике.

Вывод

Не изучен и требует исследования вопрос влияния натяга посадки «подшипник-корпус» на распределение нагрузки между телами качения в роликоподшипнике с посадкой, восстановленной полимерным материалом.

1.4 Полимерные композиционные материалы и технологическая оснастка для восстановления посадок подшипников качения в корпусных деталях

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) достаточно широко применяются при ремонте машин. Среди положительных свойств ПКМ необходимо отметить достаточную прочность, масло-, бензо- и водостойкость, сохранение формы детали, способность выдерживать определенную нагрузку и температуру. Наряду с хорошими физико-механическими свойствами полимерные материалы позволяют снизить трудоемкость ремонта и технического обслуживания машин на 20-30% и сократить расход черных и цветных металлов, сварочных и наплавочных материалов на 40-50%. При использовании ПКМ не требуется сложное оборудование и высокая квалификация рабочих. Ремонт с использованием ПКМ возможен в условиях специализированных ремонтных предприятий, в мастерских хозяйств, и даже в полевых условиях [54...63].

Для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автотрак-

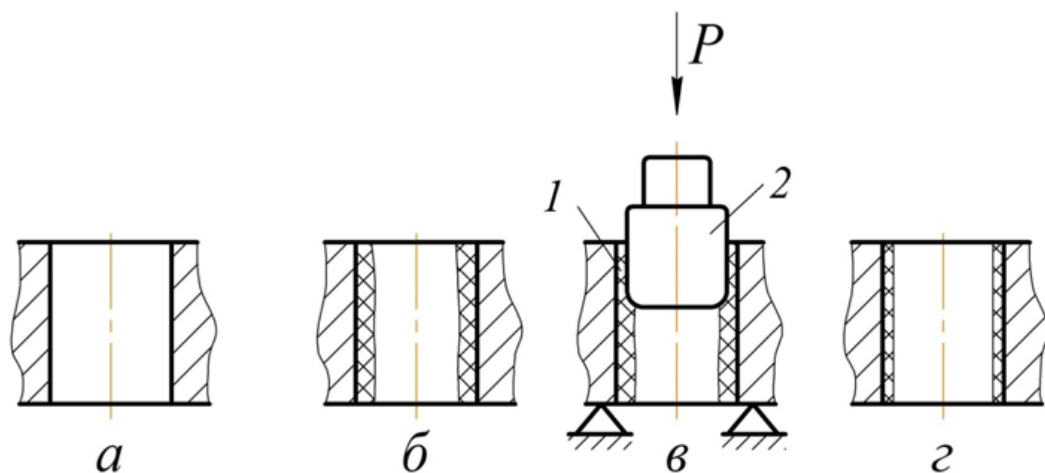
торной техники используют ПКМ на основе эпоксидных смол, эластомеров, анаэробных герметиков и акриловых адгезивов.

ГОСНИТИ разработана технология восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусных деталях с использованием ПКМ на основе эпоксидной смолы ЭД-16 (рисунок 1.12).

Технология включает следующие операции: очистка и обезжиривание поверхностей посадочных отверстий, приготовление эпоксидной композиции, нанесение композиции слоем толщиной 1...1,5 мм на поверхность отверстий, частичное отверждение до пластичного состояния, калибрование под заданный размер и форму, окончательное отверждение композиции, визуальный контроль качества покрытия.

Рекомендуются следующие составы композиции (в масс. ч.):

- эпоксидная смола ЭД-16 – 100, железный порошок – 120, портландцемент марки 500 – 60, олигоамид Л-19 – 35;
- эпоксидная смола ЭД-16 – 100, дибутилфталат – 15, железный порошок – 160, полиэтиленполиамин – 11.



а – изношенное отверстие; б – нанесение слоя эпоксидной композиции;
в – калибрование частично отвержденного слоя композиции (1 – эпоксидная композиция; 2 – калибр); г – покрытие после полного отверждения

Рисунок 1.12 – Схема последовательности этапов восстановления корпусной детали калиброванием

Приведенные составы применяются для восстановления посадочных отверстий под подшипники в корпусах коробок передач, раздаточных коробок, водяного насоса, в крышках распределительных шестерен двигателей и т.д. при износе отверстий до 0,2 мм.

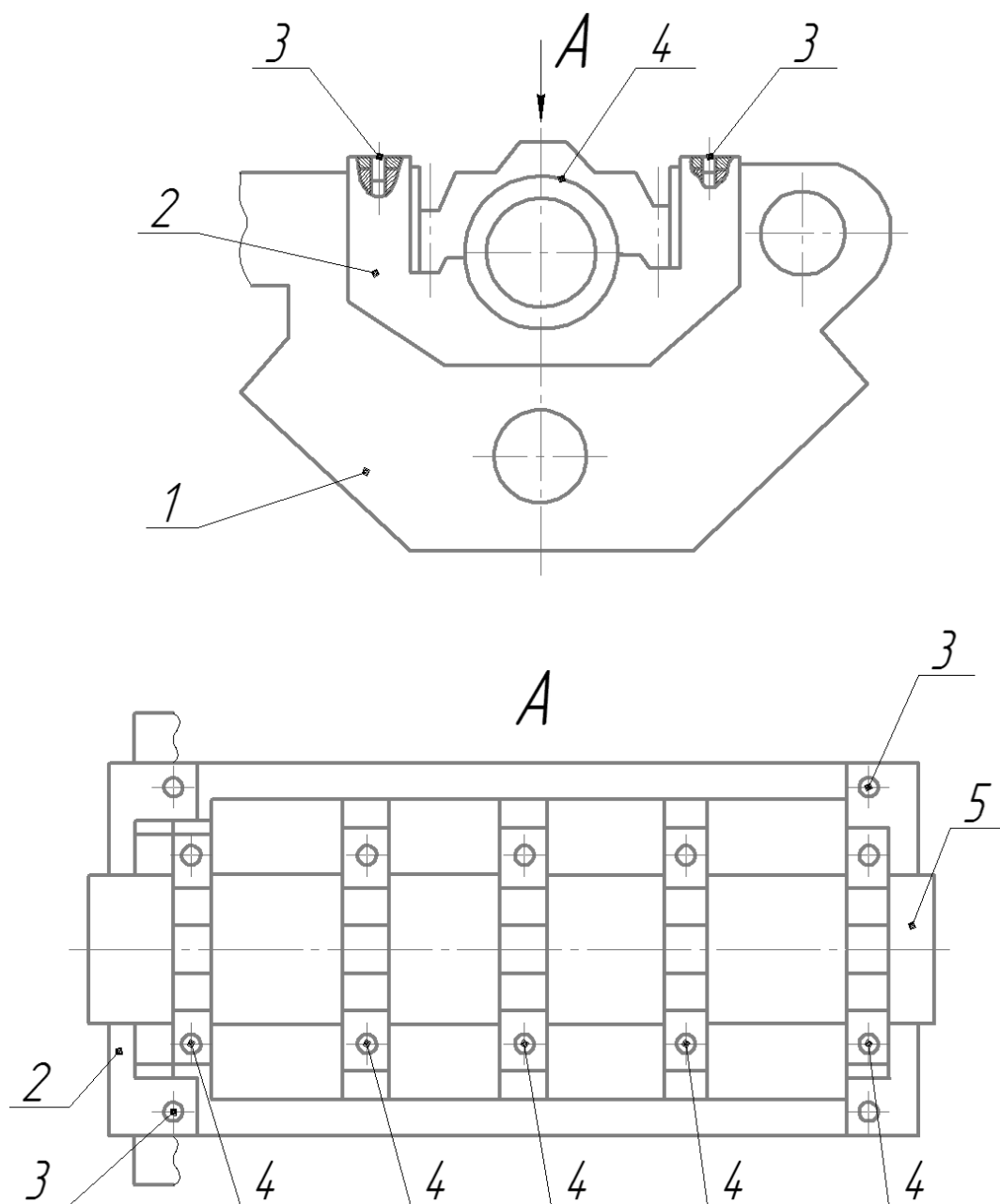
Такие полимерные покрытия имеют невысокий ресурс из-за того, что эпоксидная смола после отверждения находится в стеклообразном состоянии и является хрупкой. Поэтому в настоящее время технологию восстановления посадочных отверстий калиброванием эпоксидных составов практически не применяют.

Достаточно широкое распространение при восстановлении корпусных деталей получили анаэробные герметики и ПКМ на их основе. НИИ полимеров (г. Дзержинск) выпускает большую номенклатуру анаэробных герметиков марок «Анатерм» и «Унимгерм».

Котиным А. В. с сотрудниками разработан состав ПКМ на основе анаэробного герметика АН-6В. а так же технология восстановления изношенных отверстий в корпусных деталях [60]. В качестве наполнителя используется медный порошок при следующем соотношении компонентов: анаэробный герметик АН-6В – 99...98,5 масс.ч., медный порошок – 1... 1,5 масс.ч. Способ применяют для восстановления гнезд под вкладыши коренных подшипников блоков цилиндров двигателей (рисунок 1.13). Композицию наносят на поверхности изношенных отверстий и формуют оправкой, установленной на опоры, привязанные к заводским технологическим базам. На плоскость разъема блока цилиндров 1 устанавливают специальные опоры 2 таким образом, чтобы установочные пальцы 3 вошли в технологические отверстия блока.

Предварительно зачищенные поверхности опор под вкладыши коренных подшипников и крышки обезжиривают. Затем на постели наносят композицию. После этого, на опоры 2 устанавливают скалку 5, предварительно смазанную маслом М-8, и закрепляют крышки подшипников 4. Полимеризацию осуществляют в течение 2 ч., после чего отворачивают болты крепления крышек, снимают их,

снимают скалку 5 и опоры 2 и проводят контроль качества восстановленных отверстий. Данное изобретение позволяет повысить износостойкость гнезд до 65% и в два раза повысить ресурс агрегата.



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

Рисунок 1.13 – Схема реализации способа восстановления корпусных деталей ПКМ [73]

В работе [64] предложен ПКМ на основе анаэробного герметика АН-111, со следующим составом: герметик – 78 масс. ч., наполнителями являются порошок акрилового лака АК-506 – 21,7 масс.ч. и наноразмерный порошок сплава железа с никелем – 0,22 масс.ч. Прочность клеевых соединений, выполненных ПКМ, составляет 28,2 МПа, что на 22% выше прочности соединений из ненаполненного герметика АН-111.

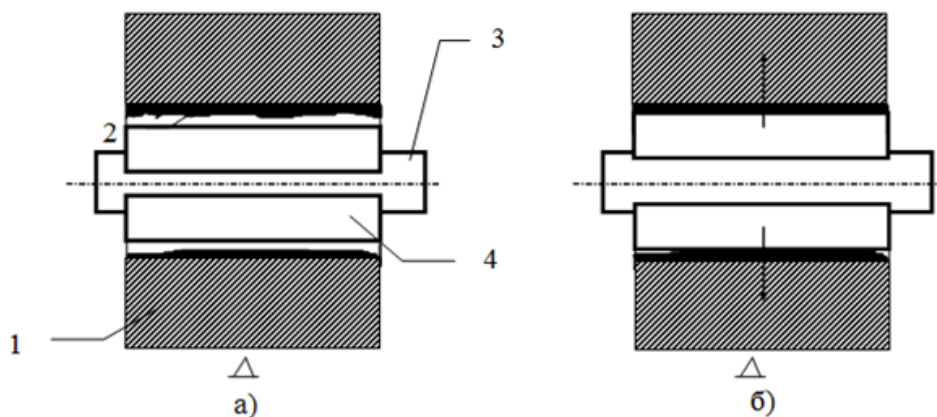
Кроме достоинств, данный ПКМ имеет и недостатки: наноразмерные порошки имеют высокую стоимость; требуется высокая точность отбора компонентов; прочность клеевых соединений, выполненных ПКМ, в сравнении с прочностью клеевых соединений с ненаполненным герметиком увеличивается незначительно; введение наполнителей не приводит к сокращению времени отверждения клеевых соединений ПКМ на основе герметика АН-111.

В работе Бочарова А.В. [63] разработан ПКМ на основе анаэробного герметика АН-112, который предназначен для восстановления посадочных мест тяжело нагруженных подшипников качения. Предложен состав ПКМ: анаэробный герметик АН-112 – 100 масс.ч., порошок алюминиевый ПАП-1 – 12 масс.ч., пудра бронзовая БПП – 0,35 масс.ч. Клеевые соединения, выполненные данным материалом имеют повышенную прочность, высокую скорость полимеризации, многократно (до 23 раз) улучшенную теплопроводность клеевого шва. Нагрев при циркуляционном нагружении посадок подшипников, восстановленных ПКМ на основе АН-112, уменьшился на 12°С. Температура восстановленного подшипника 209 по сравнению со стандартным подшипником с посадкой Js7/16 не превышала разницы в 3...5 °С. Ресурс клеевых соединений, выполненных ПКМ на основе АН-112 увеличился до 30%, в сравнении с ненаполненным герметиком АН-112.

Недостатком данной технологии является необходимость центрирования вала с подшипниками относительно корпусной детали. Проблема центрирования склеиваемых деталей существенно возрастает при восстановлении посадочных мест подшипников в корпусных деталях агрегатов трансмиссии. Сложно фиксировать вал в сборе с подшипниками и шестернями в вертикальном положении, выбирать технологические базы.

В работе Котина А.В. разработаны состав на основе анаэробного герметика Анатерм-6В и технология калибрования отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях. Предложен ПКМ с составом: герметик АН-6В – 100 масс.ч., тальк – 20 масс.ч., бронзовая пудра – 2 масс.ч. [60].

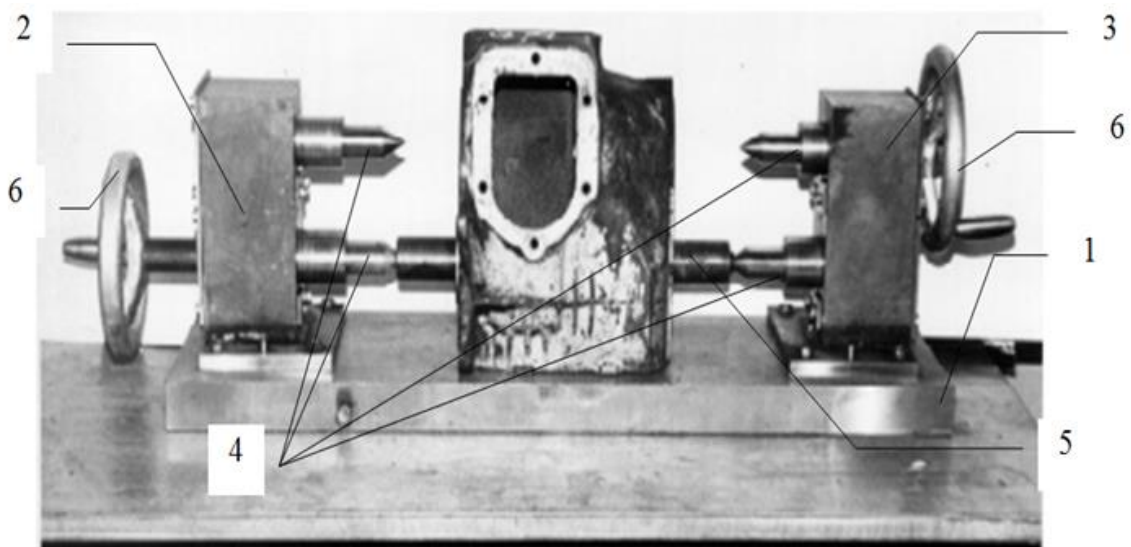
На рисунке 1.14 показана схема формирования композиции. Технология восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях включает следующие операции: 1) установка корпусной детали 1 на технологическую базу; 2) очистка и обезжиривание поверхностей посадочных отверстий; 3) нанесение слоя ПКМ; 4) формование отверстия с полимерным покрытием 2 под заданный размер, для чего в отверстие вводится оправка 3 с раздвижными кольцами 4, находящимися в сжатом состоянии. Затем кольца разжимают, и тем самым калибруют отверстие с полимерным покрытием под заданный размер. После завершения полимеризации ПКМ кольца сжимают, и оправка вынимается из отверстия.



а) оправка с кольцами в сжатом состоянии; б) калибрование полимерной композиции разжимающимися кольцами; 1 – корпусная деталь; 2 – слой полимерной композиции; 3 – оправка; 4 – раздвижные полукольца
Рисунок 1.14 – Схема формования полимерной композиции на поверхности изношенных отверстий корпусных деталей

Разработанное приспособление для восстановления отверстий в картере коробки передач автомобиля ГАЗ-53 показано на рисунке 1.15. На плите 1 закреп-

лены левая 2 и правая 3 стойки. У каждой стойки имеется два центра 4, с помощью которых центрируются скалки 5. Стойки могут перемещаться в горизонтальной плоскости при помощи маховиков 6. Расстояние между центрами – $100,62 \pm 0,05$ мм. Перекос и непараллельность общей оси центров на базовой длине 250 мм не превышает 0,04 мм. После нанесения полимерного материала на поверхности восстанавливаемых отверстий, рабочие поверхности скалок медленно вводятся в отверстия, разжимаются и полимерный слой калибруется под заданный размер. После отверждения композиции выводят конусы из оправок, скалки удаляют из восстановленных отверстий, и снимают деталь с приспособления.



1 – плита; 2 – левая стойка; 3 – правая стойка; 4 – центры;
5 – нижняя скалка; 6 – маховики

Рисунок 1.15 – Приспособление для восстановления изношенных отверстий корпуса коробки передач автомобиля ГАЗ-53 [60]

Эксплуатационные испытания показали, что средняя наработка на отказ опытной партии коробок передач составила 175980 км, что в 2,01 раза превышает аналогичный показатель у контрольной партии коробок передач, отремонтированных по типовой технологии (55100 км).

Достоинством анаэробных герметиков и ПКМ на их основе является высокая адгезия к черным металлами и скорость полимеризации. Основным техноло-

гическим недостатком является то, что материал полимеризуется лишь при отсутствии кислорода, поэтому наносить его и отверждать в виде покрытия на изношенных посадочных отверстиях корпусных деталей без специальной оснастки невозможно.

В работе Бутина А.В. предложен полимер-полимерный композиционный материал (ППКМ) на основе акрилового клея АН-105 [61]. Состав ППКМ: акриловый клей АН-105 – 100 масс.ч.; эластомер Ф-40 – 12 масс.ч. Ввод эластомера Ф-40 в полимерную матрицу АН-105 увеличил эластичность материала. Удельная работа разрушения при аксиальном сдвиге клеевых соединений увеличилась на 70%, по сравнению с ненаполненным клеем АН-105. Понижилась виброактивность подшипниковых узлов. Амплитуда вибрации подшипникового узла, восстановленного ППКМ, уменьшилась на 9%, в сравнении с узлом, восстановленным ненаполненным клеем. Благодаря эластомеру, существенно увеличилась выносливость и ресурс восстановленных посадок подшипников при циклическом нагружении. Максимально допустимый износ отверстия при восстановлении клеем АН-105 составляет 0,25 мм, а ППКМ на его основе – 0,3 мм. Ресурс подшипника с посадкой, восстановленной ППКМ на основе клея АН-105 при циклическом нагружении составляет 186,7 млн. об., что в 4,4 раза превышает расчетную долговечность и на 15% выше, чем при восстановлении ненаполненным акриловым клеем. Благодаря более низкой цене эластомера Ф-40 цена ППКМ на 13% ниже цены клея АН-105.

Хорошо зарекомендовали себя при восстановлении посадочных отверстий корпусных деталей эластомеры: герметик 6Ф, ГЭН-150(В) и эластомер Ф-40 [10, 16, 18, 52].

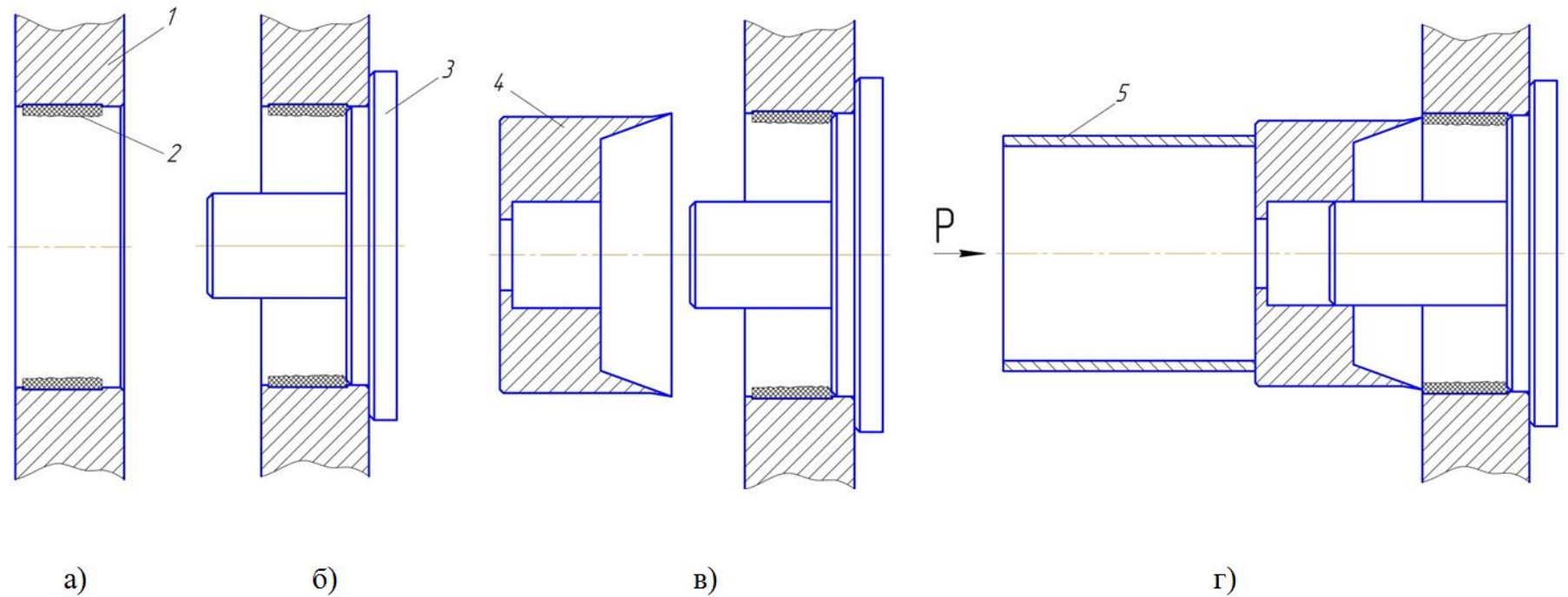
В работе Машина Д.В. разработан ПКМ на основе эластомера Ф-40С. Наполнителями послужили дисперсные алюминиевый и бронзовый порошки [65]. Состав ПКМ: эластомер Ф-40С – 87,0 масс.ч., алюминиевая пудра ПАП-1 – 16,0 масс.ч., бронзовый порошок БПП-1 – 1,8 масс.ч. При вводе металлических порошков модуль упругости материала увеличился на 11%, а адгезионные свойства возросли на 10%. Податливость опор, восстановленных композицией снизилась

до 1,37 раз, коэффициент теплопроводности вырос в 74 раза, по сравнению с ненаполненным эластомером.

Максимально допускаемый компенсируемый диаметральный износ отверстий увеличился до 0,25 мм (на 0,05мм выше чем с ненаполненным материалом). В технологию восстановления посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях разработанным ПКМ входят операции очистки, измерения и обезжиривания восстанавливаемых отверстий, приготовления полимерной композиции, нанесения композиции на поверхности отверстий, термической обработки полимерных покрытий и контроля качества.

Значительную роль в повышении качества восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях полимерными материалами играет вопрос обеспечения точности размеров восстановленных отверстий. В работе Кирсанова Ф. А. разработана технологическая оснастка, обеспечивающая повышение точности размера отверстий с полимерным покрытием [52]. В технологию восстановления входят операции по очистке восстанавливаемых отверстий, измерению отверстий и определения величины износа, обезжиривания поверхности отверстий, нанесения полимерного покрытия, термической обработки нанесенных покрытий, калибрования покрытий под заданный размер и форму и контроля качества полученных покрытий.

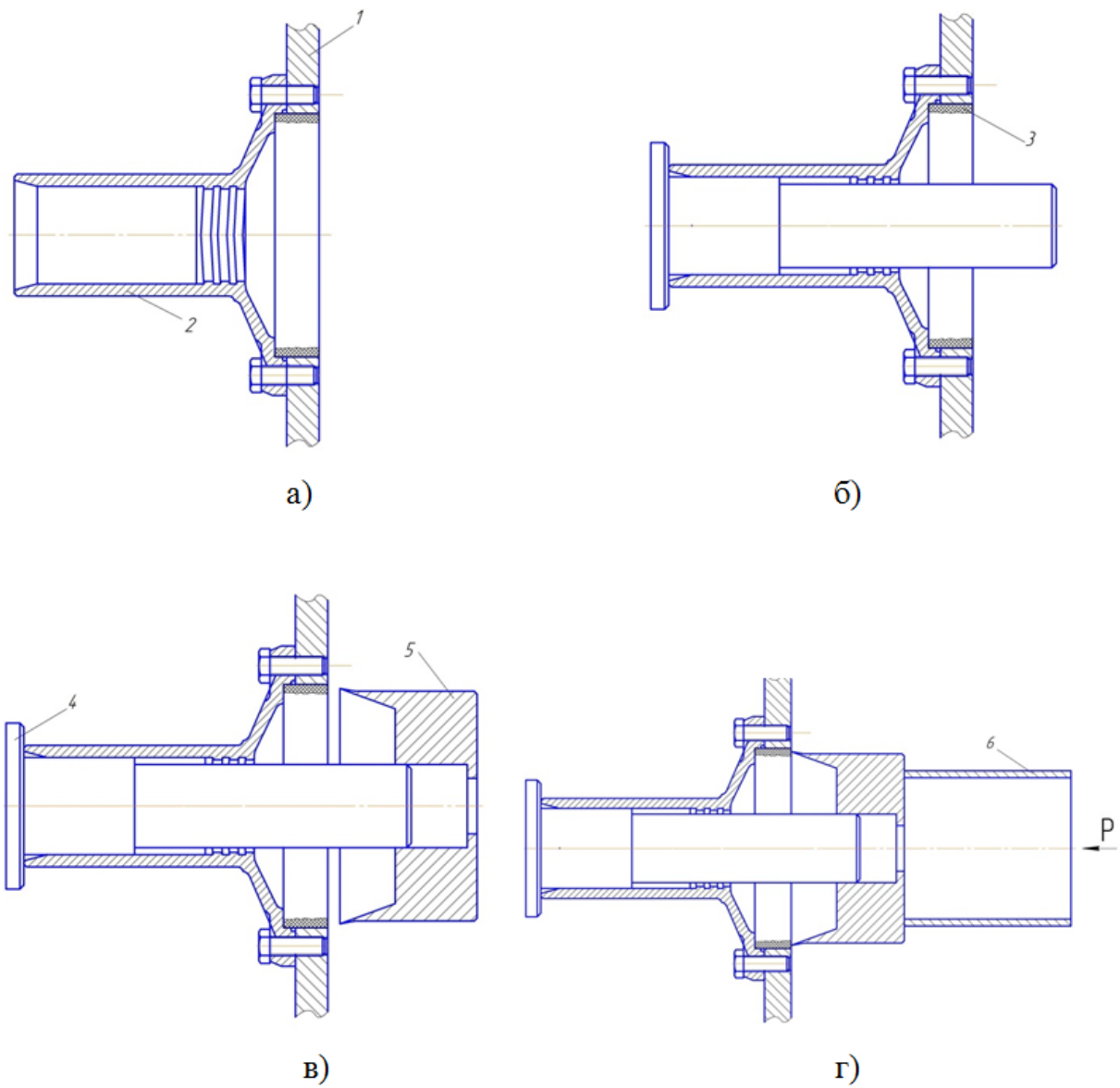
Калибрование выполняется следующим образом: в отверстие корпусной детали вставляют базирующую деталь. Центрирование оси базирующей детали относительно восстанавливаемого отверстия выполняют по не изношенной поверхности отверстия (рисунок 1.16). Если изношена вся поверхность отверстия, необходимо использовать технологическую базу присоединяемой детали, например, крышки подшипника (рисунок 1.17). Корпусную деталь поворачивают так, чтобы базирующая деталь установилась вертикально. Калибр одевают на хвостовик базирующей детали и при помощи монтажной трубы перемещают его вдоль отверстия с полимерным покрытием. При перемещении калибр своей режущей кромкой срезает излишки полимерного материала, чем обеспечивается заданный размер и форма отверстия с полимерным покрытием.



а – изношенное отверстие с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирующей детали в отверстие корпусной детали; в – установка калибра на хвостовик базирующей детали; г) калибрование;

1 – корпусная деталь; 2 – полимерное покрытие; 3 – базирующая деталь; 4 – калибр; 5 – монтажная труба

Рисунок 1.16 – Схема последовательности этапов калибрования отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали (подшипниковый щит, корпус водяного насоса двигателя) [52]



а – изношенные отверстия в корпусной детали и в крышке подшипника с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирющей детали в неизношенное отверстие сопрягаемой детали; в – установка калибра на хвостовик базирющей детали; г) калибрование;

1 – корпусная деталь; 2 – крышка подшипника 3 – полимерное покрытие;
4 – базирющая деталь; 5 – калибр; 5 – монтажная труба

Рисунок 1.17 – Схема последовательности этапов калибрования отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали (корпус коробки передач, корпус раздаточной коробки автомобиля или трактора) [52]

Автором предложены оптимальные геометрические параметры режущей кромки калибра: передний угол $\gamma = 70^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$, которые обеспечивают высокое качество и точность восстановленного отверстия: площадь разрушенного покрытия эластомера Ф-40С после калибрования составляет 4,2 %, а отклонение от круглости не более 3 мкм.

Достоинством технологии восстановления посадочных отверстий корпусных деталей эластомерами и ПКМ на их основе является простота. Полимерные покрытия наносят вручную кистью, поэтому не требуется специальное оборудование и высокая квалификация ремонтного персонала.

Недостатком эластомеров и ПКМ на их основе является необходимость термической обработки материала, что требует нагревательного оборудования, затрат электроэнергии, что повышает стоимость восстановления корпусных деталей.

Таким образом при восстановлении корпусных деталей ПКМ на основе анаэробных герметиков и акрилового адгезива АН-105 требуется специальная технологическая оснастка, обеспечивающая калибрование, формование или центрирование. При использовании ПКМ на основе эластомеров требуется нагревательное оборудование и дополнительный расход электроэнергии. Необходимо разработать полимерный композиционный материал, который можно наносить вручную кистью как эластомеры, и который отверждается при комнатной температуре, как анаэробные герметики и акриловые адгезивы. Следует разработать несложную технологическую оснастку для обеспечения заданной точности восстановленных отверстий с полимерным покрытием.

Выводы

1 Представляет научный и практический интерес разработка ПКМ, сочетающего в себе достоинства анаэробных и акриловых адгезивов и эластомеров.

2 Необходимо разработать несложную технологическую оснастку для обеспечения достаточной точности восстановленных полимерными материалами посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях автомобильного транспорта.

1.5 Выводы. Цель и задачи исследований

Ресурс подшипников качения зависит от величины контактных напряжений между телами и дорожками качения. Контактные напряжения зависят от нагрузки на тела качения и от размеров пятен контакта. В подшипниках нагрузка на центральное тело качения существенно выше нагрузки на боковые тела качения и от величины данной нагрузки зависит долговечность всего подшипника. Для повышения долговечности подшипника необходимо снизить контактные напряжения. Снижения контактных напряжений можно достигнуть перераспределением нагрузки на боковые тела качения (с соответствующим снижением нагрузки на центральное тело качения) и увеличением размеров пятна контакта.

Наиболее перспективным способом увеличения ресурса подшипниковых узлов и повышения эффективности восстановления корпусных деталей при ремонте автомобильного транспорта является применение полимерных материалов. Полимерное покрытие позволяет наружному кольцу подшипника деформироваться, что ведет к увеличению размеров пятен контакта и более равномерному распределению нагрузки между телами качения. При этом исключается фреттинг-коррозия, являющаяся основной причиной износа посадочных мест подшипников. Исследования шарикоподшипниковых узлов с полимерным покрытием показали значительное увеличение их ресурса (до 8 раз) по сравнению со стандартными подшипниками.

Наряду с шарикоподшипниками в агрегатах трансмиссии автомобильного транспорта широко используются роликоподшипники. Литературный обзор показал, что в отличие от шарикоподшипников, вопрос восстановления посадочных мест роликоподшипников полимерными материалами практически не исследован. Недостаточно изучено распределение нагрузки между телами качения, параметры контакта нагруженных тел с дорожками качения, долговечность роликоподшипников с посадками, восстановленными полимерными материалами. Не исследован вопрос влияния натяга полимерного покрытия на радиальный зазор и распределение нагрузки между телами качения в роликоподшипнике.

Существующие технологии восстановления отверстий под подшипники качения в корпусных деталях требуют сложной технологической оснастки для обеспечения требуемой геометрической точности отверстий. Полимерные материалы, применяемые для восстановления изношенных посадочных мест, либо имеют недостаточные деформационно-прочностные показатели при динамическом нагружении (эпоксидные смолы, анаэробные герметики), либо требуют термической обработки, что приводит к увеличению расхода энергии при ремонте (эластомеры).

Необходимо разработать полимерный композиционный материал, который сочетает в себе высокие деформационно-прочностные показатели при динамических нагрузках и не требует термической обработки. НИИ полимеров им. академика Каргина (Нижегородская область РФ) выпускается акриловый адгезив АН-110 с высокими прочностными показателями при статических нагрузках. Представляет научный и практический интерес эластификация акрилового адгезива АН-110 эластомерами, создание полимер-полимерной композиции с увеличенной ударной прочностью при динамических нагрузках, улучшенными деформационно-прочностными свойствами и, соответственно, обеспечивающей высокую долговечность восстановленных подшипниковых узлов.

Следует разработать несложную технологическую оснастку для обеспечения заданной точности восстановленных отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях агрегатов трансмиссии автомобильного транспорта.

Целью настоящей работы является повышение долговечности роликоподшипниковых узлов за счет снижения контактных напряжений в подшипнике, обеспечения высокого ресурса посадок подшипников при восстановлении посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильной техники полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110.

Задачи исследований:

1. Разработать теоретические предпосылки повышения долговечности роликоподшипников при восстановлении посадочных мест полимерным материалом.
2. Разработать новый полимер-полимерный композиционный материал на

основе акрилового адгезива АН-110 для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильного транспорта.

3. Исследовать деформационно-прочностные свойства, оптимизировать состав полимер-полимерной композиции на основе акрилового адгезива АН-110.

4. Исследовать параметры контакта нагруженных тел с дорожками качения и распределение нагрузки между телами качения в роликоподшипнике с посадкой восстановленной полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110.

5. Исследовать долговечность роликоподшипника с посадкой восстановленной полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110.

6. Исследовать долговечность при циклическом нагружении посадок роликоподшипников восстановленных полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110.

7. Разработать технологию и оснастку для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильного транспорта полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110 и оценить ее экономическую эффективность.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РОЛИКОПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

2.1 Параметры контакта в роликоподшипнике с полимерным покрытием

В роликоподшипнике пятно контакта ролика и дорожки качения имеет форму прямоугольника с осями l_p в направлении перпендикулярном качению и $2b_k$ в направлении качения (рисунок 2.1).

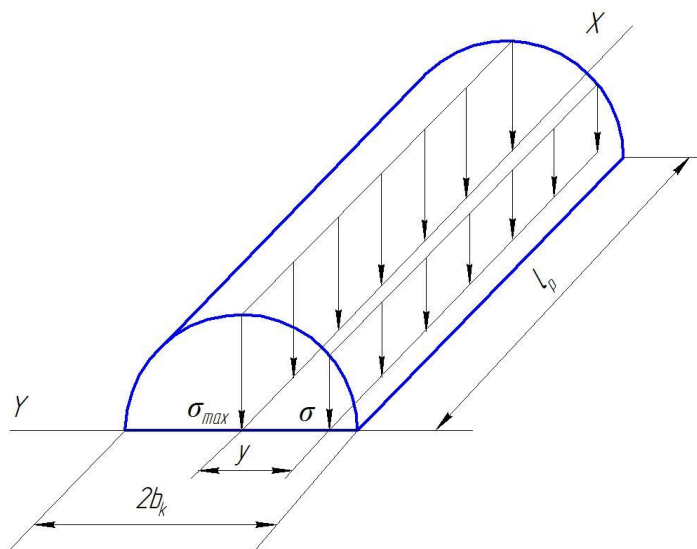


Рисунок 2.1 – Пятно контакта между телом и дорожкой качения в
роликоподшипнике [68]

Нормальные напряжения в любой точке пятна контакта можно рассчитать по формуле

$$\sigma = \frac{2P}{\pi l_p b_k} \left[1 - \left(\frac{y}{b_k} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где P – нагрузка на тело качения; l_p – длина ролика; b_k – половина ширины пятна контакта; y – расстояние от центра пятна контакта в направлении качения.

Очевидно, что максимальные контактные напряжения будут в центре пятна контакта и в этом случае формула примет вид

$$\sigma_{max} = \frac{2P}{\pi l_p b_k}, \quad (2.1)$$

Половина ширины пятна контакта в направлении качения

$$b_k = \left\{ \frac{4P}{\pi l_p \sum \rho} \left[\frac{1 - \varepsilon_I^2}{E_I} + \frac{1 - \varepsilon_{II}^2}{E_{II}} \right] \right\}^{1/2},$$

где ε_I и ε_{II} , E_I и E_{II} – коэффициенты Пуассона и модули упругости материала кольца подшипника и тела качения соответственно; $\sum \rho$ – сумма кривизн контактирующих тел, в данном случае дорожки качения и тела качения;

В общем случае (рисунок 2.2)

$$\sum \rho = \frac{1}{r_{I1}} + \frac{1}{r_{I2}} + \frac{1}{r_{II1}} + \frac{1}{r_{II2}};$$

При контакте ролика с наружным кольцом подшипника $r_{II1} = \infty$, $r_{III1} = \infty$, $r_{I2} = R_w$, где R_w – радиус ролика.

Тогда

$$\sum \rho = \frac{1}{R_w} + \frac{1}{r_{II2}}, \quad (2.2)$$

где r_{II2} – радиус дорожки качения в месте контакта с телом качения, в случае подшипника без полимерного покрытия $r_{II2} = D_1/2$, D_1 – диаметр дорожки качения определяется по справочной литературе.

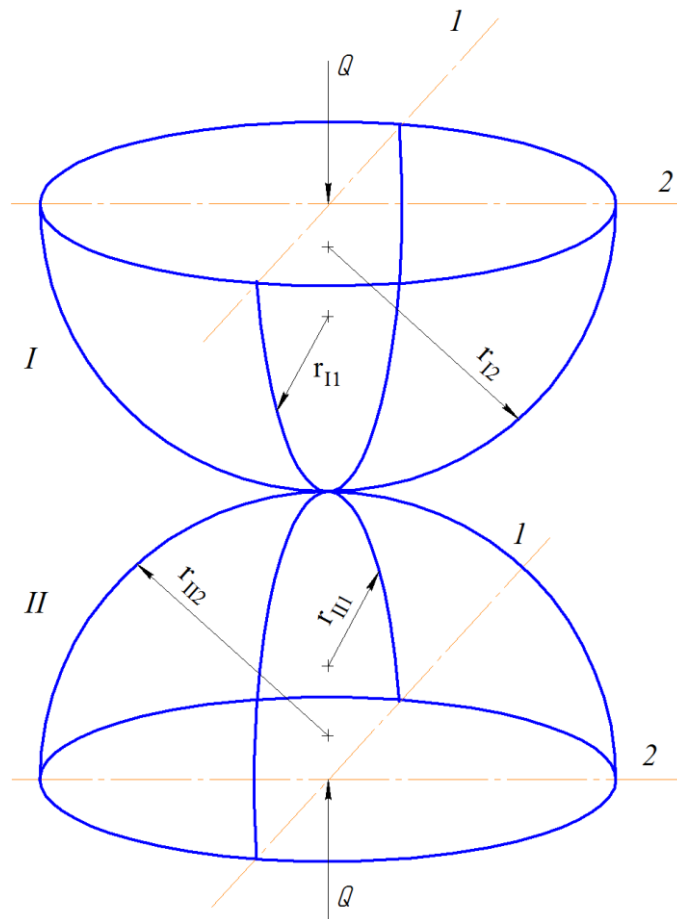


Рисунок 2.2 – Контакт тел вращения [68]

Обычно в подшипниках кольца и тела качения сделаны из одного материала, то есть $\epsilon_I = \epsilon_{II} = \epsilon$, $E_I = E_{II} = E$ и тогда

$$b_k = \left\{ \frac{8P}{\pi l_p \sum \rho} \left[\frac{1 - \epsilon^2}{E} \right] \right\}^{1/2}, \quad (2.3)$$

В подшипнике с полимерным покрытием, нанесенным на наружное кольцо, последнее при приложении радиальной нагрузки на подшипник деформируется. Деформация происходит в местах контакта тел качения и наружного кольца как показано на рисунке 2.3. Из-за этого радиус кривизны дорожки качения r_{II2} в месте контакта уже не равен половине диаметра дорожки. В определении радиуса r_{II2} заключается одна из основных проблем расчета параметров контакта в роликоподшипнике с полимерным покрытием на наружном кольце.

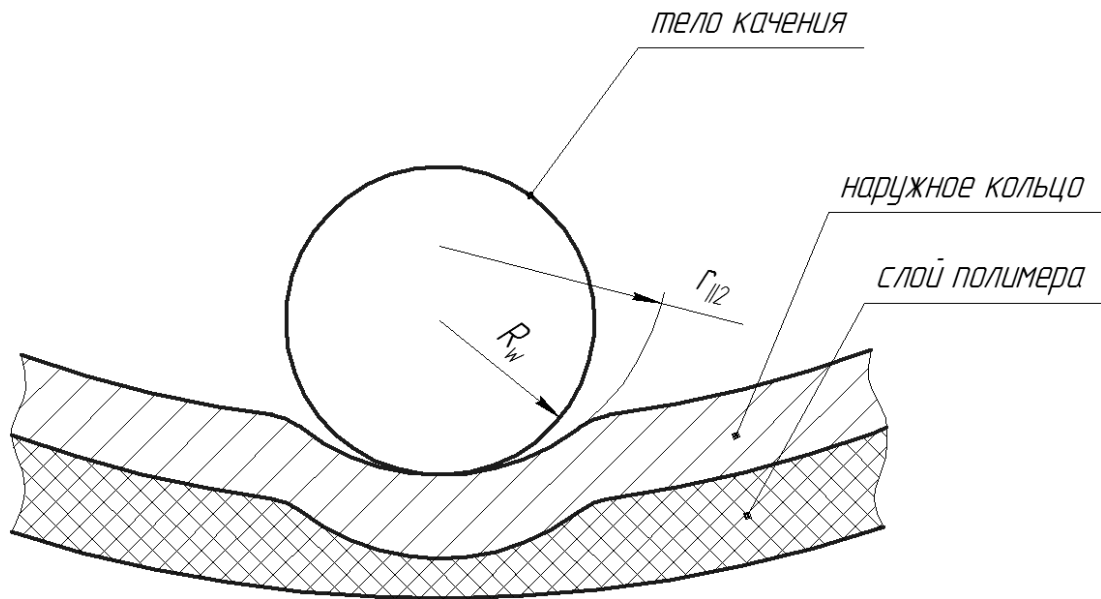


Рисунок 2.3 – Деформация наружного кольца роликоподшипника с полимерным покрытием

Для определения радиуса $r_{ш2}$ разрежем кольцо подшипника и представим его как балку на упругом основании [16, 69]. Под действием сосредоточенной силы, балка на упругом основании деформируется (рисунок 2.4).

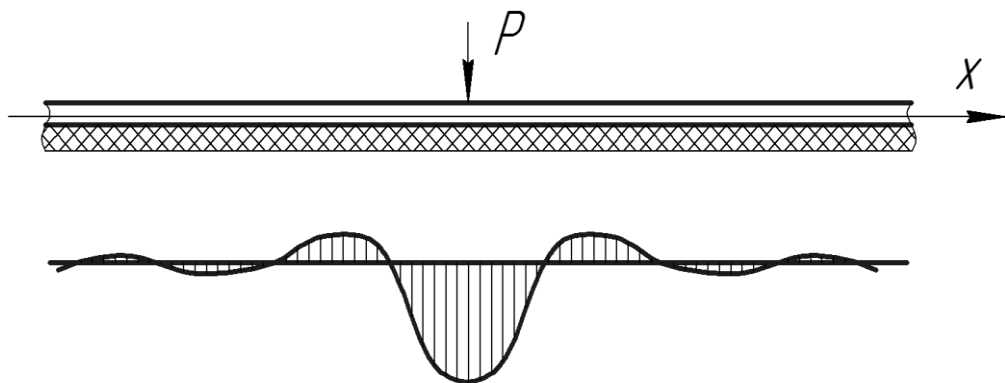


Рисунок 2.4 – Деформация балки на упругом основании

Деформированную форму балки можно описать уравнением. Уравнение балки на упругом основании при действии одной силы имеет вид [69]

$$y(x) = \frac{P}{8\beta^3 EJ} e^{-\beta|x|} (\cos \beta x + \sin \beta x).$$

В данном уравнении $y(x)$ – деформация (прогиб) балки в точке x ; P – сила, действующая на балку; β – коэффициент равный

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ}}, \quad (2.4)$$

где k – коэффициент постели, $k = k_n \cdot b_n$, где k_n – коэффициент податливости упругого основания, b_n – ширина наружного кольца подшипника; E – модуль упругости материала балки (наружного кольца); J – момент инерции сечения.

Используя уравнение балки на упругом основании можно вычислить значения прогиба балки y в любой точке балки и построить график деформации балки (рисунок 4). Под действием сосредоточенной силы P балка прогибается, и участок балки в месте прогиба имеет некоторый радиус кривизны. Вычислив значения прогиба в достаточном числе точек и аппроксимировав небольшой участок балки около точки приложения силы окружностью можно получить данный радиус.

При радиальном нагружении на наружное кольцо подшипника действует не одна сила, а несколько в зависимости от числа тел качения. В случае действия на балку системы сил $P_1, P_2, P_3 \dots P_j$ ($j=1, 2, 3 \dots N$) (рисунок 2.5), формула по определению прогибов, на основании теоремы о независимости действия внешних сил в упругих системах и теоремы о взаимности можно записать в виде [69]

$$y(x_i) = \sum_{j=1}^N \frac{P_j}{8\beta^3 EJ} e^{-\beta|x_i - x_j|} \{\cos(-\beta|x_i - x_j|) + \sin(-\beta|x_i - x_j|)\}, \quad (2.5)$$

где x_i – координата точки, в которой необходимо вычислить прогиб; x_j – координата точки в которой приложена сила P_j .

Начало координат располагается в точке приложения первой силы, а за абсциссу принимается расстояние от этой точки до того сечения, где необходимо вычислить прогиб балки.

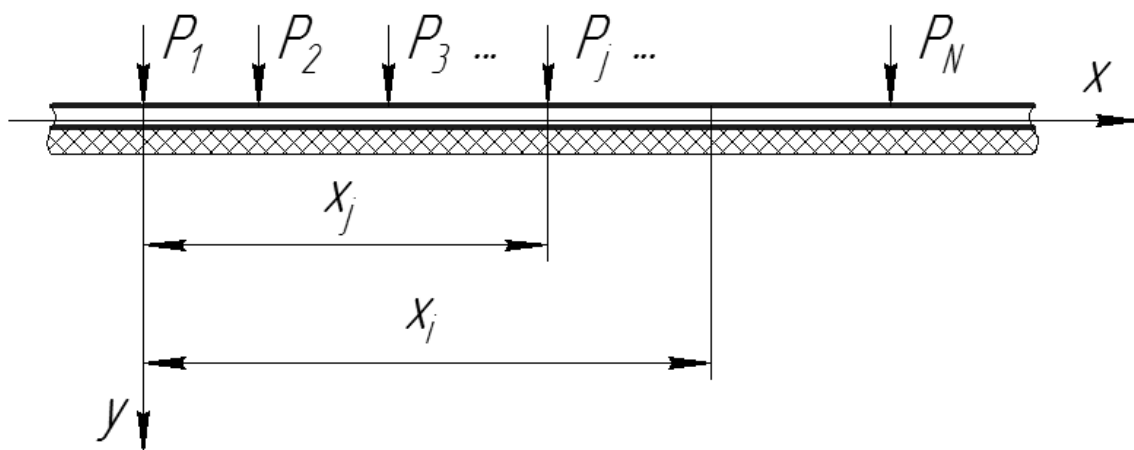


Рисунок 2.5 – Действие на балку системы сил

Для определения радиуса кривизны балки в точке прогиба аппроксимируем участок деформированной балки около точки приложения нагрузки окружностью. Рассчитаем данный радиус в точке приложения нагрузки от центрального тела качения. Будем учитывать нагрузки от центрального, первых и вторых боковых тел качения. Расчетная схема приведена на рисунке 2.6.

Здесь P_0 – нагрузка на балку от центрального тела качения;

$P_{11} = P_{12} = P_1$ – от первых боковых тел качения;

$P_{21} = P_{22} = P_2$ – от вторых боковых тел качения;

y_0 – прогиб балки под центральным телом качения;

l – расстояние между телами качения, определяемое по формуле

$$l = \frac{\pi D_1}{z},$$

где D_1 – диаметр дорожки качения наружного кольца; z – число тел качения в подшипнике.

Абсциссы точек приложения сил будут равны:

для силы P_{22} – $x_1=0$; для силы P_{12} – $x_2=l$; для силы P_0 – $x_3=2l$;

для силы P_{11} – $x_4=3l$; для силы P_{21} – $x_5=4l$.

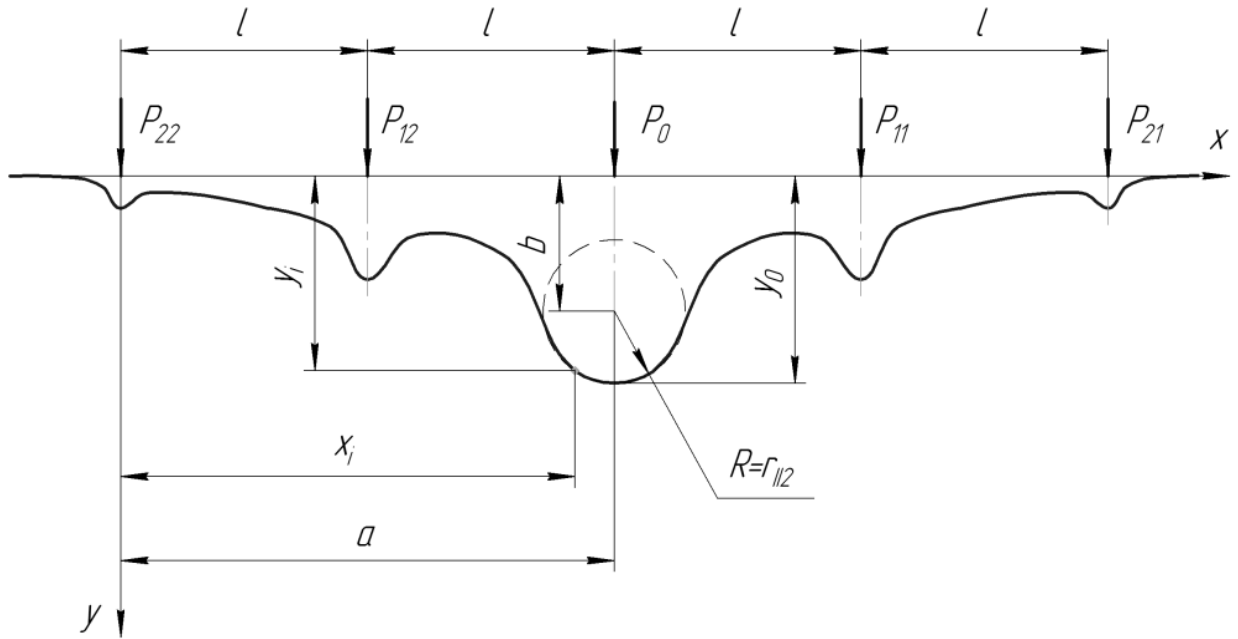


Рисунок 2.6 – Схема расчета радиуса кривизны балки r_{II2} в точке приложения нагрузки от центрального тела качения

Участок балки в месте контакта с центральным телом качения аппроксимируем окружностью. Уравнение окружности имеет вид

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 - R^2 = 0 ,$$

где a , b – координаты центра окружности; R – радиус окружности. В нашем случае $R = r_{II2}$.

Для решения задачи аппроксимации необходимо минимизировать функцию

$$F_1 = \sum_{i=1}^n ((x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2)^2 ,$$

где n – число точек, взятых для аппроксимации, x_i y_i – координаты этих точек [70].

Для упрощения расчетов ввели вспомогательные величины

$$B = -2a ; C = -2b ;$$

$$D = a^2 + b^2 - R^2 ;$$

$$z_i = x_i^2 + y_i^2 .$$

Тогда функция примет вид

$$F_1 = \sum_{i=1}^n (z_i + Bx_i + Cy_i + D)^2 .$$

Раскрыв скобки и произведя замены, описанные ниже, получили систему линейных уравнений

$$\begin{cases} \overline{xx}B + \overline{xy}C + \bar{x}D = -\overline{xz}; \\ \overline{xy}B + \overline{yy}C + \bar{y}D = -\overline{yz}; \\ \bar{x}B + \bar{y}C + D = -\bar{z}; \end{cases}$$

где

$$\begin{aligned} \overline{xx} &= \frac{1}{n} \sum x_i^2 ; \quad \overline{xy} = \frac{1}{n} \sum x_i y_i ; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i ; \quad \overline{xz} = \frac{1}{n} \sum x_i z_i \\ \overline{yy} &= \frac{1}{n} \sum y_i^2 ; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i ; \quad \overline{yz} = \frac{1}{n} \sum y_i z_i ; \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum z_i . \end{aligned}$$

Решив систему уравнений методом Гаусса, получили значения В, С и D и по ним вычислили координаты центра окружности а, b и радиус R

$$a = -\frac{B}{2} ;$$

$$b = -\frac{C}{2} ;$$

$$R = r_{II2} = \frac{\sqrt{B^2 + C^2 - 4D}}{2} .$$

Как видно, вышеприведенные формулы достаточно сложны для вычисления по ним, особенно если учесть, что для аппроксимации с хорошей степенью точности требуется большое количество точек.

Для упрощения и ускорения данных расчетов создана компьютерная программа (рисунок 2.7). При написании программы использовалась среда разработки Delphi 7.

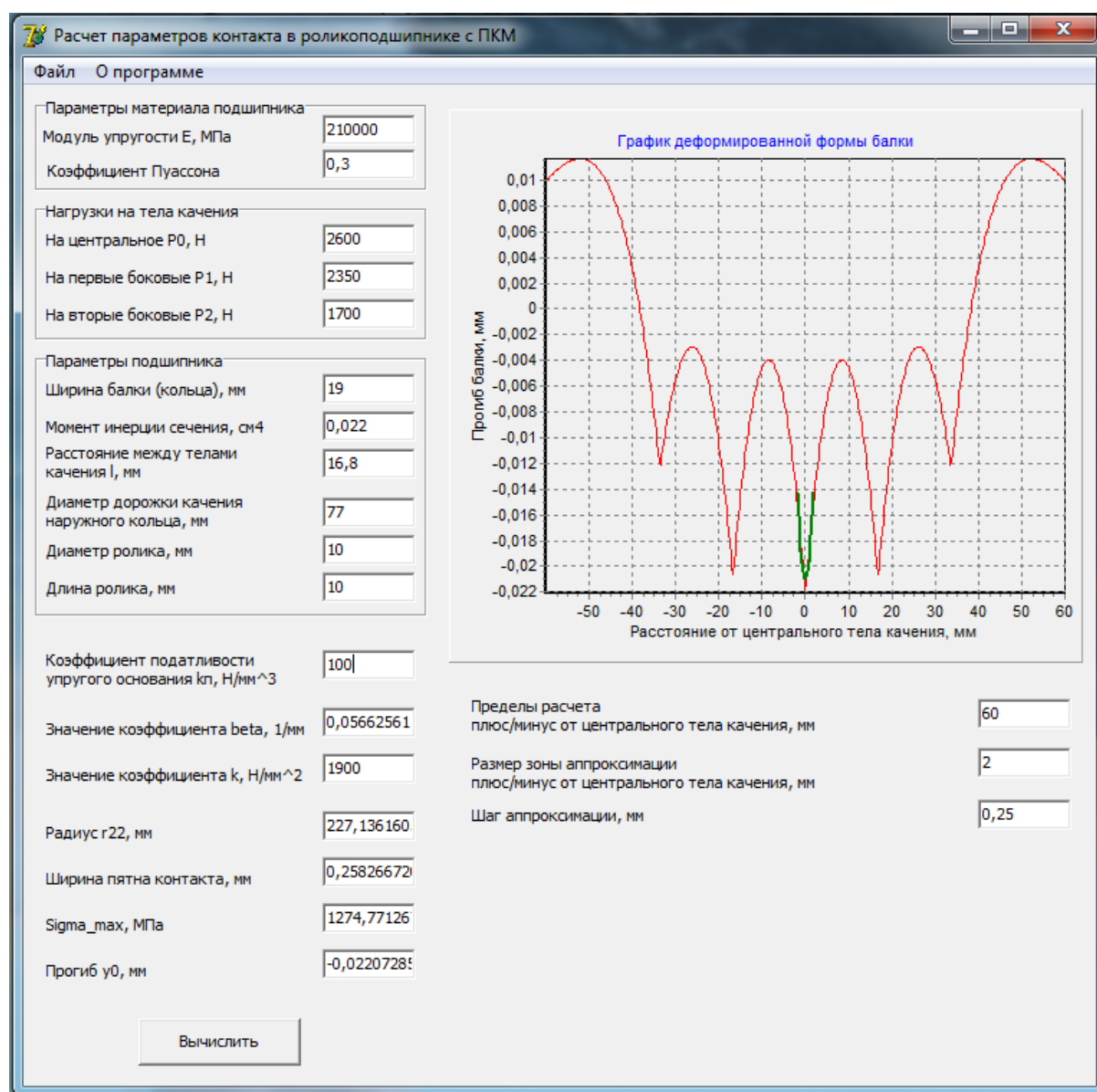


Рисунок 2.7 – Интерфейс программы для расчета контактных напряжений в зоне контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца роликоподшипника с полимерным покрытием

Программа учитывает нагрузки, передаваемые на наружное кольцо от центрального, первых и вторых боковых тел качения.

В качестве исходных данных для расчета необходимо ввести:

1) Параметры материала подшипника (модуль упругости и коэффициент Пуассона);

2) Нагрузки на тела качения;

3) Геометрические параметры подшипника:

- ширина наружного кольца;
- момент инерции сечения наружного кольца;
- диаметр дорожки качения наружного кольца;
- расстояние между телами качения;
- диаметр и длина ролика;

4) Коэффициент податливости упругого основания.

Затем необходимо ввести пределы расчета (построения графика), размер зоны и шаг аппроксимации. Размер зоны аппроксимации необходимо задавать таким, что бы аппроксимировался только участок около точки приложения силы, целесообразно принимать размер данной зоны равным $D_w/4$, где D_w – диаметр ролика.

Программа строит график деформации балки. Точки графика около центрального тела качения аппроксимируются окружностью и вычисляется радиус окружности $r_{п2}$. Затем по вышеприведенным формулам (1) и (2) вычисляются размеры пятна контакта и максимальное напряжение в месте контакта центрального тела качения с наружным кольцом.

В результатах расчета выводятся следующие данные:

- 1) Ширина пятна контакта $2b$;
- 2) Максимальное напряжение в пятне контакта;
- 3) Прогиб балки под центральным телом качения u_0 ;
- 4) Значения коэффициентов β и k .

Предусмотрена возможность сохранить график в графический файл и экспортировать данные в Microsoft Excel.

Используя созданную программу, проведены расчеты прогибов y_0 и радиусов кривизны кольца подшипника r_{12} под центральным телом качения для различных типоразмеров подшипников при различных нагрузках. В результате получили графики зависимостей радиусов кривизны от прогибов балки, приведенные на рисунке 2.8. В результате исследования графиков в специализированном программном обеспечении Advanced Grapher, выяснилось, что с большой степенью точности, полученные зависимости можно описать гиперболической функцией.

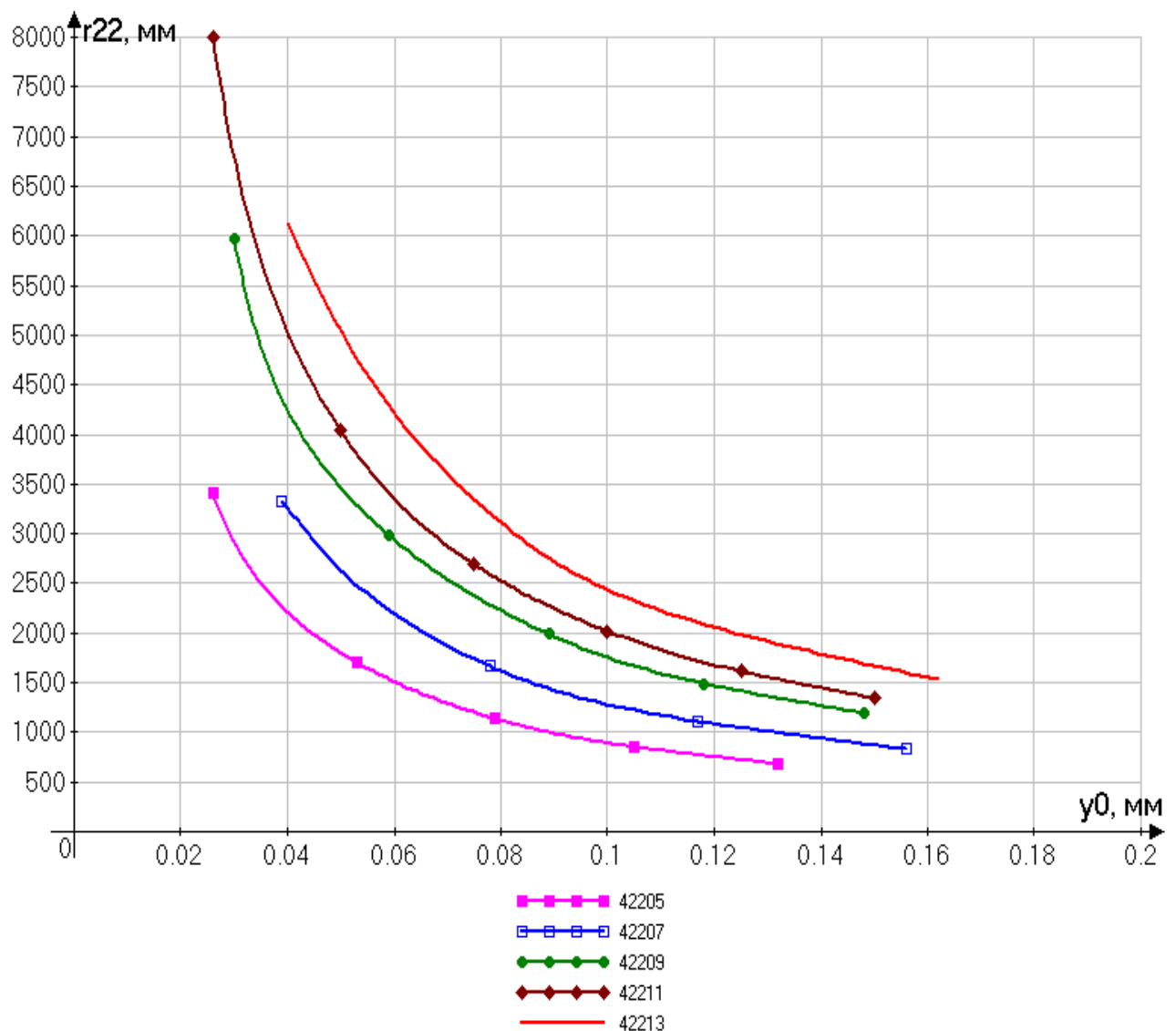


Рисунок 2.8 – Зависимость радиуса кривизны деформированного кольца подшипника r_{12} от прогиба кольца подшипника под центральным телом качения y_0

Данная зависимость имеет вид

$$r_{II2} = \frac{k_{кр}}{y_0}, \quad (2.6)$$

где $k_{кр}$ – коэффициент, зависящий от типоразмера подшипника и свойств полимерного покрытия. Назовем его коэффициентом кривизны.

Значения коэффициента кривизны для различных типоразмеров подшипников при значении коэффициента податливости основания $k_{\Pi} = 80 \dots 120 \text{ Н/мм}^3$ приведены в таблице 2.1. Как видим, коэффициент кривизны увеличивается с увеличением типоразмера подшипника.

Таблица 2.1 – Значения коэффициента кривизны $k_{кр}$ для различных типоразмеров подшипников

Типоразмер подшипника	42205	42207	42209	42211	42213
Коэффициент кривизны $k_{кр}$, мм ²	94	129	169	198	256

Из выражений (2.2) и (2.3) получили формулу для определения полуширины пятна контакта между центральным телом и дорожкой качения наружного кольца роликоподшипника с полимерным покрытием

$$b_{к0} = \left\{ \frac{8P_0 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)}{\pi l_p \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{r_{II20}} \right)} \right\}^{1/2}; \quad (2.7)$$

из выражений (2.1) и (2.7) получили формулу расчета максимального контактного напряжения вдоль площадки контакта

$$\sigma_{max0} = \sqrt{\frac{\sum \rho_0 \cdot P_0}{2\pi l_p \left(\frac{1-\varepsilon^2}{E}\right)}} = \sqrt{\frac{P_0 \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{r_{II20}}\right)}{2\pi l_p \left(\frac{1-\varepsilon^2}{E}\right)}}. \quad (2.8)$$

Выражение (2.5) для определения прогиба y_0 под центральным телом качения запишется в виде

$$y_0 = \frac{1}{8\beta^3 EJ} [P_0 e^{-\beta|x_3|} (\cos(-\beta|x_3|) + \sin(-\beta|x_3|)) + \\ + P_1 e^{-\beta|x_2|} (\cos(-\beta|x_2|) + \sin(-\beta|x_2|)) + P_1 e^{-\beta|x_4|} (\cos(-\beta|x_4|) + \sin(-\beta|x_4|)) + \\ + P_2 e^{-\beta|x_1|} (\cos(-\beta|x_1|) + \sin(-\beta|x_1|)) + P_2 e^{-\beta|x_5|} (\cos(-\beta|x_5|) + \sin(-\beta|x_5|))]$$

После преобразований получили

$$y_0 = \frac{1}{8\beta^3 EJ} [P_0 + 2P_1 e^{-\beta l} (\sin \beta l + \cos \beta l) + 2P_2 e^{-2\beta l} (\sin 2\beta l + \cos 2\beta l)] \quad (2.9)$$

Подставив в формулы (2.7) и (2.8) коэффициент кривизны $k_{кр}$ получили

$$b_{к0} = \left\{ \frac{8P_0 \left(\frac{1-\varepsilon^2}{E}\right)}{\pi l_p \left(\frac{1}{R_w} + \frac{y_0}{k_{кр}}\right)} \right\}^{1/2}; \quad (2.10)$$

$$\sigma_{max0} = \sqrt{\frac{P_0 \left(\frac{1}{R_w} + \frac{y_0}{k_{кр}}\right)}{2\pi l_p \left(\frac{1-\varepsilon^2}{E}\right)}}. \quad (2.11)$$

Подставив (2.9) в (2.10) и (2.11) и проведя преобразования, получили фор-

мулы для определения полуширины пятна контакта и максимальных напряжений в зоне контакта нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца роликоподшипника с полимерным покрытием

$$b_{к0} = \left\{ \frac{8P_0(1 - \varepsilon^2)}{\pi l_p E \left(\frac{1}{R_w} + \frac{P_0 + 2P_1 e^{-\beta l} (\sin \beta l + \cos \beta l) + 2P_2 e^{-2\beta l} (\sin 2\beta l + \cos 2\beta l)}{8k_{кр} \beta^3 E J} \right)} \right\}^{1/2} \quad (2.12)$$

$$\sigma_{max0} = \sqrt{\frac{P_0 E \left(\frac{1}{R_w} + \frac{P_0 + 2P_1 e^{-\beta l} (\sin \beta l + \cos \beta l) + 2P_2 e^{-2\beta l} (\sin 2\beta l + \cos 2\beta l)}{8k_{кр} \beta^3 E J} \right)}{2\pi l_p (1 - \varepsilon^2)}} \quad (2.13)$$

По полученным формулам можно определять размеры пятна контакта и максимальные контактные напряжения в месте контакта центрального тела и дорожки качения наружного кольца в роликоподшипнике с полимерным покрытием, нанесенным на наружное кольцо. Контактные напряжения в данной точке будут самыми высокими в подшипнике, так как нагрузка, передающаяся через центральное тело на дорожку качения наружного кольца больше нагрузок, передающихся от боковых тел качения ($P_0 > P_1 > P_2$). Поэтому от напряжения в контакте центрального тела с дорожкой качения будет зависеть долговечность всего подшипника. Ввиду сложности расчетов по полученным формулам, последние внесены в компьютерную программу (рисунок 2.7).

Выводы

1 Получены формулы (2.12) и (2.13) для расчета ширины пятна контакта и контактных напряжений нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом.

2 Разработаны метод и компьютерная программа расчета параметров контакта и контактных напряжений в роликоподшипнике с полимерным покрытием, позволяющая значительно упростить и ускорить данные расчеты.

2.2 Долговечность роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом

Известна формула зависимости долговечности подшипника качения от нагрузки [72]

$$nL = \left(\frac{C}{P}\right)^k, \quad (2.14)$$

где L – долговечность подшипника в часах; n – число оборотов вращающегося кольца в минуту; C – коэффициент работоспособности; P – нагрузка на подшипник; k – коэффициент, для роликоподшипников $k = 3,33$;

Коэффициент работоспособности равен

$$C = K'_1 z^{0,7} d_p l \cos \beta,$$

где K'_1 – коэффициент динамической стойкости, зависящий от типа подшипника, материала и точности изготовления, определяется по справочной литературе; z – число тел качения; d_p – диаметр ролика; l – длина ролика; β – угол контакта, для роликового радиального подшипника $\beta = 90^\circ$.

В случае линейного контакта соотношение между нагрузкой на тело качения и деформацией имеет вид

$$P_i = C_\delta \delta_i,$$

где i – тело качения ($i = 0$ – центральное тело качения; $i = 1$ – первое боковое тело качения; $i = 2$ – второе боковое и т. д.) δ_i – сближение с кольцами подшипника i -го тела качения; C_δ – коэффициент, зависящий от кривизны и упругих свойств материалов контактирующих тел.

Для подшипника с нулевым радиальным зазором из условия равновесия си-

стемы при внешней радиальной нагрузке на подшипник P можно записать соотношение нагрузок

$$P = P_0 \left(1 + 2 \sum_{i=1}^n \cos^2 i\gamma \right),$$

где P_0 – нагрузка на центральное тело качения; γ – угол между смежными телами качения;

Нагрузку на центральное тело качения подшипника с нулевым радиальным зазором можно определить по формуле

$$P_0 = \frac{P}{1 + 2 \sum_{i=1}^n \cos^2 i\gamma}.$$

Из данной формулы видно, что нагрузка на центральное тело качения зависит от внешней нагрузки P на подшипник и количества тел качения. Можно записать

$$P_0 = \frac{KP}{z}, \quad (2.15)$$

где K – коэффициент нагрузки на центральное тело качения, зависящий от типа подшипника и радиального зазора в подшипнике. Данный коэффициент характеризует величину нагрузки на центральное тело качения. Чем меньше его значение, тем нагрузка на центральное тело качения меньше.

Из формулы (2.15) можно выразить радиальную нагрузку

$$P = \frac{zP_0}{K}$$

и подставив полученное выражение в формулу (2.14) получили формулу для

определения долговечности через нагрузку на центральное тело качения

$$L = \frac{\left(\frac{KC}{zP_0}\right)^{3,33}}{n} \quad (2.16)$$

Из полученной формулы видно, что долговечность подшипника тем больше, чем меньше нагрузка на центральное тело качения при прочих равных условиях, то есть

$$L \sim \left(\frac{1}{P_0}\right)^{3,33}.$$

Однако в действительности подшипник имеет некоторый радиальный зазор e и на практике для роликоподшипников коэффициент $K \approx 4,6$. Слой полимерного материала можно нанести на наружное кольцо подшипника с таким расчетом, чтобы создать некоторый преднатяг при запрессовке подшипника в корпусную деталь, обеспечивающий уменьшение радиального зазора на заданную величину.

При наличии в подшипнике радиального зазора e общее смещение центра внутреннего кольца равно

$$w = \frac{e}{2} + \delta_0,$$

где δ_0 – сумма сближений наиболее нагруженного ролика с кольцами подшипника.

Для i -го шарика, участвующего в восприятии внешней нагрузки

$$\delta_i = w \cos i\gamma - \frac{e}{2}.$$

Для роликоподшипника с радиальным зазором радиальную нагрузку можно определить по формуле [72]

$$P = C_{\delta} \left\{ \delta_0 + 2 \sum_{i=1}^n \left[\left(\delta_0 + \frac{e}{2} \right) \cos i\gamma - \frac{e}{2} \right] \cos i\gamma \right\}$$

причем суммирование распространяется на слагаемые, для которых выполняется условие

$$\left[\left(\delta_0 + \frac{e}{2} \right) \cos i\gamma - \frac{e}{2} \right] > 0.$$

Это значит, что суммирование необходимо производить до определенного угла, равного произведению $i\gamma$, который зависит от δ_0 и радиального зазора e . Подставляя в данное выражение номера тел качения i при заданных δ_0 и e , при каком-то значении i выражение станет меньше нуля – на данном теле качения суммирование нужно прекратить.

В этом случае коэффициент K можно определить из соотношения

$$\frac{P}{C_{\delta} \frac{e}{2}} = \frac{\delta_0}{\frac{e}{2}} + 2 \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\delta_0}{\frac{e}{2}} + 1 \right) \cos i\gamma - 1 \right] \cos i\gamma. \quad (2.17)$$

Из данного соотношения можно определить δ_0 , а затем определить P_0 и коэффициент K

$$P_0 = C_{\delta} \delta_0,$$

$$K = \frac{z P_0}{P} = \frac{z C_{\delta} \delta_0}{P}.$$

Графически проанализировав уравнение (2.17), получили зависимости, показанные на рисунке 2.9. По оси абсцисс отложили левую часть уравнения – значения выражения $\frac{P}{c_{\delta} \frac{e}{2}}$, а по оси ординат – значения коэффициента K . Здесь построена кривая зависимости коэффициента K от значения отношения радиальной силы, действующей на подшипник, к величине зазора и коэффициенту, учитывающему кривизну и упругие свойства материала контактирующих тел.

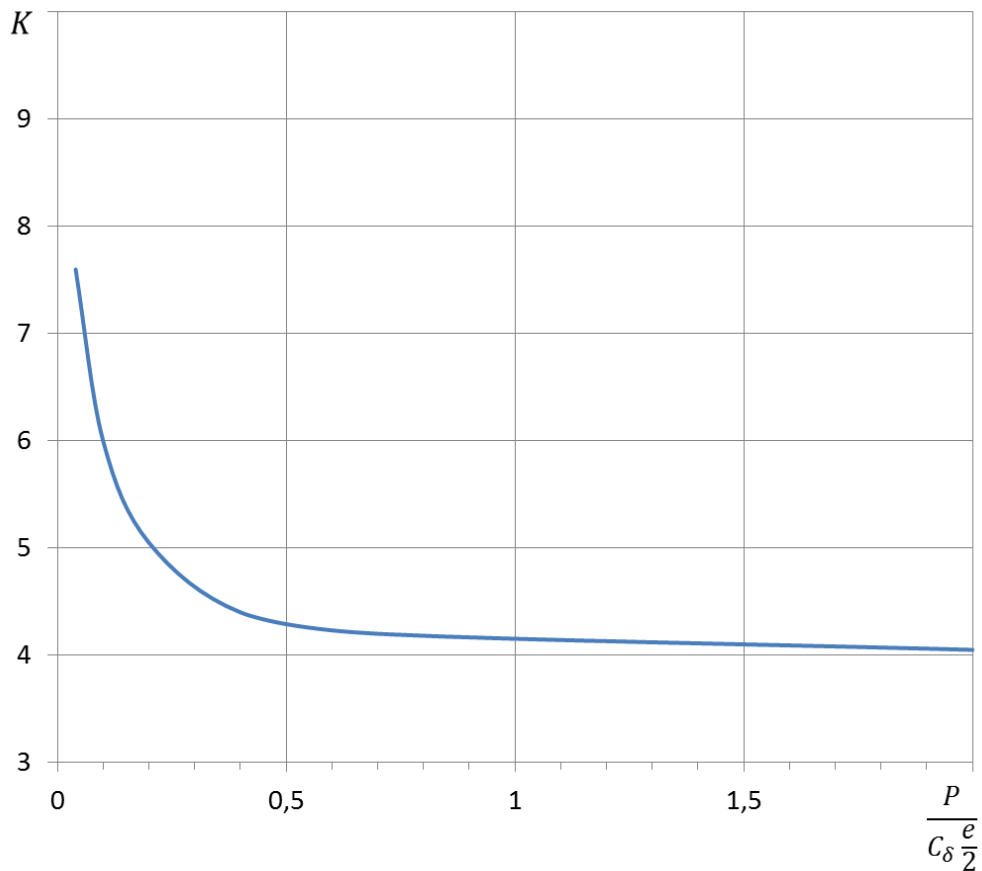


Рисунок 2.9 – Влияние радиального зазора на коэффициент K при линейном контакте

Как видно из приведенных графиков, наименьшее значение $K = 3,8$ достигается при некотором преднатяге (отрицательном радиальном зазоре) в подшипнике. В действительности, например, у стандартного подшипника 42209 радиальный зазор может достигать 55 мкм, а коэффициент $K = 4,6 \dots 4,7$ [68, 72]. Минимально допускаемый радиальный зазор определим из условия передачи нагрузки на боко-

вые тела качения. Для того, чтобы нагрузка передавалась на боковые тела качения необходимо выполнение условия [16]

$$y_0 - y_i = (\delta_0 - \delta_i) + e_i,$$

где y_0 и y_i – упругие радиальные деформации наружного кольца подшипника под центральным и i -м боковым телами качения соответственно; δ_0 и δ_i – суммарные контактные деформации колец подшипника и соответственно центрального и бокового i -го тел качения в радиальных направлениях;

e_i – радиальный зазор между кольцами подшипника и i -ым боковым телом качения при нулевом радиальном зазоре между центральным телом качения и кольцами подшипника

$$e_i = \frac{e}{2}(1 - \cos i\gamma);$$

Тогда необходимый оптимальный радиальный зазор, при котором условие передачи нагрузки на боковые тела качения выполняется

$$e = \frac{2(y_0 - y_i - \delta_0 + \delta_i)}{1 - \cos i\gamma}. \quad (2.18)$$

Расчеты и эксперименты показали, что при радиальной нагрузке $P = 9000$ Н в роликоподшипнике 42209 с полимерным покрытием при условии передачи нагрузки на первые и вторые боковые тела качения оптимальный радиальный зазор при работе должен составлять 17...22 мкм; при $P = 5000$ Н – 11...12 мкм.

Достичь таких значений радиального зазора в подшипнике с полимерным покрытием можно подбором толщины слоя полимера, чтобы при запрессовке подшипника в отверстие, обеспечивался оптимальный радиальный зазор в нем.

Обозначим коэффициент нагрузки на центральное тело качения стандартного подшипника K_C , а подшипника с полимерным покрытием – $K_{П}$. Тогда, учиты-

вая (2.15), можно записать соотношение

$$\frac{P_{0c}}{P_{0п}} = \frac{K_C}{K_{\Pi}}, \quad (2.19)$$

где P_{0c} и $P_{0п}$ – нагрузка на центральное тело качения в стандартном и подшипнике с полимерным покрытием соответственно. У подшипника с полимерным покрытием из-за натяга посадки, а следовательно и меньшего радиального зазора, значение коэффициента нагрузки на центральное тело качения будет меньше, так как он обратно пропорционален радиальному зазору, а значит $K_C / K_{\Pi} > 1$.

По соотношению $\frac{P}{C_{\delta} e}$ можно определить коэффициент K_{Π} для конкретно взятого подшипника при заданных радиальной нагрузке и зазоре. Назовем данное соотношение коэффициентом радиального зазора и обозначим как C_e , тогда значение радиального зазора в подшипнике равно

$$e = \frac{2P}{C_e C_{\delta}}. \quad (2.20)$$

Коэффициент C_{δ} в случае контакта цилиндрических тел, как в роликоподшипнике, рассчитывается по формуле [78]

$$C_{\delta} = \frac{\pi}{4} E l_p, \quad (2.21)$$

где E – модуль упругости материала подшипника; l_p – длина ролика.

Подставив (2.21) в (2.20) получили

$$e = \frac{8P}{\pi C_e E l_p}; \quad C_e = \frac{8P}{\pi e E l_p}. \quad (2.22)$$

То есть при заданном радиальном зазоре, значение коэффициента C_e зависит от радиальной нагрузки на подшипник и длины ролика. Из формулы (2.22)

при заданном радиальном зазоре и радиальной нагрузке на подшипник определяется коэффициент C_e , затем по рисунку 2.9 определяется коэффициент K и полученное значение подставляется в формулу (2.19) вместо K_{Π} . Например, для подшипника 42209 при радиальной нагрузке $P = 9000\text{Н}$, $e = 20$ мкм и при $P = 5000\text{Н}$, $e = 12$ мкм – $K_{\Pi} = 4,2$;

Вторым фактором, влияющим на распределение нагрузки между телами качения, является деформация наружного кольца подшипника. Слой полимера выполняет роль упругой прокладки и при приложении радиальной нагрузки на подшипник, наружное кольцо деформируется в эллипс с большей полуосью в направлении действия нагрузки. Вследствие этого нагрузка перераспределяется на боковые тела качения, а на центральное тело качения – снижается. Данную зависимость можно записать как отношение коэффициентов распределения нагрузок для стандартного (k_{pc}) и подшипника с полимерным покрытием (k_{pp}), определенные без натяга посадки полимерным покрытием.

Рассмотрим коэффициенты распределения нагрузки между центральным и первыми боковыми телами качения для данных подшипников

$$k_{pc} = \frac{P_{1c}}{P_{0c}}, \quad k_{pp} = \frac{P_{1п}}{P_{0п}},$$

где P_{1c} и P_{0c} – нагрузки на первые боковые и центральное тела качения в стандартном подшипнике, а $P_{1п}$ и $P_{0п}$ – в подшипнике с полимерным материалом.

Учитывая условие равновесия системы

$$2P_{1c} \cos \gamma + P_{0c} = 2P_{1п} \cos \gamma + P_{0п} = P.$$

Подставив коэффициенты распределения нагрузки получим

$$2P_{0c} k_{pc} \cos \gamma + P_{0c} = 2P_{0п} k_{pp} \cos \gamma + P_{0п} = P;$$

Проведя преобразования, получим отношение нагрузок на центральные тела качения в стандартном подшипнике и подшипнике с полимерным покрытием, выраженное через коэффициенты распределения нагрузки

$$\frac{P_{0c}}{P_{0п}} = \frac{k_{рп} \cos \gamma + 0,5}{k_{рс} \cos \gamma + 0,5}. \quad (2.23)$$

Третьим фактором, влияющим на долговечность подшипников качения с полимерным покрытием, является локальная деформация наружного кольца подшипника в месте контакта с телами качения, в результате чего увеличиваются размеры пятна контакта и соответственно уменьшаются контактные напряжения.

Формулы для расчета контактных напряжений в контакте центрального тела качения и наружного кольца стандартного и роликоподшипника с полимерным покрытием имеют вид

$$\sigma_{0c} = \frac{2P_{0c}}{\pi l_p b_{к0c}}, \quad \sigma_{0п} = \frac{2P_{0п}}{\pi l_p b_{к0п}},$$

где l_p – длина ролика; $b_{к0c}$, $b_{к0п}$ – половина ширины пятна контакта для стандартного и подшипника с полимерным покрытием соответственно;

Очевидно, что при одинаковой нагрузке на центральное тело качения в обоих подшипниках, т. е. $P_{0c} = P_{0п} = P_0$, напряжения будут линейно зависеть только от ширины пятна контакта $b_{к0}$. Можно записать

$$\frac{\sigma_{0c}}{\sigma_{0п}} = \frac{b_{к0п}}{b_{к0c}}.$$

Учитывая линейный характер зависимости контактных напряжений от ширины пятна контакта и нагрузки, представим, что в стандартном подшипнике на центральное тело качения для создания напряжения $\sigma_{0п}$ должна действовать экви-

валентная нагрузка P_x меньшая, чем P_0

$$\sigma_{0п} = \frac{2P_x}{\pi l_p b_{к0с}} = \frac{2P_0}{\pi l_p b_{к0п}}.$$

Выразим отсюда P_x

$$P_x = P_0 \frac{b_{к0с}}{b_{к0п}}.$$

То есть можно считать, что в подшипнике с полимерным покрытием нагрузка, действующая на центральное тело качения, из-за локальной деформации наружного кольца меньше аналогичной нагрузки в стандартном подшипнике в $\frac{b_{к0п}}{b_{к0с}}$ раз и можно записать соотношение

$$\frac{P_{0с}}{P_{0п}} = \frac{b_{к0п}}{b_{к0с}}. \quad (2.24)$$

Учитывая (2.19), (2.23) и (2.24) получим отношение нагрузок на центральные тела качения в подшипнике с полимерным покрытием и стандартном

$$\frac{P_{0с}}{P_{0п}} = \frac{K_C}{K_{П}} \cdot \frac{k_{рп} \cos \gamma + 0,5}{k_{рс} \cos \gamma + 0,5} \cdot \frac{b_{к0п}}{b_{к0с}};$$

Тогда отношение долговечностей рассматриваемых подшипников запишется в виде

$$\frac{L_{П}}{L_{С}} = \left(\frac{P_{0с}}{P_{0п}} \right)^{3,33} = \left(\frac{K_C}{K_{П}} \cdot \frac{k_{рп} \cos \gamma + 0,5}{k_{рс} \cos \gamma + 0,5} \cdot \frac{b_{к0п}}{b_{к0с}} \right)^{3,33};$$

Отсюда выразим долговечность роликоподшипника с полимерным покрытием

$$L_{\Pi} = L_{\text{с}} \left(\frac{K_{\text{с}}}{K_{\Pi}} \cdot \frac{k_{\text{рп}} \cos \gamma + 0,5}{k_{\text{рс}} \cos \gamma + 0,5} \cdot \frac{b_{\text{к0п}}}{b_{\text{к0с}}} \right)^{3,33}. \quad (2.25)$$

В полученной формуле множитель $\frac{K_{\text{с}}}{K_{\Pi}}$ учитывает влияние уменьшения радиального зазора на нагрузку, воспринимаемую наиболее нагруженным центральным телом качения в подшипнике с полимерным покрытием;

Множитель $\frac{k_{\text{рп}} \cos \gamma + 0,5}{k_{\text{рс}} \cos \gamma + 0,5}$ – учитывает перераспределение нагрузки между телами качения;

Множитель $\frac{b_{\text{к0п}}}{b_{\text{к0с}}}$ – учитывает увеличение размера пятна контакта из-за локальной деформации наружного кольца в месте контакта.

Из полученной формулы видно, что отношения коэффициентов и размеров пятен контакта возводятся в степень 3,33, и так как числители всех отношений больше знаменателей, то даже незначительное изменение данных параметров может привести к значительному увеличению ресурса подшипника.

Выводы

Получена формула расчета долговечности роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом (2.25), учитывающая влияние уменьшения радиального зазора от натяга посадки в подшипнике с полимерным покрытием на нагрузку, воспринимаемую центральным телом качения, перераспределение нагрузки между телами качения и увеличение размера пятна контакта из-за локальной деформации наружного кольца подшипника в месте контакта.

2.3 Расчет оптимального натяга посадки подшипника в отверстии с полимерным покрытием

Зазоры в подшипнике приводят к неблагоприятному распределению нагрузки между телами качения. Радиальный зазор в подшипниках качения с посадками,

восстановленными полимерными материалами, может быть уменьшен созданием предварительного натяга посадки. Требуемая величина натяга зависит от радиальной нагрузки, геометрических параметров подшипника и температурных условий его работы.

Для обеспечения заданного радиального зазора в подшипнике с полимерным покрытием необходимо создать натяг посадки. Определим радиальное перемещение (сжатие) наружного кольца роликоподшипника с полимерным покрытием при запрессовке в отверстие корпусной детали с натягом. Профессором Ли Р.И. полимерное покрытие рассматривается как цилиндрическая оболочка, которая за счет натяга полимерного покрытия N симметрично нагружена давлением Q (рисунок 2.10).

Прогиб цилиндрической оболочки ω определяют по формуле [18]

$$\omega = \frac{QR^{*2}}{E_{\text{пм}}h_{\text{пп}}}. \quad (2.26)$$

R^* – радиус срединной поверхности цилиндрической оболочки (полимерного покрытия); $E_{\text{пм}}$ – модуль упругости полимерного материала; $h_{\text{пп}}$ – толщина полимерного покрытия.

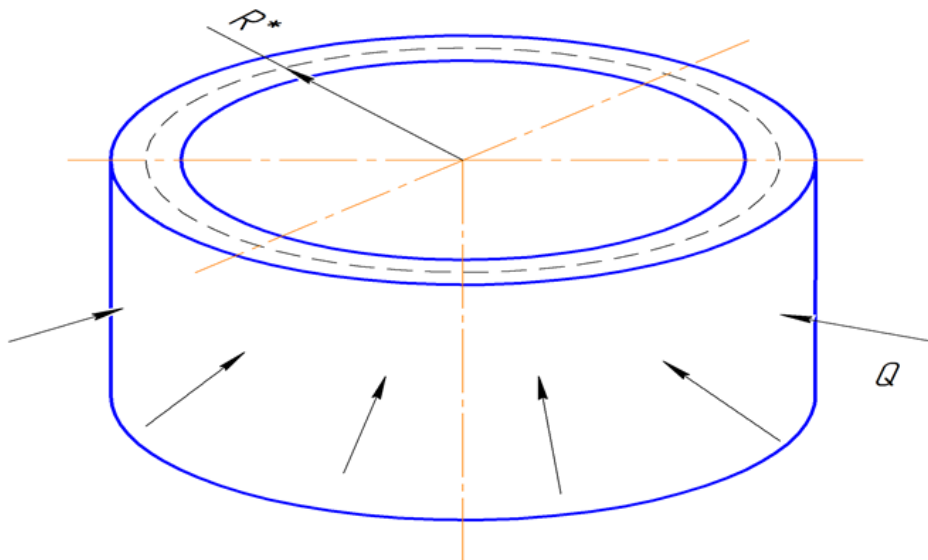


Рисунок 2.10 – Осесимметричное нагружение цилиндрической оболочки

Прогиб цилиндрической оболочки приравняем к натягу $\omega = N$, тогда из зависимости (2.26) определим давление Q

$$Q = \frac{E_{\text{пм}} N h_{\text{пп}}}{R^{*2}}. \quad (2.27)$$

По результатам эксперимента выяснилось, что формулу (2.27) необходимо скорректировать

$$Q = \frac{c E_{\text{пм}} N h_{\text{пп}}}{R^{*2}} \quad (2.28)$$

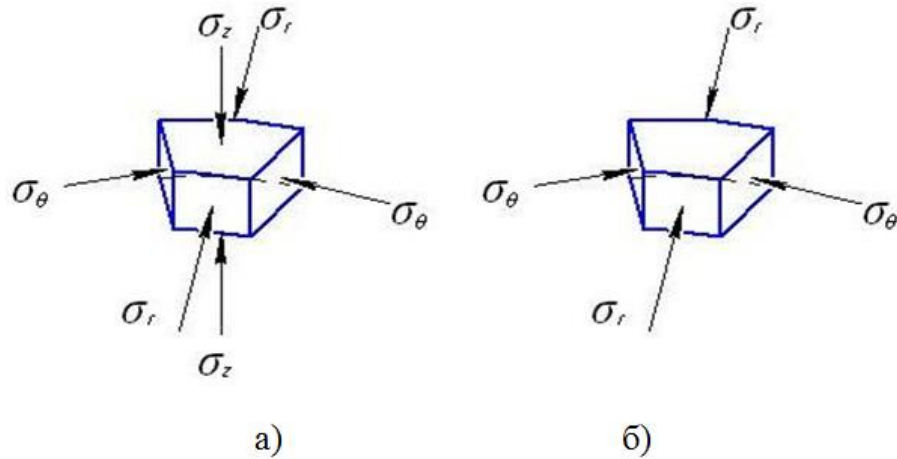
где c – поправочный коэффициент, для покрытий из композиции акрилового адгезива АН-110, коэффициент $c = 100 \dots 110$.

Представим наружное кольцо подшипника качения как толстостенную трубу (цилиндр) подвергаемую сжатию. Натягом полимерного покрытия создается осесимметричное давление Q на наружное кольцо подшипника и оно сжимается (рисунок 2.11). В данном случае напряжения и перемещения можно определить по формулам Ляме [83]

$$\sigma_{r\text{нк}} = 0, \quad \sigma_{\theta\text{нк}} = \frac{2Q}{1 - c^2}, \quad u = -\frac{2r_0 Q}{E(1 - k^2)}, \quad (2.29)$$

где $\sigma_{r\text{нк}}$ и $\sigma_{\theta\text{нк}}$ – радиальное и окружное напряжение в цилиндре (наружном кольце подшипника), соответственно; u – перемещение (на сторону) наружной поверхности цилиндра при сжатии; r_0 – внутренний радиус цилиндра; k – отношение внутреннего радиуса к наружному радиусу цилиндра.

Для определения по формуле (2.29) деформации u наружного кольца роликоподшипника от натяга полимерного покрытия, необходимо определить размеры поперечного сечения цилиндра, который эквивалентен по жесткости поперечному сечению наружного кольца роликоподшипника.



а) наружное кольцо при запрессовке; б) наружное кольцо после запрессовки

Рисунок 2.11 – Напряжения в наружном кольце подшипника

Момент инерции прямоугольного сечения определяется по формуле [75]

$$J_y = \frac{ba^3}{12},$$

где b – ширина сечения, в нашем случае ширина кольца подшипника; a – высота сечения, в нашем случае высоту сечения можно определить как разность наружного и внутреннего радиусов эквивалентного цилиндра, т. е. $a = R - r_0$, тогда можно записать равенство

$$J_{\text{цн}} = J_{\text{кн}} = \frac{b(R - r_0)^3}{12},$$

где $J_{\text{цн}}$ и $J_{\text{кн}}$ – моменты инерции сечений эквивалентного наружному кольцу цилиндра и наружного кольца подшипника.

Учитывая что $R = D/2$, D – наружный диаметр подшипника, выразим внутренний радиус эквивалентного цилиндра

$$r_0 = \frac{D}{2} - \sqrt[3]{\frac{12J_{\text{кн}}}{b}}. \quad (2.30)$$

Давление, создаваемое натягом полимерного покрытия приравняли к давлению на цилиндр. Подставив (2.28) и (2.30) в (2.29) и учитывая, что $k=r_0/R$ получили

$$u = \frac{2cE_{\text{пм}}Nh_{\text{пп}}\left(\frac{D}{2} - \sqrt[3]{\frac{12J_{\text{кн}}}{b}}\right)}{R^*{}^2E\left[1 - \left(\frac{\frac{D}{2} - \sqrt[3]{\frac{12J_{\text{кн}}}{b}}}{\frac{D}{2}}\right)^2\right]}.$$

После преобразований получили формулу для расчета деформации (сжатия) наружного кольца подшипника после его запрессовки в корпусное отверстие с натягом

$$u = \frac{cE_{\text{пм}}Nh_{\text{пп}}\left(D - \sqrt[3]{\frac{96J_{\text{кн}}}{b}}\right)}{R^*{}^2E\left[1 - \left(\frac{D - \sqrt[3]{\frac{96J_{\text{кн}}}{b}}}{D}\right)^2\right]}. \quad (2.31)$$

В работающем подшипнике радиальный зазор изменяется от контактной деформации между телами и дорожками качения, температуры и натяга посадки внутреннего кольца на вал. Радиальный зазор в работающем подшипнике определяют по формуле [73]

$$e = e_{\text{н}} - \delta_2 - K_t + \delta_0,$$

где $e_{\text{н}}$ – начальный радиальный зазор; δ_2 – уменьшение зазора из-за увеличения дорожки качения внутреннего кольца подшипника при его установке с натягом на вал; K_t – уменьшение зазора от разности температур в подшипнике, δ_0 – увеличение зазора из-за наличия контактных деформаций между телами и дорожками качения внутреннего и наружного колец подшипника.

С учетом деформации (сжатия) наружного кольца формула радиального зазора запишется в виде

$$e = e_n - \delta_2 - 2u - K_t + \delta_0. \quad (2.32)$$

Уменьшение зазора от разности температур в подшипнике

$$K_t = \alpha d_0 \Delta t, \quad (2.33)$$

где α – коэффициент линейного температурного расширения, для закаленной стали $\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$; d_0 – приведенный диаметр дорожки качения внутреннего кольца, мм; Δt – разность температур колец подшипника, °C;

Уменьшение зазора из-за увеличения дорожки качения внутреннего кольца подшипника при его установке с натягом на вал рассчитывают по формуле

$$\delta_2 = \frac{d\Delta}{d_0 F}, \quad (2.34)$$

где d – внутренний диаметра подшипника; Δ – натяг посадки подшипника на вал; F – поправочный коэффициент, для сплошного сечения вала $F = 1$.

Определим приведенный диаметр дорожки качения внутреннего кольца. Для внутреннего кольца подшипника можно записать

$$J_{цв} = J_{кв} = \frac{b(R_0 - r)^3}{12},$$

где $J_{цв}$ и $J_{кв}$ – моменты инерции эквивалентного внутреннему кольцу цилиндра и внутреннего кольца подшипника; R_0 – приведенный радиус дорожки качения внутреннего кольца, r – радиус внутреннего кольца подшипника; $r = d/2$, где d – внутренний диаметр подшипника; отсюда выразим приведенный радиус дорожки качения внутреннего кольца.

$$R_0 = \frac{d}{2} + \sqrt[3]{\frac{12J_{KB}}{b}}.$$

Тогда формула для определения приведенного диаметра дорожки качения внутреннего кольца запишется в виде

$$d_0 = d + \sqrt[3]{\frac{96J_{KB}}{b}}. \quad (2.35)$$

Подставив (2.35) в (2.33) и (2.34) получим формулу, по которой определяется уменьшение радиального зазора при установке внутреннего кольца подшипника с натягом на вал

$$\delta_2 = \frac{d\Delta}{d + \sqrt[3]{\frac{96J_{KB}}{b}}}, \quad (2.36)$$

и формулу расчета уменьшения зазора от разности температур в подшипнике

$$K_t = \alpha\Delta t \left(d + \sqrt[3]{\frac{96J_{KB}}{b}} \right). \quad (2.37)$$

Увеличение радиального зазора вследствие наличия контактных деформаций между телами и дорожками качения внутреннего и наружного колец подшипника рассчитывают по формуле

$$\delta_0 = \delta_B + \delta_H, \quad (2.38)$$

где δ_B – контактная деформация между телами и дорожкой качения внутреннего кольца подшипника; δ_H – контактная деформация между телами и дорожкой качения наружного кольца подшипника.

Контактную деформацию между телами и дорожкой качения внутреннего (наружного) кольца роликоподшипника определяют по формуле [72]

$$\delta = 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_i}{E} \left(\ln \frac{4R_{\text{дк}}R_w}{b_{\text{ки}}^2} + 0,814 \right) \quad (2.39)$$

где P_i – радиальная нагрузка на тело качения, Н; E – модуль упругости материала подшипника, МПа; $R_{\text{дк}}$ – радиус дорожки качения, мм; R_w – радиус ролика, мм; $b_{\text{ки}}$ – ширина пятна контакта, мм.

Так как наибольшая нагрузка в подшипнике приходится на центральное тело качения, долговечность всего подшипника будет определяться параметрами работы в зоне центрального тела качения. Поэтому рабочий радиальной зазор будем определять в зоне центрального тела качения.

Для контакта центрального тела качения с внутренним кольцом ширина пятна контакта рассчитывается по формуле [68]

$$b_{\text{кв}} = \left\{ \frac{8P_0}{\pi l_p \sum \rho} \left[\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right] \right\}^{1/2}, \quad (2.40)$$

где P_0 – нагрузка на центральное тело качения; l_p – длина ролика; ε – коэффициент Пуассона материала подшипника.

Сумма кривизн контактирующих тел

$$\sum \rho = \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_{0\text{в}}} = \frac{1}{R_w} + \frac{2}{d_1}, \quad (2.41)$$

где $R_{0\text{в}} = d_1/2$ – радиус дорожки качения внутреннего кольца подшипника, d_1 – диаметр дорожки качения внутреннего кольца, определяется по справочной литературе.

Подставив (2.40) и (2.41) в (2.39), получим формулу для расчета контактной деформации между центральным телом и дорожкой качения внутреннего кольца подшипника δ

$$\begin{aligned}\delta_{\text{в}} &= 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{4R_{0\text{в}}R_w}{b_{\text{кв}}^2} + 0,814 \right) = \\ &= 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{d_1 R_w \pi l_p \left(\frac{1}{R_w} + \frac{2}{d_1} \right)}{4P_0 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)} + 0,814 \right).\end{aligned}\quad (2.42)$$

Наличие полимерного покрытия в сопряжении "корпус-подшипник", приводит к деформации наружного кольца подшипника в местах контакта с телами качения. Радиус дорожки качения наружного кольца в продольном направлении в зоне контакта с центральным телом качения определим из формулы (2.6)

$$R_{0\text{н}} = \frac{k_{\text{кр}}}{y_0}, \quad (2.43)$$

где $k_{\text{кр}}$ – коэффициент кривизны; y_0 – деформация наружного кольца напротив центрального тела качения.

Деформация наружного кольца подшипника напротив центрального тела качения y_0 определяется по формуле (2.9). Контакт тела качения и наружного кольца роликоподшипника подробно рассмотрен в разделе 2.1. Ширину пятна контакта центрального тела и дорожки качения наружного кольца следует определять по формуле (2.10). Подставив (2.43) и (2.10) в (2.39), получили формулу для расчета контактной деформации между центральным телом и дорожкой качения наружного кольца подшипника $\delta_{\text{н}}$

$$\begin{aligned}\delta_{\text{н}} &= 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{4R_{0\text{н}}R_w}{b_{\text{кн}}^2} + 0,814 \right) = \\ &= 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{R_w \pi l_p \frac{k_{\text{кр}}}{y_0} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{y_0}{k_{\text{кр}}} \right)}{2P_0 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)} + 0,814 \right).\end{aligned}\quad (2.44)$$

Подставив (2.42) и (2.44) в (2.39), получили формулу для расчета контактных деформаций тел и дорожек качения внутреннего и наружного колец роликоподшипника

$$\delta_0 = 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{d_1 R_w \pi l_p \left(\frac{1}{R_w} + \frac{2}{d_1} \right)}{4 P_0 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)} + 0,814 \right) +$$

$$+ 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{R_w \pi l_p \frac{k_{кр}}{y_0} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{y_0}{k_{кр}} \right)}{2 P_0 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)} + 0,814 \right);$$

После преобразований получили

$$\delta_0 = 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{d_1 R_w^2 \pi^2 l_p^2 \frac{k_{кр}}{y_0} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{2}{d_1} \right) \left(\frac{1}{R_w} + \frac{y_0}{k_{кр}} \right)}{8 P_0^2 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)^2} + 1,628 \right). \quad (2.45)$$

Подставив в формулу (2.32) выражения (2.31), (2.36), (2.37) и (2.45) получили формулу расчета рабочего радиального зазора в роликоподшипнике с полимерным покрытием

$$e = e_H - \frac{d\Delta}{d + \sqrt[3]{\frac{96J_{KB}}{b}}} - \frac{2cE_{пм}Nh_{пп} \left(D - \sqrt[3]{\frac{96J_{KH}}{b}} \right)}{R^{*2}E \left[1 - \left(\frac{D - \sqrt[3]{\frac{96J_{KH}}{b}}}{D} \right)^2 \right]} - \alpha \Delta t \left(d + \sqrt[3]{\frac{96J_{KB}}{b}} \right) +$$

$$+ 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{d_1 R_w^2 \pi^2 l_p^2 \frac{k_{кр}}{y_0} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{2}{d_1} \right) \left(\frac{1}{R_w} + \frac{y_0}{k_{кр}} \right)}{8 P_0^2 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)^2} + 1,628 \right). \quad (2.46)$$

Из (2.45) выразили величину необходимого натяга полимерного покрытия N для получения оптимального радиального зазора e в работающем роликоподшипнике, при котором значение коэффициента K , а следовательно и нагрузка на центральное тело качения минимальны

$$N = \left[e_n - e + 0,579 \cdot \frac{P_0}{E} \left(\ln \frac{d_1 R_w^2 \pi^2 l_p^2 \frac{k_{кр}}{y_0} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{2}{d_1} \right) \left(\frac{1}{R_w} + \frac{y_0}{k_{кр}} \right)}{8 P_0^2 \left(\frac{1 - \varepsilon^2}{E} \right)^2} + 1,628 \right) - \right. \\ \left. - \frac{d \Delta}{d + \sqrt[3]{\frac{96 J_{KB}}{b}}} - \alpha \Delta t \left(d + \sqrt[3]{\frac{96 J_{KB}}{b}} \right) \right] \times \frac{R^2 E \left[1 - \left(\frac{D - \sqrt[3]{\frac{96 J_{KH}}{b}}}{D} \right)^2 \right]}{2 c E_{пм} h_{пп} \left(D - \sqrt[3]{\frac{96 J_{KH}}{b}} \right)}. \quad (2.47)$$

Расчеты показали, что при начальном радиальном зазоре $e_n = 45$ мкм в подшипнике 42209 (натяг посадки внутреннего кольца на вал приняли $\Delta = 25$ мкм [68], разницу температур колец подшипника – $\Delta t = 10^\circ\text{C}$) с полимерным покрытием толщиной $h_{пп} = 0,2$ мм, в диапазоне нагрузок $P = 5000 \dots 9000$ Н для достижения оптимального радиального зазора в работающем подшипнике, обеспечивающего передачу нагрузки на боковые тела качения, необходимо создать натяг полимерного покрытия $N = 35 \dots 40$ мкм. При этом посадочный радиальный зазор в подшипнике, смонтированном на валу и в корпусе составляет $e_n = 8 \dots 11$ мкм.

Вывод

Получена формула (2.47) для расчета оптимального натяга полимерного покрытия, при котором обеспечивается оптимальный радиальный зазор, снижение нагрузки на центральное тело качения и соответственно, увеличение ресурса роликоподшипника.

2.4 Обоснование выбора компонентов полимер-полимерного композиционного материала

В настоящее время для объяснения улучшения деформационно-прочностных свойств полимеров при введении в них эластификаторов предлагаются различные теории [84...90]. Ни одна из данных теорий, взятая отдельно, не позволяет полностью описать механизм упрочнения полимеров при введении эластификаторов. Тем не менее, многими экспериментальными исследованиями подтверждается повышение деформационно-прочностных свойств полимер-полимерных композиционных материалов при введении эластификатора в полимерную матрицу.

Основные положения данных теорий:

- частицы эластификатора служат препятствием для распространения трещины и инициируют образование множества микротрещин вместо одной большой трещины;
- энергия разрушения поглощается частицами эластификатора, в том числе в результате образования большого числа микротрещин;
- в результате разрушающей деформации образуется большое число крейзов – полимерная матрица принимает пористую структуру, нарушается сплошность образца, и в результате этого поглощается большое количество энергии;
- сдвиговая текучесть играет роль в поглощении энергии и прекращении роста трещины;
- перераспределение напряжений и релаксация.

По теории, развитой Мерцем [84], частицы каучука рассматриваются как препятствие на пути распространения трещины. С их помощью удерживаются вместе противоположные поверхности трещины, при этом частицы каучука деформируются, вытягиваются и, таким образом, замедляют препятствуют росту трещины. При этом возникает большое число микротрещин вместо одной катастрофической трещины. Данная теория объясняет способность упрочненных эластификаторами материалов достигать высоких значений деформации до разруше-

ния. Но она не объясняет каким образом происходит поглощение энергии при динамических нагрузках.

В настоящее время общепризнано, что поглощение энергии происходит практически целиком в полимерной матрице. Функция эластификатора состоит в том, что бы обеспечивать значительные концентрации напряжений в тех местах, где могут возникнуть локальные деформации.

Многие из наблюдаемых характеристик полимеров, упрочненных эластификаторами, объясняет теория мультиплетного крейзования. При крейзовании полимерная матрица приобретает пористую структуру. На это затрачивается большое количество энергии. Это связано с образованием поверхности большой площади при относительно малом содержании материала в пределах крейза. На образование 1 м^2 новой поверхности необходима энергия, приблизительно равная 1 кДж . Следовательно, при увеличении количества крейзов, в процессе разрушения, происходит значительное поглощение энергии.

Образование крейзов является первой стадией разрушения стеклообразных полимеров. При дальнейшем росте напряжений происходит разрушение пористой структуры крейзов и начинается образование трещины. При достижении трещиной критических размеров, происходит разрушение материала. Эластификатор не только способствует росту крейзов, но также и предотвращает или значительно затормаживает процесс образования трещины критической длины, что ведет к улучшению деформационно-прочностных свойств материала.

Крейзование не единственный механизм, объясняющий упрочнение материалов эластификаторами при растягивающих напряжениях. Помимо упругой деформации возникает сдвиговая текучесть, которая проявляется в форме полос сдвига. Полосы сдвига совместно с крейзами образуются в местах концентрации напряжений, которые возникают благодаря наличию частиц каучука. Сдвиговую текучесть следует считать не просто дополнительным механизмом деформации, а рассматривать её как часть единого процесса упрочнения. В сдвиговых зонах происходит ориентация молекул параллельно приложенному растягивающему напряжению и, соответственно, нормально к плоскостям, в которых происходит

образование крейзов. Рост крейзов замедляется вследствие ориентации молекул именно в этом направлении, и полосы сдвига вызывают торможение роста крейзов. При увеличении числа полос сдвига размеры образующихся крейзов уменьшаются.

Полного описания механики разрушения упрочненного эластификатором полимера в настоящее время не существует. В первом приближении механику разрушения можно описать формулами Гриффита. Обычно при появлении трещины возникает пластическая или вязкоупругая деформация в зоне ее вершины. Критерий Гриффита может быть применен в данном случае при допущении, что энергия, затрачиваемая на развитие трещины, пропорциональна площади разрушенной поверхности и не зависит от геометрии образца. В уравнение необходимо включить член, которым выражается работа пластической деформации. Стойкость материала к разрушению можно охарактеризовать, применив понятие критической скорости высвобождения энергии Ψ_{IC} , которая измеряется в джоулях на квадратный метр поверхности трещины. Так как при разрушении образуется две поверхности, то $\Psi_{IC} = 2\gamma$. Тогда модифицированный критерий Гриффита запишется в виде [84]

$$\sigma_{кр}^2 = \frac{2E\Psi_{IC}}{\pi a_{тр}(1 - \mu^2)},$$

где E – модуль упругости материала; γ – энергия, затраченная на образование единицы площади новой поверхности; $a_{тр}$ – длина трещины; μ – коэффициент Пуассона;

Данное уравнение верно при условии, что скорость высвобождения энергии Ψ_{IC} является только свойством материала и не зависит от геометрических параметров образца. При уменьшении Ψ_{IC} ниже некоторого критического значения, рост трещины прекратится. Для дальнейшего развития трещины, необходима дополнительная энергия.

Стойкость к разрушению упрочненных эластификаторами полимеров зависит в первую очередь от объемной доли эластификатора. В качестве примера можно привести эпоксидную смолу эластифицированную каучуком. На рисунке 2.12 показана зависимость между объемной долей каучука в эпоксидной смоле и энергией разрушения. Из приведенных данных видно, что с помощью малых количеств каучука, введенных в структуру полимера, можно увеличить его поверхностную энергию более чем в 10 раз.

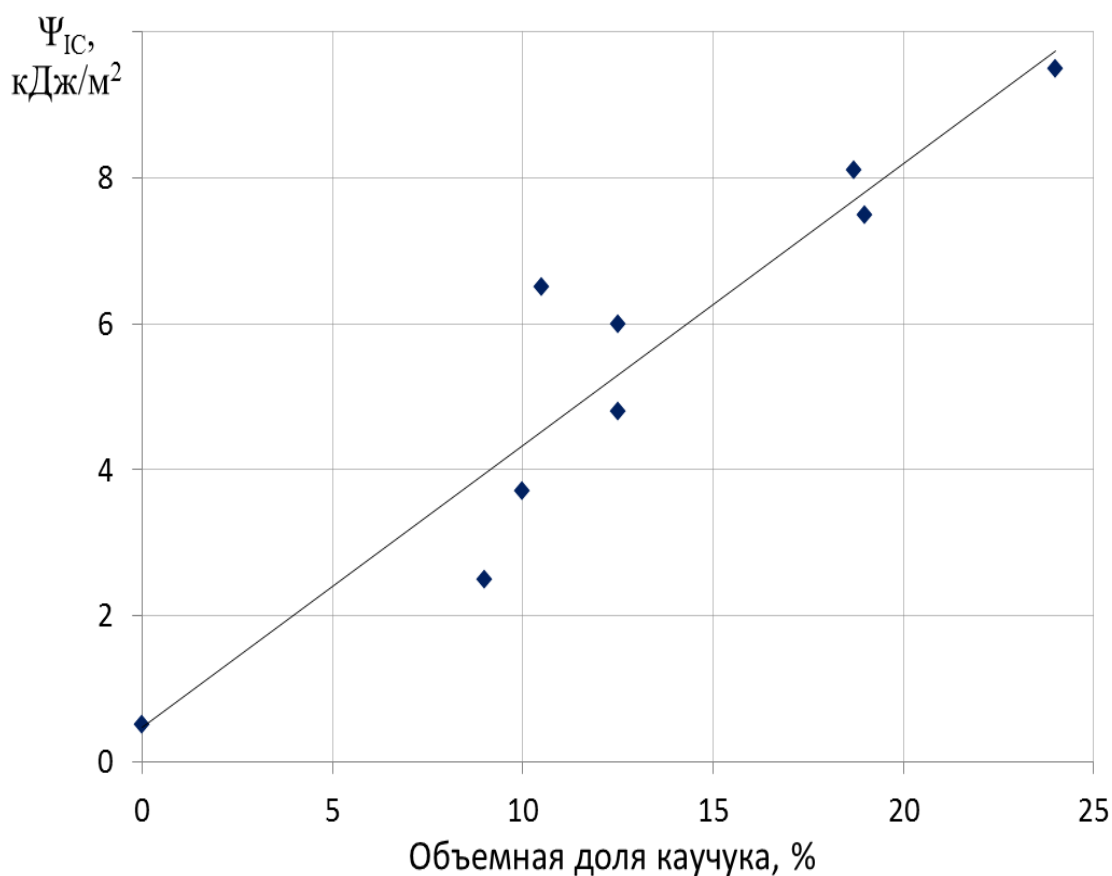
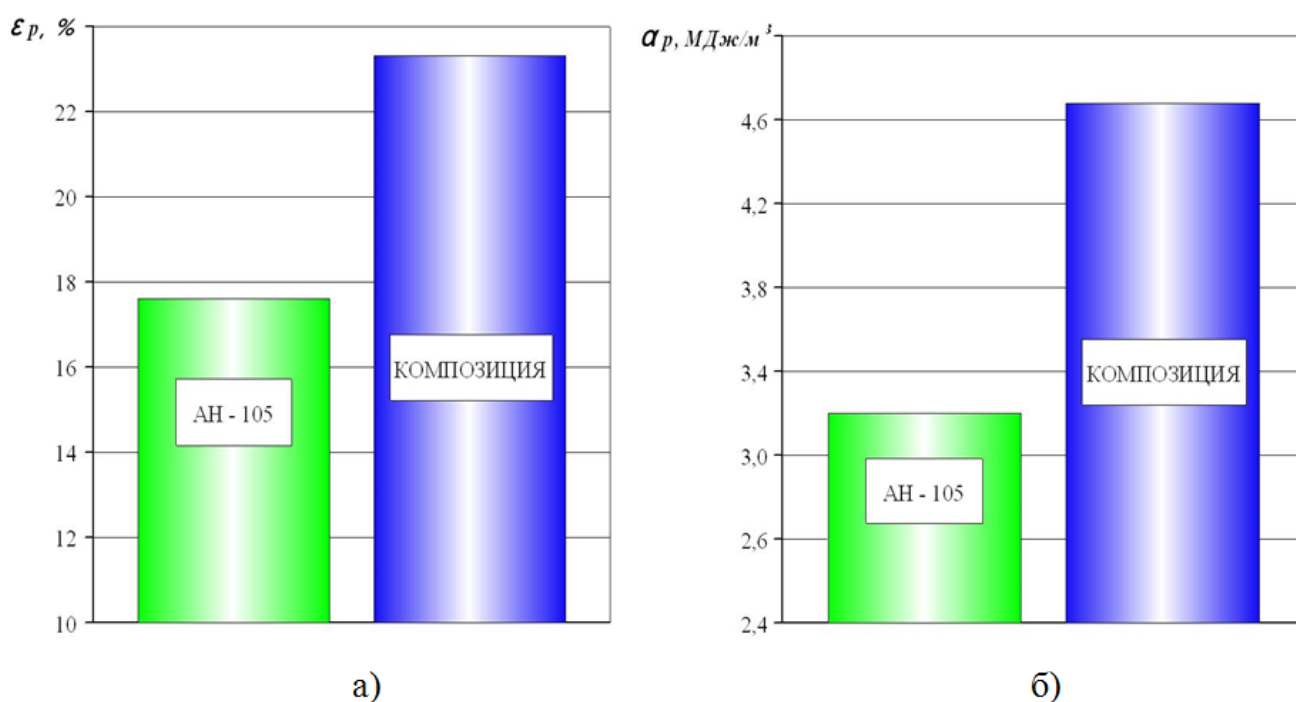


Рисунок 2.12 – Зависимость стойкости к разрушению эпоксидной смолы от объемной доли каучука [84]

В работе Бутина А. В. проведены исследования деформационно-прочностных свойств ППКМ на основе акрилового адгезива АН-105 с использованием в качестве эластификатора эластомера Ф-40. Деформационно-прочностные свойства композиции в сравнении с ненаполненным акриловым адгезивом приведены на рисунке 2.13. При введении эластификатора относительное

удлинение образцов возросло на 30%, а удельная работа разрушения выросла практически на 50%. Введение эластификатора увеличило деформационно-прочностные свойства акрилового адгезива. ППКМ на основе адгезива АН-105 рекомендуется для склеивания деталей, что требует центрирующих приспособлений, усложняет технологию восстановления. Об этом упоминалось ранее в разделе 1.4. Основным недостатком акрилового адгезива АН-105 является высокая цена (22 тыс. руб/кг).



а) – относительное удлинение; б) – удельная работа разрушения

Рисунок 2.13 – Деформационно-прочностные свойства пленок из акрилового адгезива АН-105 и композиции на его основе [61]

Представляет практический интерес новый акриловый адгезив АН-110, цена которого в 3 раза ниже АН-105 (8 тыс. руб/кг). Этот материал не использовался ранее для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автомобильного транспорта. Необходимо исследовать вопросы эластификации адгезива АН-110 эластомером Ф-40 и возможности нанесения полимер-полимерной композиции в виде покрытия.

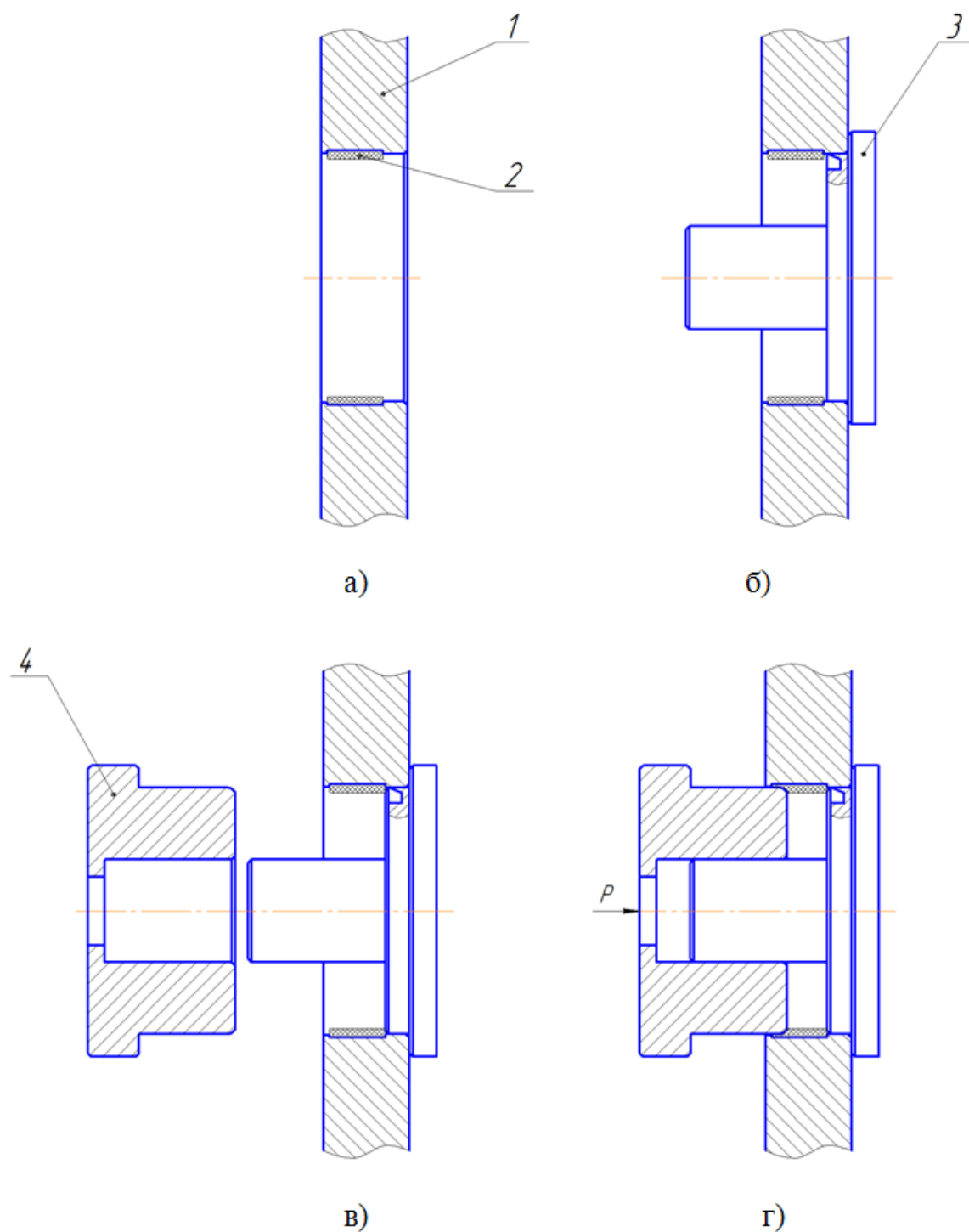
2.5 Способ калибрования отверстий с полимерным покрытием

Разработан способ калибрования отверстий полимерным покрытием в корпусных деталях.

Полимерное покрытие из акрилового адгезива АН-110 наносят послойно на поверхность отверстия кистью. Каждый слой просушивают в течение 2 минут до обретения полимером вязкого состояния. Количество слоев зависит от толщины наносимого покрытия. В среднем толщина слоя составляет 0,03 мм. В восстанавливаемое отверстие устанавливают базирующую деталь. Центрирование оси базирующей детали относительно оси восстанавливаемого отверстия выполняют по не изношенной поверхности отверстия (рисунок 2.14) или, если изношена вся поверхность отверстия, используют технологическую базу присоединяемой детали, например, крышки подшипника [80]. Устанавливают крышку подшипника, и центрирование базирующей детали выполняют по неизношенной поверхности крышки, которая сопрягается с зазором с валом, опирающимся на подшипник (рисунок 2.15).

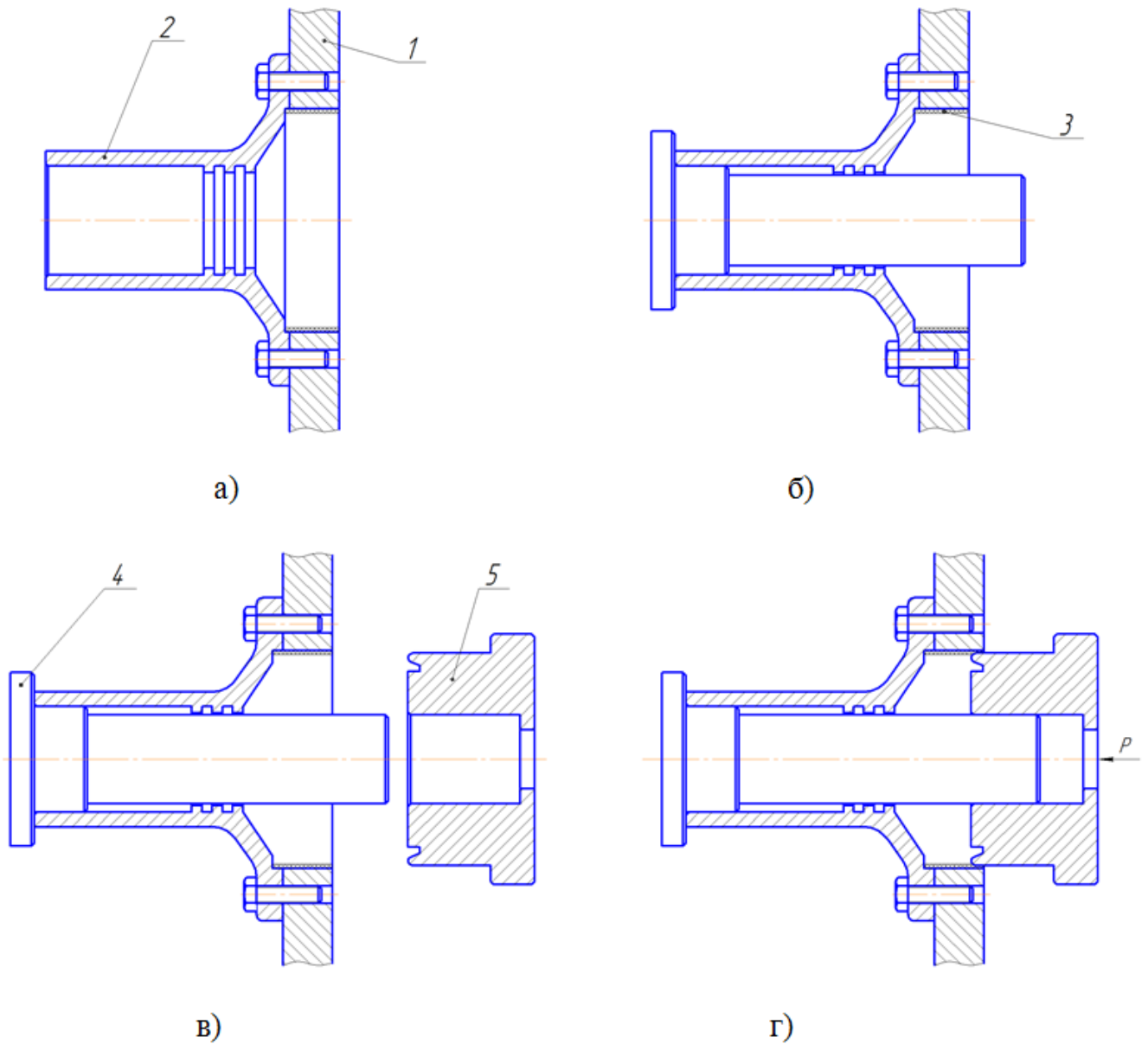
В процессе калибрования базирующую деталь вставляют в отверстие корпусной детали. Затем корпусную деталь поворачивают таким образом, чтобы ось базирующей детали приняла вертикальное положение. Поверхность калибра, которая будет контактировать с полимерным покрытием, смазывают солидолом во избежание приклеивания к покрытию. Через 3...5 минут после нанесения последнего слоя полимера калибр одевают на хвостовик базирующей детали и перемещают вдоль него, пока торцевая стенка калибра не упрется в торец базирующей детали. При перемещении калибра, его скругленным торцом убираются излишки полимерного материала, чем обеспечивается заданный размер и форма восстановленного отверстия.

Для снижения трудоемкости калибрования и повышения производительности труда калибр допускается перемещать с применением прессового оборудования. После отверждения полимерного материала, калибр вынимается и приспособление разбирается.



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

Рисунок 2.14 – Схема последовательности этапов получения отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали



а – изношенные отверстия в корпусной детали и в крышке подшипника с нанесенным полимерным покрытием; б – установка базирющей детали в неизношенное отверстие сопрягаемой детали; в – установка калибра на хвостовик базирющей детали; г – калибрование;

1 – корпусная деталь; 2 – крышка подшипника 3 – полимерное покрытие;
4 – базирющая деталь; 5 – калибр

Рисунок 2.15 – Схема последовательности этапов получения отверстия с полимерным покрытием в корпусной детали с крышкой подшипника

Вывод

Разработан способ калибрования отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях под заданный размер и форму, обеспечивающий точность размеров отверстий.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Общая методика исследований

Для решения задач, поставленных в диссертации, составлена общая схема исследований, которая приведена на рисунке 3.1.

Объектами исследований служили: полимерные пленки из акрилового адгезива АН-110 и полимер-полимерной композиции (ППКМ) на его основе; клеевые соединения «вал-подшипник», выполненные акриловым адгезивом АН-110 и ППКМ на его основе; роликподшипниковые узлы с посадками, восстановленными ППКМ на основе акрилового адгезива АН-110.

Акриловый клей Анатерм-110 (ТУ 2257-238-00208947-96) выпускается ФГУП «НИИ полимеров» (г. Дзержинск, Нижегородской области) и является двухкомпонентным высокопрочным клеем. Клей поставляется готовым к применению в полиэтиленовых воздухопроницаемых флаконах и имеет срок годности до 1 года. Компоненты клея рекомендуется наносить отдельно на склеиваемые поверхности в соотношении 1:1. После совмещения склеиваемых деталей отверждение проходит при комнатной температуре. Получаемый клеевой шов имеет высокую устойчивость к вибрации и ударным нагрузкам, химическую и термическую стойкость к нефтепродуктам, газам, растворам кислот и щелочей. По данным изготовителя кинематическая вязкость материала при 20°C составляет 425-1125 мм²/с, предел прочности при аксиальном сдвиге – 20...30 МПа.

Лак Ф-40 (ТУ 6-06-246-92) является раствором композиции каучука и модифицированной фенольной смолы в ацетоне. Разработчиком лака является "Научно-исследовательский институт пластических масс им. Г. С. Петрова" (г. Москва). Поставка материала осуществляется в виде раствора в пластиковых канистрах. Ф-40 является жидкостью коричневого цвета и имеет следующие показатели:

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

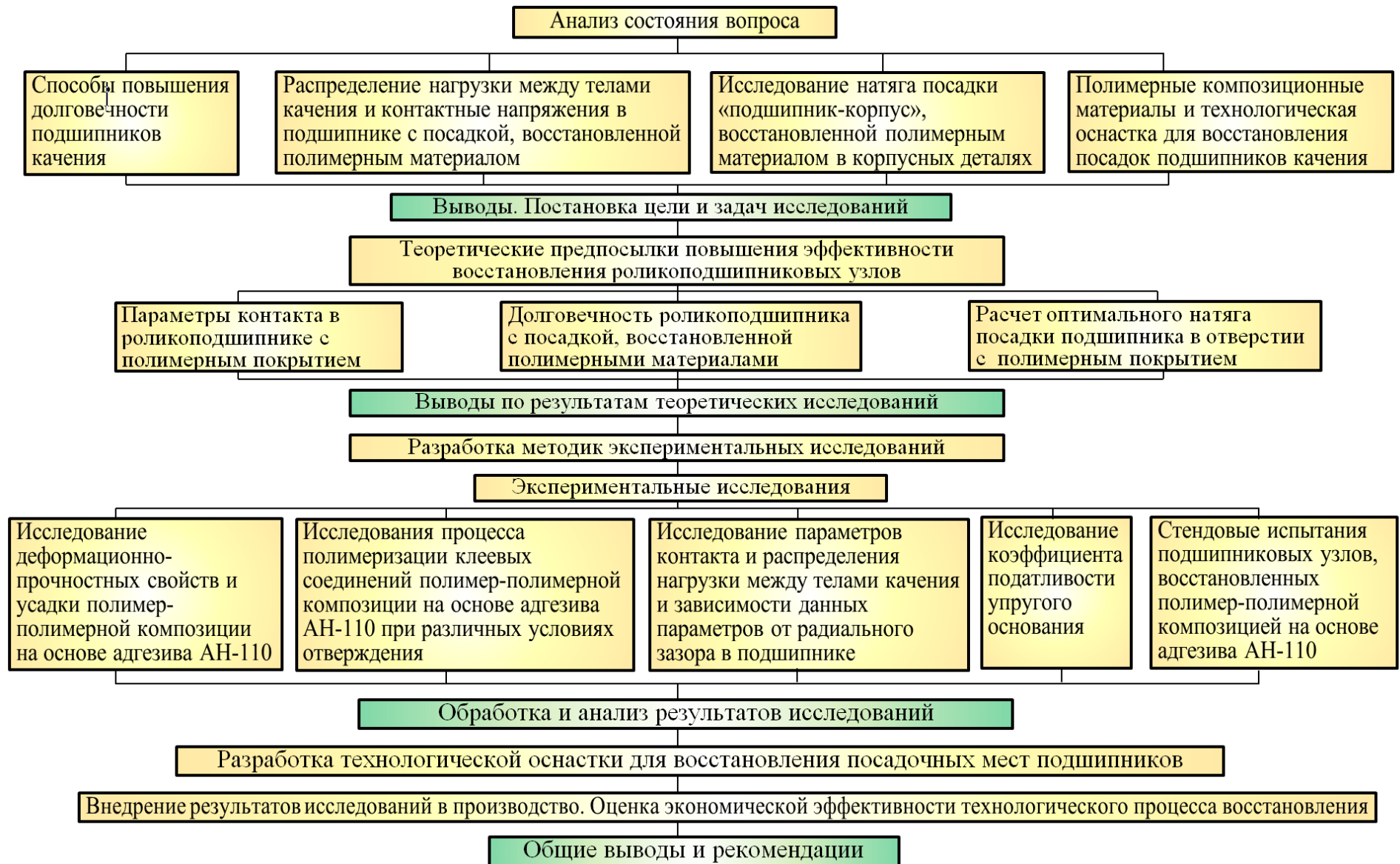


Рисунок 3.1 – Общая схема исследований

Зазор в восстанавливаемых посадках обеспечивали механической обработкой отверстий. Конусность и овальность посадочных поверхностей не превышали 0,005 мм. Для измерения наружных диаметров образцов использовали рычажные скобы (ГОСТ 11098-75) с ценой деления 0,002 мм, а при измерении внутренних диаметров использовали индикаторные нутромеры (ГОСТ 868-72) с головками часового типа 1-МИГ (ГОСТ 9696-82) и ценой деления 0,001 мм. Для определения деформаций и радиальных перемещений использовали индикаторные головки ИЧЦ 0-10-0,001 с ценой деления 0,001 мм. Экспериментальные исследования проводили с использованием современного оборудования и приборов, выпускаемых промышленностью и специально разработанных и изготовленных оригинальных стендов, установок и приспособлений.

Исследования проводили по нижеприведенным методикам.

3.2 Методика исследования деформационно-прочностных свойств пленок адгезива АН-110 и полимер-полимерной композиции на его основе

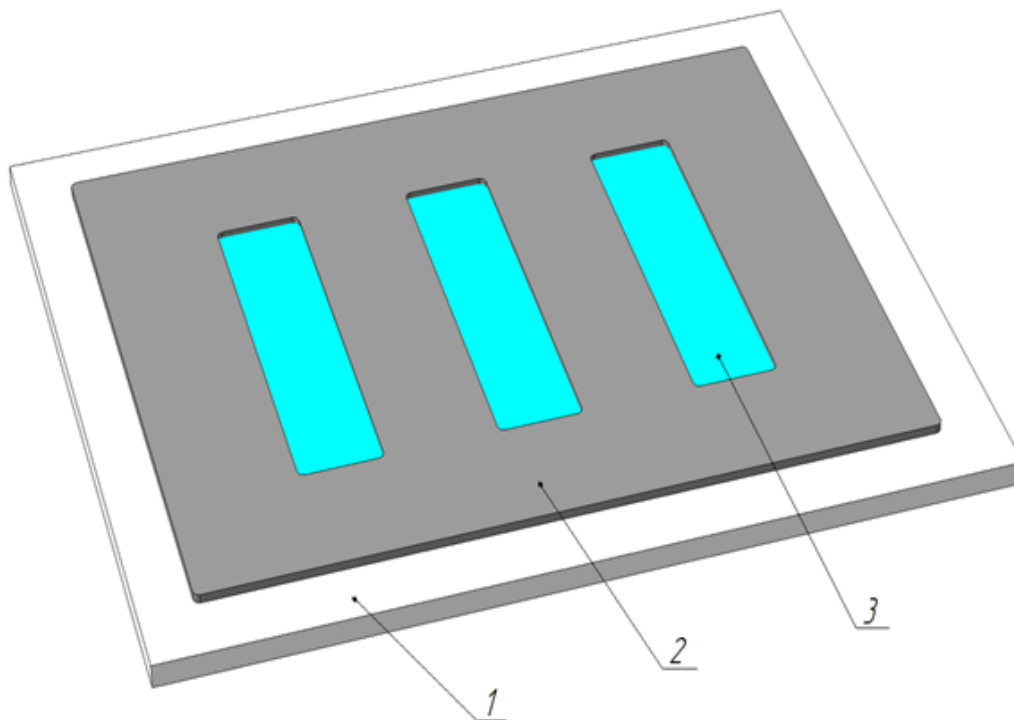
Для оценки деформационно-прочностных свойств полимерных пленок использовали следующие показатели: прочность при одноосном растяжении пленок σ_p , относительное удлинение ε и удельная работа разрушения при разрыве пленок α_p [91].

Образцами являлись пленки прямоугольной формы с размерами 60x15x1,5 мм. Рабочая длина образцов при испытаниях составляла 40 мм.

Пленки получали с использованием специальной формы-оснастки (рисунок 3.2), которая включает в себя опорную пластину размерами 150x130x10 мм из Фторопласта-4 ГОСТ 14906-77 и рамку-трафарет из Стали 3 ГОСТ 380-94. Размеры рамки-трафарета составляли 130x100x1,5 мм по наружному контуру с тремя прямоугольными окнами для пленок размерами 60x15x1,5 мм.

Детали предварительно очищенной оснастки двукратно обезжировали аце-

тоном и просушивали в течение 10 мин. Затем на фторопластовую пластину накладывали рамку-трафарет, заполняли её акриловым адгезивом АН-110 или предварительно приготовленной композицией и формовали поверхности пленок для обеспечения равномерной толщины.



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

Рисунок 3.2 – Форма-оснастка для получения пленок

Форму выдерживали в течение 24 ч на открытом воздухе при температуре 20 °С до полного отверждения композиции. Затем лезвием отсекали по внутренним контурам рамки-трафарета получившиеся пленки.

Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50. При этом вели запись графика "нагрузка-деформация". Испытания образцов проводили при постоянной скорости нагружения равной 5 мм/мин. Скорость распространения волн в высокоэластических полимерах составляет 30...50 м/с и около 1000 м/с в стеклообразных [93]. Поэтому при выбранной скорости нагружения обеспечивалось равномерное распределение напряжений в объеме образца.



Рисунок 3.3 – Исследование деформационно-прочностных свойств пленок акрилового адгезива АН-110 на разрывной машине ИР 5082-50

Прочность при разрыве пленок σ_p определяли по формуле

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_H},$$

где F_p – растягивающая нагрузка при разрыве пленки, Н; A_H – начальное поперечное сечение образца, мм².

Относительное удлинение при разрыве пленки ε определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где l_0 – начальная расчетная длина образца, мм; Δl_0 – изменение расчетной длины образца в момент разрыва, мм.

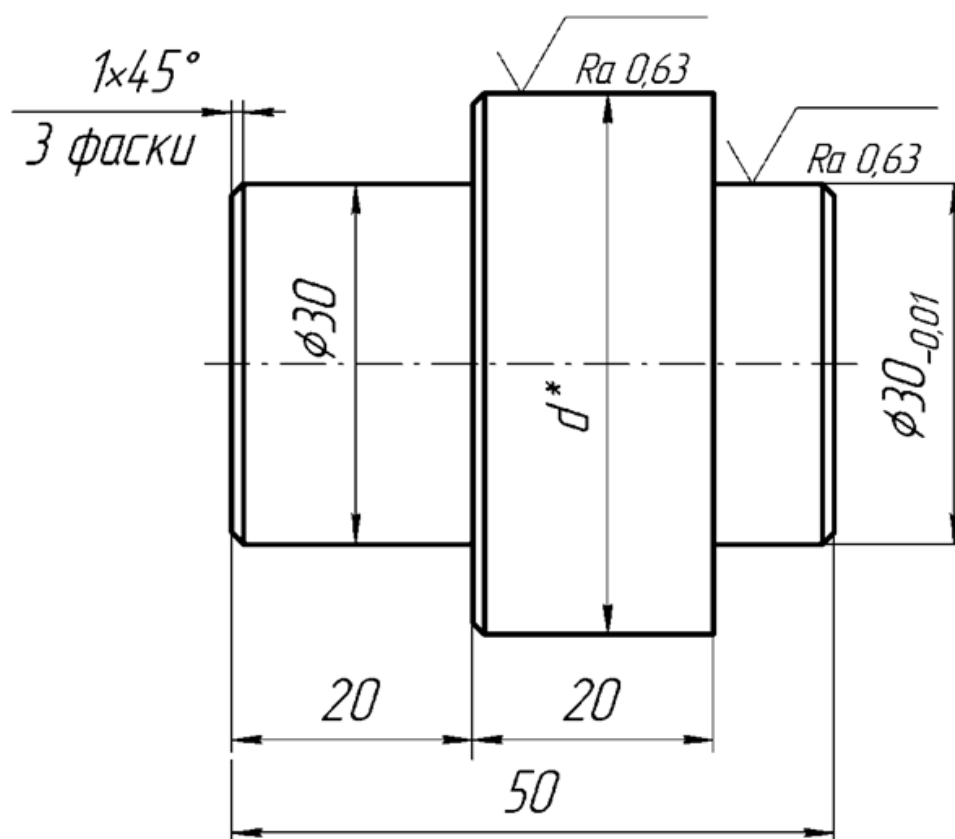
Работу разрушения при разрыве пленок α определяли как площадь, ограниченную кривой "нагрузка-деформация" и осью абсцисс на диаграмме. Удельную работу разрушения при разрыве пленок определяли по формуле

$$\alpha_p = \frac{\alpha}{V},$$

где V – объем полимерной пленки.

3.3 Методика исследования деформационно-прочностных свойств клеевых соединений адгезива АН-110 и полимер-полимерной композиции на его основе

Образцами служили клеевые соединения, выполненные композицией адгезива АН-110. Склеивали внутренние кольца подшипников 207 с валами. Валы изготовлены из стали 45 (рисунок 3.4).



d^* - диаметр склеиваемой поверхности

Рисунок 3.4 – Валы-образцы для исследования клеевых соединений с подшипником 207

Необходимого диаметрального зазора в соединении до склеивания достигали шлифованием валов. Шероховатость склеиваемой поверхности валов составляла $R_a = 0,63$ [68]. Отшлифованные валы закалили. При закалке температура нагрева составляла $T_{\text{нагр}} = 800$ °С, время нагрева $t_{\text{нагр}} = 0,5$ ч, охлаждение в масле веретенном при $T = 30$ °С [73].

Чтобы обеспечить соосность деталей клеевого соединения применяли специальные центрирующие приспособления (рисунок 3.5). Данное приспособление применяется для центрирования подшипников 207 и 209 с валами при склеивании и изготовлено из Стали 3. Нанесение полимерной композиции на склеиваемые поверхности осуществляли кистью. Отверждение клеевого соединения проводили в течение 24 ч при температуре 20°С. Разность диаметров склеиваемых деталей составляла 0,05 мм, а толщина клеевого шва 0,025мм.

Образцы испытывали на разрывной машине ИР-5082-50 при постоянной скорости нагружения равной 5 мм/мин. При этом вели запись графика "нагрузка-деформация".

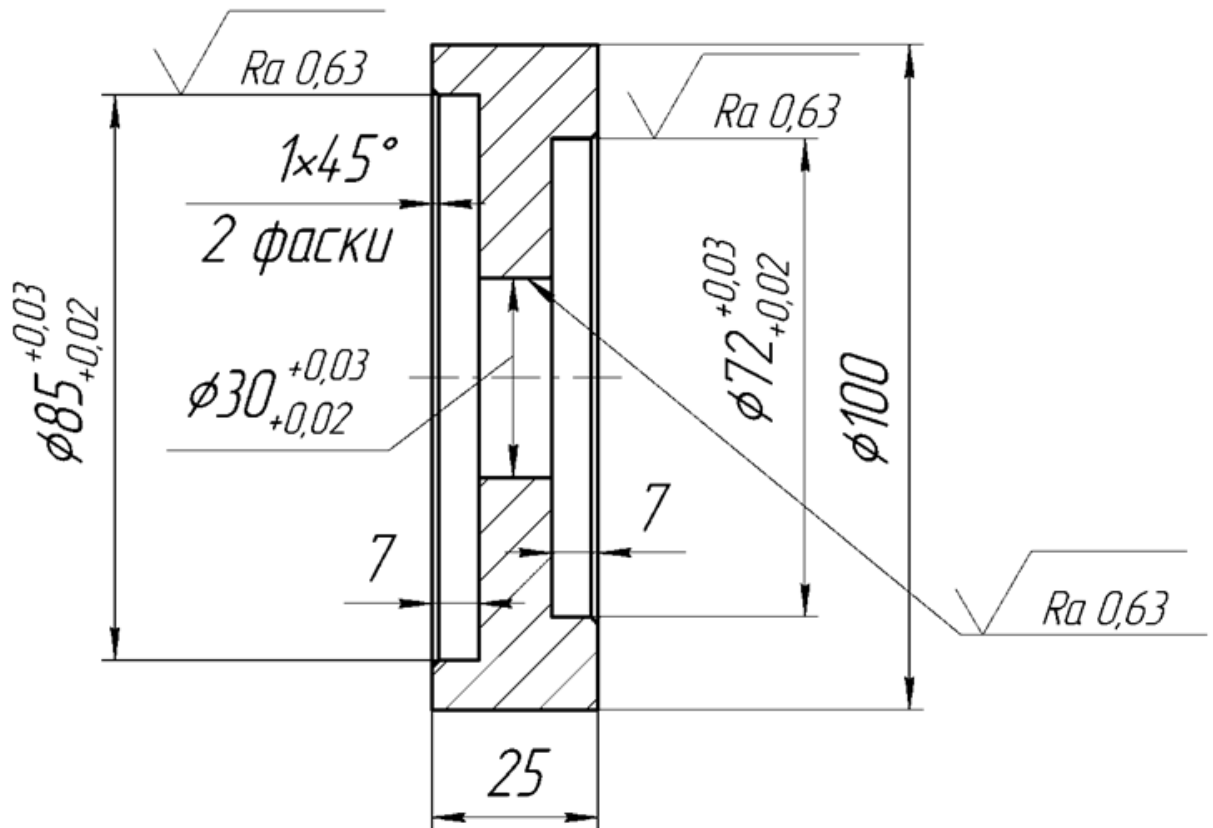


Рисунок 3.5 – Центрирующее приспособление для сборки деталей клеевого соединения

Деформационно-прочностные свойства клеевых соединений материалов оценивали по показателям прочности при аксиальном сдвиге τ , относительного удлинения ϵ и удельной работой разрушения α_p .

Касательное напряжение τ рассчитывали по формуле [91]

$$\tau = \frac{F_c}{A_H},$$

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

Относительное удлинение при разрыве пленки ε определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где l_0 – начальная длина клеевого шва, мм;

Δl_0 – изменение длины клеевого шва до момента сдвига, мм.

Работу разрушения при разрушении клеевых соединений α определяли как площадь, ограниченную кривой "нагрузка-деформация" и осью абсцисс на диаграмме. Удельную работу разрушения клеевого шва определяли по формуле

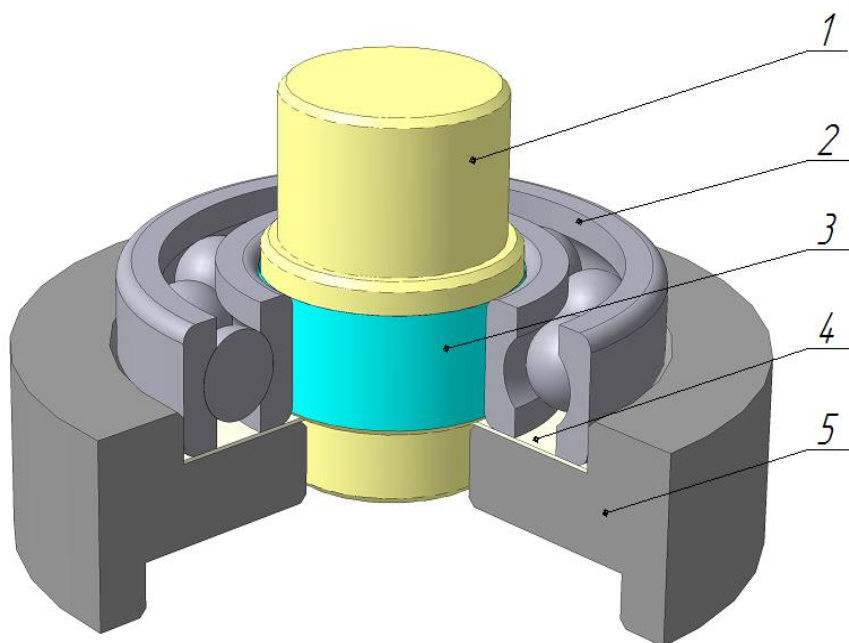
$$\alpha_p = \frac{\alpha}{V},$$

где V – объем клеевого шва.

3.4 Методика исследования процесса полимеризации клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-110 при различных условиях отверждения

При исследовании процесса полимеризации композиции применили диэлектрический метод. Исследования осуществляли при трёх различных температурах $T = 20; 30$ и 40 °С. Для обеспечения температуры в 30 и 40 °С использовали сушильный шкаф СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3, имеющий электронный терморегулятор. В качестве образцов использовали клеевые соединения внутренних колец подшипников 207 с валами, изготовленными из стали 45 (рисунок 3.4). Посадочную поверхность вала шлифовали до шероховатости $R_a = 0,63$. Разность диаметров склеиваемых деталей составляла $0,05$ мм. Чтобы обеспечить соосность деталей при склеивании, использовали специальное центрирующее приспособление (рисунок 3.5). Схема сборки клеевого соединения приведена на рисунке 3.6.

Склеиваемые поверхности двукратно обезжиривали ацетоном (ГОСТ 2768-79) и просушивали в течение 5 мин. Нанесение полимерной композиции на склеиваемые поверхности осуществляли кистью. Затем подшипник с валом склеивали с использованием центрирующего приспособления. При этом одну из сопрягаемых деталей вращали относительно другой, сначала на один оборот в одну, а затем в другую стороны, чтобы обеспечить равномерное распределение композиции в зазоре и устранить возможные перекосы деталей. Через 24 ч, после отверждения клеевого соединения, центрирующее приспособление разбирали.



1 – вал-образец; 2 – подшипник 207; 3 – адгезив;
4 – прокладка; 5 – оправка центрирующая;

Рисунок 3.6 – Схема клеевого соединения

Электрическую емкость клеевого шва через равные промежутки времени измеряли прибором Е7-11 [93]. Первые два часа показания снимали каждые 15 минут, а затем каждый час. Затем по величине электрической емкости рассчитывали диэлектрическую проницаемость (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Исследование процесса полимеризации композиции на основе адгезива АН-110 прибором Е7-11

Диэлектрическую проницаемость ε определяли по формуле [94]

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot C}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot B},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость клеевого шва; C – электрическая емкость клеевого шва, Ф; r_1 – радиус вала, мм; r_2 – радиус внутреннего кольца подшипника, мм; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; B – ширина кольца подшипника, мм.

О завершении полимеризации судили по стабилизации значений электрической емкости клеевого шва. Эксперимент проводили в трехкратной повторности.

3.5 Методика исследования усадки акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе

Исследовали усадку полимерных покрытий, выполненных адгезивом АН-110 и композицией на его основе с составом: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс. ч., наполнитель эластомер Ф-40 – 10 масс. ч.

Образцами являлись пленки прямоугольной формы 60x15x1,5 мм. Пленки получали с использованием специальной формы-оснастки (рисунок 3.2), включающей в себя опорную пластину размерами 150x130x10 мм из Фторопласта-4 (ГОСТ 14906-77), а также рамку-трафарет из Стали 3 (ГОСТ 380-94). Размеры рамки-трафарета составляли 130x100x1,5 мм по наружному контуру с тремя окнами для пленок размерами 60x15x1,5 мм.

Опорную пластину и рамку-трафарет очищали, двукратно обезжиривали ацетоном и просушивали в течение 10 мин. Опорную пластину устанавливали на выставленную поверочную плиту (ГОСТ 10905-86). На пластину помещали рамку-трафарет, которую затем заполняли адгезивом АН-110 или предварительно приготовленной композицией и формовали поверхности пленок фторопластовой пластиной для обеспечения одинаковой и равномерной толщины.

Форму выдерживали в течении 24 ч на открытом воздухе при температуре 20 °С до полного отверждения композиции. Затем лезвием отсекали по внутренним контурам рамки-трафарета получившиеся пленки. Толщину пленок измеряли в трехкратной повторности рычажной скобой повышенной точности СРП-25 (ГОСТ 11098-75) с ценой деления 0,001 мм. Усадку материала $У$ рассчитывали по формуле

$$У = \left(1 - \frac{h_{пл}}{h_p} \right) \times 100\%,$$

где $h_{пл}$ – толщина полимерной пленки, мм; h_p – толщина рамки-трафарета, мм.

3.6 Методика исследования параметров контакта и распределения нагрузки между телами качения и зависимости данных параметров от радиального зазора в подшипнике

Цель настоящих исследований заключалась в изучении параметров контакта – размеров пятен контакта, контактных напряжений и распределения нагрузки между телами качения в роликоподшипнике с полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-110, зависимости данных параметров от радиального зазора в подшипнике, а так же сравнение с аналогичным подшипником стандартной конструкции. Объектом исследования являлся подшипник 42209 с однобортовым внутренним кольцом. Параметры подшипника 42209 приведены в таблице 3.1.

Исследования проводили на специальном стенде (рисунок 3.8) для нагружения подшипников. Полимерный материал – композицию на основе акрилового адгезива АН-110 (100 масс. ч.) с наполнителем из эластомера Ф-40 (10 масс. ч.) наносили на внутреннюю поверхность втулки, предварительно запрессованной в подшипниковый щит стенда. Отверждение композиции проводили в течение 24 ч при 20 °С.

Таблица 3.1 – Параметры подшипника 42209

Внешний диаметр D , мм	Внутренний диаметр d , мм	Ширина b , мм	Динамическая грузоподъемность C , Н	Статическая грузоподъемность C_0 , Н	Число роликов, z	Диаметр ролика, D_w , мм	Длина ролика, l_p , мм
85	45	19	35300	25700	15	10	10

На первом этапе проводили исследование зависимости радиального зазора в подшипнике от натяга посадки, обеспечиваемого полимерным покрытием. Радиальный зазор в подшипнике измеряли индикаторной головкой ИЧЦ 0-10-0,001, которую устанавливали в специальный штатив-держатель. Штатив устанавливали на раму стенда. Руками прилагали усилие к валу, выбирая радиальный зазор, и измеряли перемещение вала в радиальном направлении (рисунок 3.9). Измерения проводили в трехкратной повторности, поворачивая вал относительно начального положения на угол 120° . Начальный радиальный зазор в подшипнике составлял 45 мкм. Исследования проводили при натягах посадки 20; 35 и 70 мкм. Толщина полимерного покрытия составляла 0,22; 0,235; 0,27 мм на диаметр.

Затем исследовали параметры контакта в подшипнике. Исследуемый подшипник 42209 является разборным. Внутреннее кольцо у данного подшипника съемное. Наружное кольцо, сепаратор и ролики были разобраны. Наружное кольцо подшипника запрессовали во втулку. На поверхность дорожки качения наружного кольца подшипника положили полоску тонкой белой глянцевої бумаги. На ролики маркером нанесли красящий состав. Сепаратор с роликами устанавливали на наружное кольцо подшипника. Сепаратор в сборе обеспечивал фиксированное положение тел качения относительно друг друга и оси действия нагрузки. Подшипниковые щиты и вал в сборе с внутренним кольцом исследуемого подшипника установили на стенд. На шейки диаметром 35 мм запрессовали два промежуточных подшипника 207. Для создания радиальной нагрузки на подшипник на концы рычагов стенда вешали грузы. Нагрузка через рычаги, промежуточные подшипники 207 и вал передавалась на исследуемые подшипники.

Пятно контакта в роликоподшипнике представляет собой прямоугольник с длиной равной длине ролика l_p и шириной b , которая зависит от нагрузки на подшипник [68].



Рисунок 3.8 – Стенд для испытания подшипников при статическом нагружении [18]

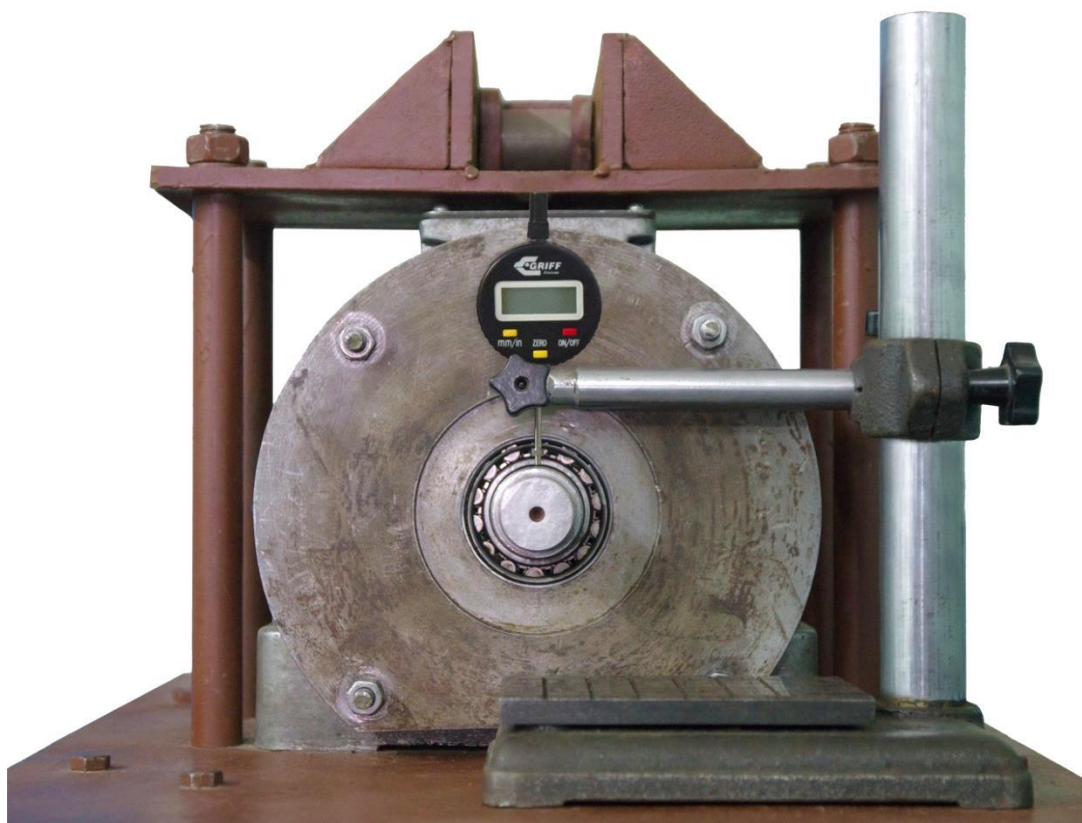


Рисунок 3.9 – Измерение радиального зазора в подшипнике

На начальном этапе исследований строили тарировочный график зависимости ширины пятна контакта от нагрузки на тело качения. Для учета влияния локальной деформации кольца в зоне контакта, тарировочный график строили как для подшипника с полимерным покрытием, так и для стандартного. Толщина полимерного покрытия составляла 0,2 мм на диаметр. Нагрузки при построении графиков составляли 850; 1874; 2895; 4938 Н. В дальнейшем по данным графикам определяли значения нагрузки Q на тела качения по размерам пятен контакта. Пятна контакта (отпечатки) на белой глянцевой бумаге исследовали микроскопом МПБ-2, определяя ширину b пятен контакта ролика с дорожкой качения наружного кольца подшипника.

Для построения тарировочного графика нагружали один ролик (рисунок 3.10, а), для исследования распределения нагрузки между телами качения – 7 роликов (рисунок 3.10, б). Центральное тело качения устанавливалось вдоль оси действия нагрузки.

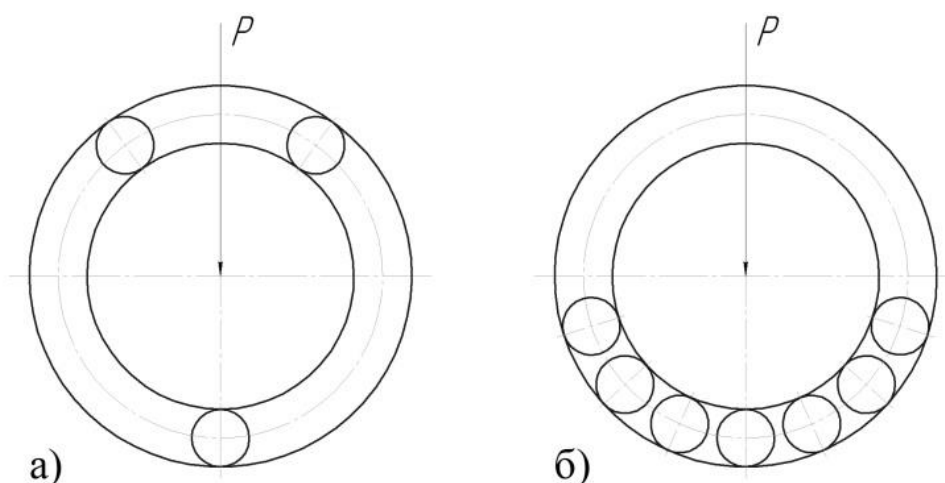


Рисунок 3.10 – Схема расположения тел качения в подшипнике для построения тарировочного графика (а), для исследования распределения нагрузки (б)

Затем исследовали распределение нагрузки между телами качения в роликоподшипниках: стандартном; с полимерным покрытием с натягом посадки 15, 40 и 60 мкм. Натяг посадки для обеспечения оптимального радиального зазора рассчитали по формуле (2.46). Толщина полимерного покрытия составляла 0,215, 0,24 и 0,26 мм на диаметр.

Исследование распределения нагрузки между телами качения проводили при радиальных нагрузках на подшипник $P = 4940; 6980; 9010$ Н. Через 0,25 часа нагрузку снимали и разбирали подшипник. По тарировочному графику определяли нагрузку на тела качения в зависимости от ширины пятна контакта. Площадь пятна контакта определяли по формуле $F = l_p b$.

Максимальные контактные напряжения под центральным телом качения рассчитывали по формуле

$$\sigma_{max} = \frac{4Q_0}{\pi l_p b_0},$$

где b_0 – ширина пятна контакта под центральным телом качения, Q_0 – нагрузка на центральное тело качения.

Коэффициенты распределения нагрузки между центральным и первыми боковыми телами качения и между центральным и вторыми боковыми телами качения определяли по формулам

$$k_{p1} = \frac{Q_1}{Q_0}; k_{p2} = \frac{Q_2}{Q_0},$$

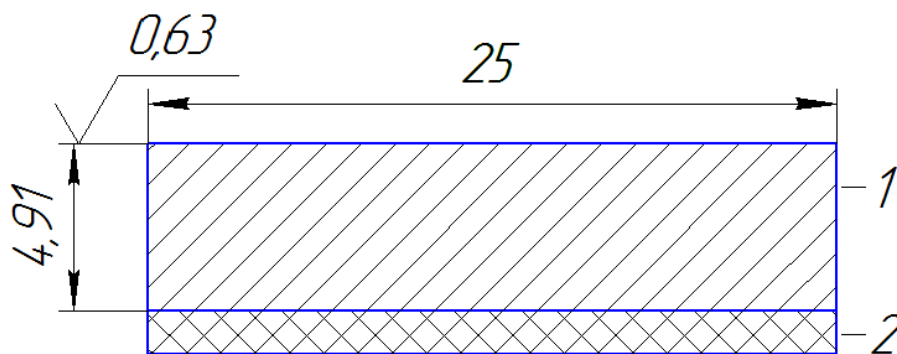
где Q_0 , Q_1 , Q_2 – нагрузки на центральное, первое и второе боковые тела качения соответственно.

Коэффициент K рассчитывали по формуле

$$K = \frac{zQ_0}{P}.$$

3.7 Методика исследования коэффициента податливости упругого основания

Для исследований коэффициента податливости упругого основания использовали ролик от роликоподшипника 42209 диаметром $D_w = 10$ мм и длиной $l_p = 10$ мм и пластину из стали ШХ-15 размерами $100 \times 25 \times 4,91$ мм, на которую с одной стороны наносили полимерную композицию на основе акрилового адгезива АН-110 (рисунок 3.11). Размеры пластины выбрали таким образом, чтобы её жесткость была эквивалентна жесткости наружного кольца подшипника 42209. Шероховатость поверхности пластины составляла $Ra = 0,63$, что соответствует шероховатости поверхности наружного кольца подшипника. Пластину подвергли термической обработке – отжигу, закалке и отпуску. При отжиге пластину нагревали до температуры 800°C и охлаждали со скоростью $15^\circ/\text{ч}$. При закалке производили нагрев до температуры 850°C в течение $0,5$ ч, и затем охлаждение в веретенном масле. Низкотемпературный отпуск осуществлялся по режиму: нагрев до температуры 150°C в течение $3,0$ ч [91].



1 – пластина; 2 – полимерная подложка

Рисунок 3.11 – Пластина с подложкой из композиции на основе акрилового адгезива АН-110

Толщина покрытий из полимерной композиции составляла $h = 0,05; 0,1; 0,15$ мм. Использовали композицию с содержанием 100 масс. ч. акрилового адгезива АН-110 и 10 масс. ч. эластомера Ф-40. Образцы выдерживали 24 часа до полного отверждения композиции.

Радиальную нагрузку на ролик создавали на стенде для статического нагружения подшипниковых узлов (рисунок 3.8). Для проведения данных экспериментальных исследований со стенда демонтировали электродвигатель. В эксперименте использовали нагружающий рычаг и специальную нагрузочную вилку (рисунок 3.12). Нагрузочная вилка 3 имеет резьбу и заворачивается в телескопическую стойку стенда. Через нагрузочную пластину 1 передается нагрузка на ролик. Фиксация ролика при радиальном нагружении осуществляется цилиндрической прорезью, выполненной в нагрузочной пластине (рисунок 3.13).

Металлическую пластину устанавливали стороной с нанесенным полимерным покрытием, на поверочную плиту 2-1-250×250 ГОСТ 10905-75. Плиту предварительно устанавливали на опорную раму стенда.

Для определения коэффициента постели k ролик нагружали нагрузкой 1870 Н, 2895 Н, 4938 Н. Деформацию пластины в направлении нагрузки измеряли индикаторной головкой ИЧЦ 0-10-0,001 (рисунок 3.14).

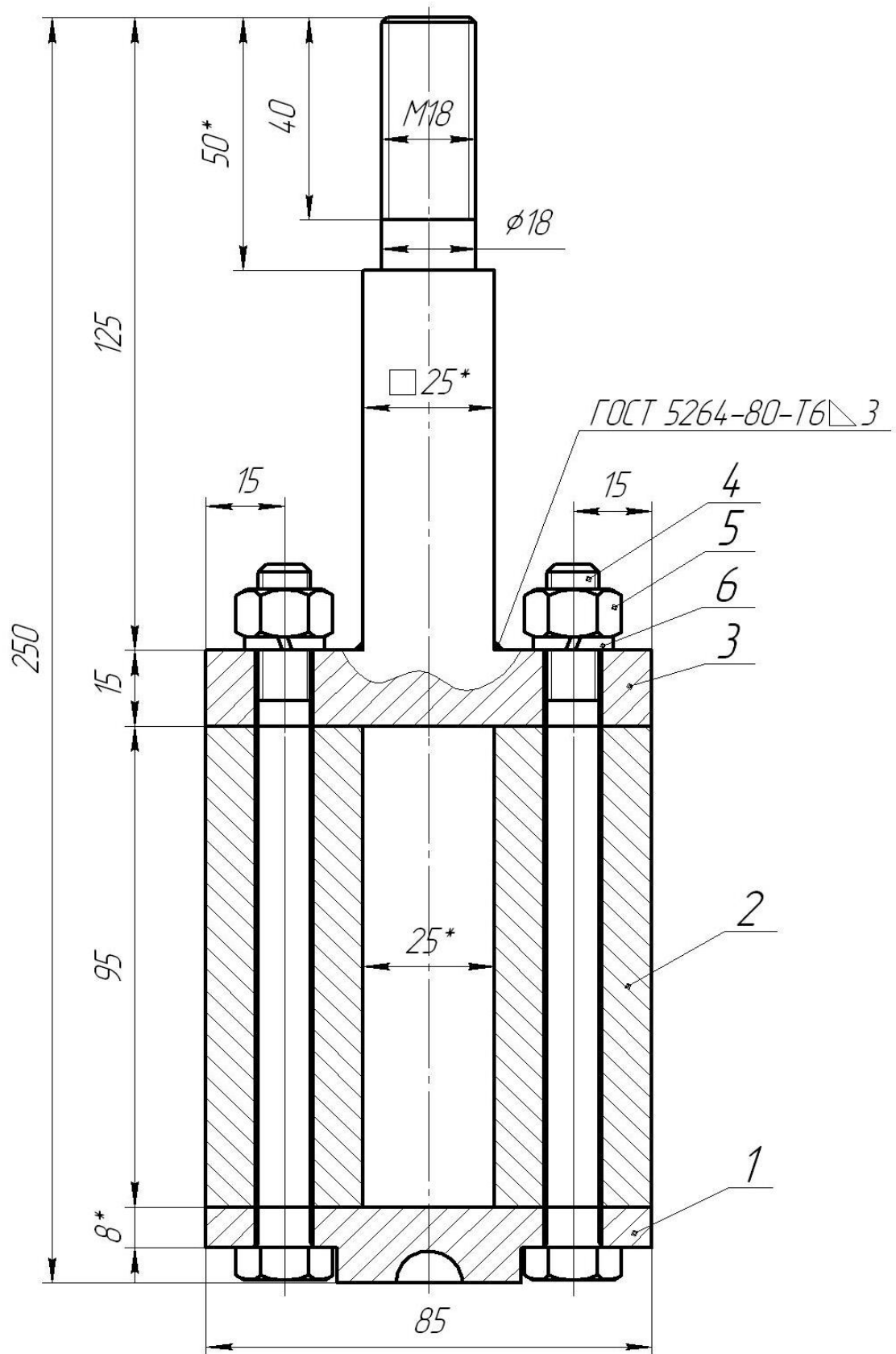


Рисунок 3.12 – Специальная нагрузочная вилка для исследования коэффициента податливости упругого основания

Эксперимент проводили в пятикратной повторности. Коэффициент k , представляющий собой отпор основания, приходящийся на единицу площади при просадке на единицу длины, рассчитывали по формуле [95]

$$k = 4\beta^4 EJ.$$

β – коэффициент, определяемый по формуле

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{P}{8EJu_0}},$$

где E – модуль упругости материала пластины, для стали $E = 2,1 \times 10^5$ МПа; P – нагрузка на ролик, Н; u_0 – измеренная деформация пластины при радиальном нагружении ролика, мм.

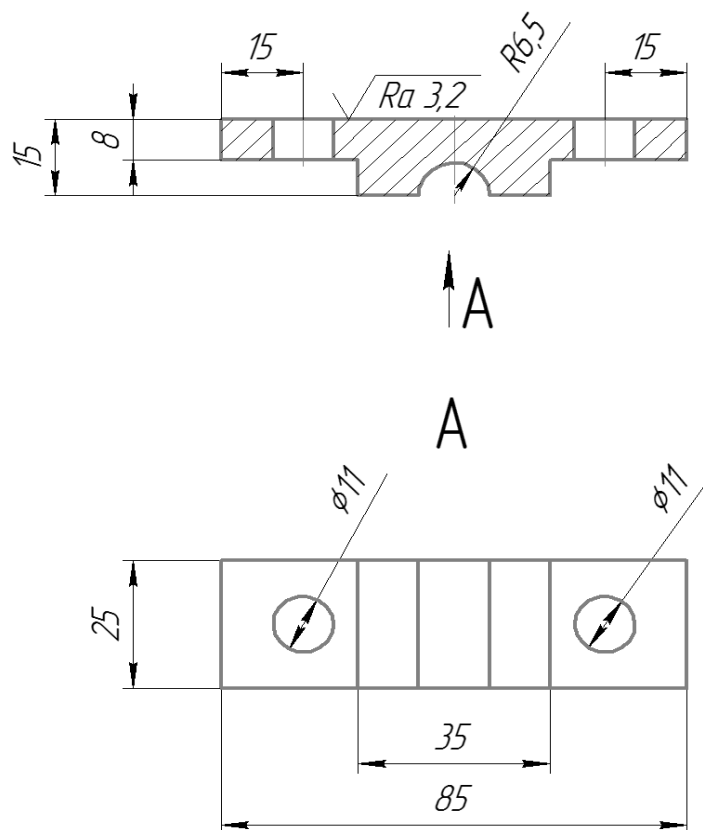


Рисунок 3.13 – Нагрузочная пластина

Коэффициент податливости k_n определяли из зависимости

$$k_n = \frac{k}{b},$$

где b – ширина балки (пластины).



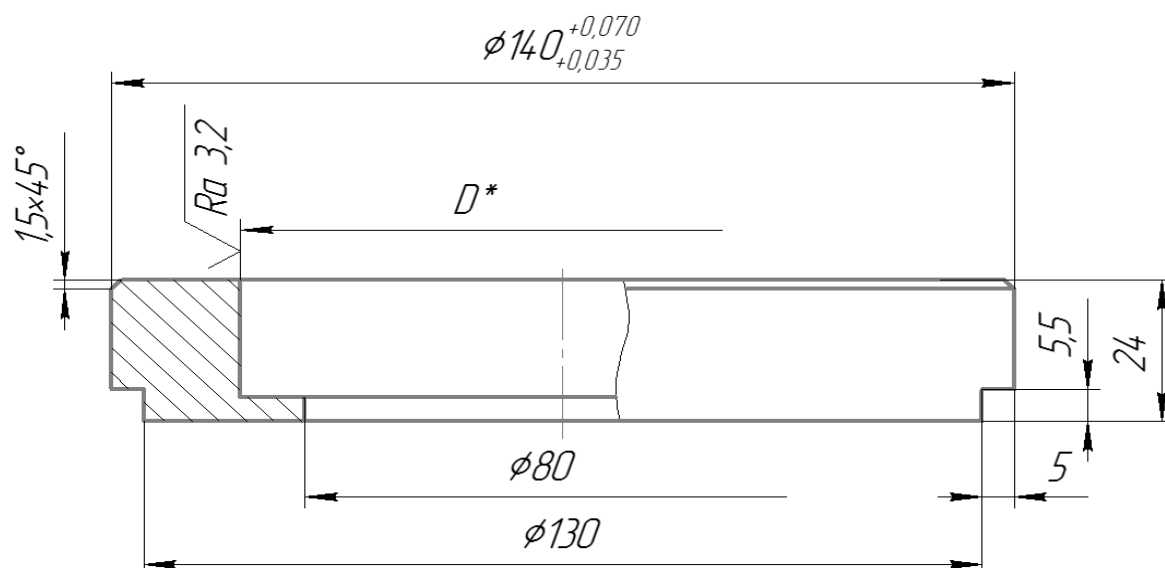
Рисунок 3.14 – Исследование коэффициента податливости упругого основания

3.8 Методика исследования долговечности подшипниковых узлов, восстановленных полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110

Объектом исследований являлись подшипниковые узлы с посадками, восстановленными композицией на основе акрилового адгезива АН-110. Испытания осуществляли на специальном стенде на основе электромеханического

вибратора ИВ-107А. Исследовали долговечность роликоподшипника 42209 с полимерным покрытием из композиции на основе акрилового адгезива АН-110 при статическом нагружении и долговечность полимерного покрытия при циклическом нагружении.

Испытания при статическом нагружении проводили на стенде (рисунок 3.8). Подшипники запрессовывали во втулки оригинальной конструкции (рисунок 3.15), изготовленные из чугуна СЧ-20 (ГОСТ 1412-80). Зазор между подшипником и посадочным отверстием в зависимости от толщины полимерного покрытия обеспечивали растачиванием посадочной поверхности втулки.



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

Рисунок 3.15 – Втулка чугунная

Вначале втулку запрессовывали в щит (рисунок 3.16). Посадочное отверстие под подшипник во втулке зачищали до металлического блеска шлифовальной шкуркой Э5М1А №16. Затем обработанную поверхность обезжиривали ацетоном и просушивали в течение 10 мин. Полимерную композицию наносили на поверхность отверстия чугунной втулки. Толщина полимерного покрытия составляла 0,24 мм. Натяг посадки – 40 мкм. Покрытие отверждали в течение 24 ч при температуре 20 °С. Затем наносили тонкий слой полимера на

наружное кольцо подшипника и запрессовывали подшипник в посадочное отверстие втулки. На шейки диаметром 35 мм запрессовали два промежуточных подшипника 207. Для создания радиальной нагрузки на подшипник на концы рычагов стенда вешали грузы.

При исследовании долговечности роликоподшипника с полимерным покрытием из композиции на основе акрилового адгезива АН-110 радиальная нагрузка составляла 13070 Н.

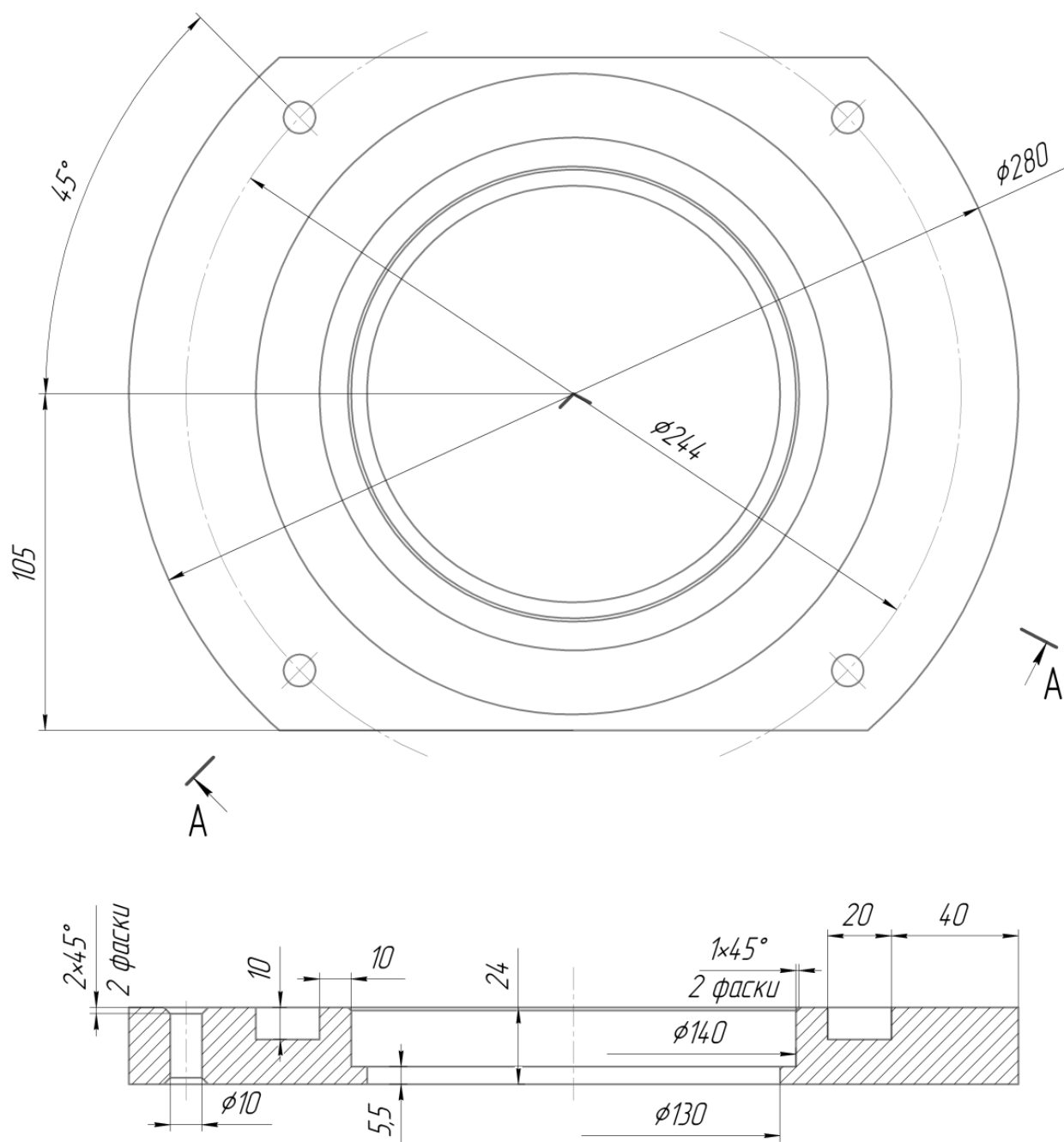


Рисунок 3.16 – Подшипниковый щит вибратора

Расчетную долговечность L подшипника 42209 определили по формуле

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^m,$$

где C – динамическая грузоподъемность, $C=35300\text{Н}$ для подшипника 42209;
 P – эквивалентная нагрузка, $P=13070\text{ Н}$; m – показатель степени, для роликовых подшипников $m=3,33$ [68];

Расчетная долговечность подшипника 42209

$$L = \left(\frac{35300}{13070} \right)^{3,33} = 27,3 \text{ млн об.}$$

За критерий долговечности подшипников приняли предельное значение радиального зазора 300 мкм.

Испытания при циклическом нагружении проводили на вибростенде на базе вибратора ИВ-107А [103], который обеспечивает циклическое нагружение восстановленных посадок подшипников (рисунок 3.17).

Вибратор является асинхронным короткозамкнутым электродвигателем, на концах вала ротора которого установлены дебалансы, являющиеся источниками возмущающих колебаний. Вибратор болтами прикреплен к двум металлическим плитам с размерами 500×500×25 мм и массой по 50 кг каждая. Плиты через четыре винтовые пружины установлены на металлическое основание размерами 500×500×10. Высота пружин составляет 120 мм.

Скорость вращения вала стенда равна 3000 мин⁻¹. Количество циклов нагружения фиксировалось при помощи счетчика, соединенного с валом. В подшипниковые щиты вибратора запрессовывали чугунные втулки, аналогичные втулкам, применяемым для испытаний при статическом нагружении. Смазку подшипников проводили ВНИИНП-242 (ГОСТ 20241-74).



Рисунок 3.17 – Стенд для испытаний подшипниковых узлов
при циклическом нагружении [103]

Полимерную композицию наносили на посадочную поверхность отверстия чугунной втулки. Радиальная нагрузка на подшипники составляла 20 кН. Толщина полимерных покрытий составляла 0,05; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175 и 0,2 мм. Натяг посадки – 10; 20; 25; 30; 35 и 40 мкм. Покрытие отверждали в течение 24 ч при температуре 20 °С. Затем наносили тонкий слой полимера на наружное кольцо подшипника и запрессовывали подшипник в посадочное отверстие втулки. Долговечность соединений оценивали по наработке до начала сдвига наружного кольца подшипника относительно посадочного отверстия втулки.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Исследования деформационно-прочностных свойств пленок полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-110

Целью исследований являлось изучение деформационно-прочностных свойств пленок адгезива АН-110 и композиции на его основе, а так же определение оптимального состава композиции с наиболее высокими деформационно-прочностными свойствами.

Деформационно-прочностные свойства материалов оценивали по показателям прочности при одноосном растяжении σ_p , относительного удлинения ε и удельной работы разрушения α_p . На рисунке 4.1 показана зависимость прочности σ_p образца от концентрации наполнителя – эластомера Ф-40. Зависимость линейная убывающая. Наибольшую прочность равную 10,5 МПа имеют образцы с концентрацией эластомера 6 масс. ч. При увеличении концентрации наполнителя до 10 масс. ч. прочность композиции снижается на 11% до 9,5 МПа.

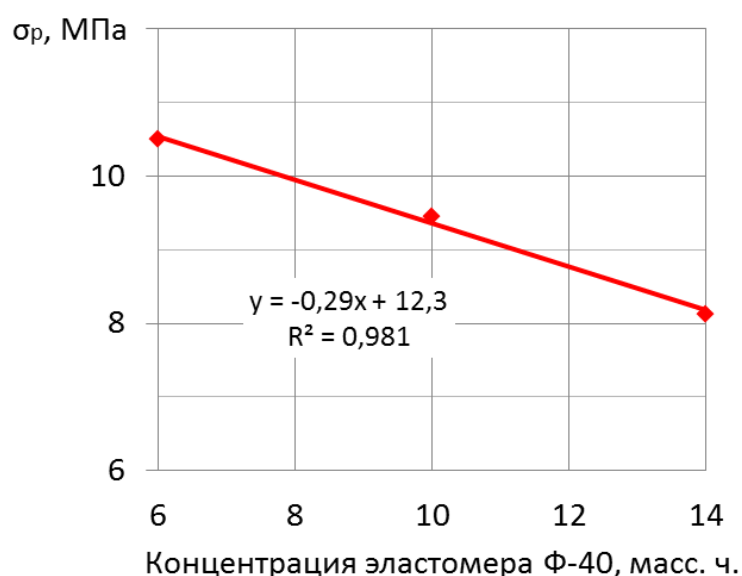


Рисунок 4.1 – Зависимость прочности при одноосном растяжении σ_p образца от концентрации раствора эластомера Ф-40

При дальнейшем увеличении концентрации эластомера до 14 масс. ч. прочность композиции снижается до 8,1 МПа, что на 30% и 17% меньше, чем при концентрации наполнителя 6 и 10 масс. ч., соответственно. Зависимость деформации ε образца от концентрации наполнителя нелинейная одноэкстремальная (рисунок 4.2).

Минимальную деформацию 25% имеют образцы с концентрацией эластомера 6%. Наибольшую деформацию имеют образцы из композиции с концентрацией эластомера 10 масс. ч. Деформация композиции с данным составом в 1,4 раза больше и составляет 36%. При концентрации эластомера 14 масс. ч. деформация составляет 27%, что в 1,3 раза меньше, чем при концентрации наполнителя 10 масс. ч.

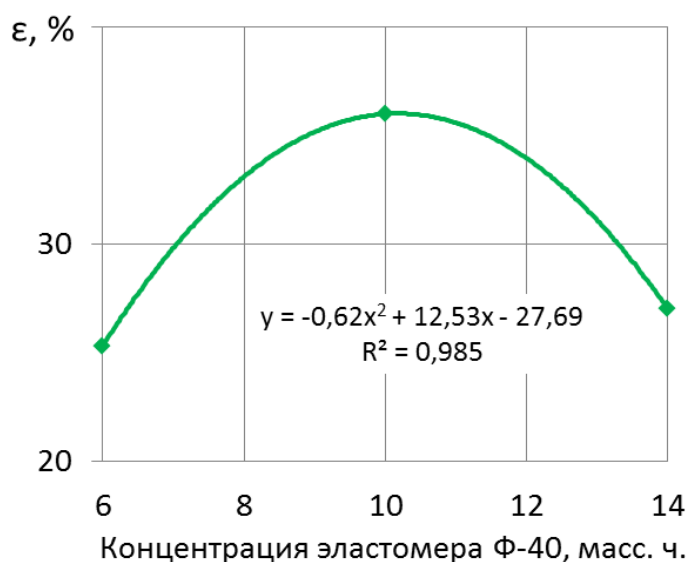


Рисунок 4.2 – Зависимость деформации ε образца от концентрации раствора эластомера Ф-40

Зависимость удельной работы разрушения α_p образцов от концентрации эластомера имеет вид аналогичный зависимости деформации (рисунок 4.3). При концентрации наполнителя 6 масс. ч. удельная работа разрушения составила 2,41 МДж/м³. Наибольшую удельную работу разрушения равную 2,95 МДж/м³ имеет образец с концентрацией эластомера 12 масс. ч. При повышении концентрации наполнителя до 14 масс. ч., удельная работа разрушения снижа-

ется до $1,88 \text{ МДж/м}^3$, что в 1,6 раза меньше удельной работы разрушения при концентрации эластомера 10 масс. ч.

Долговечность посадок подшипников, восстановленных полимерным материалом зависит от деформационно-прочностных свойств материалов. Одни материалы могут иметь высокую прочность, но небольшую деформацию, а другие – высокую деформацию, но низкую прочность. В данном случае целесообразно выбор полимерных материалов для восстановления подшипниковых узлов производить по величине удельной работы разрушения. Чем больше удельная работа разрушения, тем выше долговечность материала при динамическом нагружении [16].

Из полученных данных следует оптимальный состав полимерной композиции: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс. ч., эластомер Ф-40 – 10 масс. ч.

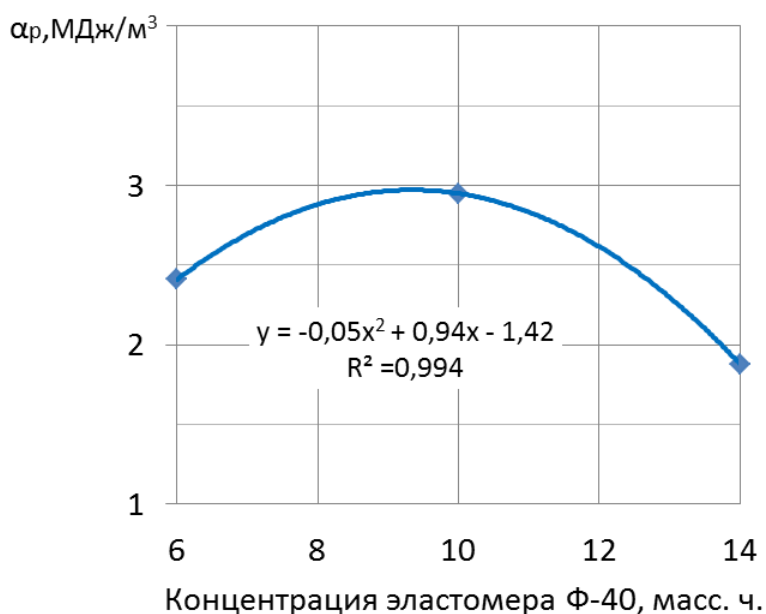


Рисунок 4.3 – Зависимость удельной работы разрушения α_p образца от концентрации раствора эластомера Ф-40

Затем, с целью сравнения, исследовали деформационно-прочностные свойства ненаполненного адгезива АН-110. На рисунке 4.4 показана прочность σ при разрыве пленок из акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе с оптимальным составом. Прочность пленок из ненаполненного акрилово-

го адгезива АН-110 составляет 12,1 МПа. При введении эластомера прочность снижается на 28 % до 9,45 МПа.

Деформация пленок из ненаполненного адгезива составляет 17,3%. Введение эластомера увеличивает данный показатель до 36%, что в 2,1 раза больше (рисунок 4.5).

Удельная работа разрушения при разрыве пленок ненаполненного адгезива АН-110 составляет 2,09 МДж/м³. У композиции удельная работа разрушения выше на 41%, и равна 2,95 МДж/м³ (рисунок 4.6).

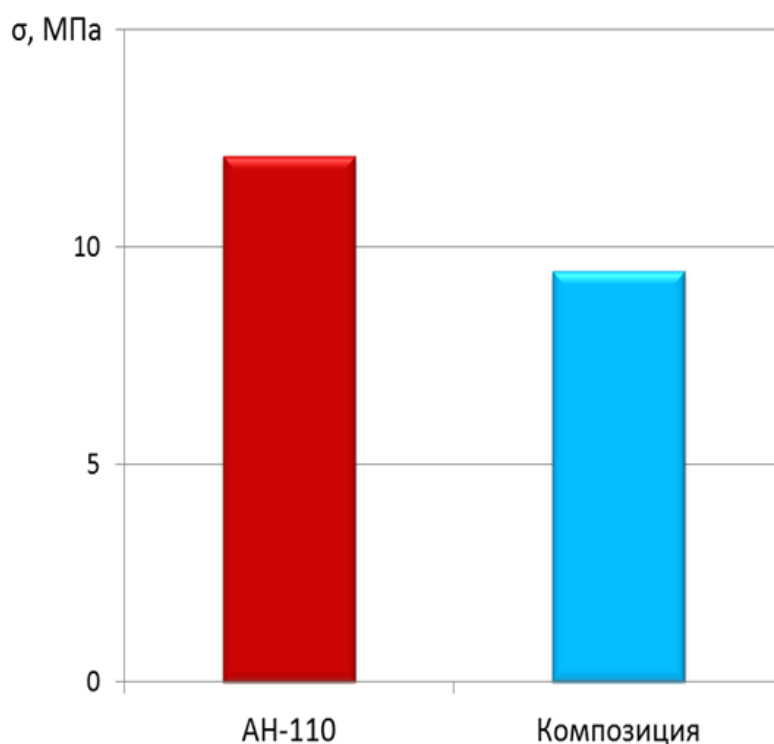


Рисунок 4.4 – Прочность σ при разрыве пленок акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе с оптимальным составом

В сравнении с ненаполненным акриловым адгезивом увеличения прочности не наблюдается, однако деформация в 2,1 раза больше у композиции. Удельная работа разрушения композиции составляет 2,95 МДж/м³ и превышает аналогичный показатель ненаполненного акрилового адгезива 2,09 МДж/м³ в 1,41 раза.

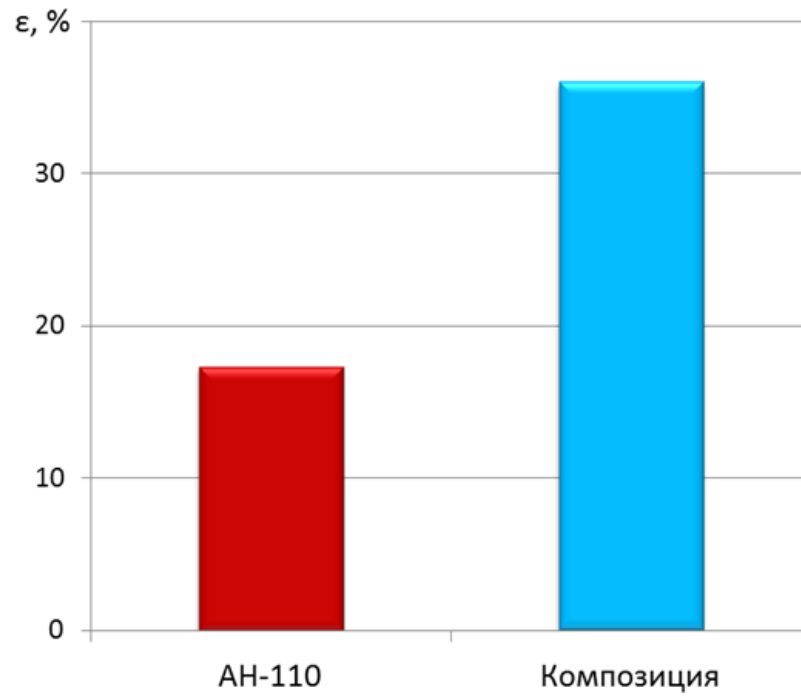


Рисунок 4.5 – Деформация ε пленок акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе с оптимальным составом

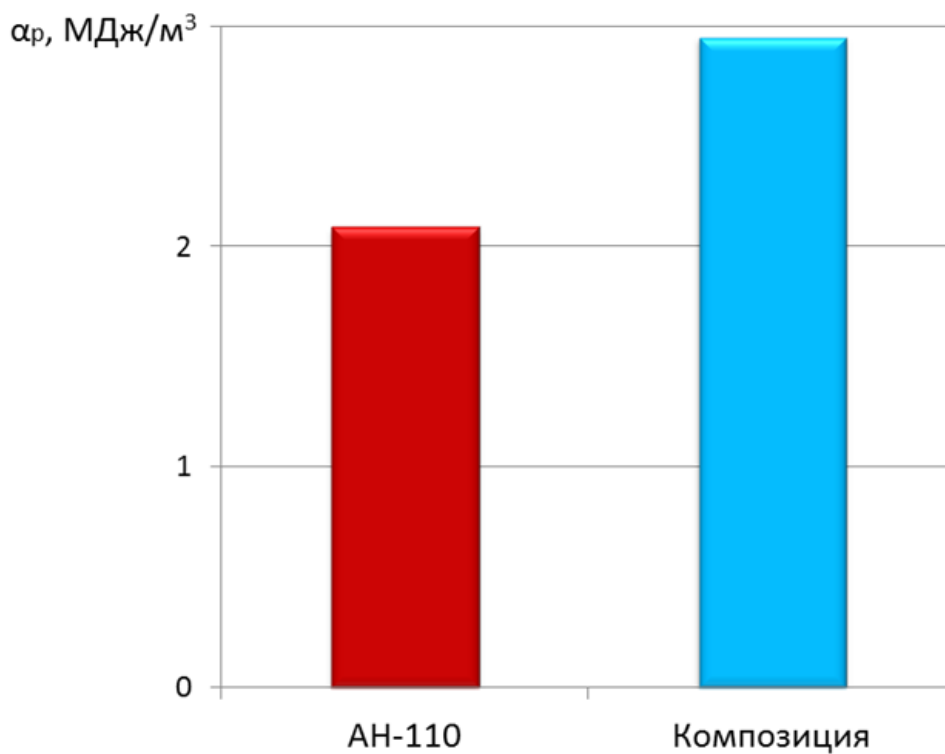


Рисунок 4.6 – Удельная работа разрушения при разрыве α_p пленок акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе с оптимальным составом

Высокие деформационно-прочностные свойства материала являются предпосылками обеспечения высокой долговечности восстановленных соединений при динамическом нагружении. Следовательно полученная композиция является перспективным материалом для восстановления посадок подшипников качения в узлах машин.

Выводы

1 Определен оптимальный состав полимер-полимерной композиции: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс.ч., эластомер Ф-40 – 10 масс. ч.

2 Композиция на основе акрилового адгезива АН-110 имеет более высокие деформационно-прочностные показатели, чем ненаполненный акриловый адгезив. Удельная работа разрушения пленок из композиции в 1,41 раза выше, чем у ненаполненного адгезива.

4.2 Исследование деформационно-прочностных свойств клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе акрилового адгезива АН-110

Целью исследований являлось определение оптимального состава композиции на основе акрилового адгезива АН-110, обеспечивающего наиболее высокие деформационно-прочностные свойства клеевых соединений. Проведены сравнительные исследования деформационно-прочностных свойств клеевых соединений, выполненных акриловым адгезивом АН-110 и полимер-полимерной композицией на его основе. Деформационно-прочностные свойства клеевых соединений материалов оценивали по показателям прочности при аксиальном сдвиге τ , относительного удлинения ε и удельной работой разрушения α_p .

Зависимость прочности при аксиальном сдвиге τ клеевых соединений от концентрации эластомера нелинейная одноэкстремальная (рисунок 4.7).

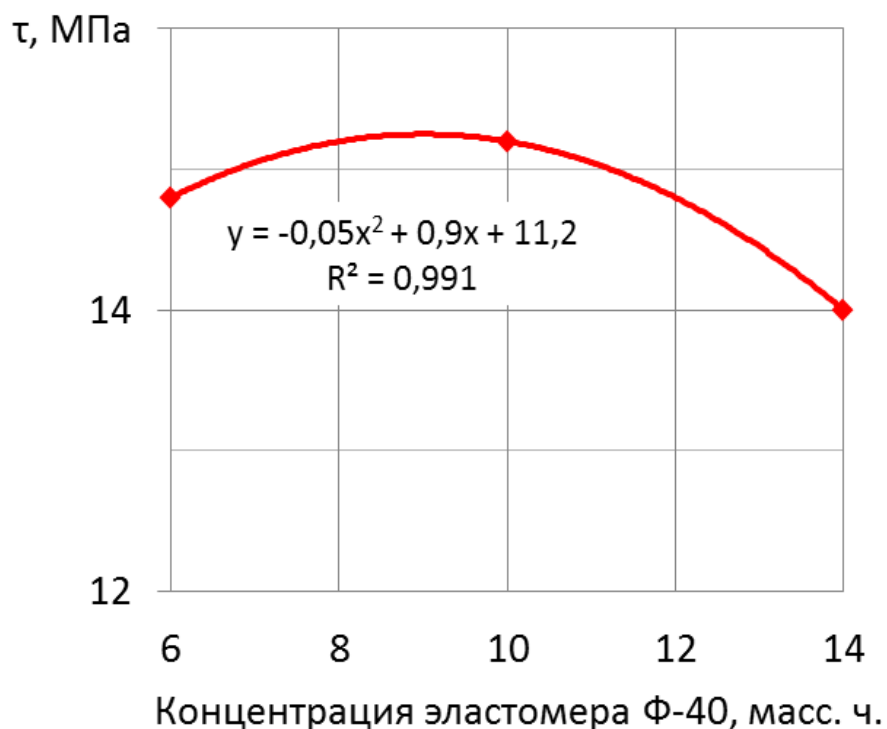


Рисунок 4.7 – Зависимость прочности τ клеевых соединений при аксиальном сдвиге от концентрации раствора эластомера Ф-40

При концентрации наполнителя 6 масс. ч. прочность минимальная и составляет 14,8 МПа. Наибольшую прочность, равную 15,2 МПа имеют клеевые соединения, выполненные композицией с концентрацией эластомера 10 масс. ч. При увеличении концентрации наполнителя до 14 масс. ч. прочность снижается на 8% до 14 МПа.

На рисунке 4.8 показана зависимость деформации ε клеевых соединений от концентрации наполнителя. Зависимость имеет нелинейный характер с экстремумом в виде максимума. При концентрации эластомера 6 масс. ч. деформация составляет 5,4%. Максимальную деформацию $\varepsilon = 6,34\%$, в 1,17 раза большую, чем при концентрации наполнителя 6 масс. ч., имеют клеевые соединения с концентрацией эластомера 10 масс. ч. При увеличении концентрации наполнителя до 14 масс. ч. деформация снижается в 1,3 раза, до 4,82%.

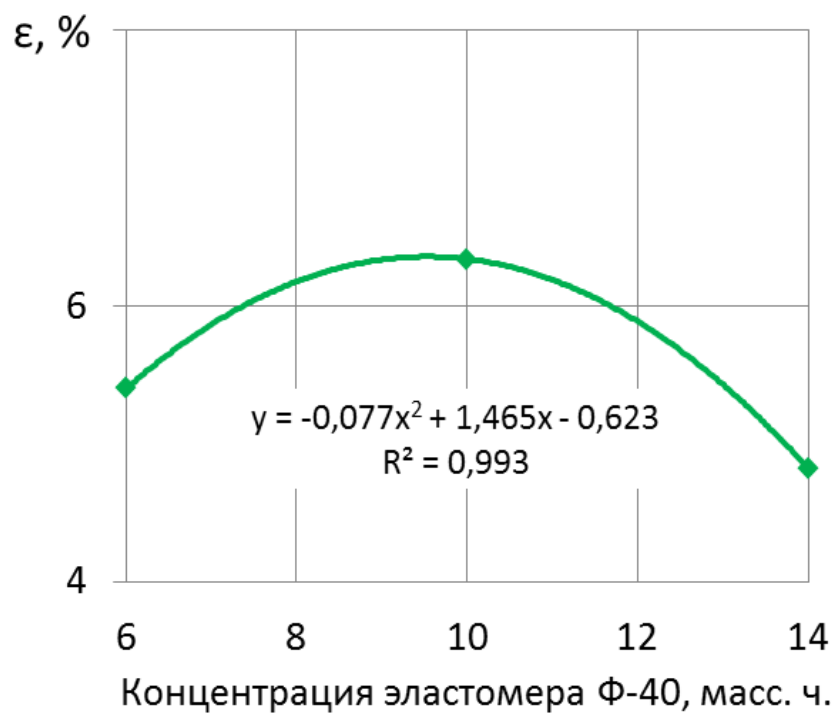


Рисунок 4.8 – Зависимость деформации ε клеевых соединений от концентрации раствора эластомера Φ -40

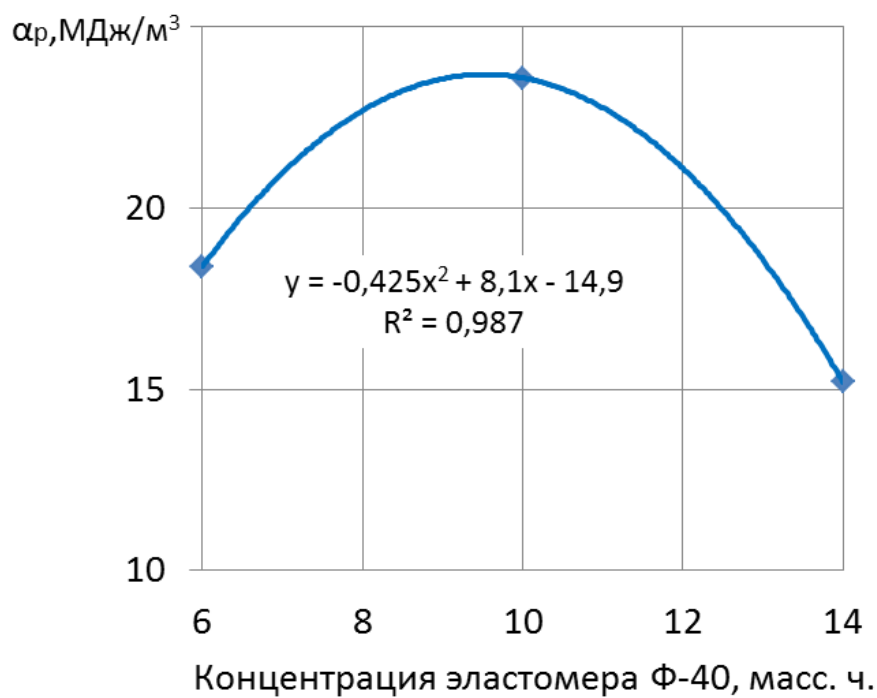


Рисунок 4.9 – Зависимость удельной работы деформации α_p клеевых соединений от концентрации раствора эластомера Φ -40

Зависимость удельной работы разрушения клеевых соединений от концентрации эластомера нелинейная одноэкстремальная (рисунок 4.9). Удельную работу разрушения $18,4 \text{ МДж/м}^3$ имеют клеевые соединения с концентрацией эластомера 6 масс. ч. Наибольшая удельная работа разрушения $23,6 \text{ МДж/м}^3$ у клеевых соединений с концентрацией эластомера 10 масс. ч. При концентрации эластомера 14 масс. ч. удельная работа разрушения имеет минимальное значение и составляет $15,2 \text{ МДж/м}^3$.

Из вышеизложенного следует оптимальный состав композиции для склеивания: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс. ч., эластомер Ф-40 – 12 масс. ч.

Затем провели сравнение прочности клеевых соединений композиции с ненаполненным адгезивом. На рисунке 4.10 показана прочность при аксиальном сдвиге τ клеевых соединений с акриловым адгезивом АН-110 и полимер-полимерной композицией на его основе. Прочность клеевых соединений, выполненных композицией составила 15,2 МПа, что превышает прочность клеевых соединений с ненаполненным акриловым адгезивом на 2,7% ($\tau = 14,8 \text{ МПа}$). По прочности значительного улучшения не наблюдается.

Относительное удлинение ϵ при сдвиге клеевых соединений с адгезивом АН-110 и полимер-полимерной композицией на его основе показано на рисунке 4.11. Удлинение клеевого шва с ненаполненным адгезивом составляет 4,5 %. Введение эластомера увеличивает этот показатель в 1,4 раза (до 6,3%).

Удельная работа разрушения α_p при сдвиге клеевых соединений, выполненных адгезивом АН-110 и его композицией приведена на рисунке 4.12. У соединений с ненаполненным адгезивом она составляет $15,4 \text{ МДж/м}^3$. Удельная работа разрушения композиции на 53,2% выше и составляет $23,6 \text{ МДж/м}^3$.

Высокие деформационно-прочностные свойства клеевых соединений характеризуют не только когезионные, но и высокие адгезионные свойства материала.

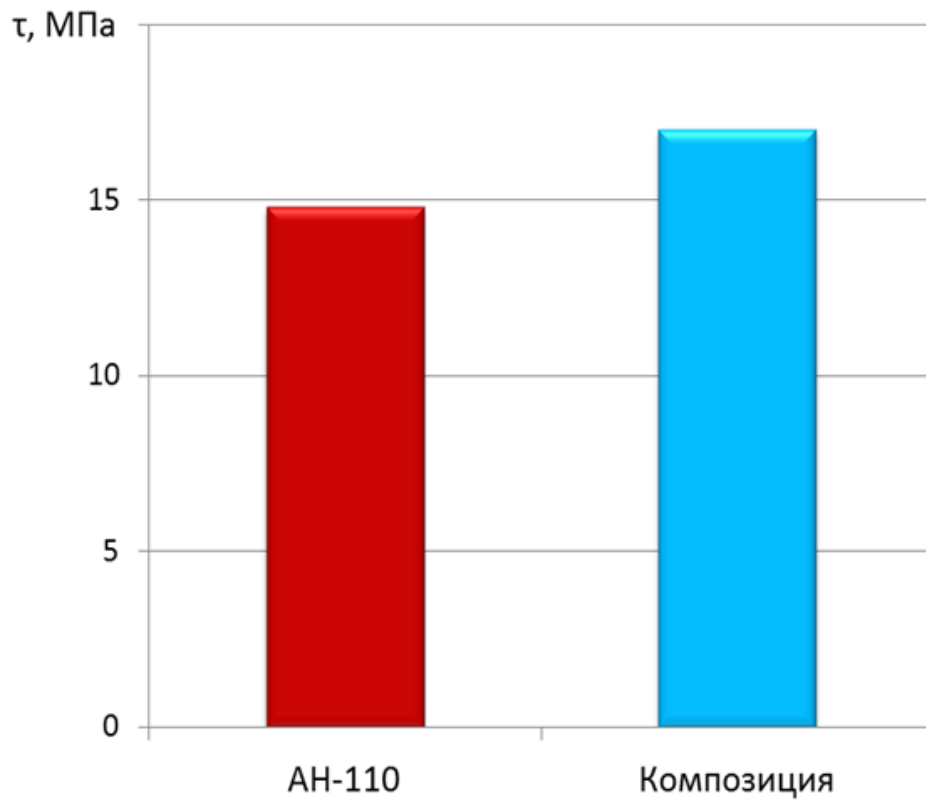


Рисунок 4.10 – Прочность τ клеевых соединений акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе с оптимальным составом

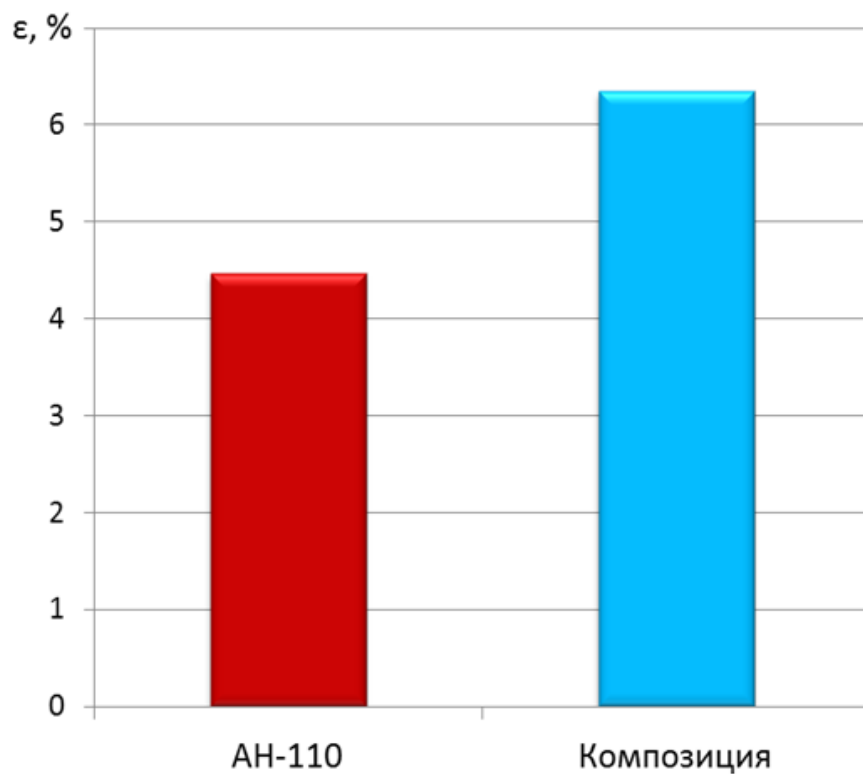


Рисунок 4.11 – Относительное удлинение ϵ клеевых соединений акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе с оптимальным составом

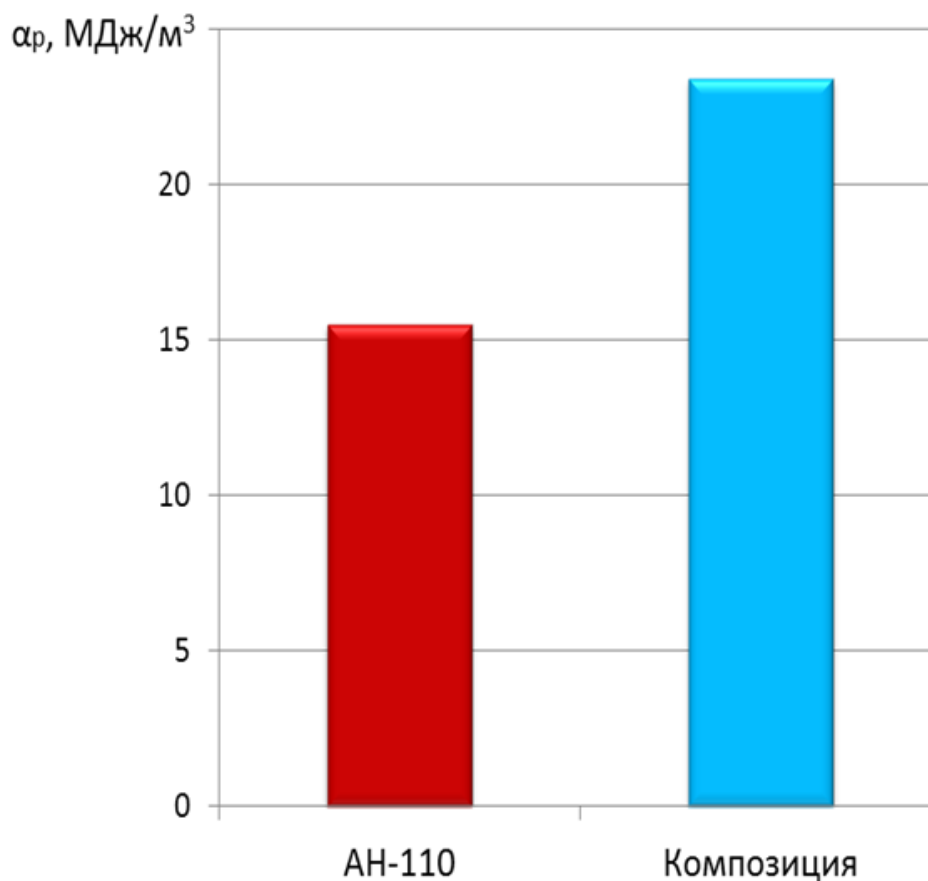


Рисунок 4.12 – Удельная работа разрушения α_p клеевых соединений акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе с оптимальным составом

Выводы

1 Определен оптимальный состав полимер-полимерной композиции, обеспечивающий высокие адгезионные свойства материала: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс. ч., эластомер Ф-40 – 10 масс. ч.

2 Клеевые соединения, выполненные полимер-полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110, имеют более высокие деформационно-прочностные показатели, чем соединения, выполненные ненаполненным акриловым адгезивом. Удельная работа разрушения клеевого шва, выполненного композицией в 1,53 раза выше, чем при использовании ненаполненного адгезива.

4.3 Исследование процесса полимеризации клеевых соединений полимер-полимерной композиции на основе адгезива АН-110 при различных условиях отверждения

Настоящие исследования проводили с целью определения времени полимеризации композиции на основе адгезива АН-110 при различных температурах окружающей среды.

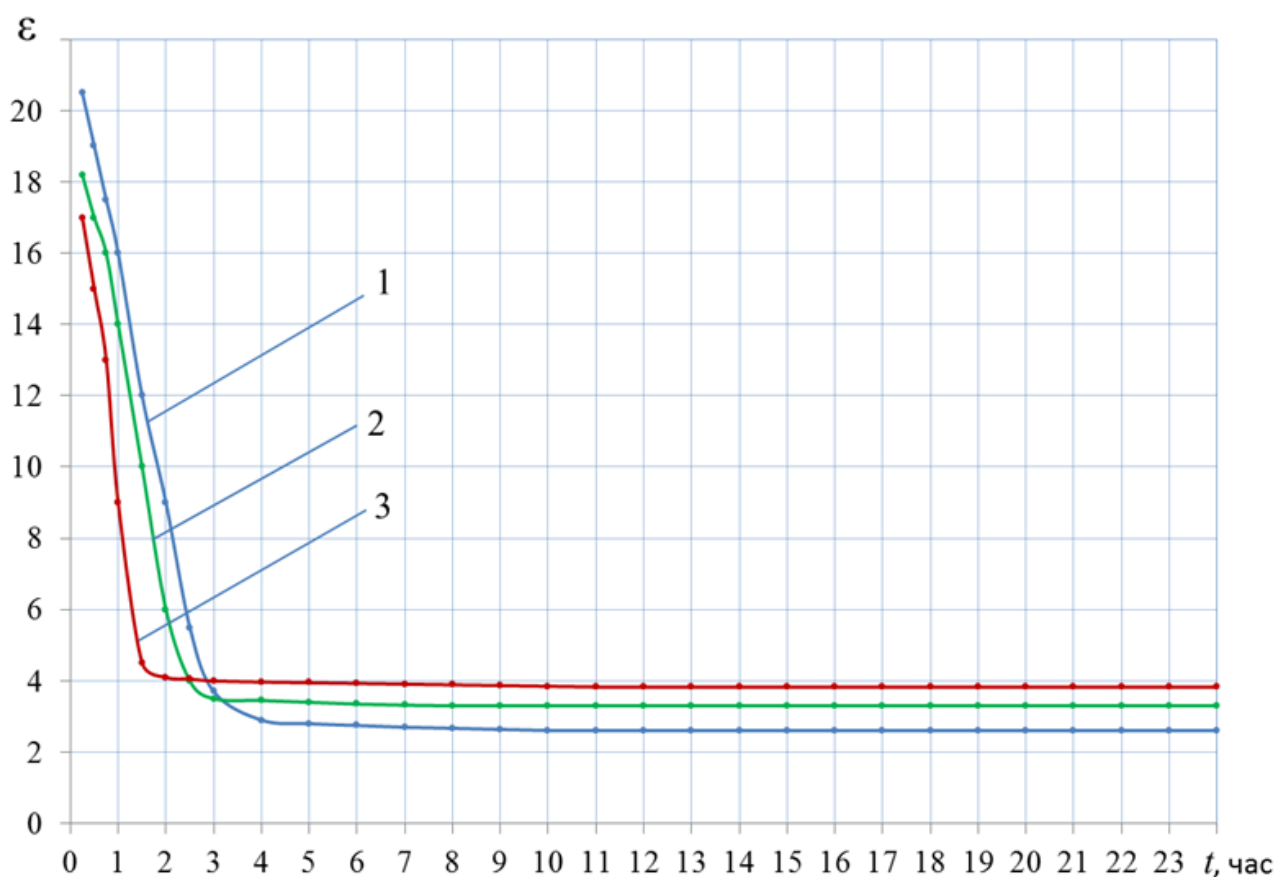
Физико-механические свойства полимерной композиции существенно зависят от её степени отверждения. При более высокой скорости отверждения клеевого соединения требуется меньше времени для достижения транспортировочной прочности. В технологическом аспекте следует отдать предпочтение тому материалу, который имеет меньшее время отверждения, так как деталь раньше будет направлена на последующую сборку.

При отверждении композиции на основе адгезива АН-110 увеличивается её вязкость, ориентация диполей затрудняется и это приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости. В течение полимеризации скорость отверждения композиции непостоянна и значения диэлектрической проницаемости изменяются по нелинейной зависимости. В течение стадии монолитизации скорость отверждения и уменьшения диэлектрической проницаемости максимальна. На данной стадии образуется сшитый полимер и в значительной степени формируются физико-механические свойства материала [105, 106].

Зависимости диэлектрической проницаемости композиции от времени отверждения при различных температурах показаны на рисунке 4.13. При температуре 20°C стадия монолитизации длится 3,5...4 ч, при этом диэлектрическая проницаемость композиции снижается с 20,7 до 2,85. С повышением температуры отверждения до 30 °C продолжительность стадии монолитизации уменьшается до 2,5...3 ч, а при температуре 40 °C – до 1,5...2 ч, при этом зна-

чения диэлектрической проницаемости снижаются с 18,2 до 3,45 и с 17,3 до 4,05 соответственно.

По окончании стадии монолитизации наблюдается значительное снижение скорости изменения диэлектрической проницаемости клеевого шва. При температуре 20°C и времени отверждения 24 ч диэлектрическая проницаемость композиции с момента окончания стадии монолитизации уменьшается с 2,85 до 2,61. При температуре 30°C значения диэлектрической проницаемости уменьшаются с 3,45 до 3,29, при 40°C – с 4,10 до 3,83. По прошествии 24 часов диэлектрическая проницаемость клеевого шва стабилизируется и процесс отверждения заканчивается.



1 – при температуре 20 °C; 2 – при температуре 30 °C;

3 – при температуре 40 °C

Рисунок 4.13 – Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ клеевого шва композиции на основе адгезива АН-110 от времени отверждения

Выводы

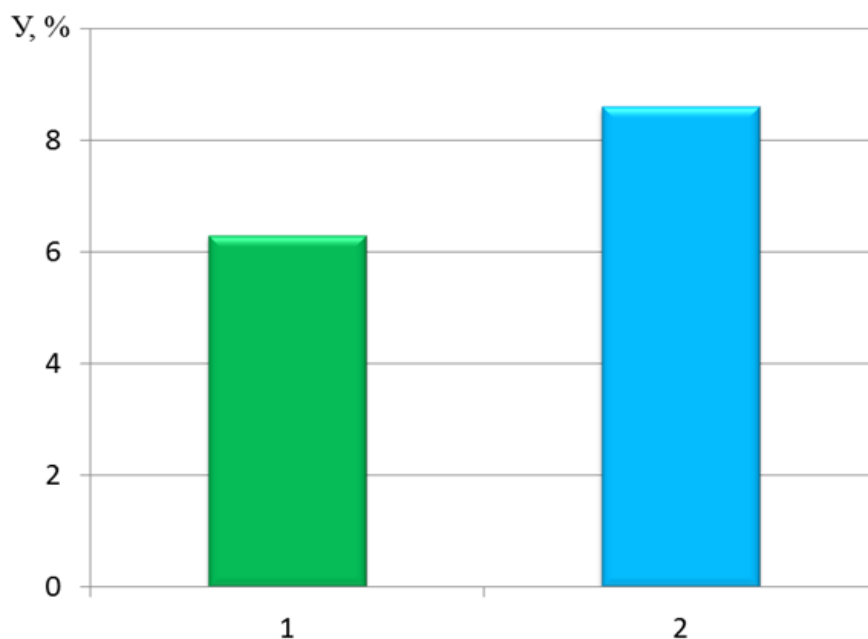
Композиция на основе адгезива АН-110 имеет достаточно высокую скорость полимеризации. Время отверждения, по истечении которого образуется сшитый полимер, составляет 4, 3 и 2 ч при температурах 20; 30 и 40°C, соответственно.

4.4 Исследование усадки акрилового адгезива АН-110

и композиции на его основе

Усадка полимерного материала играет существенную роль в формировании размеров полимерного покрытия после отверждения. Поэтому для выработки технологических рекомендаций по восстановлению деталей исследовали усадку акрилового адгезива АН-110 и композиции на его основе с наполнителем из эластомера Ф-40.

На рисунке 4.14 показана усадка U полимерных покрытий, выполненных адгезивом АН-110 и композицией на его основе. Ненаполненный акриловый адгезив АН-110 имеет усадку 6,3%. При введении в адгезив 10 масс. ч. наполнителя Ф-40, усадка получившейся композиции увеличивается до 8,6%, что в 1,36 раза больше аналогичного показателя ненаполненного адгезива АН-110. Увеличение усадки композиции обусловлено тем, что эластомер Ф-40 является раствором композиции каучука и модифицированной фенольной смолы в ацетоне. При отверждении ацетон испаряется и происходит усадка полимерного материала. Полученные значения усадки относительно небольшие, например, усадка эластомеров может достигать 24% [107]. Усадку материала необходимо учитывать при нанесении полимерного покрытия на восстанавливаемые детали и при проектировании деталей оснастки для восстановления посадочных отверстий под подшипники качения акриловым адгезивом АН-110 и композицией на его основе.



1 – акриловый адгезив АН-110; 2 – композиция на основе акрилового адгезива:
100 масс. ч. АН-110, 10 масс. ч. Ф-40

Рисунок 4.14 – Усадка $У$ полимерных покрытий, выполненных акриловым адгезивом АН-110 и композицией на его основе

Вывод

Акриловый адгезив АН-110 имеет усадку 6,3%. Введение эластомера увеличивает усадку композиции в 1,36 раза до 8,6%. Необходимо учитывать эту величину при разработке калибрующего инструмента для обеспечения заданного размера отверстий с полимерным покрытием.

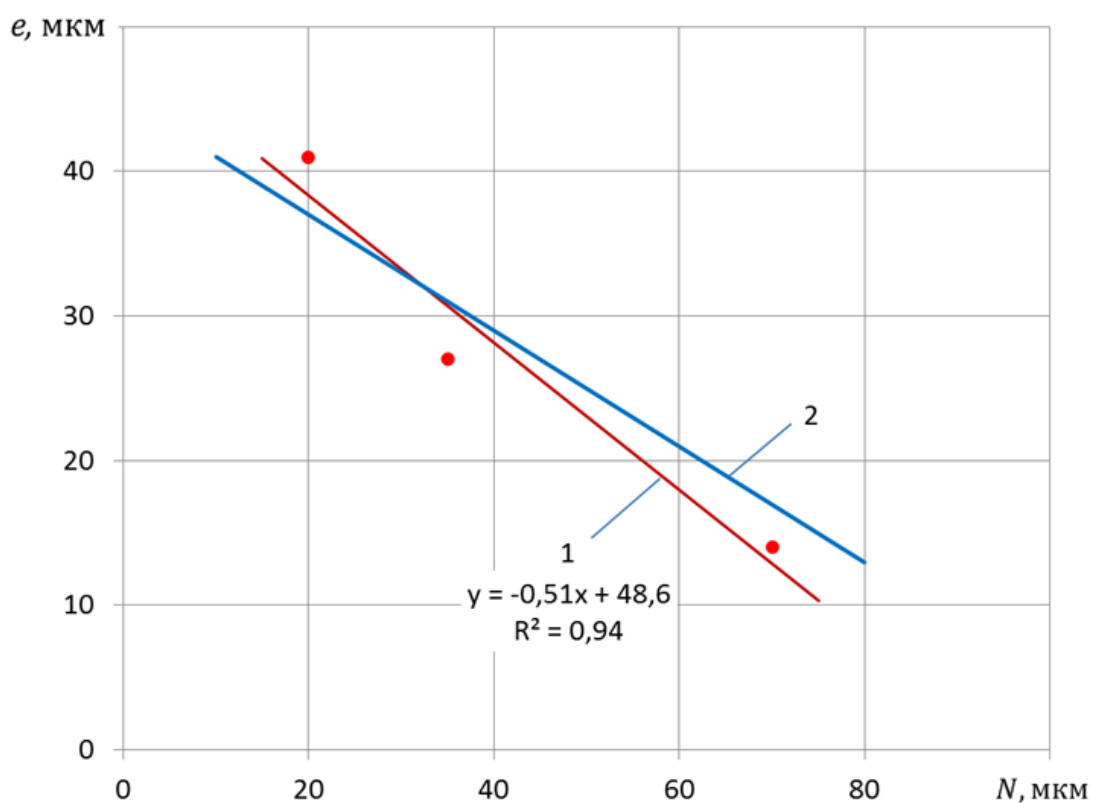
4.5 Исследование параметров контакта и распределения нагрузки между телами качения и зависимости данных параметров от радиального зазора в подшипнике

4.5.1 Исследование зависимости радиального зазора в роликоподшипнике от натяга полимерного покрытия после запрессовки в корпусную деталь

Цель исследований заключалась в определении зависимости радиального зазора в роликоподшипнике от натяга посадки, обеспечиваемого полимерным

покрытием из композиции адгезива АН-110 и в сравнении полученных результатов с теоретическими расчетами.

Зависимость радиального зазора e в роликоподшипнике 42209 от натяга полимерного покрытия N после запрессовки в корпусную деталь имеет линейный характер (рисунок 4.15).



1 – экспериментальное значение; 2 – расчетное значение

Рисунок 4.15 – Зависимость радиального зазора e подшипника 42209 от натяга полимерного покрытия N из композиции адгезива АН-110 после запрессовки в корпусную деталь

Толщина полимерного покрытия составляла 0,22; 0,235 и 0,27 мм. Зависимость 2 является расчетной по формуле (2.47). При натяге полимерного покрытия $N = 20$ мкм радиальный зазор в подшипнике наибольший и составляет 41 мкм. При увеличении натяга посадки до 35 мкм, радиальный зазор в подшипнике уменьшается в 1,5 раза, до 27 мкм. При натяге посадки 70 мкм радиальный зазор в подшипнике уменьшается до 14 мкм, что в 2,9 раза меньше пер-

воначального радиального зазора. Это объясняется тем, что создаваемое при натяге полимерного покрытия осесимметричное равномерное давление сжимает наружное кольцо подшипника.

Для сравнения расчетных и экспериментальных значений, последние аппроксимировали прямой, так как функциональная зависимость радиального зазора от натяга посадки имеет практически линейный характер. В результате получили, что расчетные и экспериментальные значения натяга полимерного покрытия в роликоподшипнике 42209 отличаются максимум на 7,6%, то есть формула (2.47) обеспечивает достаточную точность расчета.

Практически радиальный зазор необходимо выбирать исходя из технических требований на подшипник и условий его работы. По заданному значению радиального зазора по формуле (2.47) рассчитывается необходимый натяг посадки.

Вывод

Формула (2.47) позволяет с достаточной точностью (ошибка не более 8%) рассчитать натяг полимерного покрытия по заданному радиальному зазору в подшипнике.

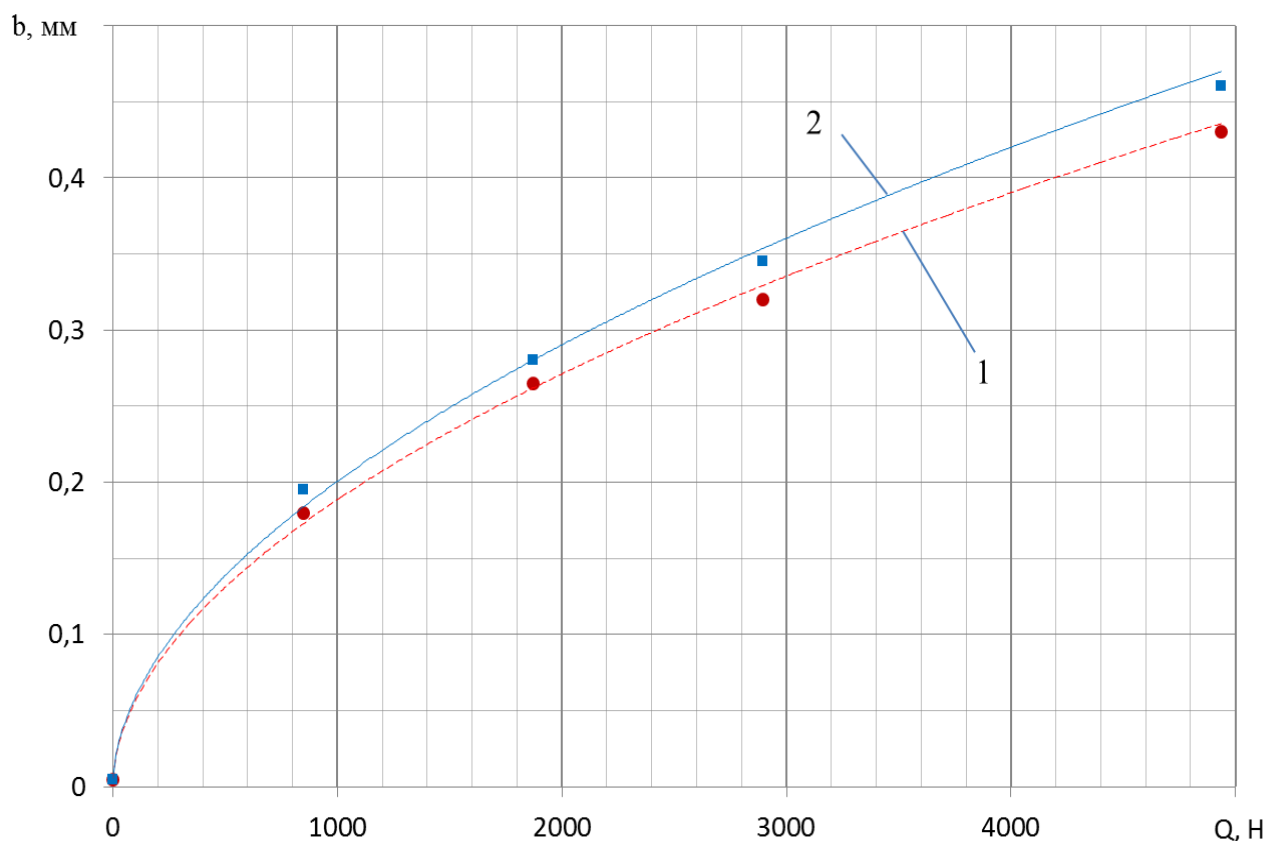
4.5.2 Исследование параметров контакта и распределения нагрузки между телами качения

Цель исследований заключалась в изучении параметров контакта – размеров пятна контакта, контактных напряжений и распределения нагрузки между телами качения в роликоподшипнике с посадкой, восстановленной полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-110, зависимости параметров контакта от радиального зазора в подшипнике, обеспечиваемого натягом полимерного покрытия, а так же сравнении данных параметров с аналогичным подшипником стандартной конструкции.

Графики зависимости ширины пятна контакта от нагрузки для подшипника с полимерным покрытием и стандартного подшипника приведены на ри-

сунке 4.16. Это тарировочные графики, по которым можно определять нагрузки на тела качения, используя ширину пятна контакта. Из рисунка видно, что ширина пятна контакта в подшипнике с полимерным покрытием при одинаковой нагрузке больше, чем в стандартном подшипнике.

Измеренная ширина пятна контакта при нагрузке 850 Н составила 0,18 и 0,20 мм для стандартного и подшипника с полимерным покрытием соответственно; при нагрузке 1874 Н – 0,26 и 0,28 мм; при 2895 Н – 0,32 и 0,35 мм; при 4938 Н – 0,43 и 0,46 мм. В подшипнике с полимерным покрытием ширина пятна контакта в 1,07...1,1 раза больше, чем в стандартном подшипнике. Увеличение ширины пятна контакта в подшипнике с полимерным покрытием происходит из-за локальной деформации наружного кольца в зоне контакта.



1 – стандартный подшипник; 2 – подшипник с полимерным покрытием

Рисунок 4.16 – Зависимость ширины пятна контакта b между телом и дорожкой качения наружного кольца подшипника 42209 от нагрузки Q на тело качения

Нагрузки на центральные, первые, вторые и третьи боковые тела качения и контактные напряжения в контакте центрального тела качения и наружного кольца в стандартном роликоподшипнике 42209 и в аналогичном подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм приведены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Распределение нагрузки между телами качения и контактные напряжения в стандартном подшипнике 42209

Обозначения	Нагрузка на подшипник Р, Н		
	4940	6980	9010
Центральное тело качения			
b_0 , мм (ширина пятна контакта)	0,23	0,27	0,31
S_0 , мм ² (площадь контакта)	2,3	2,7	3,1
Q_0 , Н (нагрузка на центральное тело качения)	1500	2100	2675
σ_0 , МПа (контактное напряжение)	825	957	1082
Первое боковое тело качения			
b_1 , мм (ширина пятна контакта)	0,21	0,25	0,29
S_1 , мм ² (площадь контакта)	2,1	2,5	2,9
Q_1 , Н (нагрузка на первое боковое тело качения)	1250	1750	2300
Второе боковое тело качения			
b_2 , мм (ширина пятна контакта)	0,17	0,20	0,22
S_2 , мм ² (площадь контакта)	1,7	2,0	2,2
Q_2 , Н (нагрузка на второе боковое тело качения)	800	1100	1450
Третье боковое тело качения			
b_3 , мм (ширина пятна контакта)	0,09	0,11	0,12
S_3 , мм ² (площадь контакта)	0,9	1,1	1,2
Q_3 , Н (нагрузка на третье боковое тело качения)	250	350	450

Распределение нагрузки между телами качения в подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм в сравнении со стандартным подшипником показано на рисунке 4.17. По сравнению со стандартным подшипником без полимерного покрытия нагрузка на центральное тело качения уменьшается на 6...7%; а на первые боковые тела качения нагрузка увеличивается на 2...4%; на вторые боковые тела качения нагрузка увеличивается на 13...17%.

Таблица 4.2 – Распределение нагрузки между телами качения и контактные напряжения в подшипнике 42209 с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм

Обозначения	Нагрузка на подшипник Р, Н		
	4940	6980	9010
Центральное тело качения			
b_0 , мм (ширина пятна контакта)	0,24	0,29	0,33
S_0 , мм ² (площадь контакта)	2,4	2,9	3,3
Q_0 , Н (нагрузка на центральное тело качения)	1400	1975	2525
σ_0 , МПа (контактное напряжение)	735	863	964
Первое боковое тело качения			
b_1 , мм (ширина пятна контакта)	0,23	0,28	0,32
S_1 , мм ² (площадь контакта)	2,3	2,8	3,2
Q_1 , Н (нагрузка на первое боковое тело качения)	1300	1850	2350
Второе боковое тело качения			
b_2 , мм (ширина пятна контакта)	0,19	0,23	0,27
S_2 , мм ² (площадь контакта)	1,9	2,3	2,7
Q_2 , Н (нагрузка на второе боковое тело качения)	900	1300	1700
Третье боковое тело качения			
b_2 , мм (ширина пятна контакта)	0,10	0,12	0,14
S_2 , мм ² (площадь контакта)	1,0	1,2	1,4
Q_2 , Н (нагрузка на третье боковое тело качения)	250	400	500

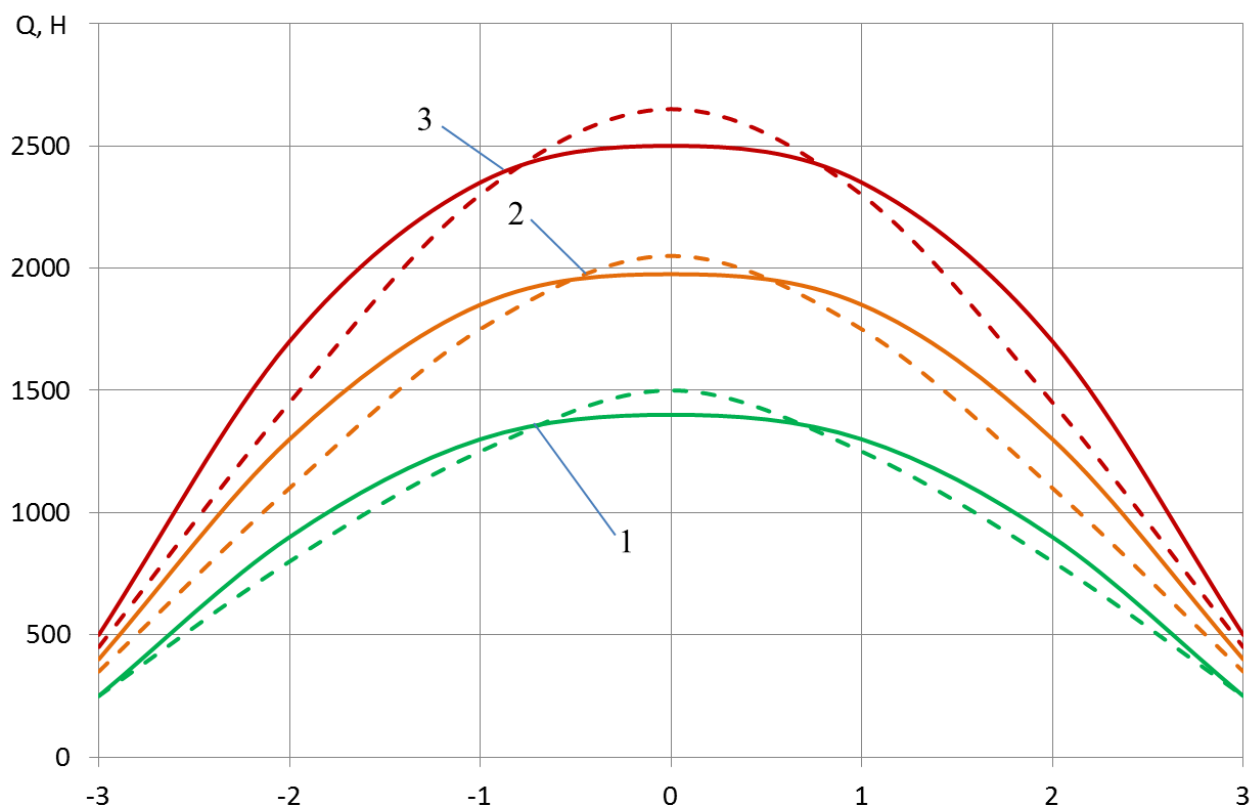


Рисунок 4.17 – Распределение нагрузки между телами качения в стандартном подшипнике (пунктирные линии) и подшипнике с полимерным покрытием натягом посадки 15 мкм (сплошные линии) при радиальной нагрузке 4940Н (1), 6980Н (2) и 9010Н (3): 0; ± 1 ; ± 2 ; ± 3 – центральное, первые, вторые и третьи тела качения соответственно

Параметры контакта в подшипнике натягом посадки 40 мкм приведены в таблице 4.3. Распределение нагрузки в подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм в сравнении с подшипником с натягом посадки 40 мкм показано на рисунке 4.18. Уменьшение радиального зазора в подшипнике ведет к ещё большей равномерности распределения и дальнейшему снижению нагрузки на центральное тело качения в подшипнике. По сравнению со стандартным подшипником без полимерного покрытия нагрузка на центральное тело качения уменьшается на 12...13%; а на первые боковые тела качения нагрузка увеличивается на 3...5%; на вторые боковые тела качения нагрузка увеличивается на 25...27%.

Таблица 4.3 – Распределение нагрузки между телами качения и контактные напряжения в подшипнике 42209 с полимерным покрытием с натягом посадки 40 мкм

Обозначения	Нагрузка на подшипник Р, Н		
	4940	6980	9010
Центральное тело качения			
b_0 , мм (ширина пятна контакта)	0,23	0,28	0,32
S_0 , мм ² (площадь контакта)	2,4	2,8	3,2
Q_0 , Н (нагрузка на центральное тело качения)	1325	1850	2375
σ_0 , МПа (контактное напряжение)	712	831	935
Первое боковое тело качения			
b_1 , мм (ширина пятна контакта)	0,22	0,27	0,31
S_1 , мм ² (площадь контакта)	2,2	2,7	3,1
Q_1 , Н (нагрузка на первое боковое тело качения)	1300	1825	2350
Второе боковое тело качения			
b_2 , мм (ширина пятна контакта)	0,20	0,24	0,28
S_2 , мм ² (площадь контакта)	2,0	2,4	2,8
Q_2 , Н (нагрузка на второе боковое тело качения)	950	1400	1825
Третье боковое тело качения			
b_2 , мм (ширина пятна контакта)	0,10	0,13	0,15
S_2 , мм ² (площадь контакта)	1,0	1,3	1,5
Q_2 , Н (нагрузка на третье боковое тело качения)	275	450	550

Коэффициенты распределения нагрузки для роликоподшипника 42209 (стандартного, с полимерным покрытием с натягом посадки 15 и 40 мкм) приведены в таблице 4.4. Данные коэффициенты у подшипников с полимерным покрытием выше, чем у стандартного подшипника.

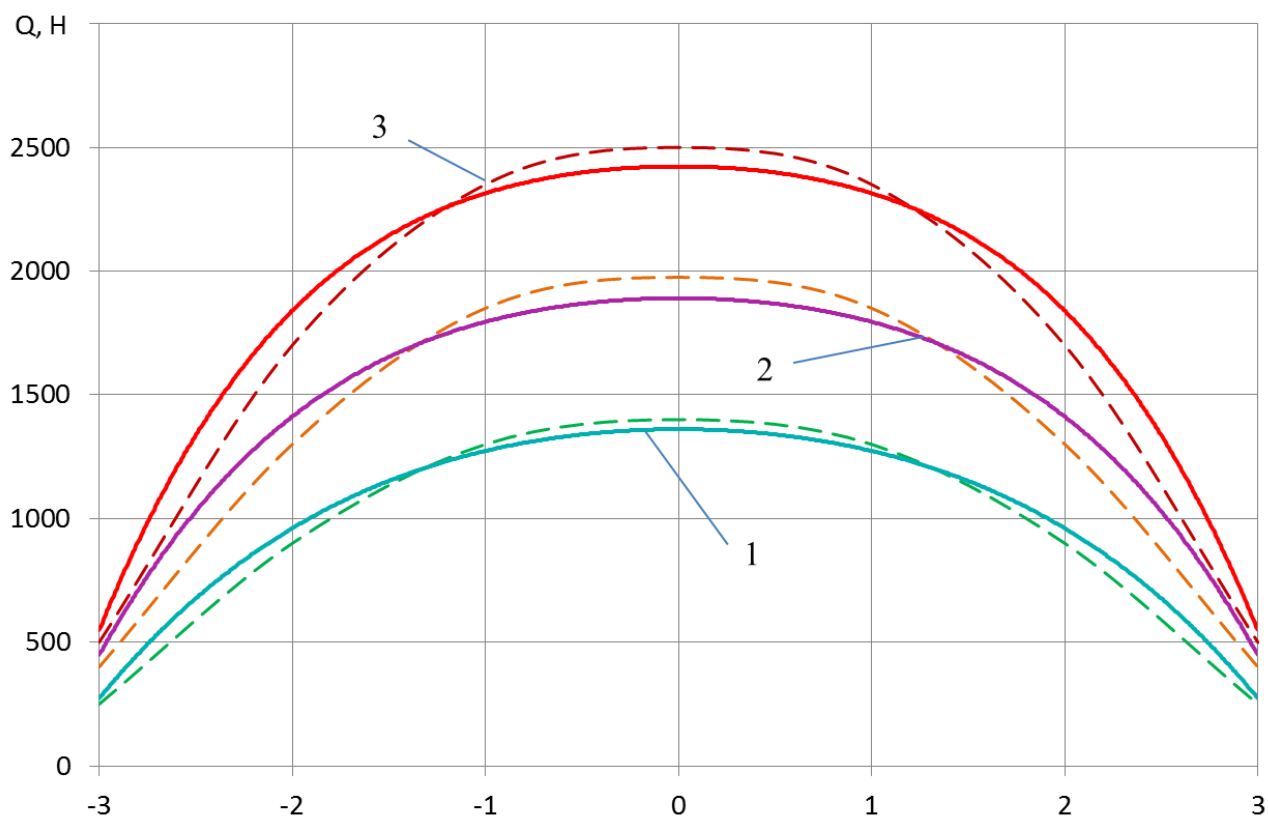


Рисунок 4.18 – Распределение нагрузки между телами качения в подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 40 мкм (пунктирные линии) и 13 мкм (сплошные линии) при радиальной нагрузке 4940Н (1), 6980Н (2) и 9010Н(3): 0; ± 1 ; ± 2 ; ± 3 – центральное, первые, вторые и третьи тела качения соответственно

Коэффициент распределения нагрузки между центральным и первыми боковыми телами качения в подшипнике с натягом посадки 15 мкм на 8...11% больше по сравнению со стандартным подшипником. Коэффициент распределения нагрузки между центральным телом качения и вторыми боковыми телами качения в подшипнике с полимерным покрытием так же выше на 21...24% аналогичного показателя для стандартного подшипника. В подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 40 мкм коэффициенты распределения нагрузки увеличиваются в ещё большей степени. Коэффициент распределения нагрузки между центральным и первыми боковыми телами качения в подшипнике с полимерным покрытием натягом посадки 40 мкм выше на 14...17% по

сравнению со стандартным подшипником и приближается к единице, а между вторыми боковыми и центральным телами качения – на 34...40% выше, чем у стандартного подшипника. При натяге посадки 60 мкм распределение нагрузки между телами качения ухудшается. Поэтому оптимальным является натяг посадки полимерного покрытия 40 мкм.

Таблица 4.4 – Коэффициенты распределения нагрузки между телами качения в стандартном роликоподшипнике 42209 и в подшипнике с полимерным покрытием

Коэффициент распределения нагрузки	Нагрузка на подшипник Р, Н		
	4940	6980	9010
Стандартный подшипник			
k_{p1}	0,833	0,854	0,868
k_{p2}	0,533	0,537	0,547
Подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм			
k_{p1}	0,928	0,937	0,940
k_{p2}	0,643	0,658	0,680
Подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 40 мкм			
k_{p1}	0,981	0,986	0,989
k_{p2}	0,717	0,757	0,768
Подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 60 мкм			
k_{p1}	0,935	0,946	0,953
k_{p2}	0,663	0,671	0,684

Значения коэффициента нагрузки на центральное тело качения K в исследуемых подшипниках приведены в таблице 4.5. Данный коэффициент характеризует нагрузку на центральное тело качения: чем он меньше – тем нагрузка на центральное тело качения меньше. Как видно из таблицы, в подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм коэффициент K меньше чем в стандартном подшипнике до 1,07 раз. В подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 40 мкм коэффициент K меньше до 1,13 раза.

Таблица 4.5 – Коэффициенты нагрузки на центральное тело качения в стандартном роликоподшипнике 42209 и в подшипнике с полимерным покрытием

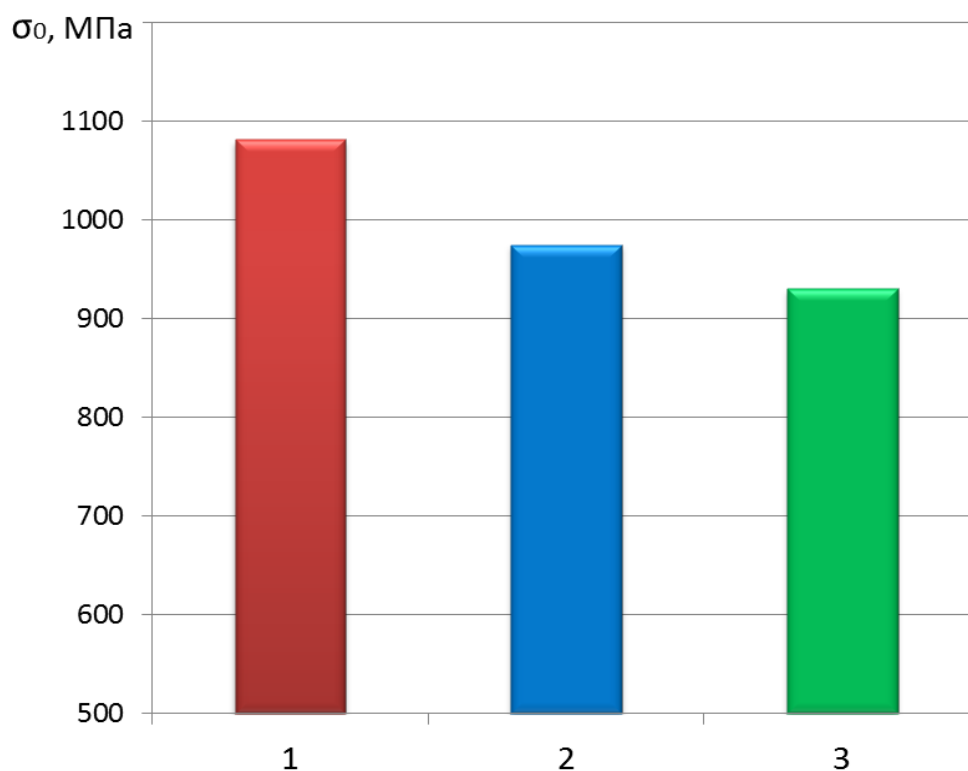
	Нагрузка на подшипник Р, Н		
	4940	6980	9010
Коэффициент нагрузки на центральное тело качения К	Стандартный подшипник		
	4,55	4,51	4,45
	Подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм		
	4,25	4,24	4,20
	Подшипник с полимерным покрытием с натягом посадки 40 мкм		
	4,02	3,98	3,95

Коэффициент K в подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 40 мкм по сравнению с аналогичным подшипником с натягом посадки 15 мкм ($K = 4,20 \dots 4,25$) уменьшился на 5,7...6,3% и имеет значения в диапазоне 3,95...4,02. Тем самым подтверждаются теоретические предпосылки, изложенные в разделе 2.2.

В роликоподшипнике с полимерным покрытием нагрузка перераспределяется с центрального на боковые тела качения. Распределение нагрузки между телами качения становится более равномерное. Нагрузка на центральное тело качения снижается. Натяг посадки 40 мкм создаёт оптимальный радиальный зазор в подшипнике, что приводит к значительному увеличению нагрузки на вторые боковые тела качения, дальнейшему снижению нагрузки на центральное тело качения и увеличению равномерности распределения нагрузки.

Контактные напряжения в месте контакта центрального тела с дорожкой качения наружного кольца будут самыми высокими в подшипнике, так как нагрузка, передающаяся через центральное тело качения на дорожку качения наружного кольца больше сил, передающихся от боковых тел качения ($Q_0 > Q_1 > Q_2$). Поэтому напряжения в контакте центрального тела с дорожкой качения будут в основном определять долговечность всего подшипника. Максимальные контактные напряжения в зоне контакта наружного кольца и цен-

трального тела качения при радиальной нагрузке на подшипник 9010 Н показаны на рисунке 4.19. В подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 15 мкм контактные напряжения на 12% меньше чем в стандартном подшипнике.



1 – стандартный подшипник;

2 – подшипник с полимерным покрытием (натяг посадки 15 мкм);

3 – подшипник с полимерным покрытием (натяг посадки 40 мкм)

Рисунок 4.19 – Максимальные напряжения в зоне контакта центрального тела и дорожки качения наружного кольца роликоподшипника 42209 при радиальной нагрузке 9010Н

В подшипнике с полимерным покрытием с натягом посадки 40 мкм, напряжения ещё ниже – на 15...17% меньше, чем в стандартном подшипнике.

Известно, что даже незначительное снижение контактных напряжений σ может привести к значительному увеличению долговечности подшипника L ,

так как $L \sim \frac{1}{\sigma^6}$.

Выводы

1 При радиальном нагружении роликоподшипника с полимерным покрытием происходит увеличение размеров пятна контакта и перераспределение нагрузки с центрального на боковые тела качения. Размеры пятна контакта в роликоподшипнике с полимерным покрытием больше до 1,1 раза, чем в стандартном. В роликоподшипнике 42209 (с натягом посадки 15 мкм) нагрузка на центральное тело качения в сравнении со стандартным подшипником меньше на 6...7%; на первые боковые тела качения нагрузка больше на 2...4%; на вторые боковые тела качения – больше на 13...17%.

2 При увеличении натяга посадки в роликоподшипнике происходит дальнейшее снижение нагрузки на центральное тело качения и повышение равномерности распределения нагрузки между телами качения. В подшипнике 42209 с натягом посадки 40 мкм, обеспечивающим оптимальный радиальный зазор, нагрузка на центральное тело качения в сравнении со стандартным подшипником меньше на 12...13%; на первые боковые тела качения нагрузка больше на 3...5%; на вторые боковые тела качения – больше на 25...27%.

3 Снижение нагрузки на центральное тело качения и увеличение размеров пятна контакта приводит к соответствующему снижению контактных напряжений. Максимальные напряжения в зоне контакта наружного кольца и центрального тела качения в роликоподшипнике 42209 при радиальной нагрузке 9010Н в роликоподшипнике с полимерным покрытием до 17% ниже, чем в стандартном.

4.6 Исследование коэффициента податливости упругого основания

Коэффициент податливости упругого основания является важной характеристикой восстановленного полимерным материалом соединения «подшипник-корпус». Данный коэффициент характеризует жесткость упругого основания. С уменьшением коэффициента податливости полимерной подложки деформация наружного кольца и площадь пятна контакта нагруженных тел с до-

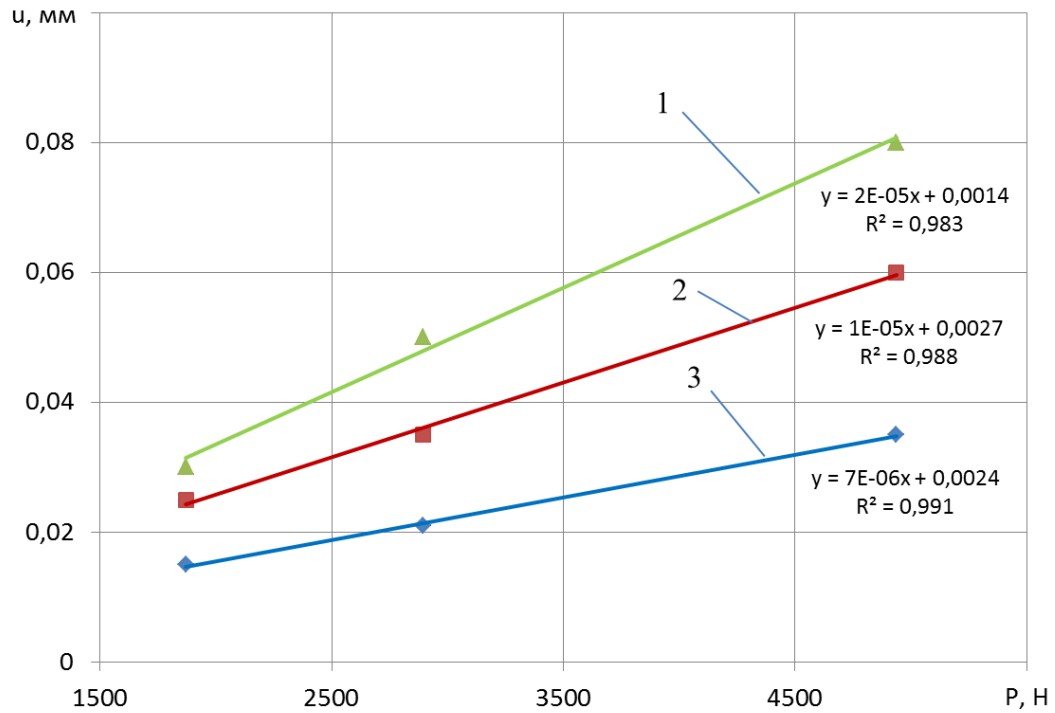
рожкой качения в подшипнике увеличиваются, что приводит к соответствующему снижению контактных напряжений.

Цель настоящих экспериментальных исследований заключалась в определении коэффициента податливости полимер-полимерной композиции на основе акрилового адгезива АН-110 при различных толщинах полимерного покрытия.

На рисунке 4.20 показана зависимость деформации u стальной пластины с полимерной подложкой из композиции на основе адгезива АН-110 от значений нагрузки на ролик P при различных толщинах полимерной подложки.

Деформация пластины при толщине полимерной подложки $h=0,05$ мм и нагрузке $P=1870$ Н составила $u=0,015$ мм. С повышением нагрузки P до 2895 Н деформация увеличилась в 1,4 раза до 0,021 мм. При нагрузке 4938 Н деформация возросла 0,035 мм, что в 2,33 и 1,66 раза больше чем при нагрузках 1870 и 2895 Н, соответственно. У пластины с полимерной подложкой толщиной $h=0,1$ мм при нагрузке $P = 1870$ Н прогиб составил $u = 0,025$ мм. С увеличением нагрузки P до 2895 Н деформация возросла в 1,4 раза, до 0,035 мм. При наибольшей нагрузке $P = 4938$ Н пластина имеет максимальный прогиб $u = 0,06$ мм, что больше в 2,4 и 1,7 раза чем при нагрузках 1870 и 2895 Н. При наибольшей толщине полимерной подложки $h = 0,15$ мм и нагрузке $P = 1870$ Н деформация пластины составила $u = 0,03$ мм. С увеличением нагрузки P до 2895 Н деформация пластины возросла в 1,67 раза до 0,05 мм. При максимальной нагрузке $P=4938$ Н пластина деформировалась на максимальное значение $u = 0,08$ мм, что в 2,67 и 1,6 раза больше чем при нагрузках 1870 и 2895 Н. Все три зависимости имеют близкий к линейному характер. При увеличении толщины полимерной подложки и нагрузки деформация пластины увеличивается.

Деформация стальной пластины на упругой полимерной подложке при радиальном нагружении характеризует ее податливость. На рисунке 4.21 показана зависимость коэффициента податливости k_n от толщины h полимерного покрытия из композиции на основе акрилового адгезива АН-110. При толщине полимерного покрытия $h = 0,05$ мм коэффициент податливости упругого основания максимален и составляет $k_n = 180,4$ Н/мм³.



1 – $h = 0,05$ мм; 2 – $h = 0,1$ мм; 3 – $h = 0,15$ мм

Рисунок 4.20 – Зависимость деформации пластины u на полимерной подложке из композиции на основе акрилового адгезива АН-110 от радиальной нагрузки P при различных толщинах полимерной подложки

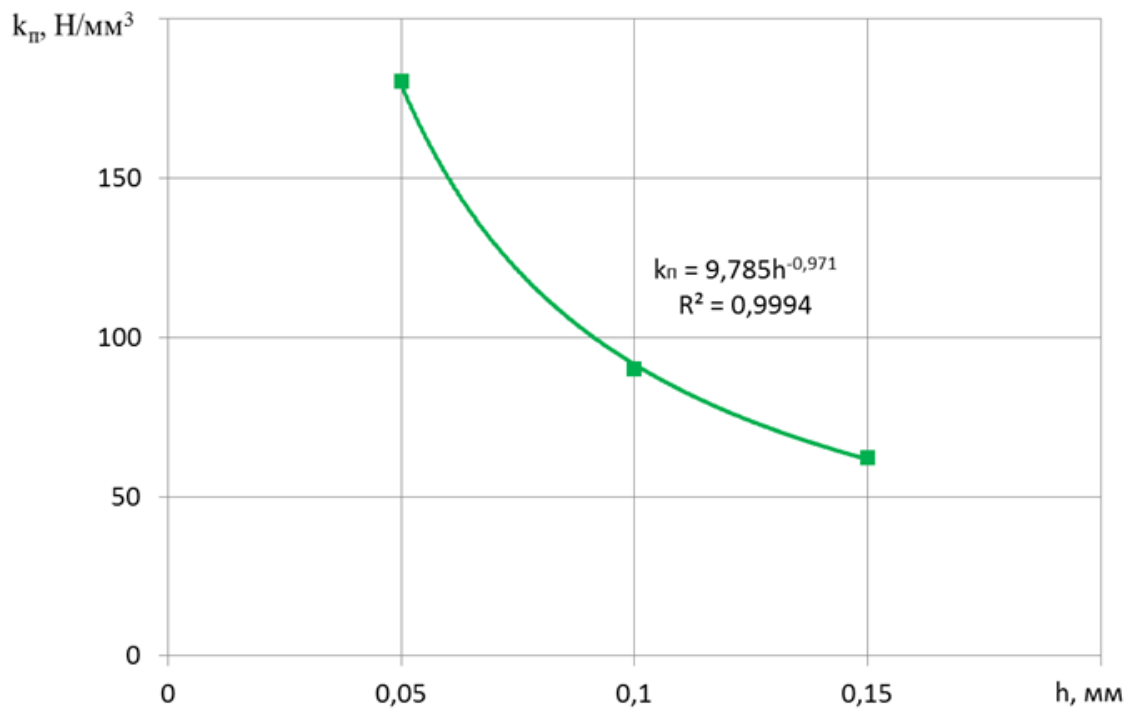


Рисунок 4.21 – Зависимость коэффициента податливости k_n от толщины h полимерной подложки из композиции на основе акрилового адгезива АН-110

При толщине полимерного покрытия 0,1 мм коэффициент податливости k_n уменьшается до 90,1 Н/мм³, что в 2 раза меньше чем при толщине полимерного покрытия $h = 0,05$ мм. При наибольшей исследуемой толщине полимерного покрытия $h = 0,15$ мм коэффициент податливости принимает минимальное значение $k_n = 62,3$ Н/мм³, что в 2,9 раза меньше чем при $h = 0,05$ мм, и в 1,4 раза меньше чем при $h = 0,1$ мм.

После аппроксимации получили, что зависимость коэффициента податливости от толщины полимерной подложки имеет вид: $k_n = 9,785h^{-0,971}$.

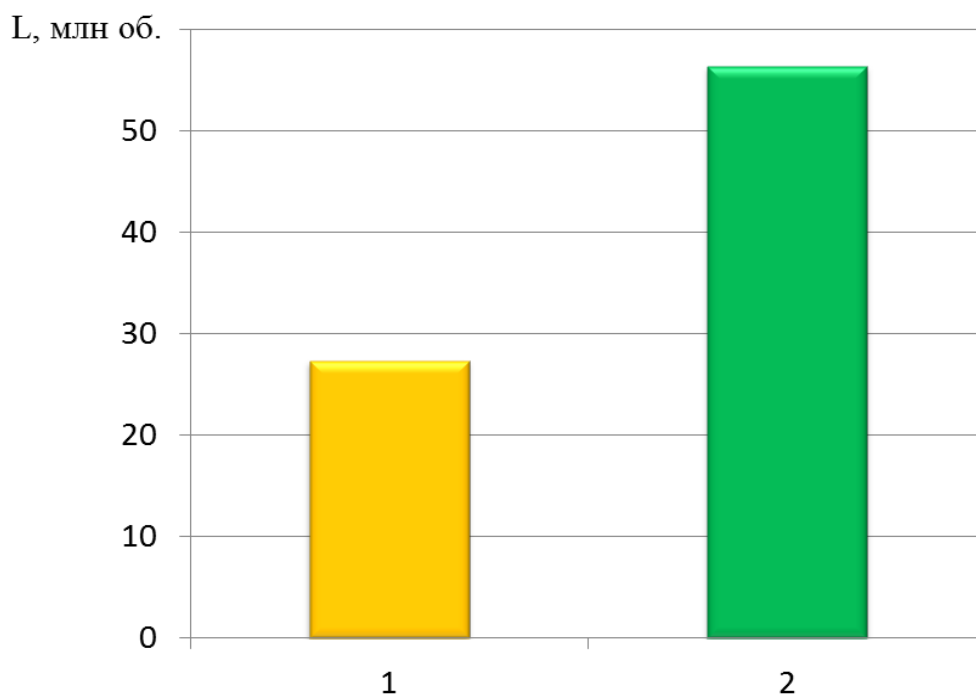
Вывод

С увеличением толщины полимерного покрытия от 0,05 до 0,15 мм, коэффициент податливости упругого основания k_n уменьшается в 2,9 раза, от 180,4 до 62,3 Н/мм³, что создает благоприятные условия для деформации наружного кольца, увеличения коэффициента распределения нагрузки и снижения контактных напряжений.

4.7 Исследование долговечности при местном нагружении наружного кольца роликовых подшипников с посадками, восстановленными полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-110

Стендовые испытания роликоподшипниковых узлов при местном нагружении наружного кольца проводили с целью определения долговечности подшипника с посадкой, восстановленной полимерной композицией на основе акрилового адгезива АН-110.

Долговечность роликоподшипника 42209 с полимерным покрытием из композиции на основе акрилового адгезива АН-110 и расчетная долговечность стандартного подшипника аналогичного типоразмера при радиальной нагрузке 13070 Н приведены на рисунке 4.22. Расчетная долговечность стандартного подшипника 42209 при нагрузке $P = 13070$ Н составляет 27,3 млн об.



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

Рисунок 4.22 – Долговечность подшипника 42209 при радиальной нагрузке 13070 Н

Результаты стендовых испытаний показали, что долговечность подшипника с полимерным покрытием достигает 56,4 млн об., что в 2,1 раза больше расчетной долговечности. Благодаря наличию полимерного покрытия толщиной 0,1 мм между наружным кольцом подшипника и втулкой, уменьшилась нагрузка на центральное тело качения, снизились контактные напряжения и произошел значительный рост долговечности подшипника.

Расчет по формуле (2.25) долговечности роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным покрытием показал, что различие с экспериментальными данными составляет 15%. Это позволяет заключить, что формула (2.25) обеспечивает достаточную точность расчета.

Выводы

1 При восстановлении изношенных отверстий в корпусных деталях композицией на основе акрилового адгезива АН-110, долговечность роликовых подшипников при местном нагружении наружного кольца увеличивается в сравнении с расчетной до 2,1 раз.

2 Формула (2.25) обеспечивает достаточную точность расчета долговечности роликоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом (ошибка не более 15%).

4.8 Исследование долговечности при циклическом нагружении посадок роликоподшипников, восстановленных полимер-полимерной композицией на основе адгезива АН-110

Цель настоящих исследований заключалась в определении максимально допустимой толщины полимерного покрытия из композиции на основе акрилового адгезива АН-110 при восстановлении изношенных посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях.

Исходя из результатов исследований, приведенных в работах [16, 18], долговечность восстановленной посадки подшипника уменьшается с увеличением толщины полимерного покрытия. На рисунке 4.23 показана зависимость долговечности восстановленных посадок подшипников 42209 от толщины полимерного покрытия из композиции на основе акрилового адгезива АН-110 и радиальной нагрузке 20 кН. Зависимость является нелинейной и имеет вид кривой Веллера. Стрелки у точек означают, что проворота наружного кольца подшипника за время испытаний зарегистрировано не было. В качестве базы испытаний на долговечность приняли $N = 5,94 \times 10^7$ циклов нагружения, что составляет 330 ч работы стенда.

При толщине полимерного покрытия 0,20 мм наружное кольцо провернулось в посадочном отверстии после 12 ч стендовых испытаний. С уменьшением толщины полимерного покрытия до 0,175 мм долговечность соединения составила 16 ч, что в 1,33 раза больше чем при толщине покрытия 0,2 мм. С уменьшением толщины полимерного покрытия до 0,15 мм долговечность восстановленного соединения заметно возросла и составила 45 ч, что выше долговечности восстановленных посадок с толщиной полимерного покрытия $h = 0,2$ мм в 3,75 раза, а с $h = 0,175$ мм в 2,8 раза.. При уменьшении толщины полимерного

покрытия до 0,125 мм соединение сохраняло работоспособность в течение 243 ч, что выше долговечности посадок с толщиной полимерного покрытия $h = 0,2$ мм в 20 раз, с $h = 0,175$ мм в 15 раз, а с $h = 0,15$ мм в 5,4 раза. Соединения с толщиной полимерного покрытия 0,1 мм и ниже, оставались работоспособными до конца испытаний. Проворота наружного кольца подшипника в посадочном отверстии зарегистрировано не было. Поэтому допустимая толщина полимерного покрытия композиции на основе акрилового адгезива АН-110, при которой обеспечивается безотказная работа восстановленного соединения составляет 0,1 мм.

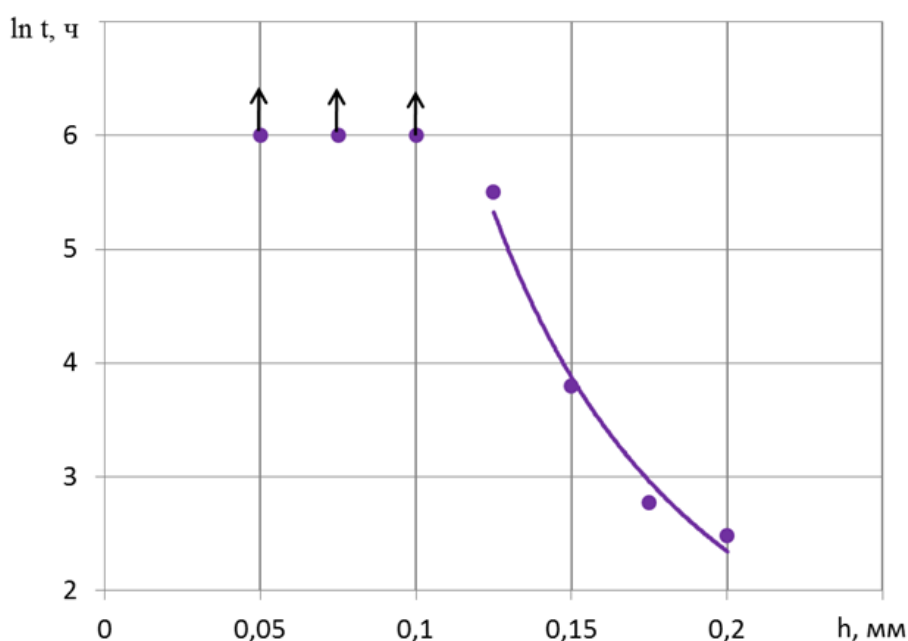


Рисунок 4.23 – Долговечность t неподвижных соединений подшипников 42209 при различной толщине полимерного покрытия из композиции на основе акрилового адгезива АН-110 при радиальной нагрузке 20 кН

Вывод

Восстановление изношенных отверстий в корпусных деталях покрытием из композиции на основе акрилового адгезива АН-110 обеспечивает высокую долговечность посадок подшипников при циклическом нагружении. Рекомендуется восстанавливать изношенные посадочные отверстия под подшипники с диаметральным износом до 0,2 мм.

5 РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

5.1 Технологическая оснастка для калибрования отверстий с полимерным покрытием из акрилового адгезива АН-110 в корпусных деталях

Разработана технологическая оснастка для калибрования отверстий с полимерным покрытием из композиции на основе адгезива АН-110 в корпусе коробки передач 52-1701015А, которая устанавливается на автомобили ГАЗ-53, ГАЗ-3307, ГАЗ-3309.

Оснастка состоит из базирующей детали и формующего калибра. Детали оснастки изготовлены из стали 45. После механической обработки детали подвергли закалке по режиму: $T_{\text{нагр}} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{нагр}} = 0,5\text{ ч}$, охлаждающая среда – масло веретенное при $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [65].

Базирующая деталь выполнена в виде трехступенчатого вала (рисунок 5.1). Ступень максимального диаметра базирующей детали является опорной. Цилиндрическая поверхность ступени среднего диаметра служит для базирования по не изношенной части поверхности отверстия в корпусной детали. Ступень наименьшего диаметра – хвостовик является направляющей для калибра.

Калибр имеет формующую цилиндрическую поверхность (рисунок 5.2). Передняя кромка формующей поверхности калибра выполнена скругленной, чтобы при формовании полимерное покрытие не крошилось. Диаметр формующей поверхности D_k рассчитывается с учетом усадки полимерного покрытия и необходимого натяга посадки подшипника для обеспечения оптимального распределения нагрузки между телами качения

$$D_k = D - U \cdot h_{\text{пп}} - N,$$

где D – наружный диаметр подшипника; U – усадка полимерного покрытия, для композиции адгезива АН-110 $U=0,08$; $h_{\text{пп}}$ – толщина полимерного покрытия; N – натяг полимерного покрытия, рассчитываемый по формуле (2.47).

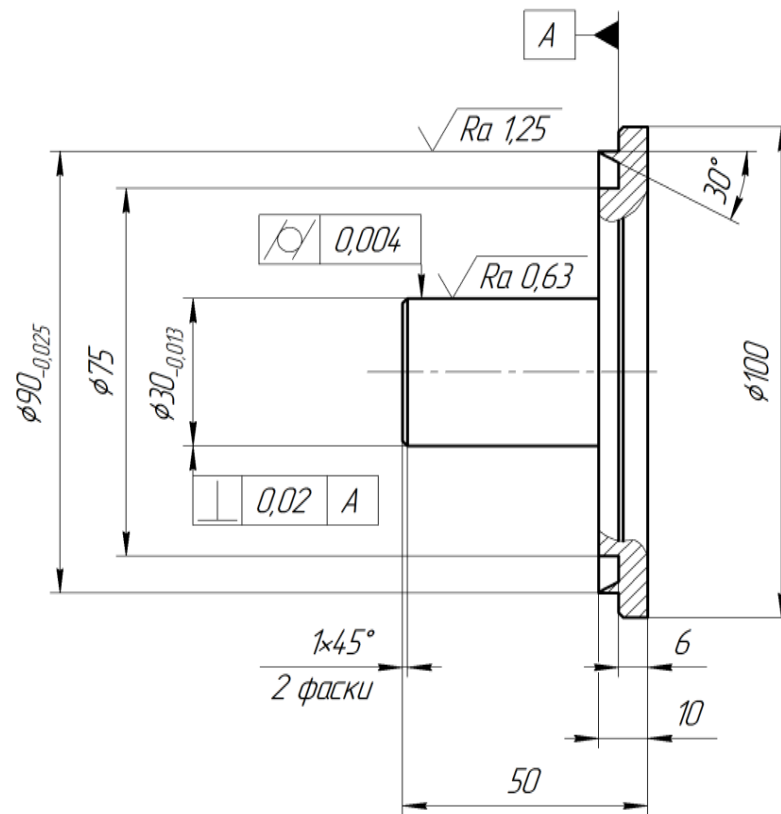


Рисунок 5.1 – Базирующая деталь

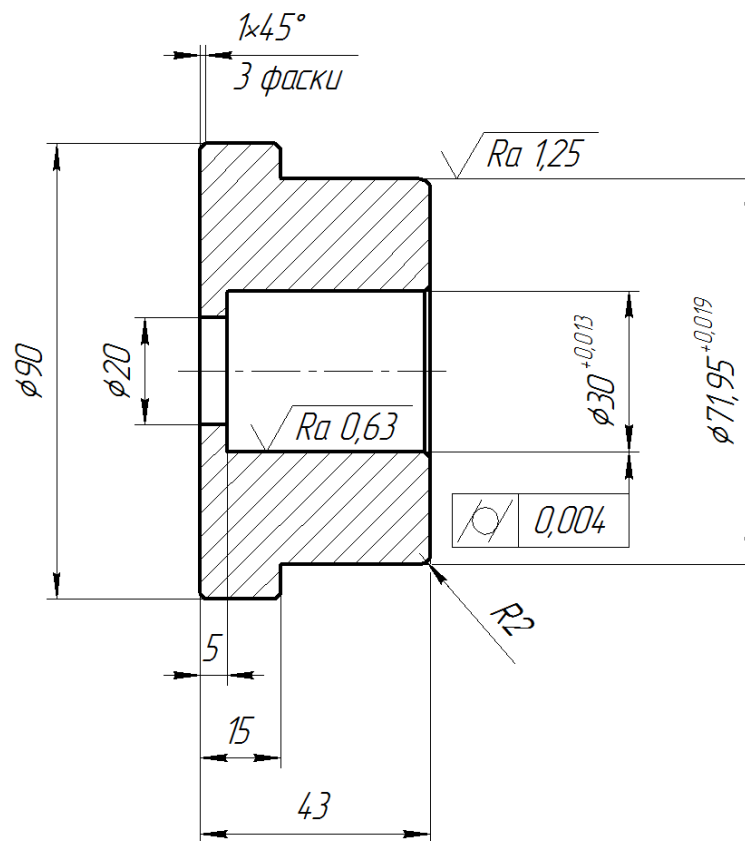


Рисунок 5.2 – Формующий калибр

Цилиндрическое отверстие, проходящее через всю длину калибра, служит для базирования и перемещения калибра по поверхности хвостовика базирующей детали. Сквозное отверстие в торцевой стенке калибра служит для его съема с хвостовика базирующей детали в случае возникновения перекоса или заклинивания, а сама стенка служит упором, в который упирается хвостовик по окончании перемещения калибра.

Вывод

Разработана технологическая оснастка, включающая базирующую деталь и формирующий калибр, позволяющая калибровать механическим способом отверстия с полимерным покрытием и обеспечивающее необходимую точность геометрических размеров отверстий.

5.2 Метод расчета параметров контакта и долговечности роликотподшипника с полимерным покрытием

В результате обобщения материалов теоретических и экспериментальных исследований разработан метод расчета параметров контакта, оптимального натяга полимерного покрытия и долговечности роликотподшипника с полимерным покрытием:

- 1) Экспериментально определяются нагрузки на тела качения в подшипнике с полимерным покрытием;
- 2) Экспериментально определяется коэффициент податливости упругого основания k_n ;
- 3) По таблице 2.1 определяется коэффициент кривизны $k_{кр}$;
- 4) По формуле (2.4) определяется коэффициент β ;
- 5) По формулам (2.12) и (2.13) рассчитываются ширина пятна контакта и максимальные напряжения в зоне контакта наиболее нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца роликотподшипника с полимерным покрытием;

- 6) По формуле (2.18) определяется оптимальный радиальный зазор в роликоподшипнике с полимерным покрытием из условия передачи нагрузки на боковые тела качения;
- 7) По формуле (2.47) рассчитывается оптимальный натяг полимерного покрытия.
- 8) По соотношению (2.20) и рисунку 2.9 определяются значения коэффициентов K_{Π} и K_C ;
- 9) Рассчитывается коэффициент распределения нагрузки между телами качения в подшипнике с полимерным покрытием $k_{рп}$

$$k_{рп} = \frac{P_{1п}}{P_{0п}},$$

где $P_{1п}$ и $P_{0п}$ – нагрузки на первые боковые и центральное тела качения в подшипнике с полимерным покрытием;

- 10) По формуле (2.3) рассчитывается ширина пятна контакта в зоне контакта наиболее нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца стандартного роликоподшипника; по известным формулам рассчитывается долговечность стандартного подшипника при такой же радиальной нагрузке, при которой будет работать подшипник с полимерным покрытием;
- 11) По формуле (2.25) рассчитывается долговечность роликоподшипника с полимерным покрытием; в стандартном роликоподшипнике коэффициент распределения нагрузки $k_{рс} = 0,83 \dots 0,86$ (таблица 4.4);

Для упрощения расчетов разработана компьютерная программа (рисунок 5.3). В программу вводятся нагрузки на тела качения, параметры подшипника и полимерного покрытия. В результатах расчета выводятся ширина пятна контакта, максимальные контактные напряжения, оптимальный натяг полимерного покрытия и долговечность подшипника с полимерным покрытием.

Расчет параметров роликоподшипника с ПКМ

Файл О программе

Нагрузки на тела качения		Радиальная нагрузка на подшипник P, Н	
На центральное P0, Н	2550		9000
На первые боковые P1, Н	2350	Параметры полимерного материала	
На вторые боковые P2, Н	1700	Коеф. податливости kп, Н/мм ³	80
Параметры материала подшипника		Модуль упругости полимерного материала, МПа	4000
Модуль упругости E, МПа	210000	Толщина полимерного покрытия, мм	0,2
Коеффициент Пуассона	0,3	Результаты расчета	
Параметры подшипника		Ширина пятна контакта, мм	0,272
Динамическая грузоподъемность, Н	35300	Максимальные контактные напряжения в подшипнике, МПа	1189,26
Ширина, мм	19	Долговечность подшипника с полимерным покрытием, млн об.	168,49
Момент инерции сечения наружного кольца, см ⁴	0,022	Оптимальный натяг полимерного покрытия, мкм	33,57
Момент инерции сечения внутреннего кольца, см ⁴	0,019	<div>Вычислить</div>	
Диаметр дорожки качения наружного кольца, мм	77		
Диаметр ролика, мм	10		
Длина ролика, мм	10		
Начальный радиальный зазор в подшипнике, мкм	45		

Рисунок 5.3 – Программа расчета параметров контакта и долговечности роликоподшипника с полимерным покрытием

5.3 Технологические рекомендации

Разработана технология восстановления посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях полимерной композицией на основе адгезива АН-110 (Приложение Г).

Технология восстановления содержит следующие операции:

- 1) Очистка посадочных отверстий под подшипники в корпусной детали;
- 2) Измерение посадочных отверстий для определения износа;
- 3) Обезжиривание посадочных отверстий;
- 4) Приготовление композиции на основе адгезива АН-110 с наполнителем из эластомера Ф-40;
- 5) Нанесение композиции на основе адгезива АН-110 на посадочные отверстия в корпусной детали;
- 6) Калибрование отверстия под заданный размер;
- 7) Контроль качества полимерных покрытий в корпусной детали.

При установке в полученное отверстие подшипника, на предварительно обезжиренную и просушенную поверхность наружного кольца, а так же на поверхность отверстия рекомендуется нанести тонкий слой адгезива АН-110 и после этого запрессовать подшипник в отверстие.

Разработанная технология восстановления внедрена в ОАО «Добринское» Суровикинского района Волгоградской области. Для оценки надежности восстановленных деталей с октября 2015 г. по ноябрь 2016 г. в хозяйстве проводились эксплуатационные испытания автотракторной техники (приложение Д). За период испытаний отказов техники из-за недостаточной долговечности восстановленных посадок подшипников не выявлено.

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

5.4 Расчет экономической эффективности технологии восстановления корпусных деталей композицией на основе адгезива АН-110 в ОАО «Добринское» Суровикинского района Волгоградской области

Стоимость восстановления с применением новой технологии рассчитывали на единицу площади поверхности восстанавливаемых отверстий. Затраты на восстановление 1 дм² поверхности отверстий композицией адгезива АН-110 составляют [117...120]

$$C_{\Pi} = 3\Pi + C_M + \Pi_P + C_{опу}, \quad (5.1)$$

где 3Π – затраты на зарплату рабочих ремонтного персонала, руб/дм²; C_M – цена материалов для восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстий под подшипники, руб/дм²; Π_P – прочие расходы на производство продукции, руб.; $C_{опу}$ – накладные расходы на организацию и управление производством, руб.

Затраты на заработную плату рабочих ремонтного персонала

$$ЗП = ЗП_o + ЗП_d + H_{cc}, \quad (5.2)$$

где $ЗП_o$ – затраты на основную заработную плату рабочих ремонтного персонала, руб; $ЗП_d$ – затраты на дополнительную заработную плату рабочих ремонтного персонала, руб; H_{cc} – затраты на отчисления социального страхования, руб.

Основная заработная плата рабочих ремонтного персонала рассчитана по формуле

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

где $T_{об}$ – общие затраты труда на восстановление 1 $дм^2$ изношенной поверхности, ч; $C_ч$ – часовой тариф, руб/ч.

Трудоемкость восстановления единицы площади изношенной поверхности отверстия $T_{об}$ равна норме на выполнение всех технологических операций восстановления. Методом хронометража зафиксировали время, необходимое для выполнения всех операций по восстановлению (таблица 5.1). Расчет производили для диаметрального износа отверстий в 0,2 мм.

Приняли, что операции технологического процесса восстановления выполняются слесарем четвертого разряда со сдельной оплатой труда и часовой тариф составляет 115,27 руб/ч (данные ОАО «Добринское»).

$$ЗП_o = 115,27 \cdot 0,044 = 5,1 \text{ руб} / дм^2$$

Дополнительную заработную плату определяли по формуле

$$ЗП_d = ЗП_o \cdot K_{д.п.} \quad (5.4)$$

$K_{д.п}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную оплату, по данным ОАО «Добринское» составляет 15% от затрат на основную зарплату рабочих ремонтного персонала, тогда

$$ЗП_{д} = 5,1 \cdot 0,15 = 0,77 \text{ руб} / \text{дм}^2.$$

Начисления на социальное страхование определяли по формуле

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

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

Таблица 5.1 – Норма времени на восстановление 1 дм² изношенной поверхности отверстий под подшипники в корпусных деталях композицией на основе адгезива АН-110

№ п/п	Наименование операции	Норма времени, мин/дм ²
1	Обезжиривание поверхности	0,4
2	Приготовление композиции	0,5
3	Нанесение полимерного покрытия из композиции на посадочные отверстия	0,5
4	Калибрование	0,7
5	Разборка приспособления для калибрования	0,3
6	Контроль	0,25
	Итого:	2,65 (0,044 ч/дм ²)

$$H_{cc} = (5,1 + 0,77) \cdot 0,3 = 1,76 \text{ руб} / \text{дм}^2.$$

Затраты на заработную плату рабочих из расчета на 1 дм² восстановленной поверхности отверстий

$$ЗП = 5,1 + 0,77 + 1,76 = 7,63 \text{ руб} / \text{дм}^2.$$

Цена материалов, необходимых для восстановления 1 дм² изношенной поверхности отверстий в корпусных деталях

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

где H_M – норма расхода материалов на восстановление 1 дм² площади изношенной поверхности отверстий под подшипники в корпусных деталях, кг/дм²;

C_M – цена единицы материалов, руб/кг.

Цены материалов, необходимых для восстановления посадочных отверстий под подшипники приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Стоимость материалов для восстановления 1 дм² отверстий под подшипники в корпусных деталях

№ п/п	Наименование материала	Цена руб/кг	Расход, кг/дм ²	Стоимость руб/дм ²
1	Клей Анатерм-110	10997	0,0012	13,20
2	Эластомер Ф-40	1168	0,00012	0,14
3	Ацетон технический	158	0,015	2,37
	Итого:			15,71

$$C_M = 13,2 + 0,14 + 2,37 = 15,71 \text{ руб} / \text{дм}^2.$$

Прочие расходы на производство единицы продукции составляют 5% от заработной платы и рассчитываются по формуле

$$П_p = 0,05 \cdot ЗП \quad (5.7)$$

$$П_p = 0,05 \cdot 7,63 = 0,38 \text{ руб} / \text{дм}^2.$$

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

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

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

$$C_{опу} = 5,1 \cdot 2 = 10,2 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Рассчитали полную себестоимость восстановления 1 дм^2 поверхности отверстий под подшипники в корпусных деталях композицией адгезива АН-110

$$C_{\pi} = 7,63 + 15,71 + 0,38 + 10,2 = 33,92 \text{ руб} / \text{дм}^2$$

Годовые затраты на восстановление изношенных отверстий под подшипники в корпусных деталях автотракторной техники композицией на основе адгезива АН-110 составляют

$$З_H = N \cdot C_{\pi}, \quad (5.9)$$

где N – годовая программа восстановления поверхности отверстий, дм^2 .

В 2015 г. на предприятии ОАО «Добринское» восстановление отверстий под подшипники в корпусных деталях не проводилось. Детали с изношенными отверстиями заменялись на новые. Общая площадь изношенной поверхности отверстий выбракованных деталей, которые могли быть восстановлены, составила $N = 887 \text{ дм}^2$. Тогда годовые расходы при восстановлении отверстий под подшипники в корпусных деталях по разработанной в работе новой технологии составляют

$$Z_H = 887 \cdot 33,92 = 30087 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии восстановления составляет

$$C_{\text{год}} = Z_2 - Z_1, \quad (5.10)$$

где Z_2 – расходы на приобретение новых деталей за год, руб.; Z_1 – годовые затраты на восстановление деталей по разработанной технологии, $Z_1 = 30087$ руб.

В ОАО «Добринское» на приобретение новых деталей в 2014 г. было затрачено $Z_2 \approx 352000$ руб. Тогда экономический эффект от внедрения технологии восстановления отверстий под подшипники композицией на основе адгезива АН-110 составляет

$$C_{\text{год}} = 352000 - 30087 = 321913 \text{ руб} \approx 322 \text{ тыс. руб.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) Разработаны теоретические предпосылки повышения ресурса роlikоподшипниковых узлов при восстановлении полимерными материалами. Установлено, что радиальный зазор влияет на распределение нагрузки между телами качения, а площадь пятна контакта нагруженного тела с дорожкой качения наружного кольца роlikоподшипника увеличивается за счет полимерного покрытия.
- 2) Получены формулы (2.12) и (2.13) для расчета ширины пятна контакта и контактных напряжений нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца роlikоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом. Предложена формула расчета долговечности роlikоподшипника с посадкой, восстановленной полимерным материалом (2.25), учитывающая влияние натяга посадки на распределение нагрузки между телами качения и параметры пятна контакта нагруженного центрального тела с дорожкой качения наружного кольца подшипника. Получена формула (2.47) для расчета оптимального натяга полимерного покрытия, при котором обеспечивается оптимальный радиальный зазор, снижение нагрузки на центральное тело качения и соответственно, увеличение ресурса роlikоподшипника. Разработаны метод и компьютерная программа расчета параметров контакта, контактных напряжений и долговечности роlikоподшипника с полимерным покрытием.
- 3) Разработан способ калибрования отверстий с полимерным покрытием в корпусных деталях, обеспечивающий точность размеров восстанавливаемых отверстий.
- 4) Разработан композиционный материал на основе адгезива АН-110 с оптимальным составом: акриловый адгезив АН-110 – 100 масс. ч., эластомер Ф-40 – 10 масс. ч. Материал имеет высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства: удельная работа разрушения пленок в 1,41 раза, а клеевых соединений в 1,53 раза больше, чем у ненаполненного адгезива АН-110.

Время полного отверждения композиции составляет 4, 3 и 2 ч при температурах 20; 30 и 40°C, соответственно.

- 5) В роликподшипнике 42209 с полимерным покрытием из композиции адгезива АН-110 площадь пятна контакта до 1,1 раза больше, чем в стандартном подшипнике из-за локальной деформации дорожки качения наружного кольца роликподшипника в зоне контакта с нагруженным телом качения. В подшипнике 42209 с натягом посадки 40 мкм нагрузка на центральное тело на 13% меньше, на первые боковые на 5%, а на вторые боковые на 27% больше, чем в стандартном подшипнике. Увеличение площади пятна контакта, перераспределение нагрузки с центрального на боковые тела качения приводит к снижению напряжений в зоне контакта центрального, наиболее нагруженного тела с дорожкой качения наружного кольца до 17% в сравнении со стандартным подшипником.
- 6) При восстановлении изношенных отверстий в корпусных деталях композицией на основе акрилового адгезива АН-110, долговечность роликовых подшипников при местном нагружении наружного кольца увеличивается в сравнении с расчетной до 2,1 раза. Восстановление корпусных деталей композицией обеспечивает высокую долговечность посадочных мест подшипников. Рекомендуется восстанавливать посадочные отверстия в корпусных деталях с диаметральной зазор до 0,2 мм.
- 7) Разработана технология и оснастка для восстановления корпусных деталей автомобильной техники композицией адгезива АН-110. Технология восстановления внедрена в ОАО «Добринское» Суровикинского района, Волгоградской области. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил около 320 тыс. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Авдеев, М. В.** Повышение эффективности восстановления деталей сельскохозяйственной техники: автореф. дис...докт. техн. наук. / Авдеев М.В. – Челябинск, 1987. – 46 с.
- 2 **Пучин, Е. А.** Технология ремонта машин / Е. А. Пучин – М.: КолосС, 2007. – 488 с.
- 3 **Черноиванов, В.И.** К вопросу восстановления посадочных мест автотракторных корпусных деталей / В.И. Черноиванов // Тр. ГОСНИТИ. – 1976. Т. 49. – С. 45 – 57.
- 4 **Батищев, А. Н.** Пособие гальваника – ремонтника / Батищев А.Н.; – М.: Колос, 1980. – 240 с.
- 5 **Поляченко, А. В.** Увеличение долговечности восстанавливаемых деталей контактной приваркой износостойких покрытий в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий: автореф. дис...докт. техн. наук / Поляченко А.В. – М., 1984. – 44 с.
- 6 **Черноиванов, В. И.** Совершенствование технологии и повышение качества восстанавливаемых деталей сельскохозяйственной техники: автореф. дис...докт. техн. наук / Черноиванов В.И. – М., 1984. – 53 с.
- 7 **Карагодин, В. И.** Ремонт автомобилей и двигателей: Учеб. Для студ. Сред. Проф. Учеб. Заведений/В. И. Карагодин, Н. Н. Митрохин. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 496 с., ил.
- 8 **Бугаев, В. Н.** Восстановление деталей и повышение ресурса топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей: автореф. дис...докт.техн. наук. / Бугаев В.Н. – М., 1987. – 32с.
- 9 **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники плазменной наплавкой: автореф. дис...докт. техн. наук. / Сидоров А.И. – М., 1989. – 34 с.
- 10 **Аль-Ассех Рашад Фахад** Обоснование выбора полимерного материала для восстановления и повышения долговечности неподвижных соединений под-

- шипников качения сельскохозяйственной техники [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Аль-Ассех Рашад Фахад. - М., 1989. – 181 с.
- 11 **Черновол, М.И.** Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями: автореф. дис...докт. техн. наук. / Черновол М.И. – М., 1992. – 35 с.
- 12 **Казанцев, С. П.** Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники: автореф. дис... докт. техн. наук. / Казанцев С. П. – М., 2006. – 32 с.
- 13 **Фархшатов, М. Н.** Ресурсосберегающие технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники и оборудования электроконтактной приваркой коррозионностойких и износостойких материалов: автореф. дис... докт. техн. наук. / Фархшатов М. Н. – Саранск., 2007. – 32 с.
- 14 **Гвоздев, А. А.** Технология повышения долговечности узлов трения при ремонте сельскохозяйственной техники с использованием модифицированных полимерных композиций: дис ... докт. техн. наук. / Гвоздев А. А. – М., 2011, – 377 с.
- 15 **Ибилдаев, Б. А.** Долговечность подшипников качения сельскохозяйственной техники с посадками, восстановленными герметиком 6Ф [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Ибилдаев Б. А. – М., 1986. – 159 с.
- 16 **Курчаткин, В. В.** Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис ... докт. техн. наук. / Курчаткин В.В. – М., 1989, – 407 с.
- 17 **Мельниченко, И. М.** Восстановление и повышение долговечности подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов и покрытий / Дис. ...докт. техн. наук. - Гомель, 1991. – 370 с.
- 18 **Ли, Р. И.** Восстановление неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дис ... докт. техн. наук. / Ли Р. И. – М., 2001, – 340 с.

- 19 **Котин, А. В.** Восстановление точности размерных цепей сборочных единиц применение не жестких компенсаторов износа / Дис. ...докт. техн. наук. – Саранск, 1998. – 358 с.
- 20 **Зазуля, А. Н.** Справочник инженера по техническому сервису машин и оборудования в АПК: / под редакцией д.с.-х. наук, профессора С. М. Бунина – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 604 с.
- 21 **Башкирцев, В. Н.** Восстановление деталей машин и оборудования адгезивами: дис ... докт. техн. наук. / Башкирцев В. Н. – М., 2004, – 397 с.
- 22 **Гаджиев, А. А.** Технологическое обеспечение долговечности подшипниковых узлов машин применением полимерных материалов: автореф. дис... докт. техн. наук. / Гаджиев А. А. – М., 2005. – 35 с.
- 23 **Кузнецов, Ю. А.** Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования АПК микродуговым оксидированием: автореф. дис... докт. техн. наук. / Кузнецов Ю. А. – М., 2006. – 35 с.
- 24 **Кононенко А. С.** Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков: дис ... докт. техн. наук. / Кононенко А. С. – М., 2012, – 405 с.
- 25 **Ли, Р. И.** Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники и оборудования перерабатывающих предприятий: учеб. пособие для вузов / Ли Р. И.; М-во сель. хоз-ва РФ, Мичуринск. гос. аграрн. ун-т – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2008. – 322 с.
- 26 **Рассказов, М. Я.** Современные тенденции организации ремонта сельскохозяйственной техники. / Болотин М.В. – М.: Росинформагротех, 2001. – 105 с.
- 27 **Черноиванов, В. И.** Состояние и основные направления развития технического сервиса на селе / Черноиванов В. И. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. – № 6, – С. 2 – 5.
- 28 **Черноиванов, В. И.** Техническое обслуживание, ремонт и обновление сельскохозяйственной техники в современных условиях / Черноиванов В. И. и др.; – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 148 с.

- 29 **Ивченко, Д. И.** Восстановление корпусных деталей анаэробными полимерными композициями: На примере картеров коробок передач автомобилей семейства ГАЗ: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.03/ Ивченко Дмитрий Иванович. – М., 2001. – 198 с.
- 30 **Воловик, Е. Л.** Справочник по восстановлению деталей / Воловик Е. Л.; - М.: Колос, 1981. – 350 с.
- 31 **Поляченко, А. В.** Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной приваркой присадочных материалов / Поляченко А. В., Рогинский Л.Б. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин. - М., 1988. – 35 с.
- 32 **Ворошилов, И. А.** Исследование и оптимизация процесса плазменной металлизации при восстановлении внутренних цилиндрических поверхностей автомобильных корпусных деталей: автореф. дис. ...канд. техн. наук / Ворошилов И. А. – М., 1973. – 25 с.
- 33 **Авдеев, М. В.** Технология ремонта машин и оборудования / Авдеев М. В., Воловик Е. Л., Ульман И. Е.; – М.: Агропромиздат, 1986. – 247 с.
- 34 Технологические рекомендации по применению методов восстановления деталей машин. – М.: ГОСНИТИ, 1976. – 181 с.
- 35 **Черноиванов, В. И.** Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: Учебное пособие / Черноиванов В. И., Бледных В. В., Северный А. Э.; – Москва – Челябинск, ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. – 992 с.
- 36 **Спицын, И. А.** Совершенствование технологии восстановления посадочных отверстий корпусных деталей электролитическим железнением в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий: дис. ... канд. техн. наук / Спицын И. А. – М., 1983. – 190 с.
- 37 **Грибиниченко, В. Н.** Восстановление ступиц колес автомобилей и прицепов / Грибиниченко, В.Н. и др. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин. – М., 1988. – 88 с.
- 38 **Тельнов, Н. Ф.** Ремонт машин / Тельнова Н. Ф.; - М.: ВО «Агропромиздат», 1992. – 560 с.

- 39 **Крупецкий, В. А.** Восстановление посадочных отверстий установкой колец / Крупецкий В. А. // Техника в сельском хозяйстве. - 1981, - № 9. – С. 56 – 57.
- 40 **Новиков, А. Н.** Восстановление посадочных мест под подшипники крупногабаритных деталей цинк - никелевым сплавом / Новиков А. Н. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин. - М., 1988. – 95 с.
- 41 **Дмитриев, А. Д.** Исследование работоспособности неподвижных соединений, восстановленных при помощи эпоксидных смол, модифицированных алифатической смолой ТЭГ-1: дис. ... канд. техн. наук / Дмитриев А. Д. – М., 1970. – 137 с.
- 42 **Аскинази, Б. М.** Повышение эффективности восстановления деталей электромеханической обработкой с добавочным металлом / Аскинази Б. М., Шеголев Е. А., Минибаев Г. Г. // Современное оборудование и технологические процессы для восстановления и упрочнения деталей машин.; - М., 1988. – 76 с.
- 43 Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Надежность и ремонт машин»: Изд-во ОрелГАУ, 2004. – 168 с.
- 44 Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Надежность и ремонт машин»: Изд-во ОрелГАУ, 2005. – 446 с.
- 45 Надежность и ремонт машин / Курчаткин В. В., Тельнов Н. Ф., Ачкасов К. А., Батищев А. Н. и др.; Под ред. В. В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000, – 776 с.
- 46 Сборник материалов Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение XXI – век»: Изд-во ОрелГАУ, С – ПГАУ, С – Петербург, 2005. – 419 с.
- 47 **Батищев, А. Н.** Монтаж, эксплуатация и ремонт технологического оборудования / Батищев А. Н. , Голубев И. Г., Курчаткин В.В.; – М.: Колос, 2007. – 424 с.
- 48 **Ли, Р. И.** Технологии восстановления деталей металлургических машин и оборудования: учеб. пособие для вузов / Ли Р. И., Жильцов А. П.; М-во образования и науки РФ, Липецк. гос. техн. ун-т – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2007. – 315 с.
- 49 **Гаджиев, А. А.** Технологическое обеспечение долговечности подшипнико-

- вых узлов машин применением полимерных материалов: дис..докт. техн. наук: 05. 20. 03: / Гаджиев А. А. – М., 2006. - 359 с.
- 50 **Поперена М.Я.** Влияние жесткости корпуса на распределение нагрузки по элементам радиального подшипника[Текст] / Поперена М.Я.– М.: Доклады А.Н. Тадж. ССР. вып. XIV, 1955. – 136 с.
- 51 **Ковалевский, А.М.** Новый способ повышения работоспособности подшипников качения и снижения удельного расхода металла [Текст] / А.М. Ковалевский – М.: Вестник машиностроения, 1958, № 8. – 142 с.
- 52 **Кирсанов, Ф. А.** Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях трансмиссии сельскохозяйственной техники эластомером Ф-40С: дис. ... канд. техн. Наук: 05.20.03: / Кирсанов Ф. А. – Мичуринск, 2015. – 182 с.
- 53 **Хебда, М.** Справочник по триботехнике в 3 т. Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения [Текст] / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе; - М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
- 54 **Лاخно, А. В.** Восстановление деталей машин из полимерных материалов / Лاخно А. В., Рылякин Е. Г. // Молодой ученый. – 2014. – №8. – С.196 – 199.
- 55 Ремонт машин / Под ред. Тельнова Н. Ф. – М.: Агропромиздат, 1992, 560с.
- 56 Технология ремонта машин и оборудования. Под общ. ред. И. С. Левитского. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Колос», 1975.
- 57 **Арзамасов, Б.Н.** и др. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1986 г. – 384 с.
- 58 **Геллер, Ю.А.** Материаловедение. – М.: Металлургия, 1989. – 456 с.
- 59 **Дальский, А.М.** Технология конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.
- 60 **Котин, А. В.** Восстановление точности размерных цепей сборочных единиц применение не жестких компенсаторов износа / дис. ...докт. техн. наук: 05.20.03: / Котин А.В. – Саранск, 1998. - 358 с.
- 61 **Бутин, А. В.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимер-

- полимерными композициями: дис. ... канд. техн. Наук: 05.20.03: / Бутин А. В. – Мичуринск, 2012. – 127 с.
- 62 **Баурова, Н.И.** Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с
- 63 **Бочаров, А. В.** Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками: дис. ... канд. техн. Наук: 05.20.03: / Бочаров А. В. – Мичуринск, 2009. – 150 с.
- 64 **Бутин, А.В.** Композиция для склеивания металлических изделий: Патент на изобретение РФ № 2526991. Заявл. 05.02.2013 / Ли Р. И., Бутин А.В., Рожнов А. Б., Сафонов В. Н. // Опубл. 27.08.2014. – Бюл. № 24.
- 65 **Машин, Д. В.** Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники композицией на основе эластомера Ф-40: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Машин Д. В. – Мичуринск, 2013. – 149 с.
- 66 <http://www.nicp.ru/>
- 67 <http://instplast.ru/>
- 68 **Перель, Л.Я.** Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник / Л. Я Перель. – М.: Машиностроение, 1983. – 543 с., ил.
- 69 **Федосьев, В.И.** Сопротивление материалов / В. И. Федосьев. – М.: Наука, 1979. – 544 с.
- 70 **Chernov, N.** Fitting geometric curves to observed data. 197 p.
- 71 <http://www.alentum.com>
- 72 **Сприщевский, А.И.** Подшипники качения. – М.: Машиностроение, 1969. – 632 с., ил.
- 73 **Спицын, Н. А.** Подшипники качения [Текст]: Справочное пособие / Н.А. Спицын, А.И. Сприщевский. – М.: Машгиз, 1961, – 828 с.
- 74 <http://www.codenet.ru>

- 75 **Анурьев, В. И.** Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т.1. – 8-е изд. перераб. и доп. / Под общ. ред. И. Н. Жестоковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920с.
- 76 **Бобровский, С. И.** Delphi 7. Учебный курс / С. И. Бобровский. – СПб.: Питер, 2004. – 736 с., ил.
- 77 **Культин, Н. Б.** Основы программирования в Delphi 7 / Н. Б. Культин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 608 с., ил.
- 78 **Попов, В. Л.** Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В. Л. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.
- 79 **Клепиков, С. Н.** Расчёт конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. – Киев: Будівельник, 1967. – 184с.
- 80 **Тимошенко, С. П.** Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Гудьер Дж. – М.: Наука. 1979 – 560 с.
- 81 **Тимошенко, С. П.** Сопротивление материалов. Т.2. Более сложные вопросы теории и задачи [Текст] / С. П. Тимошенко, под ред. И. К. Снитко. – М.: Наука. 1965 – 480 с.
- 82 **Дибир, А. Г.** Практические расчеты на прочность конструктивных элементов. Ч. I. / А. Г. Дибир, О. В. Макаров, Н. И. Пекельный, Г. И. Юдин, М. Н. Гребенников. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 102 с.
- 83 **Зубчанинов, В. Г.** Основы теории упругости и пластичности [Текст]: Учеб.для машиностроит. спец.вузов / Зубчанинов В.Г.; – М.: Высшая школа, 1990. - 368 с.
- 84 **Ньюмен, С.Н.** Полимерные смеси [Текст] Под ред. Ньюмена. Пер. с англ. / Под ред. Гордовского Ю.К. – М: Мир, 1988. – 455 с.
- 85 **Мэнсон, Дж.** Полимерные смеси и композиты [Текст] Под ред. Дж. Мэнсона. Пер. с англ. / Под ред. А. П. Коробко. – М.: Химия, 1979. – 442 с.
- 86 **Кулезнев, В.Н.** Смеси полимеров [Текст] / Кулезнев, В.Н. – М.: Химия, 1980, – 304 с.
- 87 **Нильсен, Л.** Механические свойства полимеров и полимерных композиций

- [Текст] Под ред. Л. Нильсена. Пер. с англ. / Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1978. – 312 с.
- 88 Химическая энциклопедия [Текст] Под ред. Н.С. Зефирова. – Т.4– М.: Большая Российская энциклопедия, 1995, – 641 с.
- 89 **Нарисава, И.** Прочность полимерных материалов [Текст]: Пер. с япон. / Под ред. А. А. Берлина. – М.: Химия, 1987 – 398 с.
- 90 **Екобори, Т.** Научные основы прочности и разрушения материалов [Текст]: Пер. с япон. / Под ред. А. А. Берлина. – Киев: Наукова думка, 1978 – 342 с.
- 91 **Аугамбаев, М. И.** Основы планирования научно-исследовательского эксперимента / Аугамбаев М., Иванов А.З., Терехов Ю.И.; - Ташкент. Укитувчи, 1993. – 336 с.
- 92 **Кошкин, Н. И.** Справочник по элементарной физике [Текст] / Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г.; – М.: Наука, 1975. – 255 с.
- 93 **Чичинадзе, А. В.** Полимеры в узлах трения машин и приборов [Текст]: Справочник / А. В. Чичинадзе, А. Л. Левин, М. М. Бородуллин, Е. В. Зиновьев; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
- 94 **Хайлис, Г. А.** Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Хайлис Г. А., Коваль М. М.; – М.: Колос, 1994. – 169 с.
- 95 **Биргер И. А.** Соппротивление материалов [Текст] / Биргер И. А., Мавлютов Р. Р.; - М.: Наука, 1986 - 560 с.
- 96 **Ли, Р. И.** Методические указания к лабораторной работе «Восстановление деталей полимерными материалами при ремонте машин и оборудования» / Ли Р. И., Кондрашин С. И. – Мичуринск. : Изд-во Мич. гос. агр-го ун-та, 2007. – 24 с.
- 97 **ГОСТ 12423-66.** Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб). – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 6 с.
- 98 **Аскадский, А. А.** Деформация полимеров / Аскадский А.А.; - М.: Химия, 1973. – 448 с.
- 99 **ГОСТ 14236-81.** Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.

- 100 **Крассовский, Г. И.** Планирование эксперимента / Крассовский Г.И., Филаретов Г.Ф.; – М.: Изд-во БГУ им. Ленина, 1982. – 302 с.
- 101 **ГОСТ 21981-76.** Метод определения прочности связи с металлом при отслаивании (проб). – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
- 102 **ГОСТ 9.407-84.** Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 8 с.
- 103 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, 2003г.
- 104 **Ли, Р. И.** Исследование машин и оборудования металлургического производства. Учебное пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – 305 с.
- 105 **Берлин, А. А.** Акриловые олигомеры и материалы на их основе [Текст] / Берлин А.А. и др.; – М.: Химия, 1983. – 232 с.
- 106 **Сивергин, Ю. М.** Поликарбонат - (мет) – акрилаты [Текст] / Сивергин Ю.М., Шерникис Р.Я., Киреева С.М.; – Рига: Зинатне, 1988. – 213 с.
- 107 **Псарев, Д. Н.** Технология нанесения полимерных покрытий на подшипники качения для восстановления посадок корпусных деталей сельскохозяйственной техники [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д. Н. Псарев. – Мичуринск, 2015. – 178 с.
- 108 **Кононенко, А.С.** Герметизация неподвижных фланцевых соединений анаэробными герметиками при ремонте сельскохозяйственной техники : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03: / Кононенко А.С. - М., 2001. – 156 с.
- 109 **Ли, Р. И.** Неразрушающий контроль качества неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники, восстановленных анаэробными герметиками: дис. ... канд. техн. наук / Ли Р. И. – М., 1990. – 220 с.
- 110 **Беркович, М. С.** Исследование и повышение долговечности подшипниковых узлов тракторных трансмиссий: дис...канд. техн. наук. / Беркович М.С. – М., 1972, – 130 с.
- 111 **Кербер, М.Л.** Полимерные композиционные материалы: структура, свой-

- ства, технология: уч. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – СПб: Профессия, 2008 – 560 с.
- 112 Композиция для покрытия металлических изделий: Патент на изобретение №2537864 РФ Заявл. 29.05.2009 / Ли Р.И., Колесников А.А., Бутин А.В., Мироненко А.В., Машин Д.В., Сафонов В.Н. // Дата публикации заявки: 04.02.2014, Бюл. №22, Опубликовано 10.01.2015, Бюл. №1.
- 113 Весы лабораторные ВК. Модификации ВК 150.1, ВК 300, ВК 300. Руководство по эксплуатации. РЭ ВК, 2008. – 52 листа.
- 114 **Мироненко, А. В.** Расчет параметров контакта нагруженных тел с дорожкой качения наружного кольца в металлополимерном роликоподшипнике [Текст] / Р. И. Ли, А. В. Мироненко // Известия МГТУ «МАМИ» - 2015. - №4(26), т. 1 – С. 65-70;
- 115 **Мироненко, А. В.** Программа расчета контактных напряжений в роликоподшипниковых узлах восстановленных полимерными материалами [Текст] / Р.И. Ли, А.В. Мироненко // Вестник МичГАУ. – 2015. – № 4. – С. 181-186.
- 116 **Мироненко, А. В.** Исследование распределения нагрузки между телами качения в металлополимерном роликоподшипнике [Текст] / Р. И. Ли, А. В. Мироненко // Известия МГТУ «МАМИ» - 2016. - №1(27), т. 1 – С. 38-41;
- 117 **Шпилько, А. В.** Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / Шпилько А.В., Драгайцев В.И., Тулапин П.Ф. и др.; – М.: Издательство журнала «Аграрная наука», 1998. – 127 с.
- 118 **Сергеев, И. В.** Экономика предприятия / Сергеев И. В.; – М.: Финансы и статистика, 2000. – 297 с.
- 119 **Конкин, Ю. А.** Экономическое обоснование внедрения мероприятий научно-технического прогресса в АПК / Конкин Ю. А., Пацкалев А. Ф., Осипов В. И. и др.; – М.: МИИСП, 1992. – 47с.
- 120 **Кравченко, И. Н.** Техничко – экономическое обоснование инженерных решений по эксплуатации и ремонту машин / Кравченко И. Н., Шилина Н. В., Попова Л. Н., Карцев С. В., Пучин Е. А., Карев А. М.; - М.: Издательство УМЦ «Триада», 2006. – 144с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А
(справочное)



Приложение Б
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2537864

**КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ИЗДЕЛИЙ**

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

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2013104578

Приоритет изобретения 04 февраля 2013 г.

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

Срок действия патента истекает 04 февраля 2033 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Приложение В
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2569547

**КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ИЗДЕЛИЙ**

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

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2014142647

Приоритет изобретения 22 октября 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 29 октября 2015 г.

Срок действия патента истекает 22 октября 2034 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



Приложение Г (рекомендуемое)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

восстановления посадочных отверстий композицией на основе адгезива АН-110

№ 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 0,20 мм
2	Очистить поверхность посадочных отверстий от следов коррозии	Верстак слесарный ОРГ 1468А, шкурка шлифовальная Э5М1А №16	Обработать поверхности до металлического блеска
3	Обезжирить поверхность посадочных отверстий	Стол с вытяжным шкафом ОП-2038, технический ацетон, тампон ватный, обернутый марлей	На посадочных местах не должно быть следов масла, грязи и коррозии. Выдержать на воздухе в течение 10 мин.
4	Приготовить композицию на основе адгезива АН-110	Адгезив АН-110 (ТУ 2257-238-00208947-96), Лак Ф-40 (ТУ 6-06-246-92), весы ВК 3000.1	Состав композиции: АН-110 – 100 масс. ч.; Лак Ф-40 – 10 масс. ч.
5	Нанести послойно покрытие из композиции на основе адгезива АН-110 на посадочные отверстия в корпусной детали	Кисть волосная №4...6, композиция на основе адгезива АН-110	каждый слой сушить 2...3 минуты
6	Установить базирующую деталь и калибр в отверстие с полимерным покрытием	Устройство для калибрования	–
7	Калибровать отверстие с полимерным покрытием	Устройство для калибрования, электрогидравлический пресс 204/Р	выдержать 4 часа
8	Разобрать устройство для калибрования	Устройство для калибрования	–
9	Повторить переходы 5...8 для остальных отверстий с полимерным покрытием	Устройство для калибрования, электрогидравлический пресс 204/Р	–
10	Осмотреть покрытия и измерить диаметр восстановленных отверстий	Нутромер индикаторный	Не должно быть задиров, отслаивания полимерного покрытия

Приложение Д

(справочное)

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ОАО «Добринское»

Кирдан В. И.

05 октября 2015 г.



А К Т

на проведение производственных испытаний

05 октября 2015 г.

с. п. Добринка, Суворовский район,
Волгоградская область

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ОАО «Добринское» гл. инженер Серединцев А. В., зав. ЦРМ Бирюков С. В., с одной стороны, и представители ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» д.т.н. проф. Ли Р. И., аспирант Мироненко А. В. с другой, составили настоящий акт о том, что на предприятии ОАО «Добринское» проведена производственная проверка технологии восстановления композицией адгезива АН-110 корпусных деталей агрегатов трансмиссии автомобилей ГАЗ-3307, КАМАЗ-53212, КАМАЗ-55102 и тракторов ДТ-75Н, МТЗ-80.

Восстановлены посадочные отверстия под подшипники качения:

1. Картер КП автомобиля ГАЗ-3307 (53-12-1701015-01), отверстия под подшипники: 50209К1 – 2 шт., 50307К2 – 4 шт., 42207КМ – 2 шт.;
2. Картер КП автомобилей КАМАЗ-53212, КАМАЗ-55102 (14.1701015), отверстия под подшипники: 50409 – 2 шт., 170412 – 2 шт., 12213КМ – 2 шт.; картер делителя передач (15.1770030), отверстия под подшипники: 6-205К – 2 шт., 70-50409 – 2 шт.;
3. Картер КП трактора ДТ-75 (77.38.021-1А), отверстия под подшипники: 409 – 2 шт., 2612КМ – 2 шт., 407 – 2 шт., 32605К – 4 шт., 311 – 2 шт., 32213КМ – 2 шт.;
4. Картер КП трактора МТЗ-80 (50-1701025А), отверстия под подшипники: 50308 – 2 шт., 208 – 4 шт., 207 – 2 шт., 210 – 2 шт., 12115КМ – 2 шт., 60210 – 2 шт.

В результате собраны две опытных КП автомобиля ГАЗ-3307, две опытных КП автомобилей КАМАЗ, две опытных КП трактора МТЗ-80 и одна опытная КП трактора ДТ-75Н.

Наблюдения за опытными узлами будут осуществляться специалистами ОАО «Добринское» и аспирантом ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Гл. инженер

Зав. ЦРМ

Д.т.н.,

Аспирант

Серединцев А. В.

Бирюков С. В.

Ли Р. И.

Мироненко А. В.

Продолжение приложения Д

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ОАО «Добринское»

Кирдан В. И.

30 ноября 2016 г.



А К Т

эксплуатационных испытаний

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ОАО «Добринское» гл. инженер Серединцев А. В., зав. ЦРМ Бирюков С. В., с одной стороны, и представители ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» д.т.н. проф. Ли Р. И., аспирант МIRONENKO А. В. с другой, составили настоящий акт об эксплуатационных испытаниях опытных узлов автомобилей и тракторов, у которых посадочные отверстия под подшипники качения восстановлены композицией адгезива АН-110.

Таблица – Опытные узлы с восстановленными посадочными отверстиями под подшипники качения

Номер автомобиля, трактора	Марка автомобиля, трактора	Наработка объекта за период испытаний	Наименование узла
E378MT	КАМАЗ-53212	31400 км	коробка передач
T796PX	КАМАЗ-55102	38700 км	коробка передач
4276KM	ГАЗ-3307	18200 км	коробка передач
4278KM	ГАЗ-3307	21500 км	коробка передач
28-82BT	ДТ-75Н	210 мото-ч	коробка передач
28-76BK	МТЗ-80	500 мото-ч	коробка передач
28-72BK	МТЗ-80	470 мото-ч	коробка передач

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

За период эксплуатации отказов и простоев по причине недостаточной долговечности восстановленных корпусных деталей не наблюдалось.

Коробки передач, у которых посадочные отверстия под подшипники качения восстановлены композицией адгезива АН-110, находятся в работоспособном состоянии и пригодны для дальнейшей эксплуатации.

Гл. инженер

Зав. ЦРМ

Д.т.н.,

Аспирант

Серединцев А. В.

Бирюков С. В.

Ли Р. И.

МIRONENKO А. В.

Продолжение приложения Д

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ОАО «Добринское»

Кирдан В. И.

30 ноября 2016 г.



А К Т

внедрения результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся представители предприятия ОАО «Добринское» гл. инженер Серединцев А. В., зав. ЦРМ Бирюков С. В., с одной стороны, и представители ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» д.т.н. проф. Ли Р. И., аспирант Мироненко А. В. с другой, составили настоящий акт о том, что результаты научной работы по теме «Восстановление корпусных деталей автотракторной техники композицией адгезива АН-110» внедрены на предприятии.

Технические преимущества разработки: повышение долговечности подшипниковых узлов и корпусных деталей, снижение себестоимости ремонта машин.

Экономия материальных ресурсов: экономия запасных частей.

Практическое использование результатов НИР: внедрена технология восстановления посадочных отверстий под подшипники качения в корпусных деталях автотракторной техники композицией адгезива АН-110.

Результаты исследований используются на предприятии ОАО «Добринское».

Годовой экономический эффект от использования результатов НИР составляет 322000 (триста двадцать две тысячи) рублей.

Гл. инженер

Зав. ЦРМ

Д.т.н.,

Аспирант

Three handwritten signatures in blue ink, corresponding to the positions of Chief Engineer, Head of the Workshop, and the Doctor of Technical Sciences.

Серединцев А. В.

Бирюков С. В.

Ли Р. И.

Мироненко А. В.