

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»

На правах рукописи

РЫЖОВА АННА ОЛЕГОВНА

**АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ С ШЕЙКАМИ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР**

Специальность 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов,
изделий, веществ и природной среды

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Бехер Сергей Алексеевич

Новосибирск – 2022

Оглавление

Введение.....	4
1 Анализ современного состояния неразрушающего контроля неподвижных разъемных прессовых соединений с натягом.....	10
1.1 Особенности конструкции и характеристики прессовых разъемных соединений с натягом на железнодорожном транспорте	10
1.2 Методы контроля механических напряжений с использованием акустоупругости	20
1.3 Акустические методы контроля состояния контактирующих поверхностей прессовых соединений.....	29
1.4 Выводы к первой главе.....	37
2 Экспериментальные исследования прессовых соединений методом акустоупругости	39
2.1 Испытательное оборудование.....	39
2.2 Контроль продольными волнами	43
2.3 Контроль поверхностными волнами.....	59
2.4 Выводы ко второй главе	66
3 Исследования прессовых соединений эхо-методом и методом свободных колебаний	69
3.1 Закономерности взаимодействия волны с границей прессового соединения для оценки плотности посадки	69
3.2 Исследование спектральных и временных характеристик свободных колебаний прессовых соединений с натягом колец подшипников и шеек осей колесных пар.....	84
3.3 Выводы к третьей главе.....	96
4 Разработка критериев плотности посадки колец подшипников на шейку оси колесной пары интегрально-резонансным методом акустического контроля	99

4.1 Функциональная схем прибора УДС1-СИН	99
4.2 Стандартные образцы для калибровки и проверки работоспособности прибора.....	103
4.3 Методика и критерии браковки плотности прилегания кольца подшипника к шейке оси	112
4.4 Программное обеспечение для работы с прибором УДС1-СИН.....	119
4.5 Выводы к четвертой главе.....	122
Заключение	124
Список литературы	128
Приложение А Акт внедрения ООО «НВК»	144
Приложение Б Акт внедрения ОАО «ВРК-1»	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Упругие механические напряжения и деформации играют определяющую роль в безопасной эксплуатации и безотказной работе объектов железнодорожного транспорта. Один из наиболее ответственных элементов подвижного состава - буксовый узел - способен работать только в условиях надежного неподвижного разъемного соединения внутреннего кольца подшипника с шейкой оси. Данный вид соединения обеспечивается силами трения, достаточный уровень которых зависит от упругих механических напряжений в кольце подшипника. Слабая посадка или ее ослабление под воздействием высоких температур и коррозии способны привести к провороту кольца на шейке оси, заклиниванию буксового узла, разрушению оси, сходу, аварии или крушению подвижного состава. В вагонном и локомотивном хозяйствах отказ прессового соединения подшипниковых узлов приводит к нарушению графика движения, затратам на восстановительный ремонт и задержкам поездов. Необходимость обеспечения безопасности движения определяется потребностью предприятий железнодорожной отрасли в достоверных методах и специализированных приборах контроля качества посадки внутренних колец подшипников на оси колесных пар вагонов.

Степень разработанности темы исследования. Для контроля соединений и оценки уровня механических напряжений в материале деталей в производственных условиях наиболее перспективными являются акустические методы, основанные на взаимодействии ультразвуковых волн с материалом объекта контроля. В отличие от традиционной тензометрии, поляризационно-оптических, рентгеноструктурных, магнитных и других методов, акустический менее чувствителен к изменению химического состава и структуры материала. В работах Мурнагана, М. Био, Л. Бриллюэна, Л.Д. Ландау, Р. Грина, Р. Ривлина сформулированы основные положения нелинейной теории упругости, разработан математический аппарат для тензорного описания закономерностей распространения упругих волн в однородных напряженных средах. В работах

авторов Bach F., Pao Y.-H., Sachse W., Fukuoka H., Бобренко В.М., Буденкова Г.А., Вангели М.С., Гузя А.Н., Куценко А.Н., Махорта Ф.Г., Недзвецкой О.В., Никитиной Н.Е., Муравьева В.В. сформулированы основные возможности и ограничения метода акустоупругости, предложены способы определения скорости распространения ультразвуковых волн, методы измерения упругих напряжений и оценки остаточных напряжений в ответственных элементах конструкций, в том числе в железнодорожных объектах: рельсах и бандажах локомотивных колес.

Использование традиционного ультразвука и метода свободных колебаний для диагностики и оценки состояния соединений получили свое развитие в работах Буденкова Г.А., Иванникова В.П., Муравьева В.В., Кузьбожева А. С., Коробова А.И., Карпова И.Г., Снежкова И.И. и др. Разработаны способы контроля, предложены измеряемые характеристики и критерии обнаружения дефектов.

Некоторые вопросы, имеющие принципиальное значение для создания приборов и методов контроля прессовых соединений колец подшипников, проработаны недостаточно. Отсутствуют схемы прозвучивания цилиндрических объектов с ограниченным доступом к плоским торцам и акустоупругие модели прозвучивания с цилиндрических поверхностей продольными и поверхностными волнами. Не установлены закономерности влияния состояния границы «кольцо-ось» на резонансные характеристики колец, частотный спектр и параметры диссипации энергии свободных колебаний.

Цель исследования – разработать способы акустического контроля прессовых соединений внутренних колец подшипников с осями колесных пар для повышения надежности буксовых узлов в эксплуатации.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) экспериментально и теоретически определить возможности и разработать способ определения механических напряжений кольца подшипника, устанавливаемого на шейку оси с натягом, акустоупругим методом при прозвучивании продольными и поверхностными волнами;
- 2) разработать методику ультразвукового контроля толщины переходного слоя, обусловленного шероховатостью, овальностью и конусностью сопрягаемых

поверхностей кольца подшипника и шейки оси, основанную на анализе закономерностей изменения амплитуды многократно отраженных продольных волн от границы прессового соединения;

3) установить закономерности распределения свободных колебаний в прессовых соединениях, определить спектральный состав собственных колебаний и характеристики их затухания в зависимости от условий сопрягаемых поверхностей;

4) разработать критерии браковки прессовых соединений колец подшипников с шейкой оси колесной пары интегрально-резонансным методом для обнаружения неплотностей посадки при плановых видах ремонта.

Объект исследования – акустические методы контроля.

Предмет исследования – методики акустического контроля прессовых соединений внутренних колец подшипников с шейками осей колесных пар.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) разработана модель распространения продольных волн при хордовом прозвучивании колец подшипников, устанавливающая связь времени распространения с механическими напряжениями, вызванными прессовой посадкой, и учитывающая изменение угла между направлением распространения и осью главных напряжений;

2) предложена модель формирования серии переотраженных импульсов продольной волны от цилиндрической границы раздела сред, устанавливающая зависимость коэффициента ослабления амплитуды от толщины переходного слоя и позволяющая уменьшить влияние на результаты измерений акустических характеристик материала, формы и размеров колец, состояния поверхности ввода;

3) установлены закономерности, связывающие частотный спектр и декременты затухания свободных колебаний колец подшипников с граничными условиями: свободное кольцо, кольцо на оси с натягом, кольцо на валу, кольцо на оси с воздушным зазором и зазором, заполненным смазочным материалом;

4) разработан способ обработки результатов измерений первичных сигналов интегрально-резонансным методом и критерий предельного состояния соединения по условию неплотности сопряжения.

Теоретическая значимость работы. Разработанная методика оперативного контроля механических напряжений в кольцах подшипников в процессе прессовой посадки методом акустоупругости с погрешностью 8% при прозвучивании продольными волнами, 5% – поверхностной волной расширяет возможности ультразвукового метода для объектов цилиндрической формы и дополняет знания об акустоупругих коэффициентах для стали ШХ15.

Установленные закономерности свободных и вынужденных колебаний, в том числе модовый состав, поляризация, параметры затухания и изменения амплитуды колебаний во времени повышают информативность акустических методов: собственных частот и интегрально-резонансных.

Практическая значимость работы. Способ контроля толщины переходного слоя кольца подшипника и оси, заполненного смазочными материалами, позволяет обнаружить локальные участки с недопустимой шероховатостью и дефектами поверхностей прессовых соединений. На основе способа разработана методика контроля паяных соединений при ремонте мостовых сооружений в эксплуатации, закрепленная документально в патенте RU 2739385 от 14.05.2020 г. Методика утверждена в ОАО «РЖД» и внедрена в технологический процесс ремонта мостов компанией ООО «СибНИТ».

Критерии браковки интегрально-резонансным методом реализованы в приборе УДС1-СИН, используемом для контроля колесных пар при среднем ремонте для обнаружения проворота внутренних колец подшипников на шейках осей колесных пар. Прибор внедрен в эксплуатацию в вагонных ремонтных депо ОАО «ВРК-1» (Приложение А) и ООО «НБК» (Приложение Б).

Методология и методы исследования. В работе использовались экспериментальные и теоретические методы исследования, ультразвуковой, визуальный и измерительный, магнитопорошковый методы, методы свободных и вынужденных (интегрально-резонансный) колебаний. Экспериментальные данные

обрабатывались методами математической статистики (максимального правдоподобия и наименьших квадратов), корреляционного анализа. Моделирование выполнялось аналитически и методом конечных элементов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Способ определения механических напряжений кольца подшипника, устанавливаемого на шейку оси с натягом акустоупругим методом при хордовом прозвучивании продольными и многократно прошедшими поверхностными волнами.

2. Методика контроля толщины переходного слоя, обусловленного шероховатостью и дефектами сопрягаемых поверхностей кольца подшипника и шейки оси, основанная на анализе закономерностей изменения амплитуды продольных волн, многократно отраженных от границы соединения.

3. Экспериментально-расчетный способ исследования свободных колебаний прессовых соединений, позволяющий определить спектральный состав собственных колебаний, установить соответствие спектров и характер распределения колебаний (модовый состав), определить характеристики затухания.

4. Критерии браковки прессовых соединений колец подшипников с шейкой оси колесной пары по условию ослабления посадки интегрально-резонансным методом, основанные на зависимости декремента затухания колебаний от периода вынужденных затуханий.

Достоверность результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач, физической обоснованностью полученных экспериментальных данных и моделей, применением современных и метрологически обеспеченных измерительных приборов и общепринятых стандартизированных методов обработки результатов. Достоверность подтверждается непротиворечивостью и воспроизводимостью результатов, совпадением экспериментальных данных с расчетами методом конечных элементов и с опубликованными данными других авторов.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XVI Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке – 2020. Интеграция науки, образования и производства» (г. Ижевск, 2–4 декабря 2020 г.); XI Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 12-13 ноября 2020 г.); IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (г. Омск, 29-30 октября 2020 г.); XXIII Петербургской научно-технической конференции «Ультразвуковая дефектоскопия металлов и перспективных материалов» УЗДМ-2019 (г. Санкт-Петербург, пос. Репино, 28 – 31 мая 2019 г.); X Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 15-16 ноября 2018 г.).

Личный вклад автора. Выбор направлений и методов исследований, способов обработки и представления результатов, формирование структуры и содержания работы, формулирование основных положений. Автор определил цель и задачи исследования, провел экспериментальные исследования, проанализировал и выполнил математическую обработку результатов, сделал анализ, сформулировал выводы и написал диссертацию.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.

По результатам работы опубликованы **13** статей в научных изданиях, в том числе **2** статьи в изданиях, индексируемых в SCOPUS и WoS, 1 статья в издании из Перечня ВАК, получено **2** патента РФ на изобретения и **1** свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертация подготовлена в результате исследования, выполненного **при финансовой поддержке РФФИ** в рамках научного проекта № 19-38-90016\19.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НЕПОДВИЖНЫХ РАЗЪЁМНЫХ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

1.1 Особенности конструкции и характеристики прессовых разъёмных соединений с натягом на железнодорожном транспорте

Для реализации функции в соответствии с их назначением детали подвижного состава соединяют между собой. В конструкции вагонов и локомотивов используются как подвижные, так и неподвижные соединения. Подвижные, например, буксовые узлы, обеспечивают движение одной детали относительно другой, неподвижные предназначены для соединения двух и более деталей, при этом их взаимное перемещение в процессе эксплуатации не допускается.

Подвижные и неподвижные соединения, в свою очередь, могут быть разъёмными и неразъёмными. Разъёмные используются для повышения эффективности процессов изготовления, сборки, транспортировки и ремонта. В соответствии с [10] к разъёмным относятся соединения, разборка которых не требует нарушения целостности составных частей изделия. Таким образом, разъёмные соединения изготавливают с возможностью многократной сборки и разборки без снижения их качества. В отличие от разъёмных, при разборке неразъёмных соединений целостность составных частей изделий нарушается. Демонтировать такие соединения без повреждения или даже разрушения их составных частей невозможно.

Существует значительное количество классов разъёмных и неразъёмных соединений в зависимости от метода формирования (рисунок 1.1). Прессовые соединения выделяют в отдельный класс, в чистом виде они не относятся ни к разъёмным, ни к неразъёмным соединениям. Прессовыми называют соединения частей объекта с натягом, который обеспечивает упругие механические напряжения в одной или нескольких деталях и соответствующие им силы трения.

Формирование таких соединений производится механически с помощью пресса или методом тепловой посадки. Процесс запрессовки заключается в смещении механической силой одной детали относительно другой таким образом, чтобы охватываемая деталь располагалась внутри охватывающей.

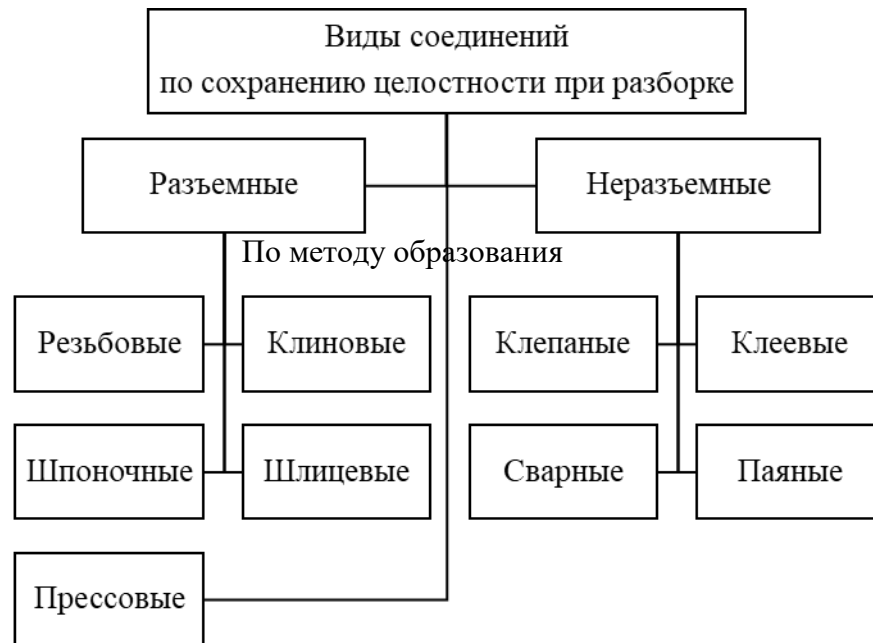


Рисунок 1.1 – Основные виды соединений

Для формирования надежного соединения внутренний посадочный диаметр деталей до напрессовки должен быть меньше наружного на заданную величину (рисунок 1.2). После посадки неподвижность соединения обеспечивается силами трения, максимальные значения которых зависят от нормальных сжимающих механических напряжений P на границе соединения и состоянием поверхностей соединяемых деталей (рисунок 1.3).

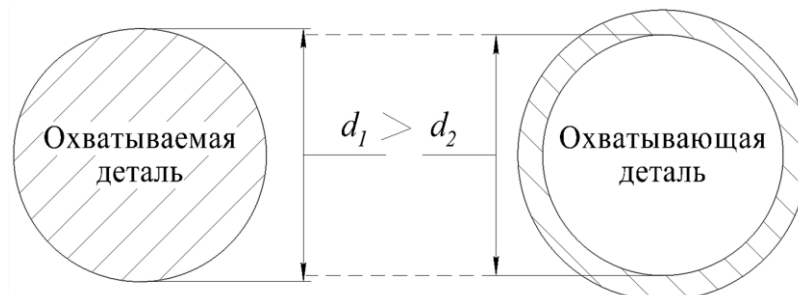


Рисунок 1.2 – Размеры деталей прессового соединения: d_1 – диаметр охватываемой детали; d_2 – диаметр охватывающей детали

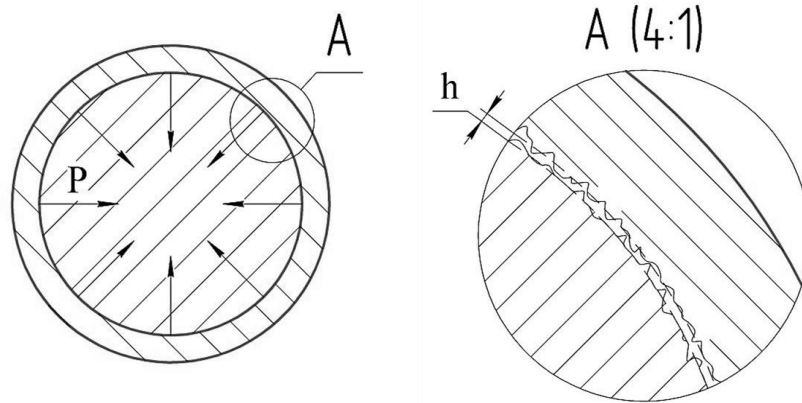


Рисунок 1.3 – Схема прессового соединения с механическими напряжениями и шероховатостью поверхности на границе сопряжения

После разборки прессовых соединений качество их составных частей не снижается, что обеспечивает возможность их повторной сборки. Однако все показатели технических и метрологических характеристик, показатели прочности и надежности (кроме ремонтпригодности) таких соединений имеют более низкие значения по сравнению с соединениями других классов.

Одни из наиболее распространенных соединений, формируемых способом прессовой посадки, на железнодорожном транспорте – это прессовые соединения внутренних колец подшипников с осями и валами, колес с подступичными частями оси, бандажей с колесными центрами локомотивов. В вагонном хозяйстве эти соединения изготавливаются и ремонтируются в соответствии с требованиями руководящего документа, утвержденного Межгосударственным советом по железнодорожному транспорту [64]. Внутренние кольца буксовых подшипников в отличие от остальных соединений не имеют определённого срока службы и используются до тех пор, пока признаются годными по результатам неразрушающего контроля.

В вагонном хозяйстве в зависимости от типа колесной пары применяются три типа подшипников: роликовые цилиндрические (рисунок 1.4), сдвоенные и подшипники кассетного типа. Два последних вида подшипников поставляются на предприятия как цельные неразъёмные изделия, готовые к монтажу. После запрессовки на ось с натягом такие подшипники не подвергаются

неразрушающему контролю при всех видах ремонта. В случае их демонтажа они передаются в центр техобслуживания компаний-изготовителей.

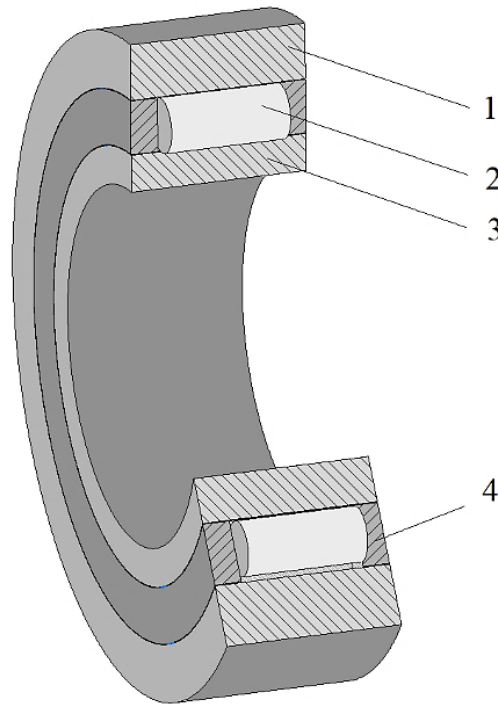


Рисунок 1.4 – Роликовый цилиндрический подшипник:
1 – наружное кольцо; 2 – ролики; 3 – внутреннее кольцо; 4 – сепаратор

Роликовые цилиндрические подшипники изготавливают так, чтобы их внутренние кольца после запрессовки на ось колесной пары при всех плановых видах ремонта не демонтировались и обеспечивалась возможность контроля методами неразрушающего контроля. Такие подшипники в составе буксового узла устанавливают на оси колесных пар типа РУ1Ш и РУ1. Перед установкой партия новых роликовых цилиндрических подшипников подвергается стопроцентному входному контролю качества, проверке комплектности поставки, наличию сертификата и паспорта. В зависимости от объема партии контролю подлежат либо все подшипники качения (при объеме партии до восьми штук), либо установленная в нормативных документах часть:

- при объеме партии свыше восьми штук до ста пятидесяти – 10 %;
- при объеме партии, превышающем сто пятьдесят штук подшипников – 7,5 % от общего объема партии.

Каждая контролируемая единица должна иметь соответствующую длину, определенные радиальные и осевые зазоры, поверхность установленного уровня качества и не иметь коррозии, видимых трещин, загрязнений или других повреждений. Номинальное значение посадочного диаметра отверстий передних и задних внутренних колец подшипников равно 130 мм. По отклонению среднего значения диаметра отверстия от номинального кольцу присваивается размерная группа, по которой в дальнейшем производится подбор колец к шейкам осей колёсных пар. Как правило, деление производится на три размерные группы: к первой относятся кольца с минусовыми отклонениями от номинального размера до 8 мкм, ко второй – от 9 до 17 мкм и к третьей – от 18 до 25 мкм.

Для определения внутреннего диаметра и формы колец подшипников в вагонных ремонтных депо и пунктах технического обслуживания колесных пар с буксовыми узлами применяют следующие приборы:

- прибор для измерения среднего диаметра отверстий внутренних колец подшипников - модель 4152-D (рисунок 1.5) (Зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 17390-03), где D – номинальный диаметр измеряемого кольца;

- прибор для измерений наружных и внутренних диаметров - «Прибор ИКР-01» модификации УП-01 по ТУ 318558-007-43180716-05 (рисунок 1.6) (Зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 30849-05).

Приборы для измерения диаметров контактные и состоят из двух основных элементов: электронного блока (рисунок 1.5, б) и измерительных позиций для прибора модели 4152-D (рисунок 1.5, а) или установочных устройств для ИКР-01 (рисунок 1.6).

Работа приборов основана на сравнении размеров: диаметра отверстия установочной меры (рисунок 1.5, в) или кольца (рисунок 1.6, а) и диаметра отверстия контролируемого кольца (рисунок 1.6, б). Измерения проводятся при помощи индуктивных преобразователей. Основные элементы такого типа преобразователя: катушка с двумя или более обмотками и подвижный якорь. Обмотки включены навстречу друг другу. Суммарное выходное напряжение,

наводимое в них, равно нулю, в том случае, если якорь расположен симметрично относительно обмоток.

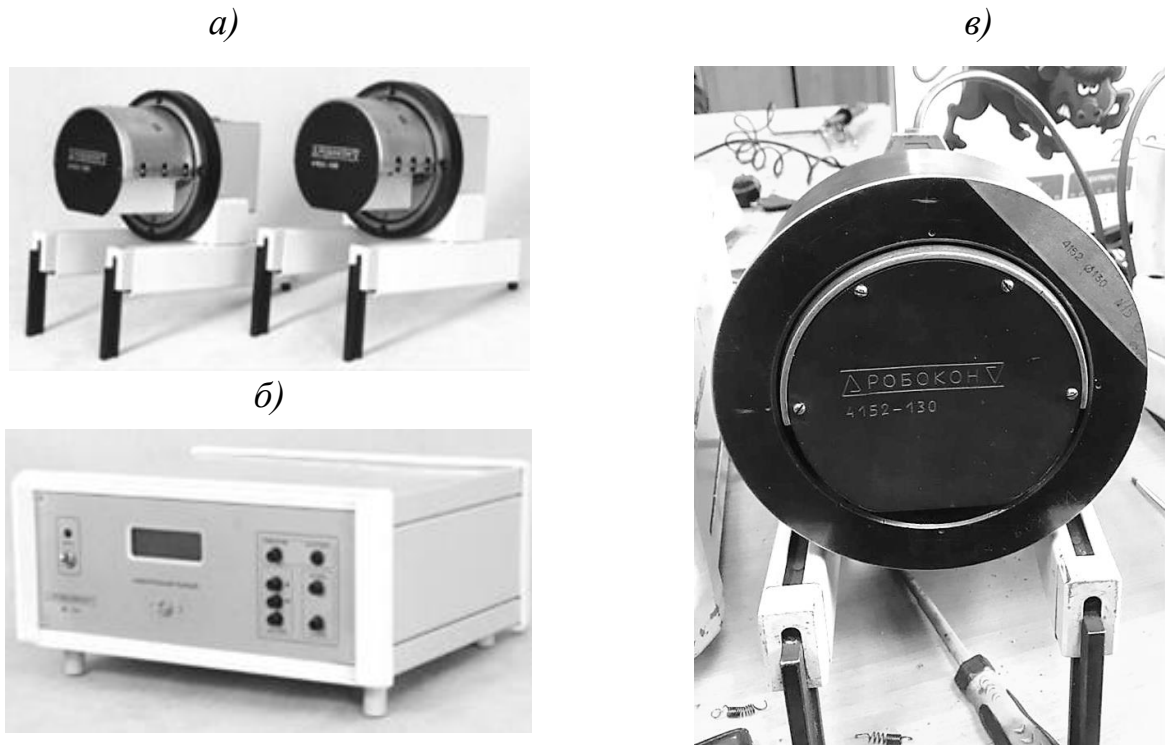


Рисунок 1.5 – Прибор для измерения среднего диаметра отверстия внутренних колец подшипника – Модель 4152-D: *а* – измерительные позиции; *б* – электронный блок; *в* – установочная мера диаметром 130 мм на измерительной позиции

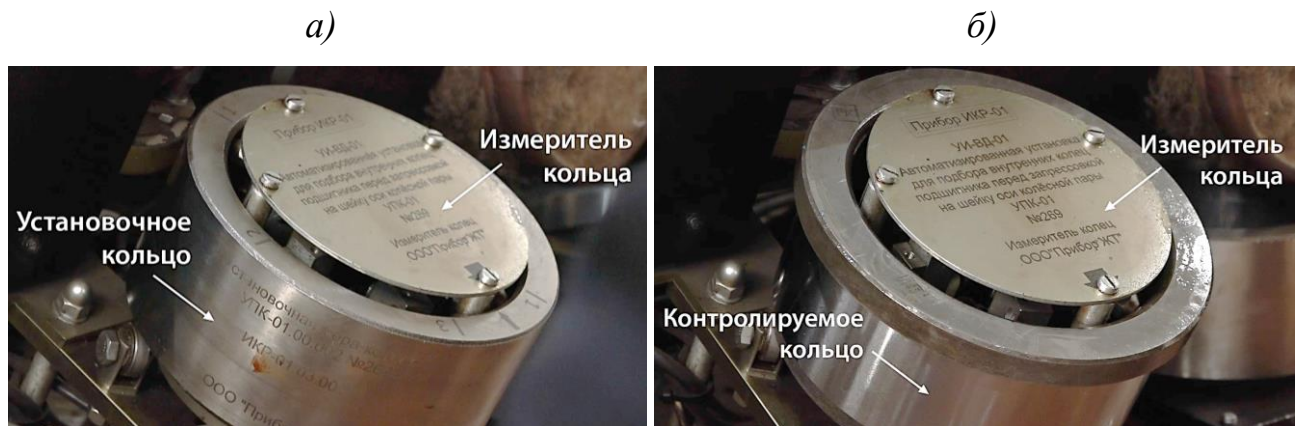


Рисунок 1.6 – Фотографии внешнего вида устройства установочного для измерения внутренних диаметров прибора ИКР-01 с установочным кольцом (эталон) (*а*) и контролируемым кольцом (*б*)

Если якорь сместится относительно положения симметрии, то разность значений напряжений будет отлична от нуля и на электронный блок поступит электрический сигнал в форме, наиболее удобной для восприятия и обработки. В

результате приборы определяют и выводят на монитор электронного блока средние значения внутреннего диаметра кольца подшипника, овальности и конусности с погрешностью, не превышающей 3 мкм для прибора модели 4152-130 и 6 мкм для ИКР-01. Среднее значение диаметра определяется как полусумма максимального D и минимального d значений (рисунок 1.7). Овальность – как полуразность (рисунок 1.7, б). Конусообразность – как отношение разности максимального D и минимального d значений внутреннего диаметра кольца к длине l (рисунок 1.7, а).

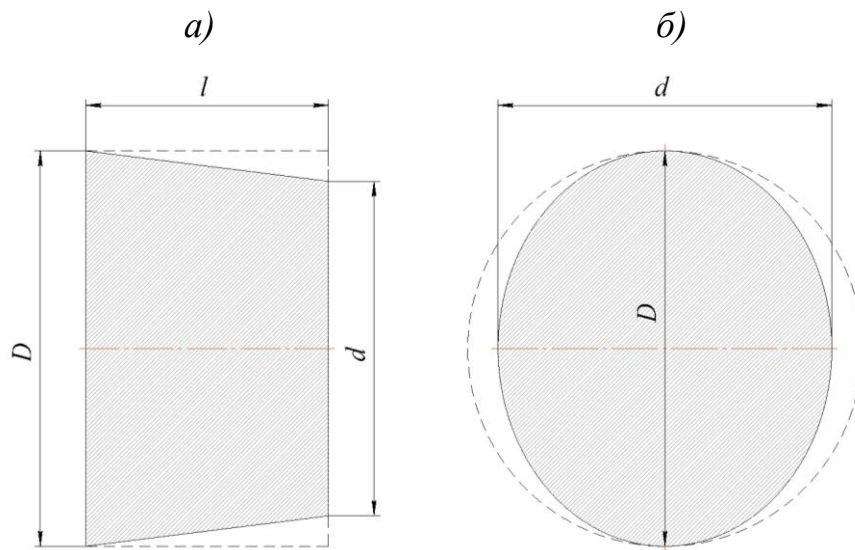


Рисунок 1.7 – Определение конусности (а) и овальности (б)

Подшипники, не прошедшие входной контроль, не допускаются к монтажу. В случае удовлетворительного входного контроля подшипника на его внутреннее кольцо наносят отклонение среднего значения посадочного диаметра от номинального или номер размерной группы, в соответствии с маркировкой групп, принятой на предприятии-изготовителе. Значения наносятся цветным карандашом либо маркером по металлу на поверхность кольца, исключая дорожку качения.

По нанесённым значениям подбирают внутренние кольца подшипника для каждой оси колесной пары таким образом, чтобы разность диаметра шейки оси и внутреннего диаметра кольца не выходила за границы допустимого диапазона: от 40 до 110 мкм. При этом для одной оси диаметры отверстий всех внутренних колец не должны отличаться более, чем на 8 мкм.

После подбора соответствующих подшипников производится их запрессовка на шейке оси с помощью гидравлического пресса или методом тепловой посадки. Перед монтажом подшипников с помощью гидравлического пресса посадочные поверхности: отверстия внутренних колец подшипников и шейки осей колесных пар - тщательно очищаются, протираются насухо и покрываются ровным тонким слоем смазки. В качестве смазки используется паста эМПи-4 по ТУ 0254-011-25887352-2007 «Паста эМПи-4 для прессовой посадки подшипников буксовых узлов вагонов». Смазка наносится для снижения вероятности образования задиров на шейках осей колесной пары. В дальнейшем она заполняет зазор и, с одной стороны, препятствует попаданию воды и, следовательно, коррозии соединения, с другой стороны – затрудняет ультразвуковой контроль, так как способствует прохождению ультразвуковой волны.

После подготовки при условии, что значение температуры сопрягаемых деталей отклоняется от значения температуры окружающей среды не более, чем на 3 °С, запрессовывают внутренние кольца цилиндрических роликовых подшипников с установленными в нормативных документах усилиями и скоростями. Допускаемые значения усилия запрессовки согласно [13] составляют от 245,3 до 392,5 кН (от 25 до 40 тс), скорость перемещения поршня – от 2,5 до 4 мм/с.

Для монтажа цилиндрических подшипников методом тепловой посадки процедура подготовки внутренних колец подшипников и шеек осей идентична подготовке деталей при посадке с помощью гидравлического пресса. Вместо смазки эМПи-4 используют масло трансформаторное по [15], промышленное масло по [9] или веретенное АУ по ТУ 38-1011232-89 «Масла веретенные АУ. Технические условия». Тонким слоем масла покрывают шейку оси. После подготовки внутренние кольца подшипника нагревают до температуры, значения которой находятся в диапазоне от 100 до 120 °С. Для нагрева допустимо применять электропечи, индукционные нагреватели или ванны, наполненные нагревающей жидкостью. В качестве нагревающей жидкости используется трансформаторное масло. Перед непосредственной установкой внутренних колец подшипника на ось

колесной пары для исключения перекоса используется специальный направляющий стакан, который прикрепляют к торцу оси.

В процессе запрессовки качество соединения может быть оценено по зависимости длины запрессовки от прикладываемого усилия. Однако для колец эта зависимость не контролируется. Общие закономерности, преимущества и ограничения такого подхода могут быть рассмотрены на примере формирования прессовых соединений колес с осями.

В процессе запрессовки колес на оси на компьютере нагружающего устройства фиксируется диаграмма со значениями давления или усилия (рисунок 1.8). Диаграмма по всей длине должна иметь выпуклую и плавно нарастающую вверх форму [13]. Полученные значения на каждые 100 мм диаметра подступичной части оси не должны выходить за границы диапазона, установленного в [64]: от 383 до 569 кН. Нижний предел конечного усилия запрессовки при повторном монтаже каждый раз увеличивается на 15 %.

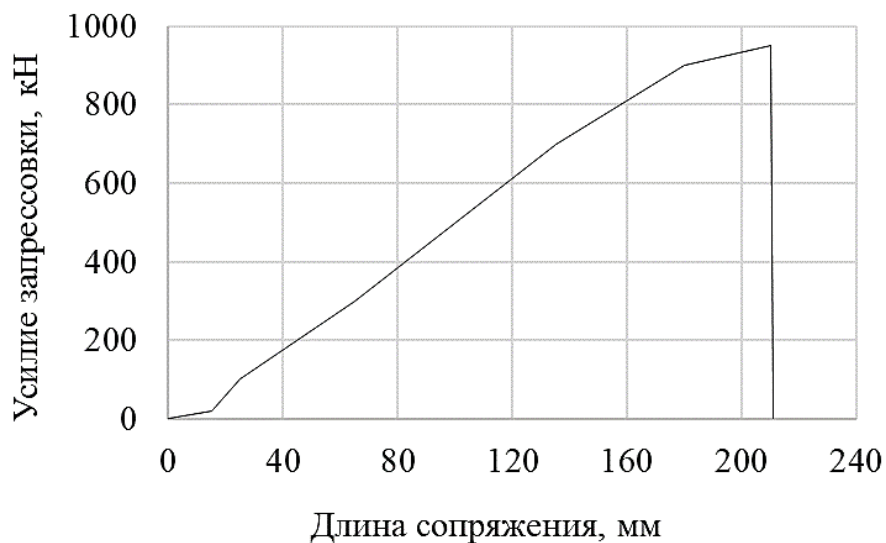


Рисунок 1.8 – Внешний вид допускаемой диаграммы запрессовки

После формирования колесной пары форма кривой диаграммы запрессовки не должна иметь резких колебаний, конечные усилия запрессовки не должны выходить за границы допускаемого диапазона значений. При необходимости распрессовки соединения колес с осью возможна повторная посадка колес на ту же или другую свободную ось не более двух раз и только в том случае, если на

поверхности подступичных частей оси и отверстия ступицы колес отсутствуют задиры.

В случае распрессовки сформированного соединения внутреннего кольца подшипника с шейкой оси, допустимо повторно производить посадку на любую свободную ось колесной пары, но не более одного раза, так как качество поверхности сопрягаемых поверхностей при повторной запрессовке и распрессовке колец на ось существенно снижается. В большей степени «страдает» шейка оси за счет меньшего содержания углерода в составе стали, из которой она изготовлена. Из-за относительной «мягкости» стали по сравнению с материалом колец подшипников на ее поверхности могут появляться задиры. По этой причине внутренние кольца подшипников допускается не снимать при некоторых видах ремонта буксовых узлов колесных пар. При этом обязательным условием должно быть проведение контроля плотности посадки (натяга).

Плотность посадки внутренних колец роликовых цилиндрических подшипников на шейку оси колесной пары грузового вагона в настоящее время измеряют косвенным методом. Рассчитывают разность результатов измерений диаметра отверстия внутреннего кольца подшипника и диаметра шейки оси колесной пары в свободном состоянии, полученных перед монтажом.

На достоверность результатов контроля плотности посадки колец на шейку оси, полученных косвенным методом, оказывают влияние следующие факторы:

- разница температур сопрягаемых деталей;
- состояние посадочных поверхностей;
- погрешность, связанная с овальностью и конусообразностью отверстия кольца и поверхности качения шейки оси.

В процессе эксплуатации самым распространенным способом контроля плотности посадки внутренних колец подшипников на ось колесной пары без распрессовки в настоящее время является проверка на проворот с использованием специализированных устройств. Данный способ имеет два существенных недостатка. Во-первых, существует достаточно высокая вероятность повреждения дорожки качения кольца подшипника, что приводит к его браковке. Во-вторых,

низкая достоверность полученных результатов связана с влиянием человеческого фактора, что увеличивает шансы пропуска дефектного прессового соединения.

1.2 Методы контроля механических напряжений с использованием акустоупругости

Для обеспечения безопасной эксплуатации прессовых соединений необходимы надежные способы контроля механических напряжений в кольцах подшипников, так как от их уровня зависят силы трения, обеспечивающие неподвижность соединения в процессе эксплуатации. Среди существующих методов неразрушающего контроля абсолютных напряжений [82, 108, 118] наибольшее внимание исследователей уделяется акустическим методам. Преимуществом акустических методов является возможность контроля поверхностных и внутренних напряжений и оценка средних напряжений на пути распространения волны.

Одним из ведущих специалистов в области исследования напряженного состояния металлоконструкций методом акустоупругости, Никитиной Н. Е., было опубликовано более 20 статей [40-49]. Кроме того, современное состояние применения акустоупругого эффекта для исследования плоского напряженного состояния конструкционных материалов освещено в книге [42]. Основным объектом контроля выступала трубная сталь. Механические напряжения измеряли при помощи портативного прибора ИН-5101А (рисунок 1.9), разработанного Инженерной фирмой ООО «ИНКОТЕС» (Зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 29028-10). В приборе реализован ультразвуковой метод. Совмещенный контактный преобразователь возбуждает две поперечные волны, направленные взаимно перпендикулярно, и одну продольную. Измеряемый параметр — задержка принятых сигналов относительно первого отраженного импульса с погрешностью не более 1 нс. Значения одно- и двухосных напряжений количественно определяются в соответствии с расчетными алгоритмами, заложенными в вычислительный модуль прибора ИН-5101А.

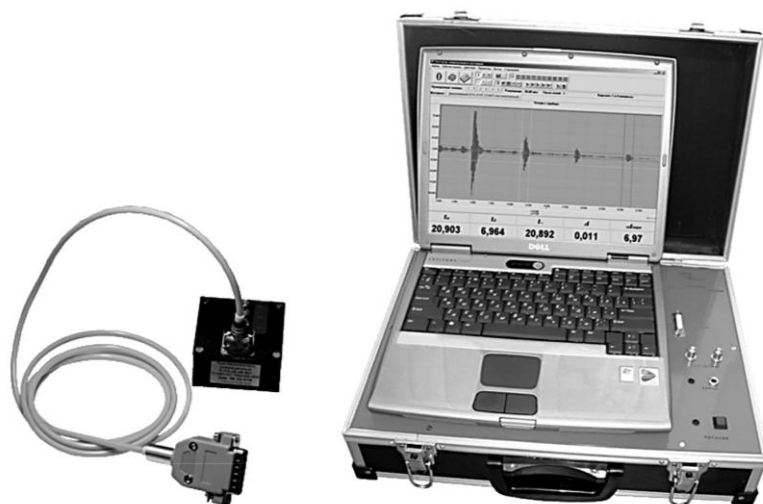


Рисунок 1.9 – Прибор ИИ-5101А с преобразователем [44]

Измерение напряжений по задержке сигнала при прозвучивании пластин продольной и поперечной волнами, ориентированными вдоль и ортогонально направлению распространения напряжений также описано в [80] и [116] для тонких стальных пластин.

Значительный вклад в исследование механических напряжений с использованием эффекта акустоупругости внесла Степанова Л. Н. В работах [61, 62, 70, 71, 74] описана технология контроля железнодорожных рельсов. С помощью специального стенда создают растягивающие механические напряжения. Устанавливают на поверхность катания рельса систему из двух отдельно подключённых преобразователей с углом ввода 18° , один из которых является излучателем, а другой - приемником (рисунок 1.10). Регистрируют время прохождения продольной и поперечной волнами расстояния от излучателя до приемника после однократного отражения от подошвы рельса при разных значениях растягивающих напряжений (рисунок 1.11). Напряжения рассчитывают по разности времени задержки распространения продольной и поперечной волн. Экспериментально полученные данные подтверждаются результатами использованием тензометрии.

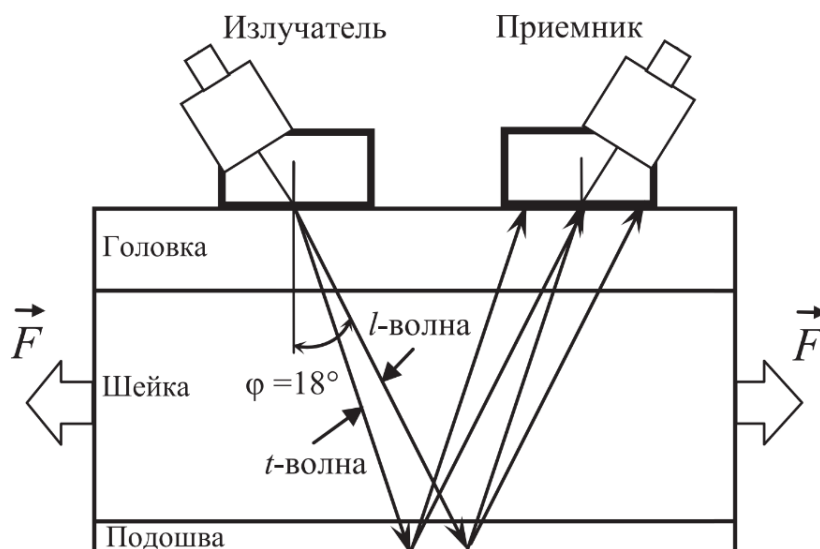


Рисунок 1.10 – Установка пьезопреобразователей на рельс [70]

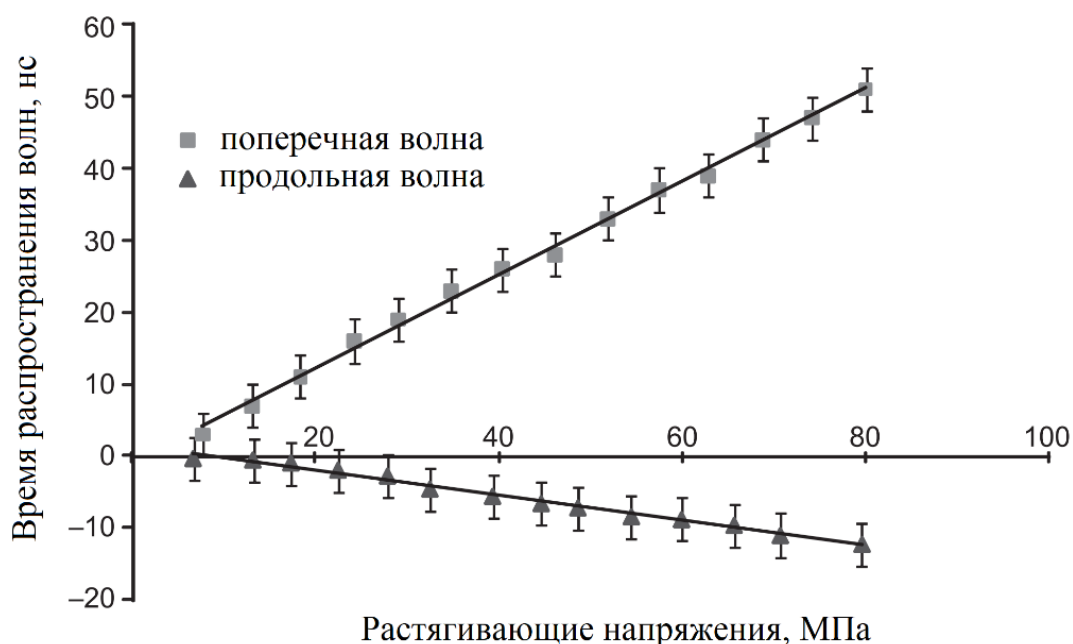


Рисунок 1.11 – Экспериментальная зависимость изменения времени распространения волн в рельсе от рассчитанных значений продольных напряжений [71]

Исследования напряженно-деформированного состояния рельсов с использованием метода акустоупругости отражены в работах коллектива авторов Ижевского государственного технического университета [31-38]. Эксперименты, выполненные под руководством Муравьева В.В. и Муравьевой О.В., проводились с помощью разработанного электромагнитно-акустического структуроскопа СЭМА (номер в государственном реестре средств измерений 61957-15) [5]. На головку рельса устанавливался бесконтактный электромагнитно-акустический

преобразователь, возбуждающий и принимающий поперечные волны, направленные перпендикулярно поверхности ввода (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Схема установки электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП) на головке рельса и ход лучей [34]

Значения напряжений вычисляются через отношение времени распространения волн, поляризованных вдоль и перпендикулярно поверхности ввода. Погрешность полученных значений не превышает 3 МПа.

Изначально электромагнитно-акустический способ автором был предложен для оценки натяга и остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес [5, 31]. Скорость волны измерялась на разных этапах жизненного цикла при прозвучивании бандажа по ширине, как показано на рисунке 1.13. Для того чтобы оценить степень плотности прилегания бандажей, сравнивали распределение остаточных напряжений в бандажах в свободном состоянии и в бандажах после прессовой посадки на колесный центр. Разность значений остаточных напряжений при этом составила от 200 до 300 МПа.

Значения натяга определяют возникающие при этом «окружные» напряжения в бандаже. Экспериментально показано, что на каждый 0,1 мм плотности посадки значение напряжений изменяется на 20 МПа. При этом по результатам экспериментов в бандажах с одинаковым значением натяга существенно различались остаточные напряжения в диапазоне от 50 до 100 МПа.

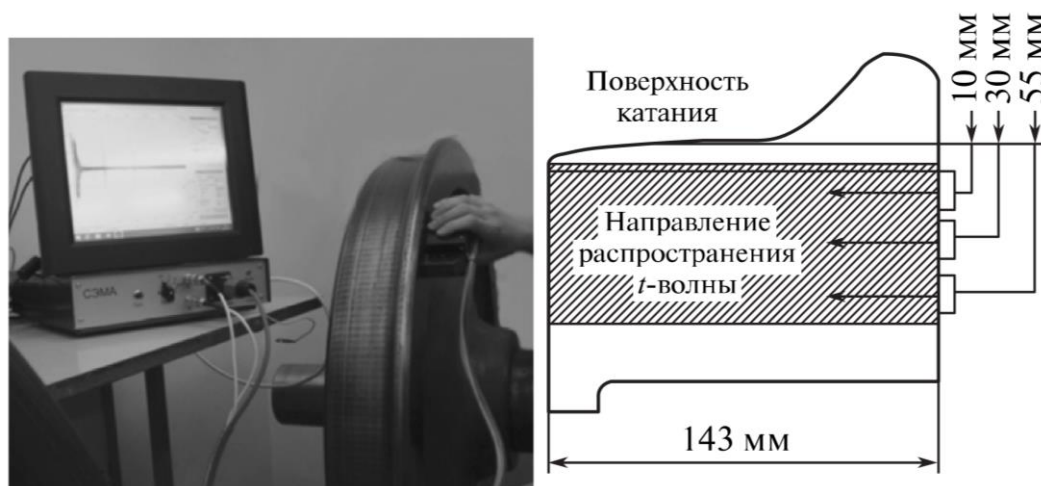


Рисунок 1.13 – Общий вид структуроскопа СЭМА для контроля остаточных напряжений и места установки ЭМА преобразователя по толщине бандажа [31]

Исходя из этого, данный способ позволяет оценить значение натяга бандажа локомотивных колес на колесный центр и не допустить его разрыв, проворот или сползание в процессе эксплуатации. Применение этого способа для контроля плотности посадки внутренних колец подшипников на ось колесной пары ограничено из-за малых размеров объекта контроля. Нормативный диапазон значений натяга здесь будет уже составлять не тысячную долю метра, а миллионную.

В работах [90, 113, 22] исследовались остаточные напряжения в тонкостенных трубах из аустенитной стали, ультразвуковой сигнал формировался лазерно-акустическим преобразователем. В [22] использовалось нормальное и наклонное (с углом, близким к первому критическому) падение ультразвукового пучка на контролируемый объект.

Для плоскопараллельных образцов контроль напряженного состояния проводился в эхо-режиме при вводе акустического сигнала перпендикулярно поверхности (рисунок 1.14). Таким образом измерялись усредненные по толщине действующие и/или остаточные напряжения. Для того чтобы в эхо-режиме измерить скорость ультразвуковой волны с высокой точностью, необходимо знать толщину детали в пределах диаметра ультразвукового пучка с точностью до двух микрометров. Соблюдение этого условия не всегда представляется возможным. Это в большей степени связано с качеством поверхности объекта, которое не

позволяет обеспечить выполнение этого требования. Отрицательное влияние оказывает непараллельность противоположных поверхностей объекта: ввода и донной поверхностей. Таким образом, для достоверного измерения скорости ультразвуковой волны и в результате определения механических напряжений эхо-методом с достаточной для практического применения точностью необходима тщательная подготовка поверхности образцов.

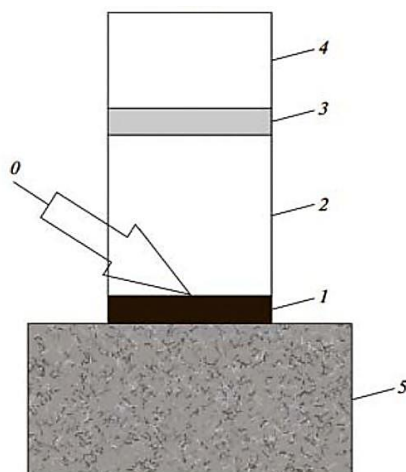


Рисунок 1.14 – Схема лазерно-ультразвукового контроля:
0 – лазерный пучок, 1 – опто-акустический генератор, 2 – опто-акустическая призма, 3 – пьезоприемник, 4 – демпфер, 5 – исследуемый объект [22]

Для измерения скорости прохождения ультразвука рассматривалось использование других типов волн, которые не требуют отражения от противоположной стороны объекта, например, поверхностных волн Рэлея. Возможность применения волн этого типа для определения влияния напряжений на скорость распространения ультразвука было исследовано еще в девяностых годах двадцатого века, где исследователями было установлено, что:

- начальные напряжения оказывают существенное влияние в цилиндре, чем в области полупространства;
- скорость волн линейно зависит от напряжения;
- при растяжении скорость поверхностной волны уменьшается в случае ортогонального приложения нагружения к плоскости распространения волн;
- скорость волн Рэлея зависит от напряжения, радиуса цилиндра, волнового числа.

В [101, 19, 28] поверхностные волны Рэля использовались для измерения дисперсии скорости ультразвука в элементах микроэлектроники при возбуждении колебаний поверхности образца бесконтактным способом при помощи лазера. Регистрация колебаний в этом случае осуществлялась интерферометрическим способом. Такое возбуждение волн требует не менее тщательной подготовки поверхности, так как волна рассеивается на неровностях и шероховатостях. Кроме того, при проведении экспериментов не удалось решить проблему адекватной интерпретации результатов, полученных на криволинейных поверхностях.

Другая возможность измерения скорости ультразвука — применение продольных головных волн. Такое решение неоднократно обсуждалось в литературе [89, 25, 56]. Схема измерения скорости головной продольной ультразвуковой волны приведена на рисунке 1.15. Использование такого типа волн позволяет оценить скорость их распространения и исследовать распределение напряжений в поверхностных слоях толщиной до 1 миллиметра и в образцах, для которых отражение от противоположной донной поверхности не дает информацию о скорости распространения ультразвуковой волны с достаточной точностью.

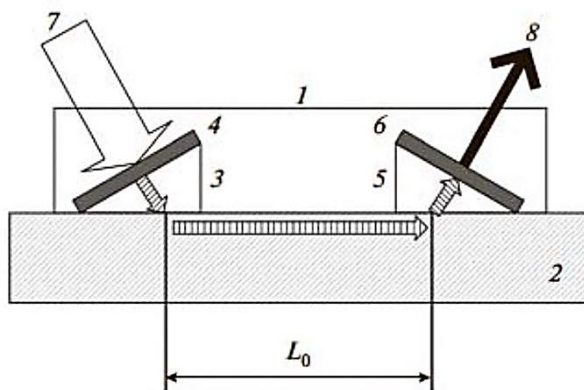


Рисунок 1.15 – Схема измерения скорости головной продольной ультразвуковой волны: 1 – раздельно-совмещенный лазерно-ультразвуковой преобразователь, 2 – поверхность исследуемой среды, 3, 5 – наклонные поверхности призмы, 4 – термооптический преобразователь, 6 – широкополосный пьезоприемник, 7 – импульсный лазерный пучок [79]

Метод определения поля абсолютных напряжений в стальных элементах с использованием критически преломленных продольных волн также широко рассматривается зарубежными авторами [83-87, 91- 97, 99, 102, 115, 117, 119]. В [87, 94, 96, 102]. Предлагаемый способ реализуется двумя наклонными

преобразователями (излучающим и приемным) [87, 102] или группой преобразователей [83, 85, 94, 96] (рисунок 1.16) из одного излучающего и двух приемных. В [87, 94, 96] преобразователи соединены штангенциркулем. Напряжения определяются по разности времен прихода на приемные датчики в ненагруженном состоянии и в результате увеличения растягивающего напряжения в исследуемых образцах. Способ был опробован на пяти стальных элементах с переменным поперечным сечением. Для проверки используется традиционный тензометрический метод. Предложенный способ позволяет эффективно оценивать распределение напряжений и экстремум напряжений в конструкционных их стальных элементов.

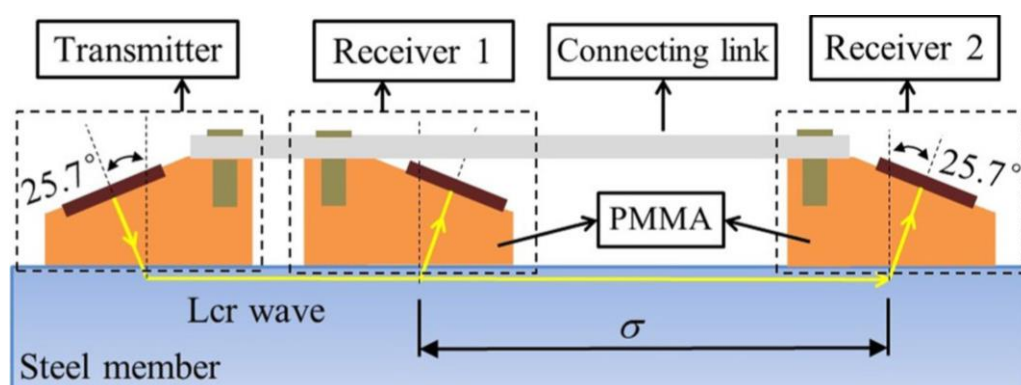


Рисунок 1.16 – Принципиальная схема метода измерения напряжений [94]

Автор статьи [2] предложил способ определения скоростей поверхностных и объемных волн в металлах с использованием приставного преобразователя на основе электромагнитно-акустического эффекта. Скорость распространения поверхностных волн измерялась в двух режимах: совмещенном (рисунок 1.17) и раздельном (рисунок 1.18). Первый был реализован с применением одного преобразователя в качестве излучателя и приемника. Раздельный режим измерения заключался в применении двух преобразователей, которые устанавливались параллельно друг другу. Измерение скорости объемных волн проводилось только в раздельном режиме.

Волна, генерируемая датчиком, отражалась от краев образца и принималась тем же датчиком в совмещенном режиме, приемным преобразователем при измерении скорости в раздельном режиме. Скорости вычислялись по разности

времен прихода сигналов по простым формулам, за основу которых взята общепринятая зависимость расстояния S от скорости C и времени t прохождения волны.

Разность времен прихода дала возможность решить две основные проблемы, которые присущи традиционным методам определения скорости [39]: погрешность определения расстояний, пройденных волной, и погрешность, связанная с неточностью определения начала и конца оцениваемого временного интервала.

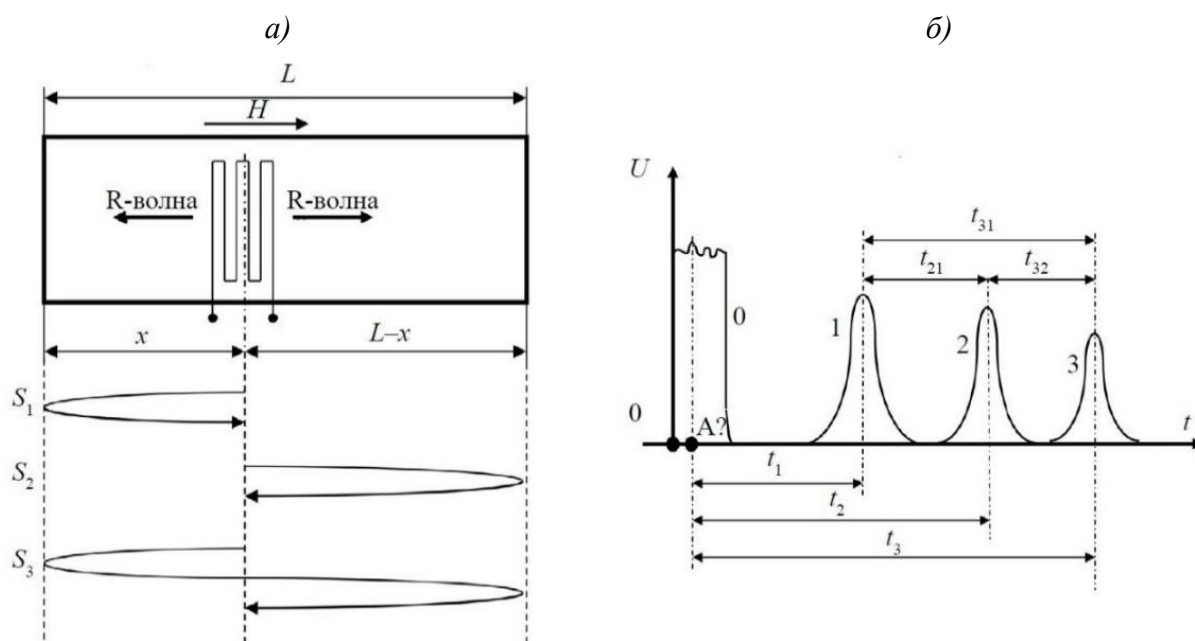


Рисунок 1.17 – ЭМА-преобразователь в совмещенном режиме измерения (а) и его осциллограмма (б) [2]

Таким образом, методика позволила определять скорость трех типов акустических волн (продольных, поперечных и поверхностных волн Рэлея) за одну установку преобразователя в образцах с плоскопараллельными границами с точностью $\pm 5\%$.

Применение метода для определения скорости распространения волн в кольцах подшипников ограничено формой соединения, отличной от плоскопараллельной. Необходимы реконструкция формы преобразователя для обеспечения постоянства акустического контакта и более сложные формулы для расчета скорости, учитывающие конструктивные особенности соединения.

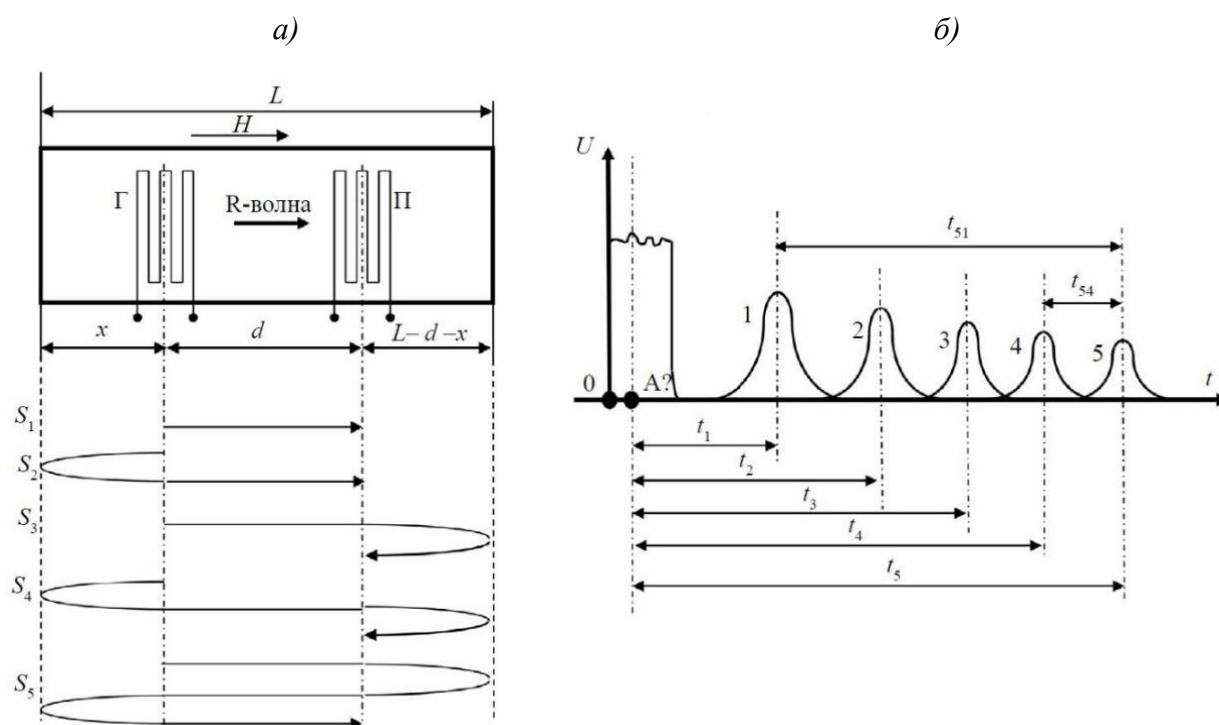


Рисунок 1.18 – ЭМА-преобразователи в раздельном режиме измерения (а) и их осциллограмма (б) [2]

Способ измерения напряжений в металлах на основе ЭМА-принципа через определения скоростей поверхностных волн Релея и с использованием сдвиговых и продольных волн также описан в [98, 100, 106]. Работы выполнены с применением электромагнитно-акустического преобразователя – ЕМАТ [105].

1.3 Акустические методы контроля состояния контактирующих поверхностей прессовых соединений

Степень ослабления акустических волн, прошедших через границу прессового соединения, коррелирует с плотностью прилегания сопрягаемых деталей. Патенты на способ определения коэффициента уменьшения амплитуды ультразвуковых колебаний публикуются с середины XX века [50, 55, 58].

В современных работах [53] коэффициент затухания продольных ультразвуковых колебаний в материале определялся на двух идентичных образцах материала, отличающихся только толщиной: l_1 и l_2 . Последовательно прозвучивается каждый образец прямым пьезоэлектрическим преобразователем. Регулируя диапазон развертки дефектоскопа, регистрируется серия эхо-импульсов,

после многократного отражения от поверхности ввода и донной поверхности образцов (рисунок 1.19). Из всех зарегистрированных импульсов выбирали по два для каждого образца с амплитудами, соответствующими отношению 2:3. Сигналы с минимальными значениями амплитуды должны превышать уровень шумов не менее, чем в 2 раза. Для оценки коэффициента затухания ε и коэффициента отражения ультразвуковых волн от границы материала исследуемого образца с преобразователем $R_{\text{пэп}}$ решается система уравнений:

$$\frac{P^{m1}}{P^{n1}} = \frac{\varphi(m \cdot l_1)}{\varphi(n \cdot l_1)} \cdot [R_{\text{пэп}} e^{-2 \cdot \varepsilon \cdot l_1}]^{m-n}$$

$$\frac{P^{k2}}{P^{s2}} = \frac{\varphi(k \cdot l_2)}{\varphi(s \cdot l_2)} \cdot [R_{\text{пэп}} e^{-2 \cdot \varepsilon \cdot l_2}]^{k-s} ,$$

где m, n, k, s – порядковые номера выбранных эхо-импульсов, где $m > n, k > s$; $\frac{P^{m1}}{P^{n1}}$ и $\frac{P^{k2}}{P^{s2}}$ – отношения амплитуд донных импульсов на первом и втором образцах соответственно; $\varphi(m \cdot l_1), \varphi(k \cdot l_2), \varphi(n \cdot l_1), \varphi(s \cdot l_2)$ – функции ослабления донного импульса в результате расширения акустического поля преобразователя для толщины $m \cdot l_1, k \cdot l_2, n \cdot l_1, s \cdot l_2$, соответственно.

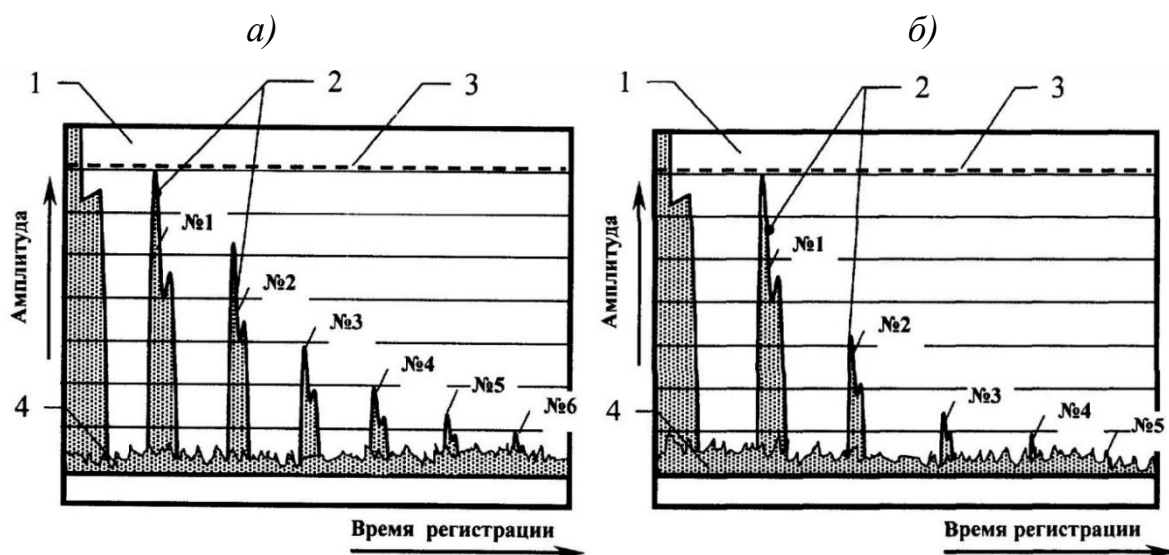


Рисунок 1.19 – Эскизы многократно отраженных от поверхности металла, толщиной 12 мм (а) и 20 мм (б), эхоимпульсов [53].

Заявленный способ определения коэффициента затухания продольных колебаний в материале применим для объектов, на которые не действуют внешняя нагрузка, температурное поле и другие факторы. Прессовые соединения находятся

в напряженно-деформированном состоянии. Данным способом удастся достоверно оценить коэффициент затухания только до монтажа объекта. После монтажа сигналы будут отражаться от границы сопряжения двух деталей и отражающая способность для разных значений натяга будет отличаться.

Оценка напряженно-деформированного состояния соединений с натягом цилиндрической формы эхо-методом рассмотрена в работах Буденкова Г.А. и Иванникова А.В. как в соавторстве, так и в отдельно опубликованных статьях [79, 4, 6, 23, 57]. Эксперименты проводились на свободном кольце и пяти соединениях, сформированных в результате тепловой запрессовки. Соединения были изготовлены из идентичных стальных деталей с шероховатостью сопрягаемых поверхностей $R_z = 6,3$ мкм и отличались значениями натягов: 30, 50, 80, 100 и 140 мкм.

Генерация и прием эхо-сигналов проводились прямым совмещенным преобразователем в шестнадцати точках (с шагом $22,5^\circ$) по окружности наружной поверхности охватывающей детали. Рабочая частота преобразователя составляла 5 МГц, диаметр пьезопластины – 9 мм.

На рисунках 1.20 и 1.21 приведены временные диаграммы отражений ультразвуковых импульсов на свободном кольце и на прессовой сборке соответственно. Для свободного кольца коэффициент отражения определялся из соотношения:

$$R_k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_0 D^2 R}{U_0 D^4 R_d'^2 R_n} = \frac{1}{D^2 R R_n},$$

для соединения с натягом:

$$R_s = \frac{U_1'}{U_2'} = \frac{U_0 D^2 R_d'}{U_0 D^4 R_d'^2 R_n} = \frac{1}{D^2 R_d' R_n}.$$

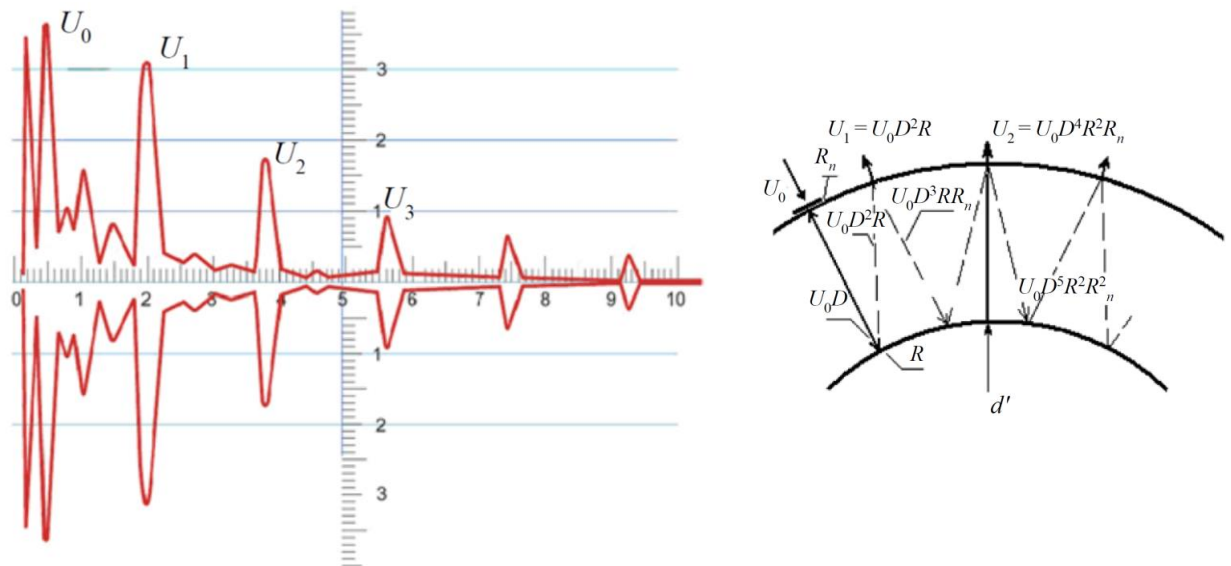


Рисунок 1.20 – Схема формирования УЗ-сигнала на свободном кольце [4].

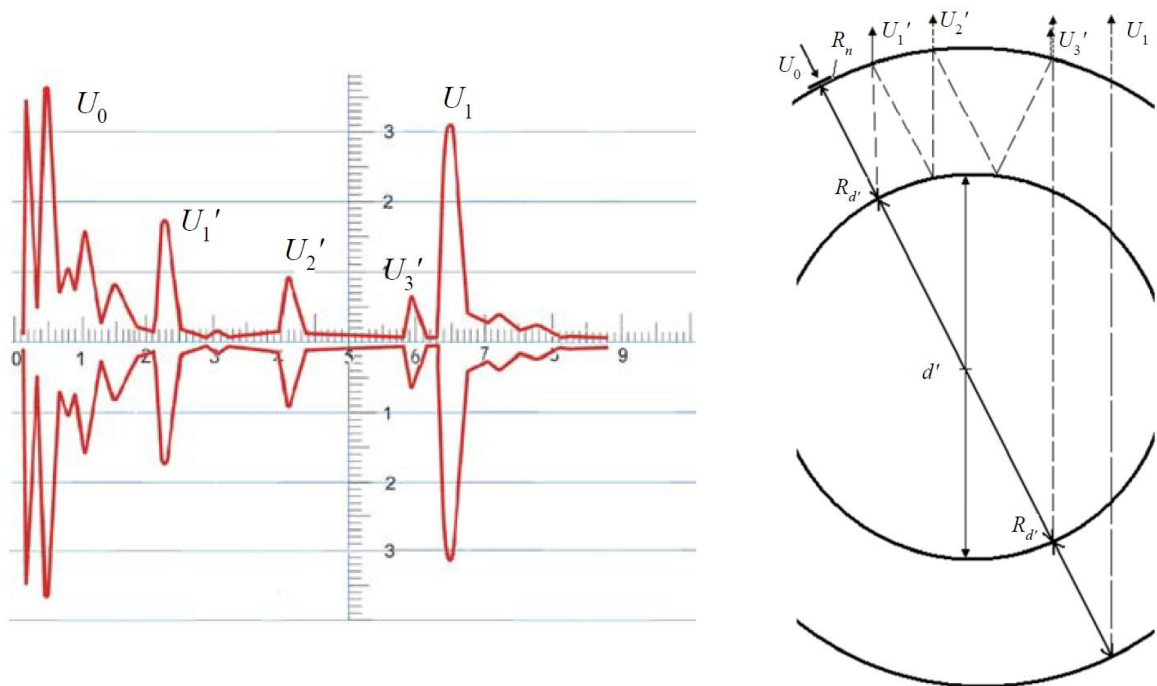


Рисунок 1.21 – Схема формирования УЗ-сигнала на прессовой сборке [4].

Напряженно-деформированное состояние соединений оценивалось отношением коэффициентов отражения для кольца в свободном состоянии R_k и кольца в соединении R_s :

$$R_{\text{посадки}} = \frac{R_k}{R_s}.$$

Для наглядности результаты исследований образцов соединений с разными значениями натягов отобразили в виде круговых диаграмм ослабления переотраженных волн (рисунок 1.22).

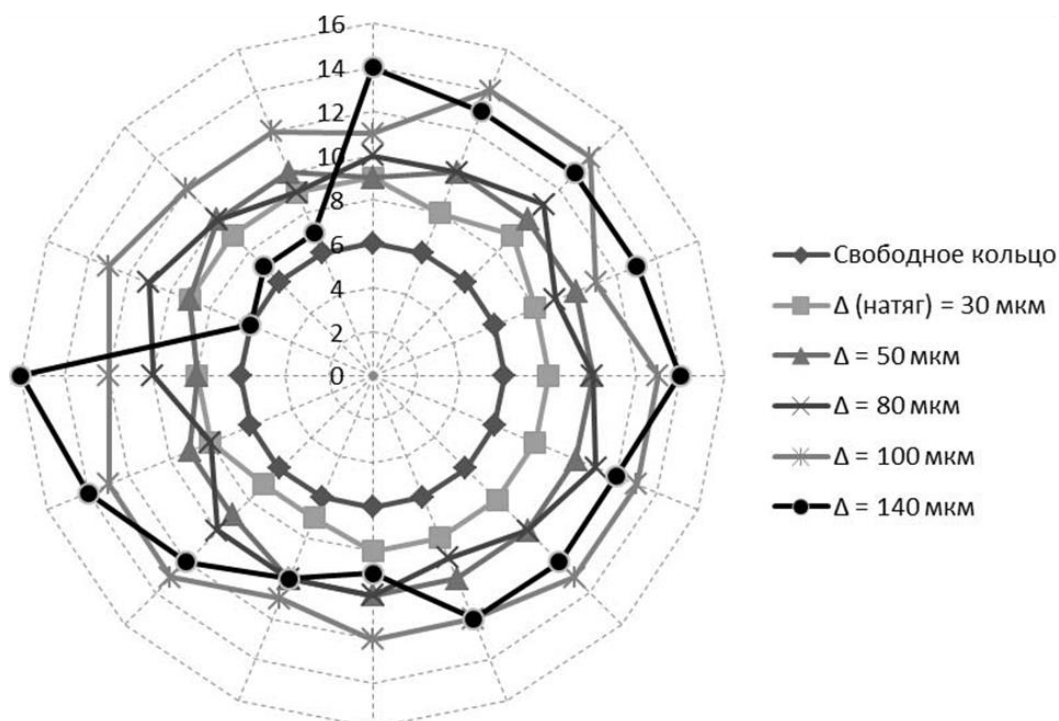


Рисунок 1.22 – Круговые диаграммы ослабления переотраженных волн от границы соединения двух деталей при различных значениях натяга [57]

Иванниковым В.П. [24, 60] проводились исследования соединений с натягом с применением ультразвуковой томографии. Объекты контроля сканировались ультразвуковым преобразователем по окружности в нескольких сечениях. Зарегистрированные сигналы позволили вычислить коэффициенты отражения от места сопряжения в каждом направлении распространения волн и сформировать плоские изображения сечений объектов. По этим данным в специализированном программном обеспечении восстанавливался трехмерный образ напряженно-деформированного состояния образцов с натягом. Проводилась количественная оценка разброса натяга по поверхности сопряжения.

Лазерно-ультразвуковому исследованию остаточных напряжений в [22] подвергались образцы трубопровода из высоколегированной аустенитной стали 12X18H10T (AIS1 321) в состоянии поставки и после термического нагружения (процедура аналогична использовавшейся в [75, 27]). При этом возникали

температурные напряжения, которые локально превышали порог пластичности в образце, вследствие чего появлялись остаточные напряжения, которые необходимо было оценить в соответствии с целью исследования.

В материале образца в свободном ненагруженном состоянии практически отсутствуют механические напряжения и разброс значений скорости распространения ультразвуковой волны по поверхности исследуемого образца не превышает 0,3 %. В результате теплового нагружения локально на образце было зафиксировано снижение скорости распространения ультразвука, при этом разброс значений достиг 1 %. Это свидетельствует о наличии остаточных растягивающих напряжений.

Скорость распространения ультразвуковой волны линейно зависит от приложенного напряжения до порога текучести. Наклон зависимости соответствует коэффициенту акустоупругой связи, β для материала исследуемого образца: $-(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$. С помощью полученного коэффициента акустоупругости по скорости были построены диаграммы распределения остаточных напряжений по поверхности образца (рисунок 1.16).

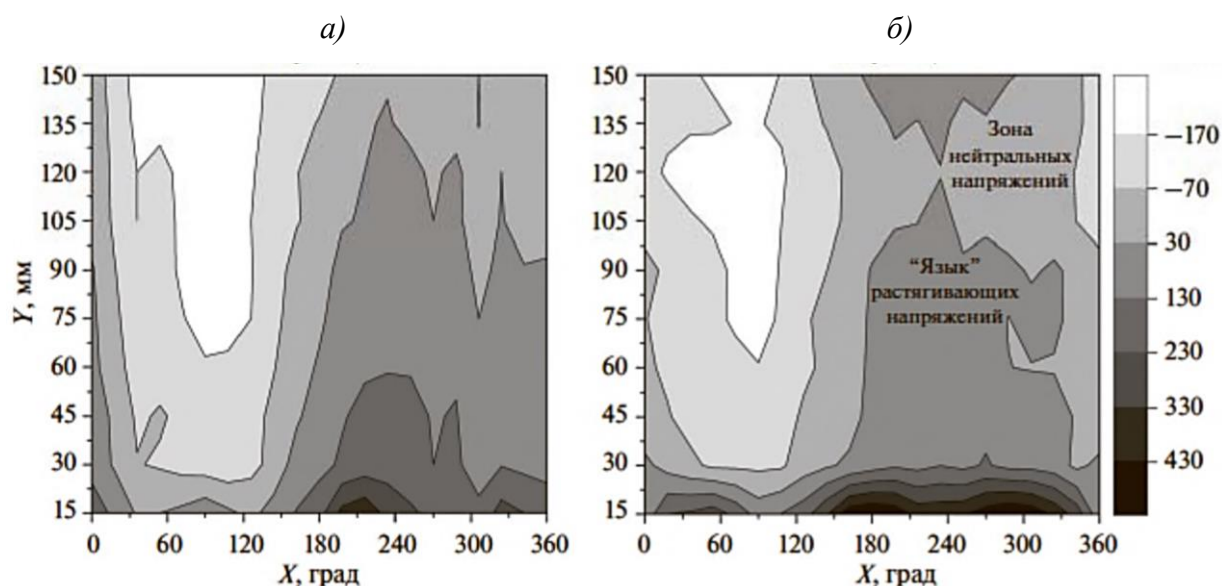


Рисунок 1.16 – Распределение остаточных напряжений образца № 1 (а) и образца № 2 (б) по их поверхности после тепловой нагрузки [22]

Реже всего встречаются публикации, где для оценки напряженно-деформированного состояния применен метод свободных колебаний. Одна из

таких работ [59] основана на создании конечно-элементной модели упругого объекта (рисунок 1.17), после чего определяются формы и частоты собственных колебаний модели при различном напряженно-деформированном состоянии, производятся измерения собственных частот колебаний исследуемого упругого объекта вне зависимости от направления и способа их возбуждения, определяются идентичные формы колебаний конечно-элементной модели упругого объекта и исследуемого упругого объекта, сравниваются значения частот соответствующих форм колебаний, на основании сравнения делаются выводы о напряженно-деформированном состоянии исследуемого упругого объекта.

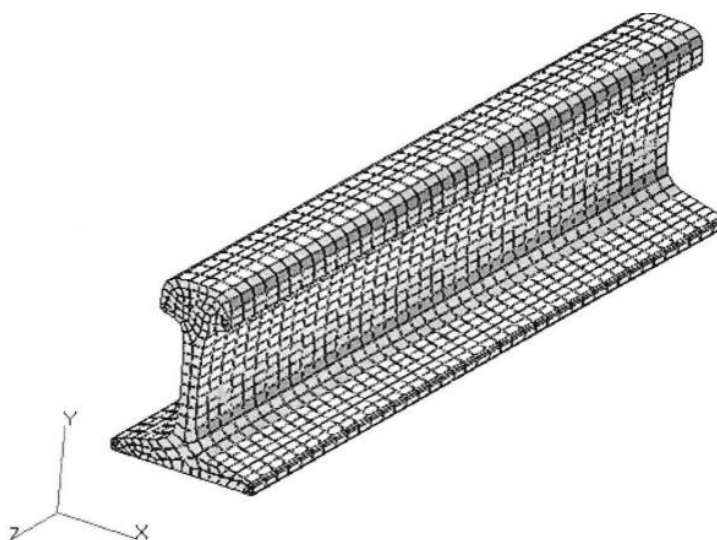


Рисунок 1.17 – Конечно-элементная модель исследуемого рельса марки Р65 длиной 800 мм [59].

В работах [92, 93, 95, 97, 117] исследовано влияние одноосного напряжения на амплитуду и фазовые спектры поперечных волн, распространяющихся в стальных элементах. Исследование заключалось в прозвучивании трех стальных образцов разной толщины поперечными волнами. Сдвиговые волны поляризованы под углом 45° . Принципиальная схема измерений представлена на рисунке 1.18.

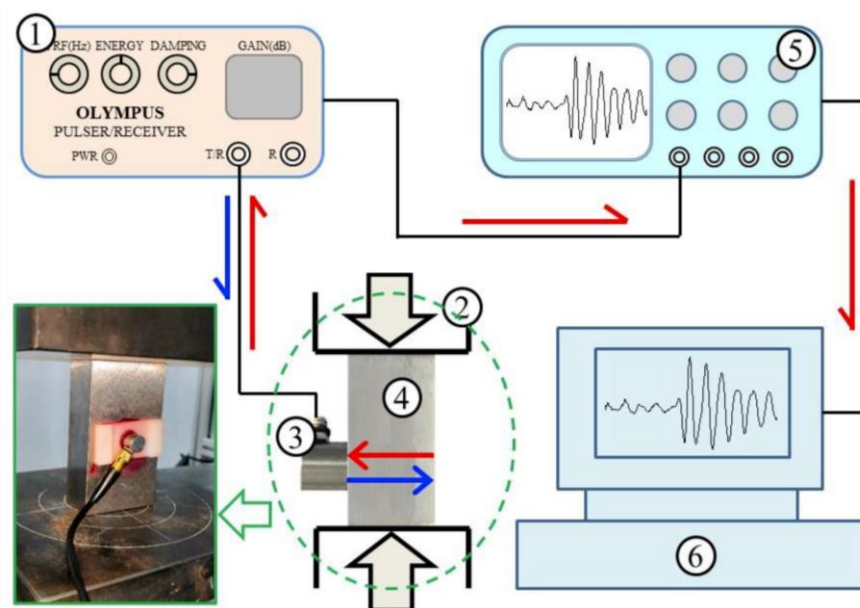


Рисунок 1.18 – Схема измерительной установки: 1 – генератор ультразвуковых импульсов, 2 – универсальное нагружающее устройство, 3 – акустический преобразователь, 4 – исследуемая стальная пластина, 5 – осциллограф, 6 – персональный компьютер [95].

С помощью устройства (2) ступенчато нагружали образцы до значения напряжения 230 МПа начиная с 20 МПа через каждые 10 МПа. При этом в образцах возникали сжимающие напряжения вдоль их вертикальной оси. На каждой ступени осциллографом регистрировались эхо-импульсы с дискретизацией 100 МВ/с. Методом быстрого преобразования Фурье получали спектральные картины. Оценка одноосного напряжения основана на анализе линейной зависимости обратных значений частот (периодов) от соответствующих значений напряжений (рисунок 1.19).

В 2010 году был получен патент на способ определения механических напряжений в стальных конструкциях [54]. Суть способа заключалась в следующем: изготавливался фрагмент стальной конструкции с характеристиками материала, идентичными характеристикам материала исследуемой конструкции, фрагмент подвергали пошаговому нагружению до достижения предела текучести его материала, при этом каждый шаг нагружения сопровождался измерением микротвердости на поверхности фрагмента конструкции. Измерение проводилось микротвердомером в произвольных точках поверхности фрагмента не менее 50 раз для каждого шага. После нагружения по полученным результатам измерения

микротвердости построены графики зависимости среднего значения микротвердости от значений механических напряжений.

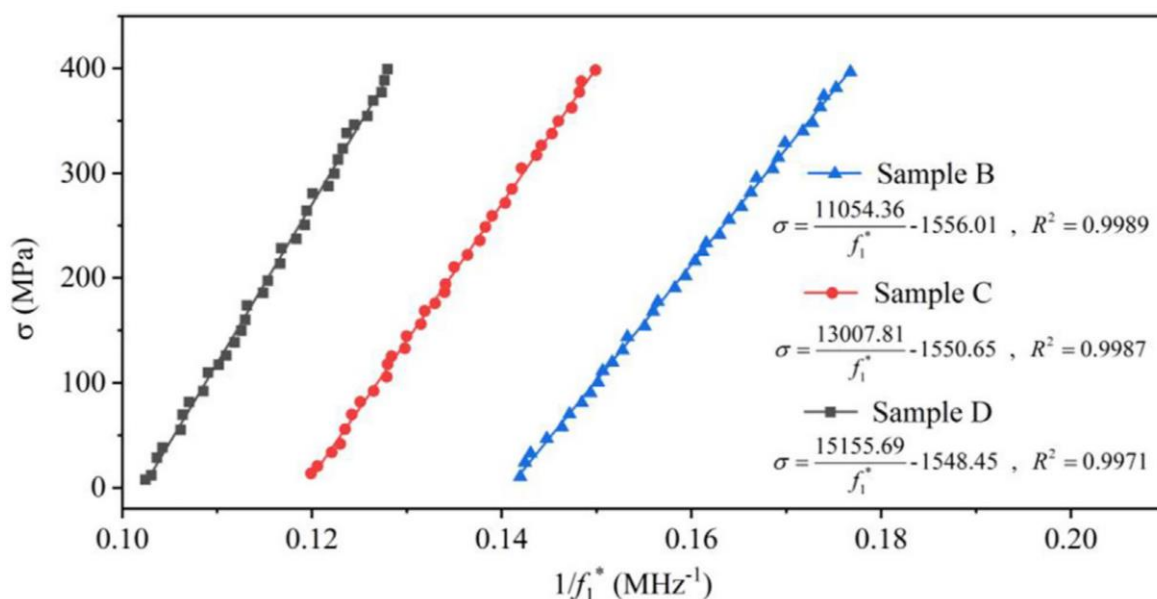


Рисунок 1.19 – Графики зависимости одноосных напряжений от обратных значений частоты для трех исследуемых образцов [93].

Для определения остаточных механических напряжений в исследуемой конструкции проводились многократные измерения микротвердости на её поверхности, полученные значения обрабатывались и определялись механические напряжения с использованием предварительно построенного графика зависимости.

Значение микротвердости в значительной степени зависит от структуры материала исследуемого объекта, поэтому требуются многократные измерения в разных точках его поверхности. Для этого требуются большие временные затраты, что в условиях массового производства является существенным недостатком.

1.4 Выводы к первой главе

Надежность соединений, сформированных методом прессовой посадки, определяется упругими механическими напряжениями в кольцах подшипников, плотностью прилегания контактирующих поверхностей. Нарушение технологии изготовления соединений и условий их эксплуатации снижает прочность соединений, что требует создания и внедрения при плановых видах ремонта специализированных приборов контроля. В настоящее время достоверные методы

контроля качества посадки внутренних колец подшипников на оси колесных пар железнодорожных вагонов отсутствуют.

Для решения задач косвенного измерения напряжений теоретически и экспериментально доказана возможность применения эффекта акустоупругости. Разработаны способы отстройки от таких мешающих факторов как внутренние напряжения материала, колебания температуры и другие. Метод измерения напряжений с помощью акустоупругого эффекта преимущественно основан на эхо-импульсном методе. Для наиболее распространенных материалов определены коэффициенты акустоупругости как для измерений по скорости ультразвука, так и для измерений по времени распространения ультразвуковой волны. При измерении напряжений в материале объекта контроля методом акустоупругости в случаях, когда контакт не влияет на результаты измерений, ультразвуковая волна в материал вводится пьезоэлектрическими преобразователями, для снижения влияния контактной жидкости созданы приборы, основанные на электромагнитно-акустическом эффекте.

Для решения задачи диагностики соединений положительно зарекомендовали себя акустические методы: ультразвуковой, методы свободных и вынужденных колебаний. Прозвучивание соединения ультразвуковыми волнами позволяет обнаруживать локальные участки неплотного прилегания контактирующих поверхностей. Интегральные методы колебаний обеспечивают возможность оперативного контроля состояния прессового соединения, в том числе средней плотности сопряжения деталей.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ

2.1 Испытательное оборудование

Надежность и безотказность прессовых неподвижных разъемных соединений обеспечивается разностью диаметров деталей, называемой в нормативной и технической документации натягом. Наружный диаметр d_1 внутренней детали превышает внутренний диаметр наружной детали d_2 . Натяг определяется как разность диаметров деталей, измеренных в свободном состоянии до формирования соединения:

$$\Delta d = d_1 - d_2. \quad (2.1)$$

После прессовой посадки колец на шейку оси неподвижность соединения обеспечивается силами трения, максимальные значения которых зависят от нормальных сжимающих механических напряжений P на границе соединения и состоянием поверхностей в зазоре между кольцом и осью.

Для моделирования прессовых соединений в лаборатории разработаны и изготовлены образцы натяга из валов, имитирующих шейки осей, и колец подшипников роликовых цилиндрических типа 36-42726E2M в соответствии с [8]. Основные методические вопросы и технология изготовления настроечных образцов приведена в разделе 4.1.

Для исследования акустоупругих характеристик материала колец подшипников аттестован стенд для нагружения, позволяющий воспроизвести упруго напряженно-деформированное состояние одного кольца подшипника с различным уровнем механических напряжений (рисунок 2.1).

Преимуществом стенда для исследований методом акустоупругости является возможность проведения экспериментов на одном и том же объекте с разными значениями механических напряжений. Для контроля в процессе испытаний напряжений в стенде предусмотрен манометр, фиксирующий давление гидравлической жидкости в гидросистеме в кгс/см². Напряжения на поверхности

катания кольца подшипника измерялись тензометрическим комплексом «Динамика-3» [73], регистрирующим деформации тензодатчиков, наклеенных на поверхность кольца подшипника.

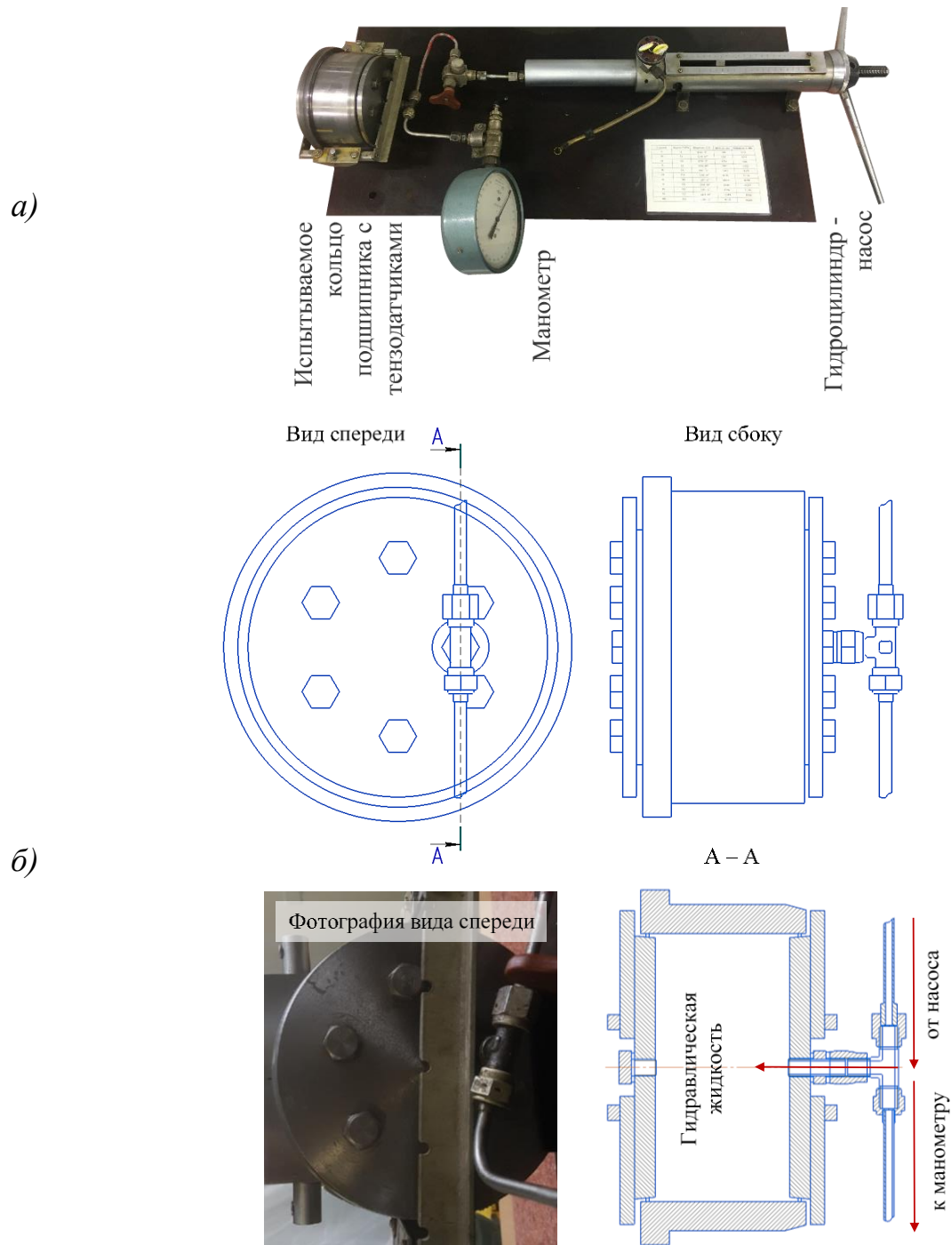


Рисунок 2.1 – Внешний вид стенда для нагружения колец подшипников (a) и чертеж внутреннего устройства испытательного кольца (б)

Тензодатчик проволоочный типа ПКС-7 [38] наклеивался на дорожку качения кольца подшипника и ориентировался по окружности для измерения деформаций,

вызванных растяжением кольца (рисунок 2.2).

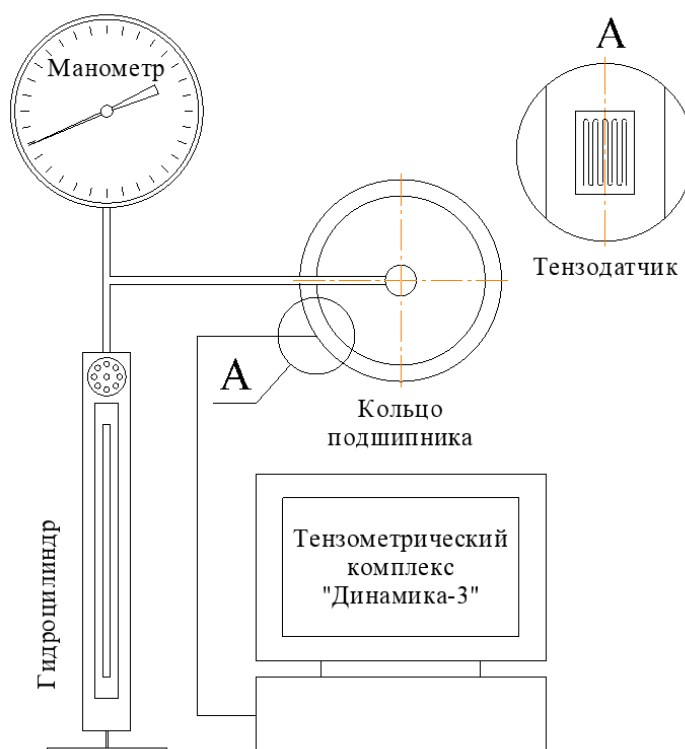


Рисунок 2.2 – Схема стенда с тензометрической системой для проведения механических испытаний колец подшипников

Комплекс измерительный микропроцессорный быстродействующий тензометрический «Динамика-3», разработан в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС) совместно с ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» и зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под № 66938-17. Комплекс обеспечивает измерение и регистрацию в цифровом виде и сохранение на электронном носителе сигналов, в том числе сигналов с одиночных тензодатчиков. Основные технические характеристики комплекса «Динамика-3» приведены в таблице 2.1, тензодатчика типа ПКС-7 – в таблице 2.2.

Для предварительной тарировки тензосистемы использовали магазин сопротивлений РЗЗ в диапазоне значений сопротивления от 119 до 121 Ом с шагом 0,1 Ом с выдержкой на каждом шаге не менее 5 с. При тарировке определялись коэффициенты пропорциональности относительных изменений сопротивления тензодатчика с единицами аналого-цифрового преобразователя тензосистемы.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики комплекса «Динамика-3» при измерении сигналов с одиночных тензодатчиков

Техническая характеристика	Значение
Диапазон номинальных сопротивлений применяемых датчиков, Ом	от 10 до 1000
Минимальный диапазон измеряемых изменений сопротивления, Ом	± 3
Максимальный диапазон измеряемых изменений сопротивления, Ом	± 12
Пределы основной допускаемой приведенной погрешности сопротивления тензорезисторного датчика, %	$\pm 0,1$
Ток питания датчика, мА	от 8 до 32
Число измерительных каналов на одной плате	8
Максимальное количество одновременно поддерживаемых плат	8
Частота дискретизации на каждый канал, кГц	8, 16, 32, 64

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики тензодатчиков типа ПКС-7

Техническая характеристика	Значение
Номинальное электрическое сопротивление, Ом	120
Диапазон измеряемых деформаций, 10^{-6}	± 2000
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений, %	± 6
Номинальная база тензорезистора, мм	7
Предельное относительное отклонение сопротивления в партии от номинального, %	1
Часовая ползучесть при нормальных условиях: – среднее значение, %, не более – предел среднего квадратического отклонения, %	0,5 0,5

Калибровка стенда проводилась в целях определения зависимости напряжений в материале кольца подшипника от давления в гидросистеме. При давлениях менее 5 МПа в работе стенда наблюдается повышенное трение в поршневой группе, что проявляется в нелинейности на графиках зависимости деформации и натяга от давления (рисунок 2.3).

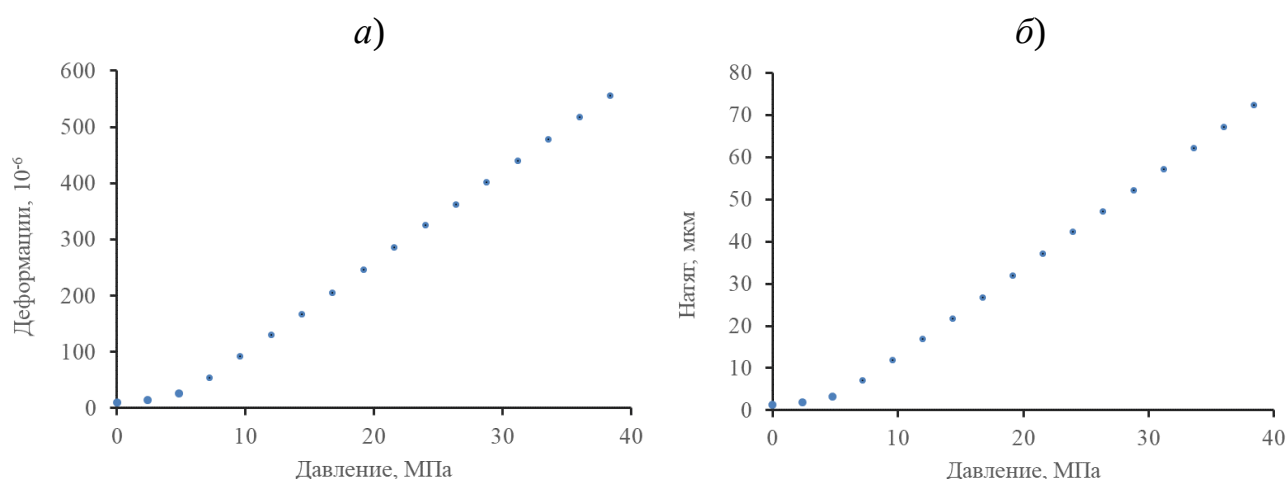


Рисунок 2.3 – Результаты калибровки стенда для нагружения колец подшипников: зависимость относительных деформаций (а) и эквивалентного натяга (б) от давления в гидравлической системе

Полученные зависимости относительных деформаций ε (рисунок 2.3, а) и эквивалентного натяга Δd (рисунок 2.3, б) от давления в гидравлической системе стенда удовлетворительно описываются линейной зависимостью для давления больше 5 МПа с коэффициентом корреляции более 0,999:

$$\varepsilon = 16,1 \cdot P - 64,0, \quad (2.2)$$

$$\Delta d = 2,10 \cdot P - 8,32, \quad (2.3)$$

где P – давление в гидравлической системе, Па; ε – относительные деформации кольца подшипника, 10^{-6} ; Δd – натяг, мм.

2.2 Контроль продольными волнами

Применяемые для контроля упругих деформаций и напряжений методы акустоупругости по сравнению с другими физическими методами неразрушающего контроля позволяют оценить напряжения не только на поверхности объекта, но и внутри материала. Акустические методы контроля напряжений основаны на эффектах первого порядка малости: зависимости упругих модулей материала и, следовательно, скоростей распространения упругих волн от относительных деформаций материала объекта контроля и упругих напряжений.

В настоящее время существует развитый математический аппарат [3, 16 – 18]

на основе тензорного исчисления для количественного описания явления акустоупругости. В случае одноосного напряженно-деформированного состояния с $\sigma_{3,3} \neq 0$ акустические характеристики изотропного материала описываются тензором акустоупругих коэффициентов $\beta_{i,j}$, где i, j – индексы координатных осей, которые могут принимать значения 1, 2 и 3. Для удобства дальнейшего анализа установим соответствие индексов и координатных осей: ось x имеет индекс 1, y – 2, z – 3.

Тензор $\beta_{i,j}$ имеет девять компонент, из которых независимыми являются только пять: $\beta_{3,3}$, $\beta_{1,1}$, $\beta_{1,3}$, $\beta_{3,1}$, $\beta_{1,2}$. Компоненты тензора измеряются в ТПа^{-1} и имеют смысл относительного изменения скорости волны, распространяющейся вдоль или перпендикулярно направлению действия механических напряжений $\sigma = 1 \text{ ТПа}$ с определенной поляризацией.

Относительное изменение скорости распространения, вызванное упругими механическими напряжениями, описывается тензором $\delta v_{i,j}$. Первый индекс тензора i определяет направление распространения волны, второй j – направление поляризации волны. Очевидно, что $\delta v_{1,1}$, $\delta v_{2,2}$, $\delta v_{3,3}$ – это относительные изменения продольных волн, распространяющихся вдоль осей x , y , z . Компоненты тензора $\delta v_{1,2}$, $\delta v_{1,3}$ – это относительные изменения скоростей поперечных волн, распространяющихся вдоль оси x и поляризованных вдоль оси y и z соответственно.

В случае одноосного напряженно-деформированного состояния изотропного материала с единственной ненулевой компонентой тензора механических напряжений $\sigma_{3,3}$ относительные изменения скоростей распространения продольных волн описываются выражением:

$$\delta v_{i,j} = \beta_{i,j} \cdot \sigma_{3,3}. \quad (2.4)$$

В справочной литературе отсутствуют данные об акустоупругих коэффициентах сталей ШХ4 и ШХ15, используемых для изготовления колец роликовых цилиндрических подшипников. Справочные значения коэффициентов $\beta_{i,j}$ для наиболее близких сталей с высоким содержанием углерода и хрома приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Акустоупругие коэффициенты сталей [1]

Марка стали/источник	Компонент тензора акустоупругих коэффициентов, ГПа ⁻¹				
	$\beta_{3,3}$	$\beta_{1,1}, \beta_{2,2}$	$\beta_{1,3}$	$\beta_{3,1}$	$\beta_{1,2}$
Э76Ф/2	– 12,05	1,14	– 7,13	– 1,06	0,13
35ХГСА	– 12,66	1,07	– 7,56	– 1,53	1,01
09Г2С	– 22,11	– 0,82	– 10,16	– 3,71	– 0,30

В случае сложного напряженного состояния, отличного от одноосного растяжения-сжатия, тензор $\delta v_{i,j}$ относительного изменения скоростей распространения связан с тензором напряжений $\sigma_{i,j}$ в произвольном базисе координатных осей выражением:

$$\delta v_{i,j} = \gamma_{i,j,m,n} \cdot \sigma_{m,n}, \quad (2.5)$$

где $\gamma_{i,j,m,n}$ – тензор акустоупругости для произвольного тензора напряжений.

Тензор $\gamma_{i,j,m,n}$ связан с тензором $\beta_{i,j}$ акустоупругих коэффициентов следующими простейшими соотношениями:

$$\gamma_{1,1,1,1} = \gamma_{2,2,2,2} = \gamma_{3,3,3,3} = \beta_{3,3}, \quad (2.6)$$

$$\gamma_{1,1,2,2} = \gamma_{2,2,1,1} = \gamma_{1,1,3,3} = \gamma_{2,2,3,3} = \gamma_{3,3,1,1} = \gamma_{3,3,2,2} = \beta_{2,2}, \quad (2.7)$$

$$\gamma_{1,2,3,3} = \gamma_{2,1,3,3} = \gamma_{2,3,1,1} = \gamma_{3,2,1,1} = \gamma_{1,3,2,2} = \gamma_{3,1,2,2} = \beta_{1,2}, \quad (2.8)$$

$$\gamma_{1,3,3,3} = \gamma_{2,3,3,3} = \gamma_{2,1,1,1} = \gamma_{3,1,1,1} = \gamma_{1,2,2,2} = \gamma_{3,2,2,2} = \beta_{1,3}, \quad (2.9)$$

$$\gamma_{3,1,3,3} = \gamma_{3,2,3,3} = \gamma_{1,2,1,1} = \gamma_{1,3,1,1} = \gamma_{2,1,2,2} = \gamma_{2,3,2,2} = \beta_{3,1}, \quad (2.10)$$

$$\gamma_{i,j,k,l} = 0, \text{ если } k \neq l. \quad (2.11)$$

Использование выражения (2.5) для решения практических задач неудобно и затрудняет физическую интерпретацию результатов в случае наклонного распространения волн относительно главных осей напряжений, когда оптимальные базисы скоростей и механических напряжений не совпадают. Для удобства (2.5) допустимо преобразовать к выражению, в котором механические напряжения преобразуются к базису скоростей. Это преобразование выполняется в соответствии с общими правилами преобразования тензоров:

$$\delta v_{i,j} = \gamma_{i,j,m',n'} \cdot A_{m',m} \cdot A_{n',n} \cdot \sigma_{m,n}, \quad (2.12)$$

где $A_{m',m}$ – матрица перехода от базиса x, y, z к базису, привязанному к направлению распространения волны x', y', z' .

Экспериментальные исследования акустоупругих характеристик материала колец подшипников в готовом изделии проводились с помощью установки, представленной на рисунке 2.4. Для возбуждения акустических импульсов в излучающем пьезоэлектрическом преобразователе использовались дефектоскопы УД2-102 и УСД-50, зарегистрированные в государственном реестре средств измерений под № 18007-06 и № 34900-07, соответственно. Дефектоскопы как источники зондирующего импульса обеспечивают его амплитуду от 100 до 160 В для частот в диапазоне от 0,5 до 10 МГц.

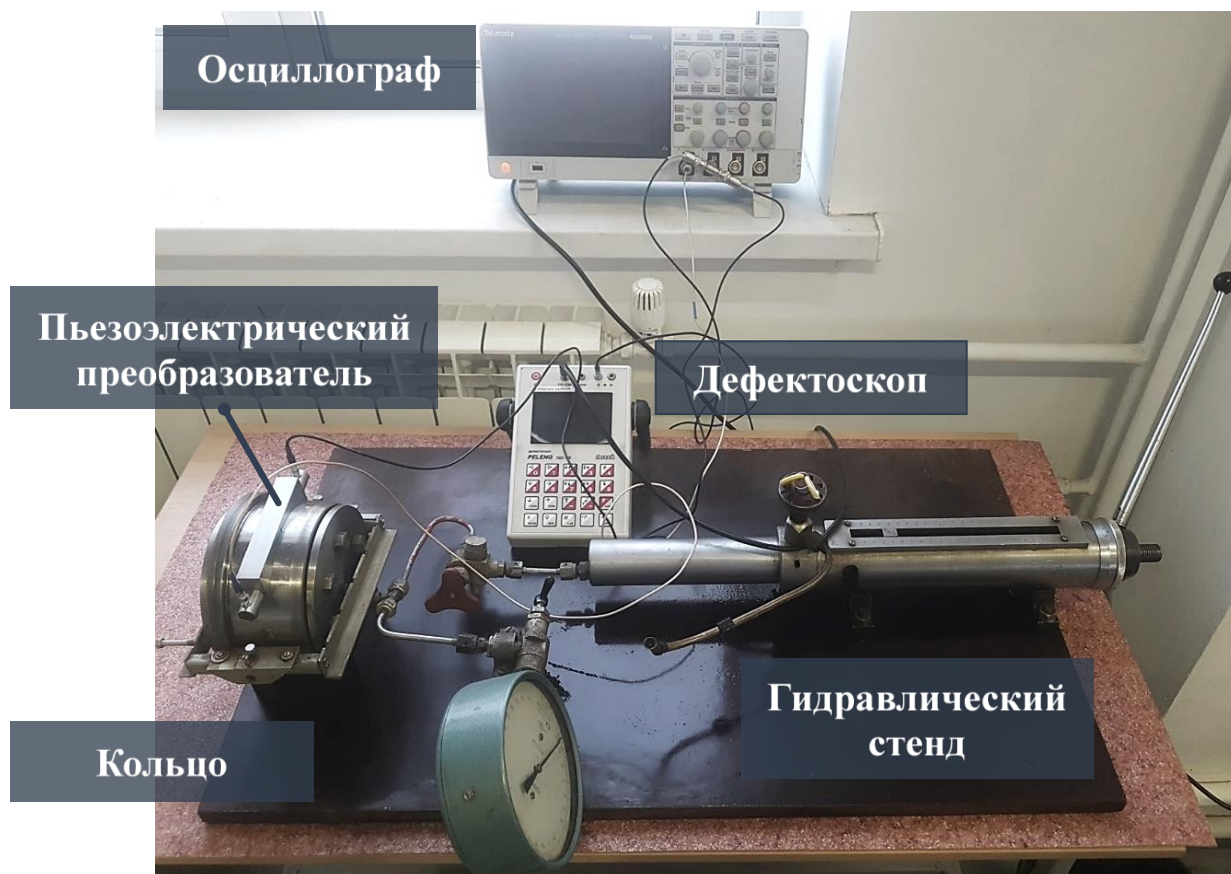


Рисунок 2.4 – Внешний вид установки для испытания колец подшипников с использованием метода акустоупругости

Электрические сигналы с пьезоэлектрических преобразователей регистрировались цифровыми запоминающими осциллографами TBS2102 и TBS2104 (номер в государственном реестре средств измерений № 66636-17).

Основные характеристики осциллографов приведены в таблице 3.4. Приборы обеспечивают регистрацию сигналов с приемных пьезоэлектрических преобразователей с частотой дискретизации до 1 нс и сохранение оцифрованных сигналов при этой частоте длительностью до 20 мс, что соответствует 118 м пути прохождения продольной волны в объекте контроля.

Таблица 2.4 – Характеристики цифровых запоминающих осциллографов Tektronix (Китай)

Характеристика	Значение	
	TBS2102	TBS2104
Количество измерительных каналов	2	4
Входное сопротивление, МОм	1,0	
Максимальная частота дискретизации, Гц	10^9	
Максимальное количество записи отчетов в память	$20 \cdot 10^6$	
Коэффициент отклонения, мВ/дел	2 – 5000	
Пределы допускаемой относительной погрешности коэффициента отклонения: до 5 мВ/дел свыше 10 мВ/дел	$\pm 4 \%$ $\pm 3 \%$	
Коэффициент развертки	2 нс/дел – 100 с/дел	
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения временных интервалов	$\pm 25 \cdot 10^{-6} \cdot T$	

Экспериментальные исследования коэффициентов упругости проводились при прозвучивании объектов исследования продольными волнами по отдельной схеме (рисунок 2.5 а) и поверхностными волнами Рэлея по совмещенной схеме (рисунок 2.6 б). При исследованиях по отдельной схеме выход дефектоскопа соединялся с излучающим пьезоэлектрическим преобразователем и параллельно с первым каналом осциллографа, принимающий преобразователь – со вторым каналом осциллографа. При исследованиях по совмещенной схеме выход дефектоскопа соединялся с пьезоэлектрическим преобразователем и одновременно с первым каналом осциллографа. Развертка синхронизировалась по превышению зондирующим импульсом порога блока синхронизации таким образом, чтобы все

принимаемые сигналы, кроме зондирующего, не превышали установленного порога синхронизации. Сигналы сохранялись на цифровой носитель и обрабатывались на ЭВМ.

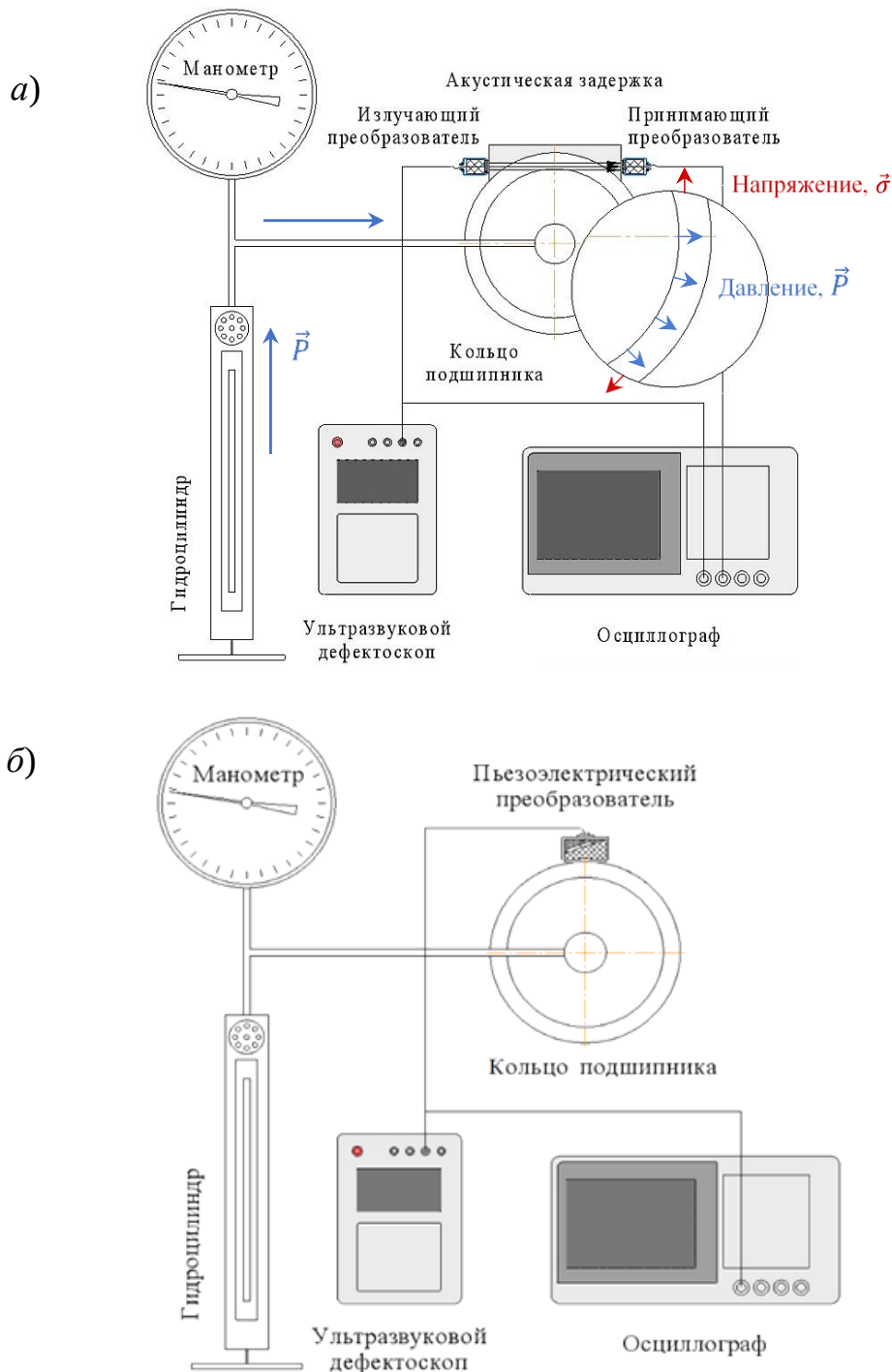


Рисунок 2.5 – Схемы установки для испытания колец подшипников продольными (а) и поверхностными (б) волнами с использованием метода акустоупругости

Для исследования влияния механических напряжений на скорость распространения продольной волны изготовлена акустическая задержка из стали

20 (рисунок 2.6). Поверхность акустической задержки, прилегающая к кольцу, имеет форму, идентичную поверхности катания кольца. Излучающий прямой преобразователь П111-2,5-К12 работает на частоте 2,5 МГц, возбуждает продольные волны, распространяющиеся по хорде относительно кольца подшипника. Принимающий преобразователь устанавливался таким образом, чтобы обеспечить максимальный уровень продольной волны, прошедшей вдоль акустической оси через кольцо. С целью уменьшения влияния на полезный сигнал сигналов, переотражённых в акустической задержке, часть цилиндрической поверхности акустической задержки сошлифована до диаметра 160 мм и сделаны пропилы толщиной 1 мм и глубиной 13 мм.

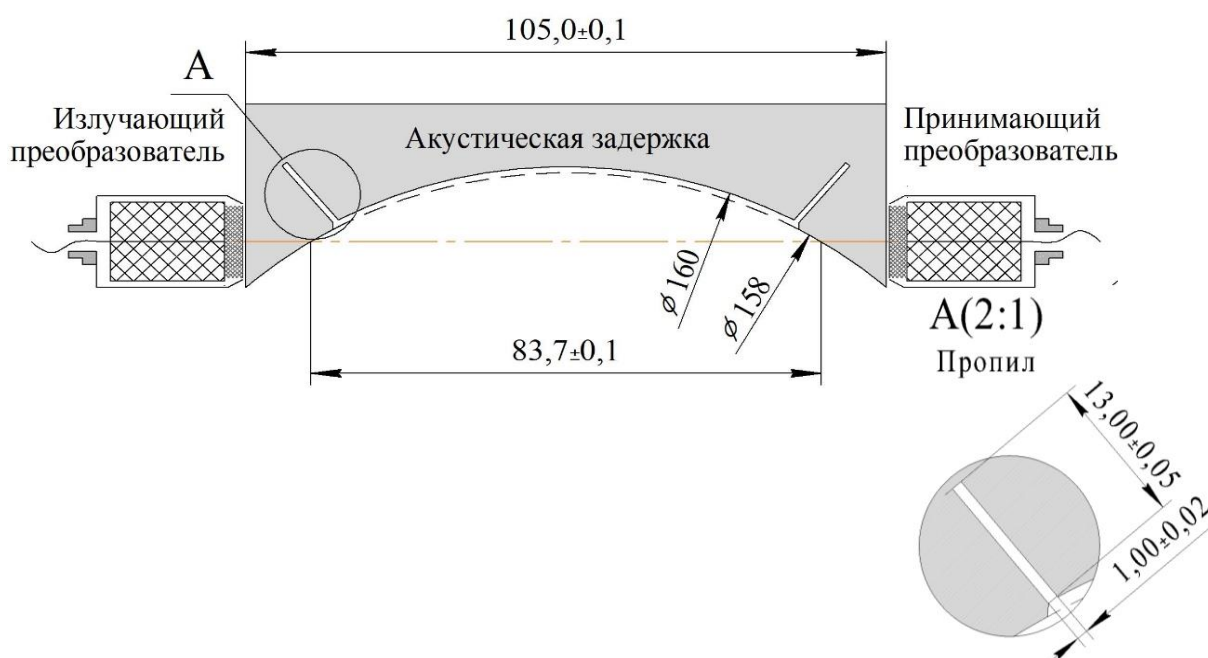


Рисунок 2.6 – Акустическая задержка с излучающим и принимающим прямыми преобразователями для хордового прозвучивания кольца подшипника продольной волной

Характерный вид электрического сигнала, регистрируемого вторым каналом осциллографа с принимающего пьезоэлектрического преобразователя, приведен на рисунке 2.7. Сигнал связан с прошедшей продольной волной при хордовом прозвучивании кольца подшипника. В начале временной развертки наблюдаются помехи, вызванные зондирующим импульсом, который поступает на первый канал осциллографа, поэтому зондирующий импульс на развертке не представлен.

Сигнал продольной прошедшей по хорде ультразвуковой волны расположен во временной области от 19 до 21 мкс. При снятии преобразователя с кольца сигнал исчезает. Время распространения соответствует скорости продольной волны 5,94 мм/мкс. На временах более 21 мкс от зондирующего импульса наблюдаются сигналы, связанные с переотражениями в акустической задержке.

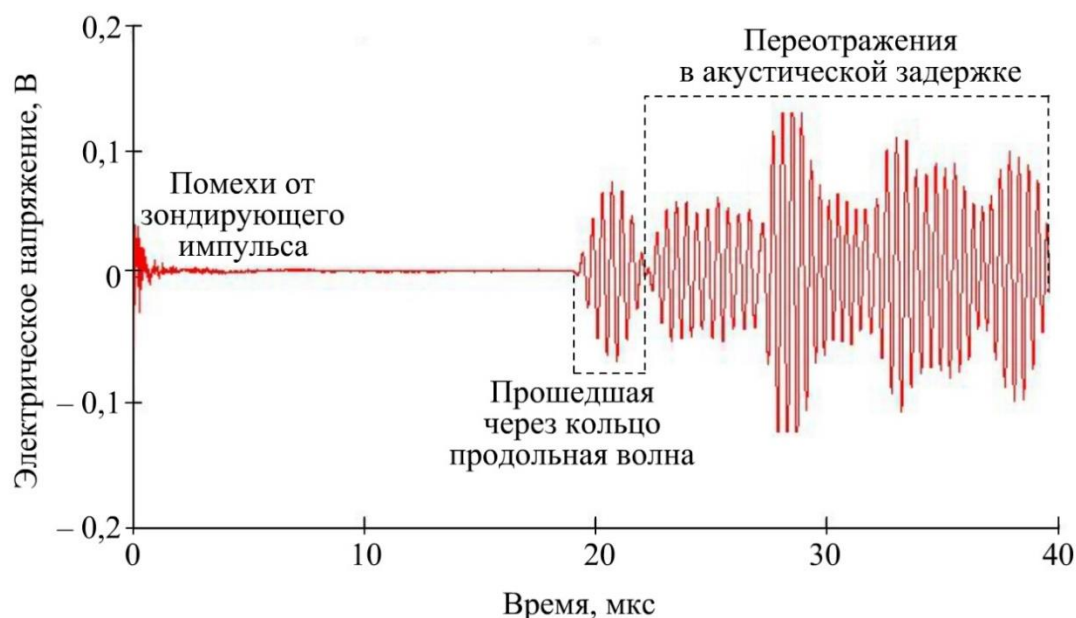


Рисунок 2.7 – Сигнал на принимающем преобразователе в схеме с хордовым раздельным преобразователем

Изменение скорости распространения ультразвуковой волны измеряли по задержке сигнала относительно опорного, зарегистрированного на полностью разгруженном кольце подшипника (рисунок 2.8). Наибольшее значение задержки времени распространения волны составило 50 нс, что существенно меньше периода колебаний, который на частоте 2,5 МГц составляет 400 нс. Прямой метод измерения: по сдвигу сигнала на заданном уровне не обеспечивает необходимую точность измерений малых по сравнению с периодом колебания временных интервалов. Основная составляющая погрешности связана с вариациями амплитуды сигнала при растяжении кольца подшипника. С целью повышения точности измерений времени задержки разработан и программно реализован корреляционный метод, основанный на определении максимума дискретной корреляционной функции Af_k двух сигналов $u1_l$ и $u2_l$ на интервале от l_1 до l_2 :

$$Af_k = \frac{\langle (u1_l - \langle u1_l \rangle) \cdot (u2_{l+k} - \langle u2_l \rangle) \rangle}{\sqrt{(\langle u1_l^2 \rangle - \langle u1_l \rangle^2) \cdot (\langle u2_{l+k}^2 \rangle - \langle u2_{l+k} \rangle^2)}}, \quad (2.13)$$

где Af_k – значения автокорреляционной функции в k -ый момент времени;

$u1_l$ и $u2_l$ – значения электрического напряжения опорного и регистрируемого сигналов в момент времени с индексом l , мВ;

$\langle \rangle$ – оператор усреднения на интервале от l_1 до l_2 .

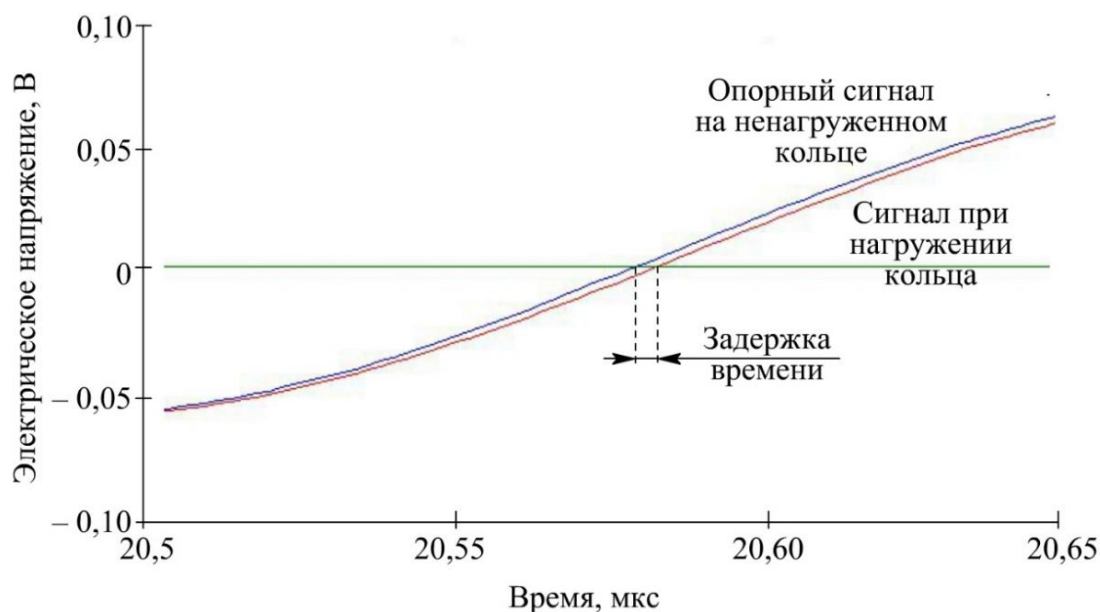


Рисунок 2.8 – Сигналы на принимающем преобразователе, зарегистрированные на ненагруженном (опорный) и нагруженном кольце подшипника

График корреляционной функции сигнала, зарегистрированного при нагружении кольца подшипника до уровня относительных деформаций $100 \cdot 10^{-6}$, с опорным сигналом, зарегистрированным на свободном кольце подшипника, приведен на рисунке 2.9. Для повышения наглядности по вертикальной оси отложена автокорреляционная функция в 50 степени. Максимум корреляционной функции соответствует задержке сигналов на 2 нс. Таким образом, использование алгоритма, основанного на анализе коэффициента корреляции сигналов относительно опорного позволяет оценивать временной сдвиг между ними с неопределенностью не более 2 нс. Полученное значение сдвига является интегральным параметром сигналов, который рассчитывается усреднением на интервале 3 мкс, что соответствует от 5 до 6 периодам колебаний.

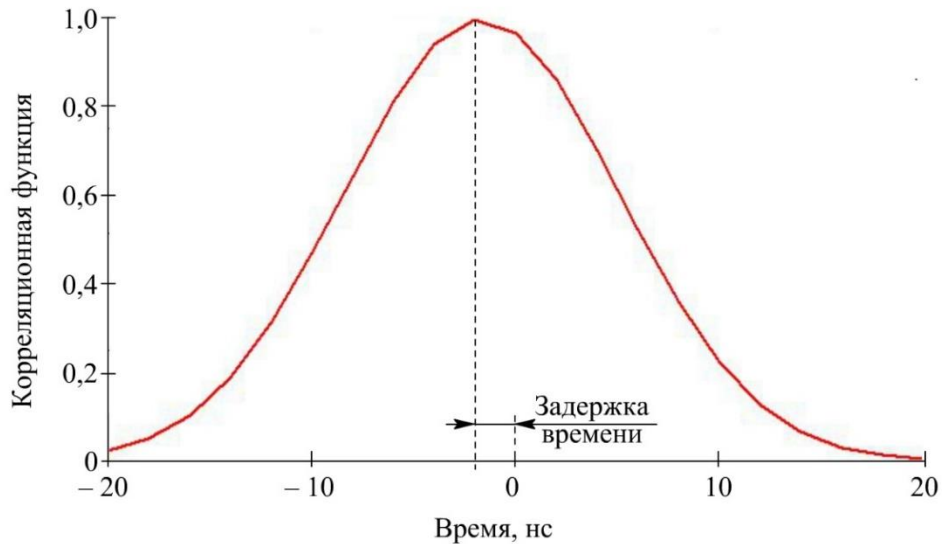


Рисунок 2.9 – Корреляционная функция двух сигналов, зарегистрированных с задержкой времени 2 нс

Задержка времени регистрируемого акустического сигнала при распространении продольной волны в объекте контроля относительно опорного сигнала линейно зависит от механических напряжений в кольце подшипника с коэффициентом корреляции больше 0,98 (рисунок 2.10). Экспериментальные данные получены при нагружении и разгрузке кольца. Методом наименьших квадратов установлены параметры линейной функции, аппроксимирующей экспериментальную зависимость:

$$\delta t = \alpha \cdot \sigma + c, \quad (2.14)$$

где δt – относительное изменение времени распространения, 10^{-6} ;

σ – механическое напряжение, МПа;

$\alpha = 9,77 \text{ ТПа}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности;

$c = 45,74 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент смещения.

Коэффициент пропорциональности α является коэффициентом акустоупругости по времени распространения волны, который при постоянной базе прозвучивания очевидно равен с обратным знаком коэффициенту акустоупругости по скорости распространения волны:

$$\beta_{3,3} = -\alpha = -9,77 \text{ ТПа}^{-1}. \quad (2.15)$$

Среднее квадратическое отклонение коэффициента $\beta_{3,3}$ составляет

$\sigma = 1,26 \text{ ТПа}^{-1}$ или 13 % результата измерения.

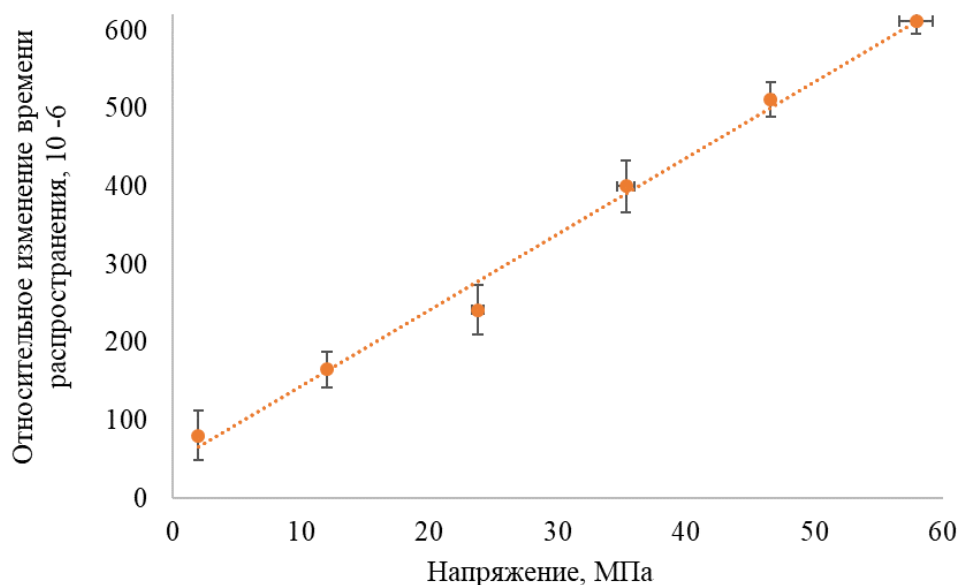


Рисунок 2.10 – Зависимость относительного изменения времени распространения продольной волны при хордовом прозвучивании кольца подшипника от механических напряжений

Выражение (2.15) справедливо только в рамках модели, в которой допустимо пренебречь изменениями угла между направлением распространения продольной волны и главными механическими напряжениями, влиянием изменения размеров кольца подшипника при нагружении, изменением толщины контактного слоя жидкости.

Расчет изменения времени распространения продольной волны, учитывающий неколлинеарность направлений распространения и действия механических напряжений, проводился с использованием тензорной модели (2.12). В каждой точке луча волны угол φ между базисами главных напряжений xu и волны $z'u'$ (рисунок 2.11) определяется выражением:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{z'}{\sqrt{R^2 - (l)^2}}. \quad (2.16)$$

$$\cos(\varphi) = \sqrt{\frac{R^2 - (l)^2}{R^2 - (l)^2 + z'^2}}. \quad (2.17)$$

$$\sin(\varphi) = \frac{z'}{\sqrt{R^2 - (l)^2 + z'^2}}. \quad (2.18)$$

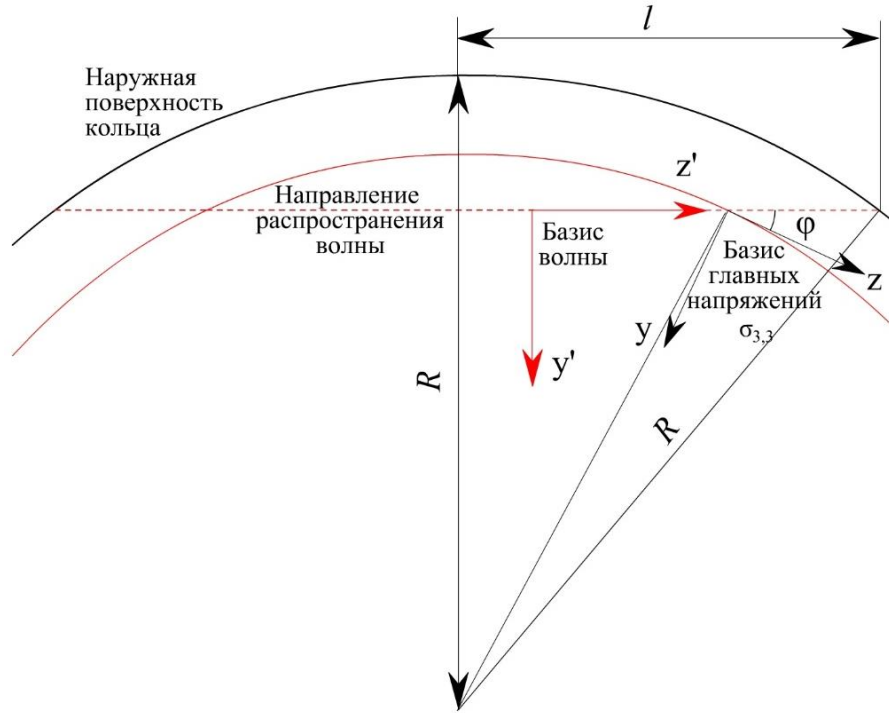


Рисунок 2.11 – Схема ориентации базиса волны $z'y'$ и базиса главных напряжений xy при распространения продольной волны в кольце подшипника

Тензор перехода от базиса напряжений к базису скоростей выражается через угол φ и в матричной форме имеет виде:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (2.19)$$

Для одноосного напряженно-деформированного состояния только одна компонента тензора напряжений отлична от нуля $\sigma_{3,3} = \sigma_0$, в соответствии с рисунком 2.11:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{pmatrix}. \quad (2.20)$$

Подстановка (2.19) и (2.20) в (2.5) – (2.12) дает выражение для относительного изменения скорости волны в виде функции угла φ для продольных и поперечных с поляризацией по оси y' волн:

$$\delta v_{3,3} = \sigma_0 \cdot (\beta_{2,2} \cdot (\sin(\varphi))^2 + \beta_{3,3} \cdot (\cos(\varphi))^2), \quad (2.21)$$

$$\delta v_{3,2} = \sigma_0 \cdot (\beta_{1,3} \cdot (\sin(\varphi))^2 + \beta_{3,1} \cdot (\cos(\varphi))^2). \quad (2.22)$$

Выражения (2.21) и (2.22) после подстановки (2.17) и (2.18) позволяют установить зависимость скорости распространения волны от координаты z' :

$$\delta v_{3,3} = \sigma_0 \cdot \left(\beta_{2,2} \cdot \frac{z'^2}{R^2 - (l)^2 + z'^2} + \beta_{3,3} \cdot \frac{R^2 - (l)^2}{R^2 - (l)^2 + z'^2} \right), \quad (2.23)$$

$$\delta v_{3,2} = \sigma_0 \cdot \left(\beta_{1,3} \cdot \frac{z'^2}{R^2 - (l)^2 + z'^2} + \beta_{3,1} \cdot \frac{R^2 - (l)^2}{R^2 - (l)^2 + z'^2} \right). \quad (2.24)$$

После преобразований уравнения (2.23) и (2.24) принимают вид:

$$\delta v_{3,3} = \sigma_0 \cdot \frac{\beta_{2,2} \cdot z'^2 + \beta_{3,3} \cdot (R^2 - (l)^2)}{R^2 - (l)^2 + z'^2}, \quad (2.25)$$

$$\delta v_{3,2} = \sigma_0 \cdot \frac{\beta_{1,3} \cdot z'^2 + \beta_{3,1} \cdot (R^2 - (l)^2)}{R^2 - (l)^2 + z'^2}. \quad (2.26)$$

В общем виде выражение для скорости продольной или поперечной ультразвуковой волны представимо в виде функции z' :

$$v(z') = C \cdot (1 + \delta v(z')), \quad (2.27)$$

Дифференцированное уравнение движения волны по хорде имеет вид:

$$\frac{dz'}{dt} = v(z'). \quad (2.28)$$

При использовании метода разделения переменных выражение (2.28) интегрируется в виде:

$$\int_0^l \frac{dz'}{C \cdot (1 + \delta v(z'))} = \int_0^{t+\Delta t} dt. \quad (2.29)$$

Учитывая малость $\delta v(z') \ll 1$, приведем выражение (2.29) к определенным интегралам вида:

$$\int_0^l dz' - \int_0^l \delta v(z') dz' = C \cdot \int_0^{t+\Delta t} dt. \quad (2.30)$$

После интегрирования (2.30) выражение принимает вид:

$$l - \int_0^l \delta v(z') dz' = C \cdot t + C \cdot \Delta t. \quad (2.31)$$

$$C \cdot \Delta t = - \int_0^l \delta v(z') dz'. \quad (2.32)$$

$$\delta t = - \frac{1}{l} \cdot \int_0^l \delta v(z') dz'. \quad (2.33)$$

Для продольной волны подстановка (2.23) в (2.33) дает:

$$\delta t_l = -\sigma_0 \cdot \frac{1}{l} \cdot \int_0^l \frac{\beta_{2,2} \cdot z'^2 + \beta_{3,3} \cdot (R^2 - (l)^2)}{R^2 - (l)^2 + z'^2} \cdot dz'. \quad (2.34)$$

После преобразований (2.34):

$$\delta t_l = -\sigma_0 \cdot \frac{1}{l} \cdot \left(\beta_{2,2} \cdot \int_0^l \frac{z'^2}{R^2 - l^2 + z'^2} \cdot dz' + \beta_{3,3} \cdot \int_0^l \frac{R^2 - (l')^2}{R^2 - l^2 + z'^2} \cdot dz' \right). \quad (2.35)$$

Второй интеграл в выражении (2.35) является табличным, первый интеграл может быть представлен в виде суммы табличных интегралов:

$$\int_0^l \frac{z'^2}{R^2 - l^2 + z'^2} \cdot dz' = l - \int_0^l \frac{(R^2 - l^2)}{R^2 - l^2 + z'^2} \cdot dz'. \quad (2.36)$$

После интегрирования выражение (2.36) для относительного времени задержки продольной акустической волны, связанной с механическими напряжениями в кольце подшипника, принимает вид:

$$\delta t_l = -\sigma_0 \cdot \left(\beta_{2,2} + (\beta_{3,3} - \beta_{2,2}) \cdot \sqrt{(R/l)^2 - 1} \cdot \arctg \left(\frac{1}{\sqrt{(R/l)^2 - 1}} \right) \right). \quad (2.37)$$

По аналогии с (2.37) относительное изменение времени задержки поперечной волны акустической волны:

$$\delta t_t = -\sigma_0 \cdot \left(\beta_{1,3} + (\beta_{3,1} - \beta_{1,3}) \cdot \sqrt{(R/l)^2 - 1} \cdot \arctg \left(\frac{1}{\sqrt{(R/l)^2 - 1}} \right) \right). \quad (2.38)$$

Согласно схеме прозвучивания на рис. 2.11, аргумент выражений (2.37) и (2.38) составляет:

$$\sqrt{(R/l)^2 - 1} = 1,6. \quad (2.39)$$

В рассматриваемой модели хордового прозвучивания кольца подшипника относительные времена задержки акустических волн, вызванные упругими растягивающими напряжениями, связанными с натягом кольца на шейку оси:

$$\delta t_l = -\sigma_0 \cdot (0,89 \cdot \beta_{3,3} + 0,11 \cdot \beta_{2,2}). \quad (2.40)$$

$$\delta t_t = -\sigma_0 \cdot (0,89 \cdot \beta_{3,3} + 0,11 \cdot \beta_{2,2}). \quad (2.41)$$

Учитывая, что отношение акустоупругих коэффициентов для большинства сталей $\frac{\beta_{2,2}}{\beta_{3,3}} \approx 0,1$ и, следовательно, второе слагаемое в выражении (2.40) не превышает 1,2 % первого слагаемого. Используя результат аппроксимации (2.15) для коэффициента пропорциональности относительного времени задержки и упругих механических напряжений и формулу (2.40) для времени задержки при хордовом прозвучивании, получим значение коэффициента акустоупругости материала колец подшипников в изделии:

$$\beta_{3,3} = -\frac{\alpha}{0,89} = -11,0 \text{ ТПа}^{-1} (\pm 8 \%). \quad (2.42)$$

Один из наиболее значительных источников погрешностей связан с изменением размеров кольца подшипника, вызванным воздействием механических сил. Абсолютные значения погрешностей очевидно пропорциональны модулю упругости стали ШХ15, который по справочным данным составляет $E = 2,11 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ [17]. При растяжении кольца его размеры увеличиваются и, следовательно, составляющая коэффициента α , вызванная только акустоупругостью, уменьшается на величину $\alpha_d = E^{-1} = 4,7 \text{ ТПа}^{-1}$. Без специальных мер изменение размеров кольца способно приводить к смещению системы преобразователей относительно кольца и изменению толщины слоя контактной жидкости. В условиях, когда диаметр акустической задержки превышает диаметр кольца в ненагруженном состоянии, при увеличении диаметра кольца толщина контактного слоя уменьшается на величину:

$$dl = -2 \cdot l \cdot \frac{\sigma}{E}, \quad (2.43)$$

где $2 \cdot l$ – длина хорды (см. рисунок 2.11), м.

Изменение времени распространения акустической волны определяется выражением:

$$dt = \frac{dl}{C_f}, \quad (2.44)$$

где C_f – скорость распространения ультразвуковой волны в жидкости, м/с.

Относительное изменение времени распространения волны, связанное с изменением толщины контактного слоя, определяется подстановкой выражения (2.16) в (2.17) и делением на время распространения продольной волны со скоростью C в материале кольца:

$$\delta t = -\frac{\sigma}{E} \cdot \frac{C}{C_f}. \quad (2.45)$$

Коэффициент пропорциональности между относительным изменением времени распространения и механическими напряжениями в отсутствии специальных мер составят:

$$\alpha_c = -E^{-1} \cdot \frac{c}{c_f}. \quad (2.46)$$

Коэффициент пропорциональности α_c определяется отношением скоростей распространения в объекте контроля и в материале кольца подшипника. В самом негативном случае, в котором влияние контактного слоя не скомпенсировано, изменение его толщины оказывает наибольшее влияние на коэффициент пропорциональности α , противоположное по знаку влиянию изменения размеров и явлению акустоупругости.

На следующем этапе проведены испытания образцов колец подшипников с известным натягом (рисунок 2.12). На каждом из пяти образцов натяга 40, 60, 80, 90 и 120 мкм выполнены измерения в четырех точках, расположенных через 90°. Средние квадратические отклонения относительного измерения времени распространения волны в каждой точке составили от $200 \cdot 10^{-6}$ до $500 \cdot 10^{-6}$. Такие высокие, более 40 % среднего значения, случайные разбросы результатов наблюдений связаны со слабой повторяемостью параметров акустического контакта при повторных установках преобразователя на объект контроля. При изменении слоя контактной жидкости на 1 мкм абсолютное время распространения продольной волны изменяется на 0,7 нс, а относительное – на $40 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, соответствующие вариации толщины контактного слоя жидкости находятся в диапазоне от 5 до 10 мкм и отражают точность изготовления акустической задержки и кольца подшипника.

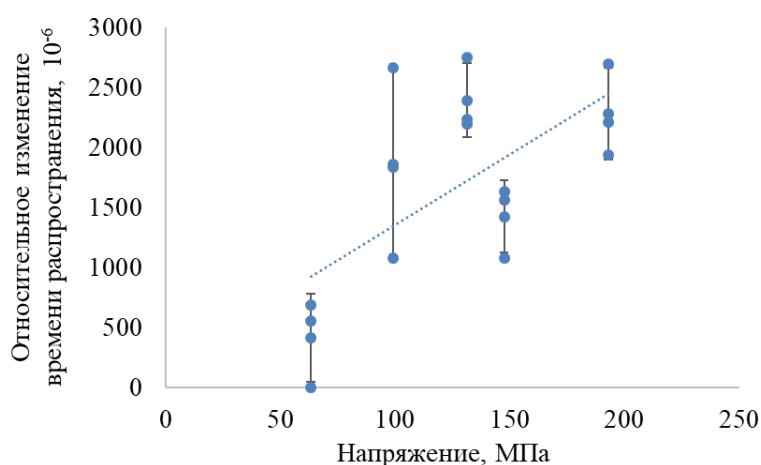


Рисунок 2.12 – Зависимость относительного изменения времени распространения продольной волны при хордовом прозвучивании стандартных образцов от механических напряжений

2.3 Контроль поверхностными волнами

Для контроля поверхностными волнами разработано и изготовлено методом 3D-печати устройство позиционирования (рисунок 2.13), стабилизирующее акустический контакт преобразователя поверхностных волн с поверхностью исследуемого кольца. Характерный вид электрического сигнала, регистрируемого пьезоэлектрическим преобразователем, приведен на рисунке 2.14. Между сигналами поверхностной ультразвуковой волны, многократно прошедшей по кольцу подшипника, наблюдаются помехи, вызванные импульсом предыдущей посылки зондирующего сигнала («фантомные» сигналы). Импульс однократно прошедшей волны расположен на интервале времени от 167 до 170 мкс. Время распространения поверхностной волны соответствует скорости, равной 2,95 мм/мкс.

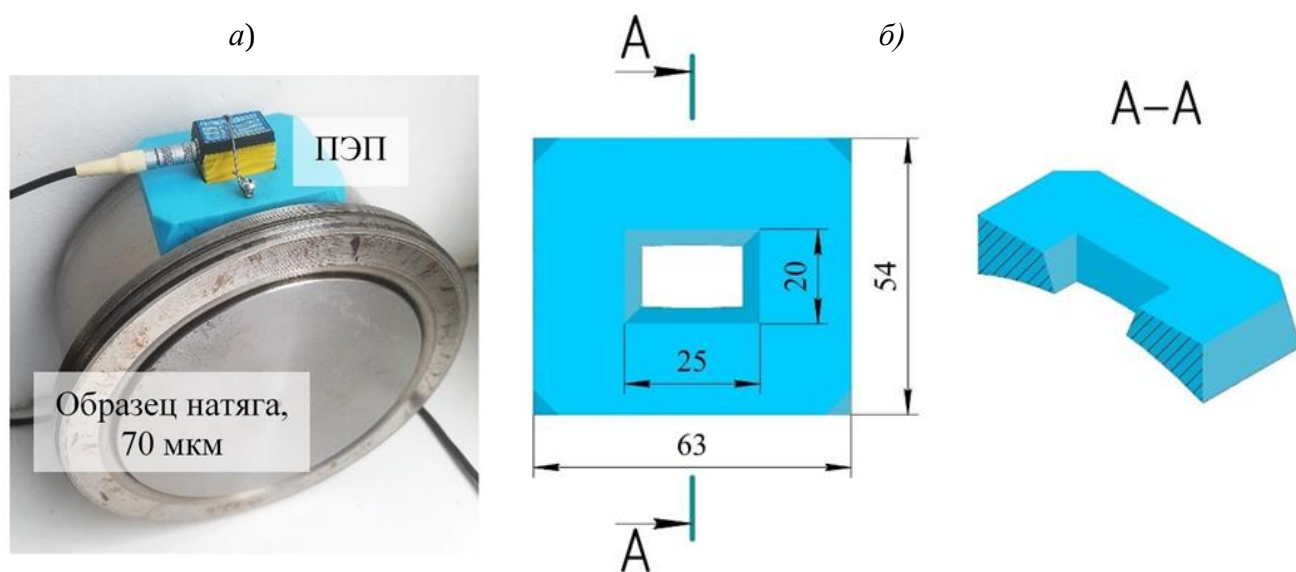


Рисунок 2.13 – Фотография преобразователя (а) поверхностных волн и чертеж устройства позиционирования (б), установленного на образец.

Скорость распространения ультразвуковой поверхностной волны оценивалась как для продольной волны в разделе 2.2 по задержке сигнала относительно опорного, зарегистрированного на полностью разгруженном кольце подшипника. Наибольшая задержка времени распространения поверхностной волны составила 60 нс, что существенно меньше периода колебаний. Для повышения точности измерений времени задержки использовался алгоритм,

основанный на определении максимума автокорреляционной функции (2.13).

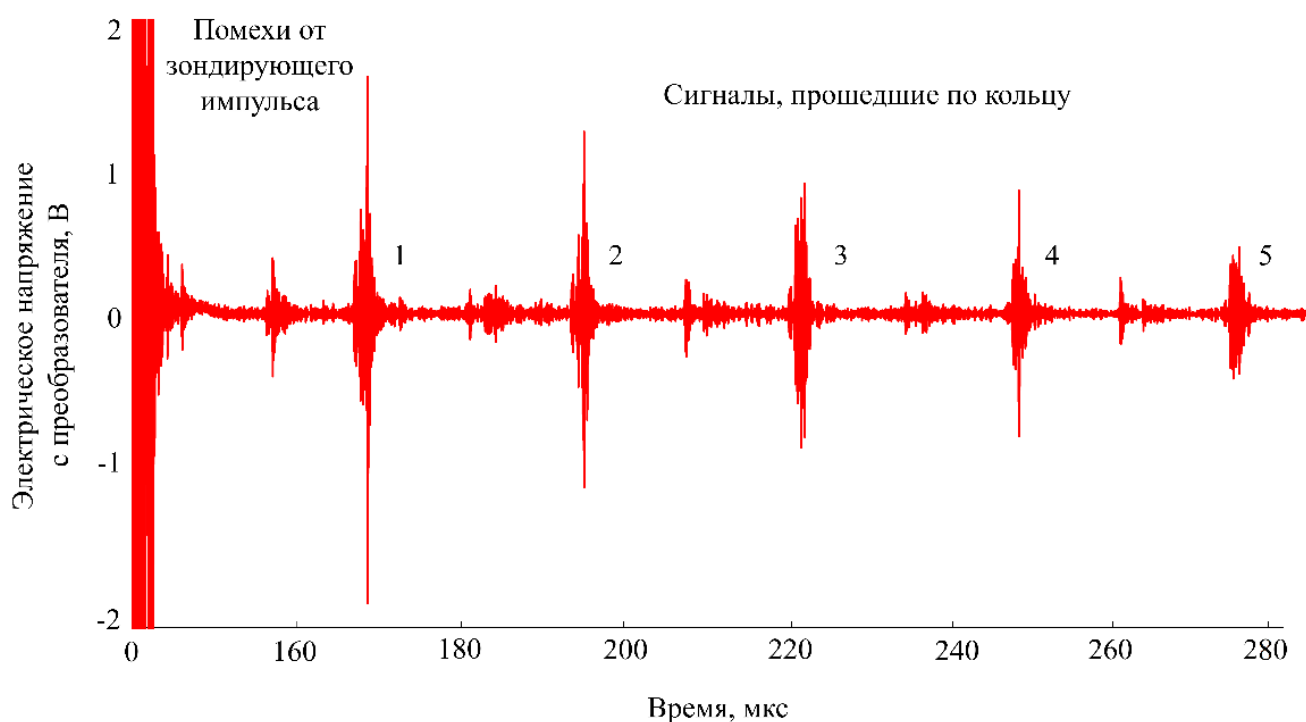


Рисунок 2.14 – Зависимость электрического напряжения на выходе преобразователя от времени распространения поверхностной волны в кольце подшипника.

Временную задержку сигнала относительно опорного сигнала определяли по индексу сдвига k , при котором реализуется максимальное значение дискретной корреляционной функции:

$$\Delta t = \Delta_{ADC} \cdot k, \quad (2.47)$$

где Δ_{ADC} – временной шаг квантования аналого-цифрового преобразователя, с.

В экспериментах сигнал прошедшей волны состоял из 12 колебаний общей длительностью около 5 мкс. В зависимости от положения интервала, на котором вычислялась корреляционная функция, на временной оси и его длительности изменялось как абсолютное значение максимума корреляционной функции, так и соответствующий индекс сдвига k . На этапе отработки способа варьировалось время начала интервала t_1 и длительность интервала $\Delta t = t_2 - t_1$. Наибольшее значение корреляционной функции регистрируется на интервале времени, совпадающем с передним фронтом импульса, с временем начала $t_1 = 0,5$ мкс и длительностью $\Delta t = 1,2$ мкс (рисунок 2.15). Однако на данном интервале

наблюдается максимальный градиент времени задержки сигнала относительно опорного по временным параметрам интервала (4 – 12) нс/мкс. Градиент напрямую определяет неопределенность измерения времени задержки, например, пропуск алгоритмом одного периода колебаний $T = 0,4$ мкс приводит к изменению времени задержки сигнала, равному (1,6 – 5,0) нс.

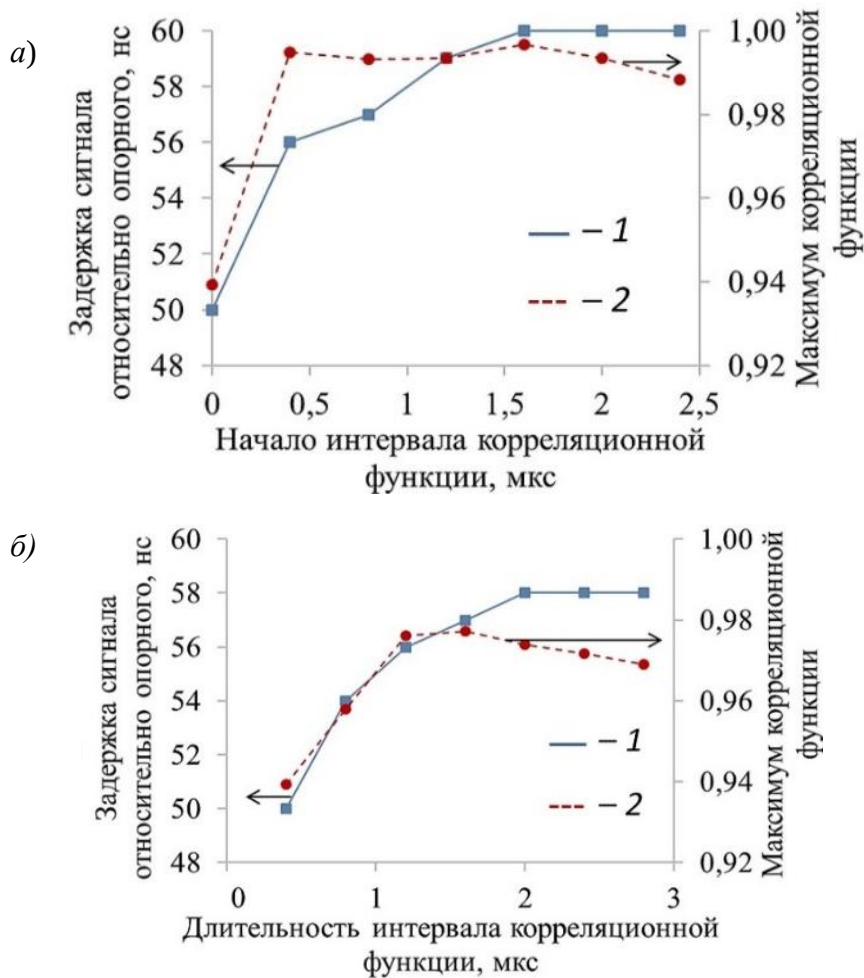


Рисунок 2.15 – Зависимость задержки (1) сигнала с нагруженного кольца подшипника и максимума корреляционной функции (2) от начала интервала вычисления корреляционной функции (а) и его длительности (б).

Наиболее стабильная задержка сигнала относительно опорного наблюдается при вычислении корреляционной функции на интервалах с временем начала от 1,5 до 2,5 мкс (рисунок 2.15, а) и длительностью от 2,0 до 3,0 мкс (рисунок 2.15, б). В данный интервал попадает центральная часть импульса, состоящая из пяти колебаний с амплитудой (50 – 100) % относительно максимальной амплитуды. Градиенты задержки сигнала относительно опорного по времени начала и длительности интервала вычисления корреляционной функции в этом случае не

превышают 1 нс/мкс, что соответствует неопределенности временной задержки сигнала не более 0,4 нс относительно опорного.

Таким образом, использование алгоритма, основанного на анализе корреляционной функции сигналов, регистрируемых с нагруженного кольца подшипника, относительно опорного сигнала, позволяет оценить временной сдвиг между ними с неопределенностью, не превышающей 1 нс. Полученное значение сдвига является интегральным параметром, который характеризует сигнал на интервале времени от 1,7 до 3,3 мкс, что соответствует четырем периодам колебаний в центральной части импульса.

Экспериментальная зависимость относительного изменения времени задержки поверхностной ультразвуковой волны, однократно прошедшей по кольцу, относительно опорного сигнала от механических напряжений в кольце подшипника показана на рисунке 2.16.

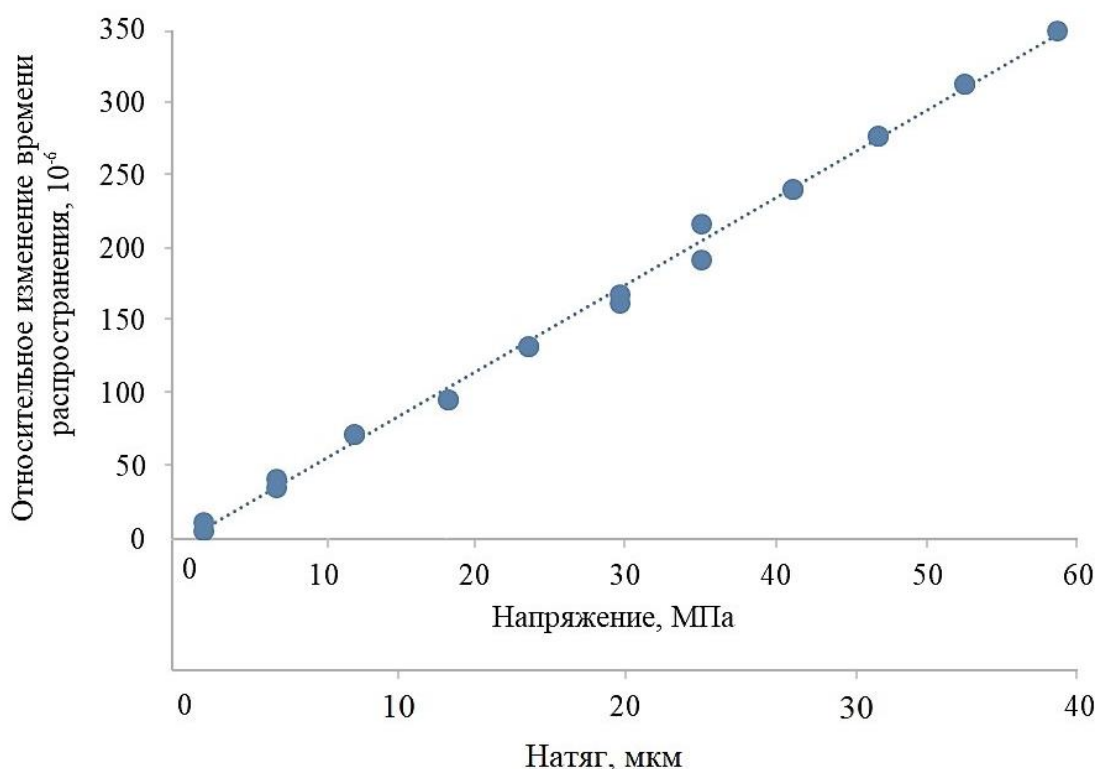


Рисунок 2.16 – Экспериментальная зависимость относительного изменения времени распространения поверхностной волны от измеренных значений натяга и механических напряжений в кольце подшипника.

Полученные данные соответствуют как режиму нагружения, так и разгрузке кольца. Отклонения экспериментальных значений относительного изменения

времени распространения поверхностной волны от результата аппроксимации линейной зависимостью не превышают 1 % с коэффициентом корреляции более 0,99:

$$\delta_d = \alpha \cdot \sigma + \beta, \quad (2.48)$$

где $\alpha = (5,48 \pm 0,28) \text{ ТПа}^{-1}$ и $\beta = -(10 \pm 1) \cdot 10^{-6}$ – коэффициенты, полученные методом наименьших квадратов.

Экспериментальные зависимости относительного изменения времени задержки поверхностной волны, многократно прошедшей по кольцу, относительно опорного сигнала от механических напряжений в кольце подшипника позволили определить коэффициенты акустоупругости, смещения и коэффициенты корреляции, рассчитанные методом наименьших квадратов, которые представлены в таблице 2.5. Коэффициент акустоупругости α соответствует относительному изменению времени распространения поверхностной волны Рэлея вдоль растягивающих напряжений при переменной базе прозвучивания. Справочные значения коэффициента α для углеродистых сталей варьируются в диапазоне от 6,5 до 7,1 ТПа^{-1} [21].

Таблица 2.5 – Коэффициенты пропорциональности относительного изменения времени распространения поверхностной волны, многократно прошедшей по кольцу, от механических напряжений

Параметр	Количество проходов волны по кольцу				
	1	2	3	4	5
Коэффициент α , ТПа^{-1}	5,48	5,39	5,43	5,57	5,37
Доверительные границы погрешности, ТПа^{-1}	0,14	0,81	0,62	0,33	0,41
Коэффициент β , 10^{-6}	-10,1	-17,7	-7,4	-6,8	-7,9
Коэффициент корреляции, R	0,97	0,99	0,98	0,99	0,99

Погрешности определения времени задержки поверхностной волны относительно опорного времени связаны с акустическим трактом в объекте контроля (рисунок 2.17). Один из основных факторов, определяющих неопределенность времени распространения – непостоянство акустического

контакта. При изменении толщины слоя контактной жидкости на 10 мкм время задержки увеличивается более чем на 6 нс. Уменьшение влияния акустического контакта может быть достигнуто за счет измерения времени многократно прошедших по окружности кольца подшипника волн. При использовании для измерения времени задержки волны, n раз обогнувшей кольцо, погрешность, связанная с акустическим контактом, уменьшается обратно пропорционально числу n .

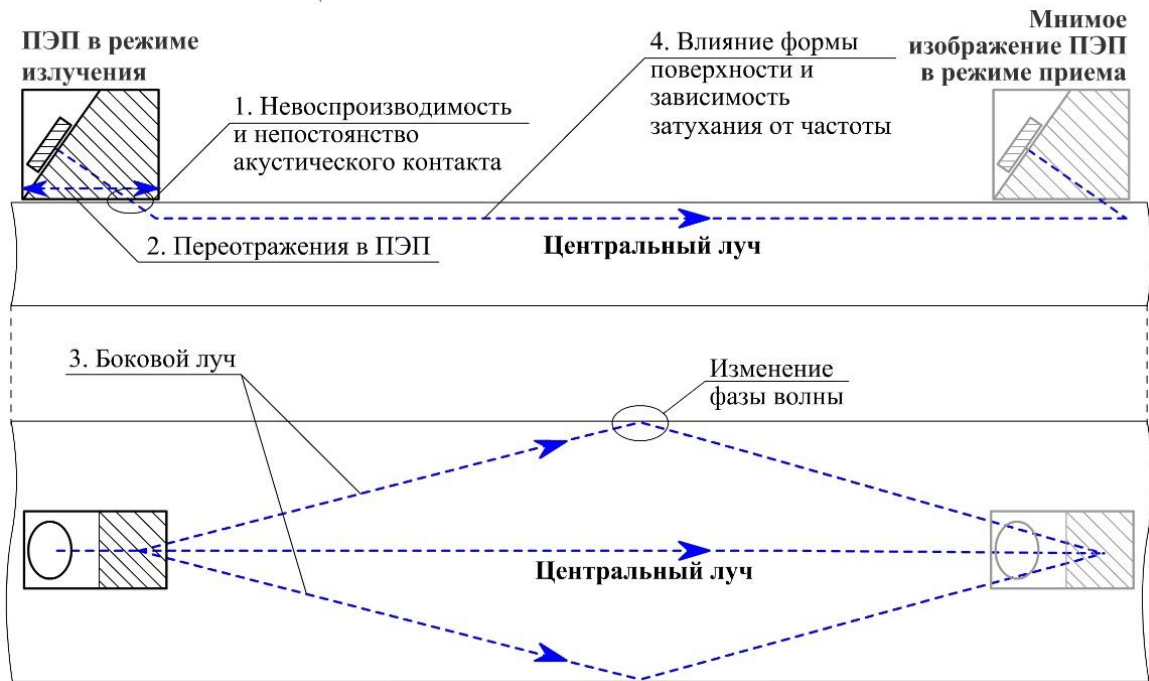


Рисунок 2.17 – Основные источники погрешностей измерений времени задержки поверхностной волны относительно опорного времени.

Регистрируемые принимающим преобразователем сигналы являются суперпозицией поверхностных волн, прошедших по окружности кольца подшипника вдоль центрального луча, и боковых акустических волн, отраженных от границ кольца. Для n раз обогнувших кольцо волн разность длин первого бокового луча и центрального луча зависит от расстояния до границы l и диаметра кольца D :

$$\Delta L = \sqrt{(n \cdot \pi \cdot D)^2 + l^2} - n \cdot \pi \cdot D. \quad (2.49)$$

Для волны с $n = 1$ отраженный луч длиннее прямого луча на (3,6 – 6,2) мм, что на временной развертке соответствует (3 – 5) периодам колебаний. При этом в

первом прошедшем по окружности импульсе поверхностной волны наблюдаются два максимума в моменты времени, равные 2,8 мкс и 4,2 мкс (рисунок 2.18, *а*). Для волн, пять раз обогнувших кольцо $n = 5$, разность длин центрального и однократно отраженного от границы бокового луча составляет 0,7 мм (0,2 мкс). Регистрируемые импульсы накладываются друг на друга и на временной развертке не дифференцируются. Боковые отраженные от границ (торцов поверхности качения кольца) акустические волны являются в методе акустоупругости мешающим фактором, так как изменяют форму регистрируемого импульса и тем самым создают неопределенность измерения времени прихода импульса на преобразователь.

Изменение формы импульсов (рисунок 2.18, *а*) связано с несколькими факторами: суперпозицией волн, затуханием, кривизной цилиндрической поверхности объекта контроля. На амплитудно-частотном распределении первого и пятого зарегистрированных импульсов, приведенных для сопоставимости к одной амплитуде на рисунке 2.18, *б*, основной максимум спектральной амплитуды наблюдается на частоте $(2,4 \pm 0,1)$ МГц. Второй локальный максимум наблюдается на частоте $(3,1 \pm 0,1)$ МГц, причем его относительная спектральная амплитуда для волн с $n = 5$ в 3 раза меньше амплитуды волны с $n = 1$. Изменение спектрального состава импульсов подтверждает модель изменения формы (рисунок 2.18, *а*) и создает значительные неопределенности $\Delta t > 50$ нс при определении абсолютного времени распространения волны как пороговыми, так и корреляционными способами.

Абсолютные измерения времени распространения поверхностных волн выполнялись на образцах с известным натягом в четырех сечениях, расположенных под углом 90° . При этом среднее квадратическое отклонение (СКО) относительных значений времени распространения поверхностных волн в каждой точке составили от $25 \cdot 10^{-6}$ до $40 \cdot 10^{-6}$. Случайные составляющие неопределенности в пределах 25 % от среднего значения результатов наблюдений вызваны слабой повторяемостью параметров акустического контакта при повторных установках преобразователя на объект контроля.

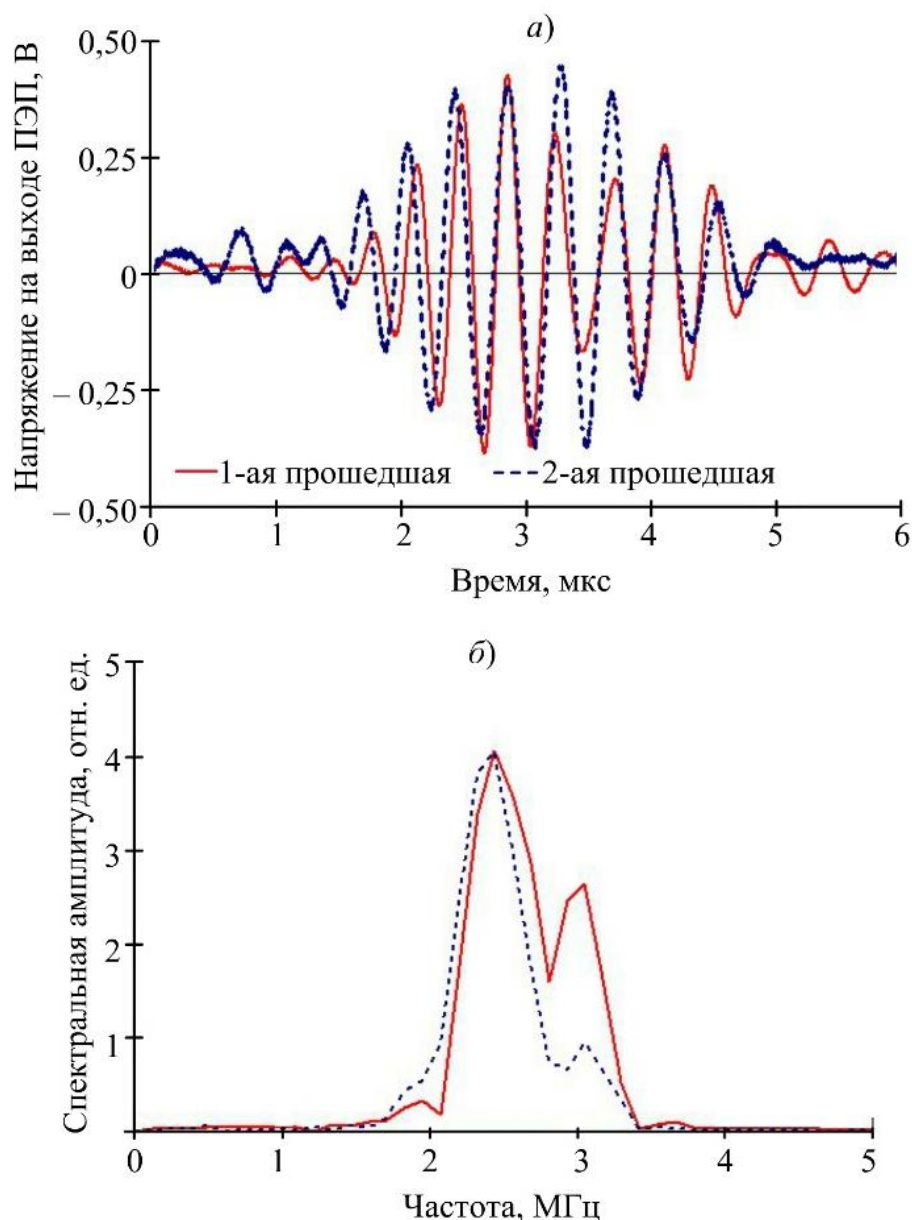


Рисунок 2.18 – Форма (а) и спектр (б) первого и пятого прошедших по окружности кольца импульсов поверхностной волны.

2.4 Выводы ко второй главе

Аттестован стенд для нагружения колец подшипников, воспроизводящий напряженно-деформированное состояние в прессовом соединении. Стенд обеспечивает нагружение кольца до напряжений, эквивалентных натягу 70 мкм (относительные деформации $550 \cdot 10^{-6}$). Стенд работает в комплексе с микропроцессорной тензометрической системой «Динамика-3» для контроля напряженного состояния испытываемого кольца.

Разработан и изготовлен хордовый преобразователь, обеспечивающий прозвучивание кольца подшипника продольными и поперечными волнами с базой 96 мм. Для проведения акустических характеристик собрана установка обеспечивающая измерение времени с дискретностью отсчета 1 нс.

Предложен и реализован экспериментальный способ оптимизации временных параметров корреляционного метода определения малых (менее периода колебаний) времен задержки двух сигналов. Оптимальные временные параметры интервала вычисления корреляционной функции соответствуют средней части импульса с амплитудой колебаний более 50 % ее максимального значения. В экспериментах неопределенность времени задержки импульсов поверхностных волн не превышала времени дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) осциллографа, равного 1 нс.

Экспериментально определены акустоупругие коэффициенты времени для материала кольца подшипника при распространении по хорде. С использованием тензорного описания акустоупругости разработан способ оценки акустоупругих коэффициентов скорости при хордовом прозвучивании цилиндрических деталей. На основе разработанного способа предложены поправки для повышения точности определения акустоупругих коэффициентов, которые позволили уменьшить предел допускаемой погрешности с 13 % до 8 %.

Для стали ШХ15 значение акустоупругого коэффициента продольной волны, распространяющейся вдоль направления действия главных механических напряжений, составило $\beta_{3,3} = 11,0 \text{ МПа}^{-1} (\pm 8 \%)$. Коэффициент акустоупругости по времени распространения поверхностной волны для стали ШХ15 в кольце подшипника составил $\alpha = (5,48 \pm 0,28) \text{ ТПа}^{-1}$, а соответствующий ему коэффициент акустоупругости по скорости распространения равен $\beta = -(0,74 \pm 0,14) \text{ ТПа}^{-1}$.

Проанализированы основные причины и границы неопределенностей измерения времени распространения волны по кольцу подшипника: непостоянство акустического контакта, суперпозиция прямого луча и отраженного от границы

кольца, наличие дисперсии, связанной с частотно-зависимым затуханием и криволинейностью поверхности.

При акустическом контроле образцов натяга показано, что невозпроизводимость акустического контакта при повторных установках преобразователя на объект контроля возникает из-за вариации толщины контактного слоя. При повторных измерениях образцов погрешность измерения механических напряжений в кольцах подшипника акустоупругим методом достигает 50 % измеряемой величины. Разработанные способы акустоупругости могут эффективно использоваться для контроля механических напряжений в кольце подшипника в процессе прессовой посадки, так как не требуют клеевого соединения тензодатчиков с поверхностью кольца.

3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭХО-МЕТОДОМ И МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

3.1 Закономерности взаимодействия волны с границей прессового соединения для оценки плотности посадки

Для контроля переходного слоя между кольцом подшипника и шейкой оси с оценкой плотности прилегания перспективно использовать отраженные от границы кольцо-ось ультразвуковые волны. Зазор между деталями заполнен жидкой средой – пастой ЭМПи-1, поэтому для установления соответствия толщины переходного слоя с амплитудой отраженной волны необходимо построить модель прохождения волны через слой, а затем экспериментально оценить влияние мешающих факторов на неопределенность результатов контроля.

Задача прохождения непрерывной продольной акустической волны через границу сред 1 и 3 (рисунок 3.1), разделенную слоем 2 контактной жидкости толщиной Δ , достаточно подробно изучена и имеет аналитическое решение, представленное в опубликованных работах [1] и учебниках. Для исследования закономерности прохождения через слой акустического импульса произвольной формы и оценки влияния неоднородности толщины слоя на регистрируемые сигналы в случае как нормального, так и наклонного падения продольной волны рассмотрим алгоритм решения известной задачи, позволяющей получить аналитические выражения для коэффициентов прохождения и отражения.

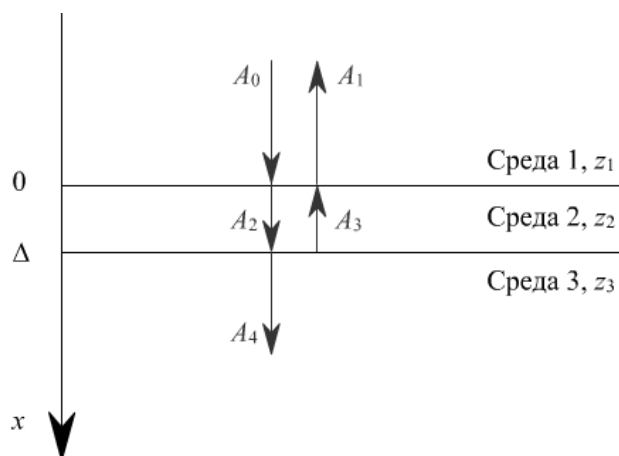


Рисунок 3.1 – Схема прохождения непрерывной акустической волны через границу сред,

разделенных слоев

В случае непрерывного излучения в 1-ой, 2-ой и 3-ей средах возникают стационарные отраженные и прошедшие продольные акустические волны, смещения частиц среды в которых описывается выражениями:

$$x_l = A_l \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t - i \cdot k_l \cdot x), \quad (3.1)$$

где A_l – комплексные величины – амплитуда l -ой волн, м; k_l – волновые числа в среде, соответственно, м^{-1} ; ω – круговая частота, Гц; t и x – время и координата, с и м; i – комплексная единица.

Амплитуды и фазы волн определяются граничными условиями, которые могут быть сформулированы в терминах коэффициентов отражения и прохождения:

$$A_1 = r_{12} \cdot A_0 + d_{21} \cdot A_3, \quad (3.2)$$

$$A_2 = d_{12} \cdot A_0 + r_{21} \cdot A_3, \quad (3.3)$$

$$A_3 \cdot \exp(i \cdot k_2 \cdot \Delta) = r_{23} \cdot A_2 \cdot \exp(-i \cdot k_2 \cdot \Delta), \quad (3.4)$$

$$A_4 \cdot \exp(-i \cdot k_3 \cdot \Delta) = d_{23} \cdot A_2 \cdot \exp(-i \cdot k_2 \cdot \Delta). \quad (3.5)$$

Амплитудные коэффициенты отражения и преломления широко известны и приведены, например, в [21]:

$$r_{12} = -r_{21} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \quad (3.6)$$

$$r_{23} = -r_{32} = \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2}, \quad (3.7)$$

$$d_{12} = d_{21} = \frac{2 \cdot \sqrt{z_1 \cdot z_2}}{z_1 + z_2}, \quad (3.8)$$

$$d_{23} = d_{32} = \frac{2 \cdot \sqrt{z_2 \cdot z_3}}{z_3 + z_2}, \quad (3.9)$$

После подстановки (3.6 – 3.9) выражения (3.2 – 3.5) принимают вид:

$$A_1 = r_{12} \cdot A_0 + d_{12} \cdot A_3, \quad (3.10)$$

$$A_2 = d_{12} \cdot A_0 - r_{12} \cdot A_3, \quad (3.11)$$

$$A_3 = r_{23} \cdot A_2 \cdot \exp(-2 \cdot i \cdot k_2 \cdot \Delta), \quad (3.12)$$

$$A_4 = d_{23} \cdot A_2 \cdot \exp(i \cdot k_3 \cdot \Delta - i \cdot k_2 \cdot \Delta). \quad (3.13)$$

Решение для амплитуды A_3 отраженной волны во второй среде может быть получено из выражений (3.11) и (3.12) простой подстановкой первого уравнения во

второе:

$$A_3 = \frac{d_{12} \cdot r_{23}}{r_{12} \cdot r_{23} + \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)} \cdot A_0, \quad (3.14)$$

Подстановка (3.14) в (3.10) дает решение для амплитуды отраженной волны A_1 :

$$A_1 = \left(\frac{(r_{12}^2 + d_{12}^2) \cdot r_{23} + r_{12} \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{r_{12} \cdot r_{23} + \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)} \right) \cdot A_0, \quad (3.15)$$

Из закона сохранения энергии сумма коэффициентов отражения по энергии r_{12}^2 и прохождения d_{12}^2 равна единице:

$$r_{12}^2 + d_{12}^2 = 1, \quad (3.16)$$

тогда:

$$A_1 = \frac{r_{23} + r_{12} \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{r_{12} \cdot r_{23} + \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)} \cdot A_0. \quad (3.17)$$

Для оценки влияния толщины слоя z_2 на абсолютные значения амплитуд и фаз отраженных волн выполнен анализ выражения (3.17) в приближении малости $k_2 \cdot \Delta \ll 1$.

Переход от комплексной амплитуды отраженной волны (3.17) к действительной амплитуде и фазе основан на умножении на комплексно-сопряженную величину:

$$|A_1|^2 = A_1 \cdot A_1^*, \quad (3.18)$$

где $*$ – знак комплексного сопряжения.

$$|A_1|^2 = A_0^2 \cdot \frac{r_{23} + r_{12} \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{r_{12} \cdot r_{23} + \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)} \cdot \frac{r_{23} + r_{12} \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{r_{12} \cdot r_{23} + \exp(-i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}. \quad (3.19)$$

После преобразований уравнение (3.19) принимает вид:

$$|A_1|^2 = A_0^2 \cdot \frac{r_{23}^2 + r_{12}^2 + 2 \cdot r_{12} \cdot r_{23} \cdot \cos(2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{1 + r_{12}^2 \cdot r_{23}^2 + 2 \cdot r_{12} \cdot r_{23} \cdot \cos(2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}. \quad (3.20)$$

Замена коэффициентов отражения r_{12} и r_{23} их выражениями через акустические сопротивления сред (3.6), (3.7) приводит (3.20) к виду:

$$|A_1|^2 = A_0^2 \cdot \left(\frac{z_3 - z_1}{z_3 + z_1} \right)^2 \cdot \frac{1 - \frac{(z_2^2 - z_1^2) \cdot (z_3^2 - z_2^2)}{z_2^2 \cdot (z_3 - z_1)^2} \cdot \sin^2(k_2 \cdot \Delta)}{1 - \frac{(z_2^2 - z_1^2) \cdot (z_3^2 - z_2^2)}{z_2^2 \cdot (z_3 + z_1)^2} \cdot \sin^2(k_2 \cdot \Delta)}. \quad (3.21)$$

Выражение для амплитуды отраженной волны очевидно следует из выражения (3.21):

$$A_1 = A_0 \cdot \frac{z_3 - z_1}{z_3 + z_1} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{(z_2^2 - z_1^2) \cdot (z_3^2 - z_2^2)}{z_2^2 \cdot (z_3 - z_1)^2} \cdot \sin^2(k_2 \cdot \Delta)}{1 - \frac{(z_2^2 - z_1^2) \cdot (z_3^2 - z_2^2)}{z_2^2 \cdot (z_3 + z_1)^2} \cdot \sin^2(k_2 \cdot \Delta)}}. \quad (3.22)$$

В выражении (3.22) второй множитель соответствует коэффициенту отражения от границы первого z_1 и третьего z_3 материала в отсутствии контактного слоя z_2 . Все влияние контактного слоя на отраженную амплитуду содержится в третьем множителе, расположенном под корнем.

Фаза отраженной волны может быть получена из соотношения (3.17) умножением числителя и знаменателя на комплексно-сопряженную к знаменателю величину, что позволяет избавиться от мнимой части знаменателя дроби:

$$A_1 = A_0 \cdot \frac{r_{23} + r_{12} \cdot \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{r_{12} \cdot r_{23} + \exp(i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)} \cdot \frac{r_{12} \cdot r_{23} + \exp(-i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{r_{12} \cdot r_{23} + \exp(-i \cdot 2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}. \quad (3.23)$$

После перемножения дробей, алгебраических преобразований и перехода от экспоненты к тригонометрическим функциям выражение для комплексной амплитуды принимает вид:

$$A_1 = A_0 \cdot \frac{r_{12} \cdot (1 + r_{23}^2) + r_{23} \cdot (1 + r_{12}^2) \cdot \cos(2 \cdot k_2 \cdot \Delta) - i \cdot r_{23} \cdot (1 - r_{12}^2) \cdot \sin(2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{1 + r_{12}^2 \cdot r_{23}^2 + 2 \cdot r_{12} \cdot r_{23} \cdot \cos(2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}. \quad (3.24)$$

Тангенс фазы отраженной волны очевидно является отношением мнимой части к реальной:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = - \frac{r_{23} \cdot (1 - r_{12}^2) \cdot \sin(2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{r_{12} \cdot (1 + r_{23}^2) + r_{23} \cdot (1 + r_{12}^2) \cdot \cos(2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}. \quad (3.25)$$

После подстановки выражений коэффициентов отражения через акустические сопротивления сред (3.6, 3.7) и преобразований к удобному виду:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = - \frac{\frac{z_1 \cdot z_2}{z_2^2 + z_1^2} \cdot \sin(2 \cdot k_2 \cdot \Delta)}{\frac{z_2^2}{z_2^2 + z_1^2} \cdot \frac{z_3^2 - z_1^2}{z_3^2 - z_2^2} - \sin^2(k_2 \cdot \Delta)}. \quad (3.26)$$

Анализ выражений для амплитуды (3.22) и фазы (3.26) в приближении малости толщины контактного слоя, которое эквивалентно требованию малости аргумента функции синуса $k_2 \cdot \Delta$.

Условие малости влияния слоя z_2 на амплитуду очевидно следует из (3.22):

$$\left| \frac{(z_2^2 - z_1^2) \cdot (z_3^2 - z_2^2)}{z_2^2 \cdot (z_3 + z_1)^2} \cdot \sin^2(k_2 \cdot \Delta) \right| \ll 1, \quad (3.27)$$

а на фазу из (3.26):

$$\sin^2(k_2 \cdot \Delta) \ll \left| \frac{z_2^2}{z_2^2 + z_1^2} \cdot \frac{z_3^2 - z_1^2}{z_3^2 - z_2^2} \right|. \quad (3.28)$$

После преобразований (3.27) имеет вид:

$$\sin^2(k_2 \cdot \Delta) \ll \left| \frac{z_2^2 \cdot (z_3 + z_1)^2}{(z_2^2 - z_1^2) \cdot (z_3^2 - z_2^2)} \right|. \quad (3.29)$$

Акустические сопротивления материалов, применяемых в неразрушающем контроле, приведены в таблице 3.1. Контактные жидкости, моделируемые слоем z_2 , обладают в 20 – 30 раз меньшими акустическими сопротивлениями, чем материал акустической задержки z_1 и объекта контроля z_3 . Для разложения выражений (3.28) и (3.29) по степеням $\frac{z_2}{z_1}$ и $\frac{z_2}{z_3}$ допустимо их переписать в виде:

$$\sin^2(k_2 \cdot \Delta) \ll \left| \frac{\left(\frac{z_2}{z_3}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{z_3}{z_1}\right)^2}{\left(\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{z_2}{z_3}\right)^2\right)} \right|, \quad (3.30)$$

$$\sin^2(k_2 \cdot \Delta) \ll \left| \frac{\left(\frac{z_2}{z_3}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{z_3}{z_1}\right)^2}{\left(\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2 + 1\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{z_2}{z_3}\right)^2\right)} \right|. \quad (3.31)$$

Таблица 3.1 – Акустические сопротивления материалов [21]

Материал	Акустическое сопротивление, z , Па·с/м	Материал	Акустическое сопротивление, z , Па·с/м
Сталь углеродистая	45,9 ... 46,3	Спирт этиловый	0,9
Сталь аустенитная	44 ... 48	Масло моторное	1,5

Пренебрегая в (3.30) и (3.31) малыми слагаемыми $\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2$ и $\left(\frac{z_2}{z_3}\right)^2$ в знаменателе и учитывая, что при $k_2 \cdot \Delta \ll 1$ значение $\sin(k_2 \cdot \Delta) \approx k_2 \cdot \Delta$, требование малости толщины контактного слоя z_2 принимает вид:

$$k_2 \cdot \Delta \ll \alpha \cdot \frac{z_2}{z_3}, \quad (3.32)$$

где α – коэффициент, зависящий от соотношения $\frac{z_3}{z_1}$, $\alpha = 2$ для амплитуды отраженной волны, $\alpha = \left|1 - \frac{z_3}{z_1}\right|$ для фазы.

В терминах длины волны λ_2 в слое z_2 условие малости может быть записано в форме:

$$\Delta \ll \frac{\alpha}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{z_2}{z_3} \cdot \lambda_2. \quad (3.33)$$

Для слоя масла, стальных акустических задержек и объекта контроля требование (3.33) имеет вид:

$$\Delta \ll \frac{\lambda_2}{100}. \quad (3.34)$$

Выражение (3.34) устанавливает ограничение на частоту волны при заданной шероховатости и волнистости поверхности объекта контроля:

$$f \ll \frac{C_2}{100 \cdot \Delta_s}, \quad (3.35)$$

где Δ_s – шероховатость или неровность поверхности объекта контроля, мм; C_2 – скорость распространения продольной волны в контактной жидкости, мм/мкс.

При шероховатости поверхности $\Delta_s = 0,02$ мм и скорости распространения продольной волны в воде или масле $C_2 = 1,5$ мм/мкс частота должна быть много меньше $f \ll 0,75$ МГц. Экстенсивный путь снижения влияния контактного слоя z_2 на амплитуду за счет уменьшения частоты акустической волны имеет ограниченную применимость, так как создает новую проблему: влияние границ акустической задержки z_1 и толщины объекта контроля z_3 на регистрируемые сигналы. При частоте $f = 0,2$ МГц длина волны составит $\lambda_{1,3} = 5$ мм, что определяет необходимость увеличения размеров акустической задержки z_1 до размеров от 40 до 60 мм и накладывает ограничения на толщину объекта контроля z_3 , которая должна быть больше 50 мм.

Возможным решением проблемы снижения влияния контактного слоя на амплитуду и фазу отраженной волны может быть повышение отношения $\frac{z_2}{z_3}$ за счет использования новых для ультразвука материалов, например, жидких металлов. Так при отношении $\frac{z_2}{z_3} = 0,2$ и скорости $C_2 = 3$ мм/мкс ограничение на рабочую частоту, рассчитанное по формулам (3.30) и (3.31), существенно мягче и составляет $f \ll 10$ МГц.

Численные расчеты коэффициентов отражения и фазы отраженной волны выполнены по формуле (3.17) для материалов сталь – масло – сталь. Значения акустических сопротивлений материала акустической задержки и объекта

контроля принимались равными 44 и 48 г · мм/(см³ · с), масло – 1,5 г · мм/(см³ · с).

Абсолютное значение коэффициента отражения продольной волны монотонно возрастает при увеличении толщины контактного слоя и инвариантно к перестановке акустических сопротивлений первой и третьей сред. Численные расчеты подтверждают приближенные оценки по формуле (3.33) о невозможности в практически значимых случаях пренебрежения наличием слоя контактной жидкости, несмотря на малость отношения длины волны к толщине слоя. Например, при толщине контактного слоя Δ равной 5 мкм и длине волны $\lambda_2 = 1,2$ мм (кривая 1 на рисунке 3.2) их отношение равно $\frac{\lambda_2}{\Delta} = 0,004$, при этом абсолютное значение коэффициента отражения в 3,4 раза превышает его минимальное значение при отсутствии слоя z_2 с контактной жидкостью.

Чувствительность коэффициента отражения к толщине слоя контактной жидкости может быть охарактеризована производной, которая при численных расчетах приближенно выражается формулой:

$$k = \frac{dR}{d\Delta} \approx \frac{R_{i+1} - R_i}{\Delta_{i+1} - \Delta_i}, \quad (3.36)$$

где R – коэффициент отражения; Δ – толщина контактного слоя, мкм; R_i и Δ_i – численные значения коэффициента отражения и толщины слоя в i -ом расчете.

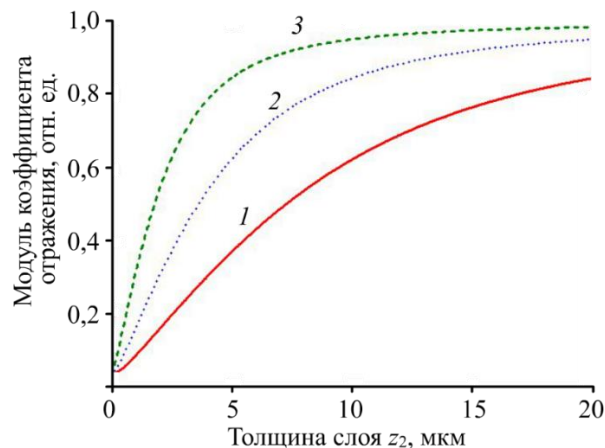


Рисунок 3.2 – Графики зависимости модуля коэффициента отражения продольной волны от толщины слоя z_2 для различных длин волн в слое: 1 – 1,2 мм; 2 – 0,6 мм; 3 – 0,3 мм

Зависимость чувствительности, определяемой (3.36), от толщины контактного слоя представлена на рисунке 3.3. Она характеризует погрешность

измерения коэффициента отражения, связанную с вариациями толщины слоя контактной жидкости. При средней толщине от 1 до 3 мкм максимальное значение чувствительности для длины волны 1,2 мм составляет $0,26 \text{ мкм}^{-1}$, что соответствует изменению коэффициента отражения на 26 % для вариации толщины на 1 мкм. Изменение длины волны до 0,3 мкм резко снижает чувствительность к вариациям до 5 % на каждый 1 мкм. Требования к обработанным поверхностям деталей подшипников подвижного состава составляют $Ra = 1,25 \text{ мкм}$, и, следовательно, для таких толщин на частотах более 0,6 МГц, соответствующих длине волны в контактной жидкости 1,2 мм и более, минимальная погрешность измерения коэффициента отражения составит 5 %.

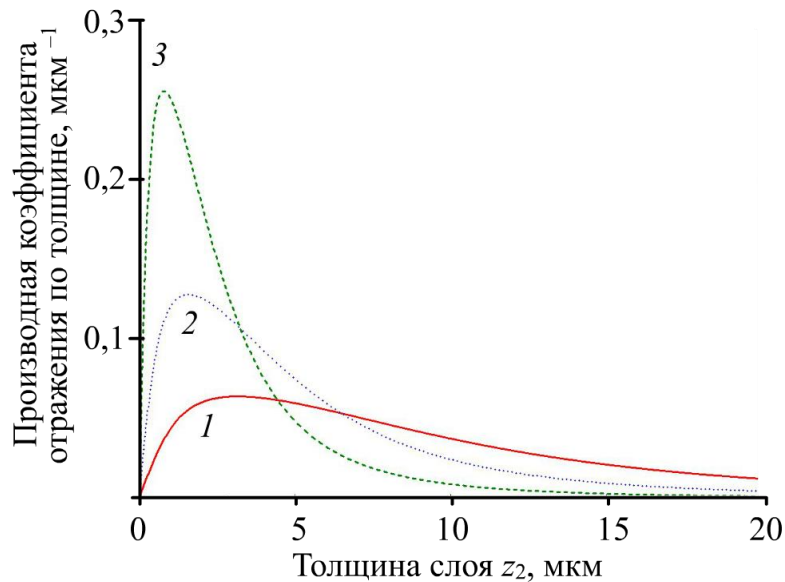


Рисунок 3.3 – Графики зависимости производной модуля коэффициента отражения продольной волны от толщины слоя z_2 для различных длин волн в среде z_2 : 1 – 1,2 мм; 2 – 0,6 мм; 3 – 0,3 мм

Изменение фазы волны (рисунок 3.4 и 3.5) после отражения от границы соединения является информативным параметром, который характеризует акустические характеристики слоя (толщину и акустический импеданс). Зависимость фазы волны от толщины (рисунок 3.4) слоя коррелирует с производной модуля коэффициента отражения продольной волны (рисунок 3.3). Совпадение локальных максимумов позволяет оценить степень влияния акустического контакта на амплитуду отраженной и прошедшей волн, что может быть использовано при оценке погрешности измерения времени прохождения контактного слоя в методе акустоупругости и изменения амплитуды отраженной

волны при использовании методов отражения от границы соединения.

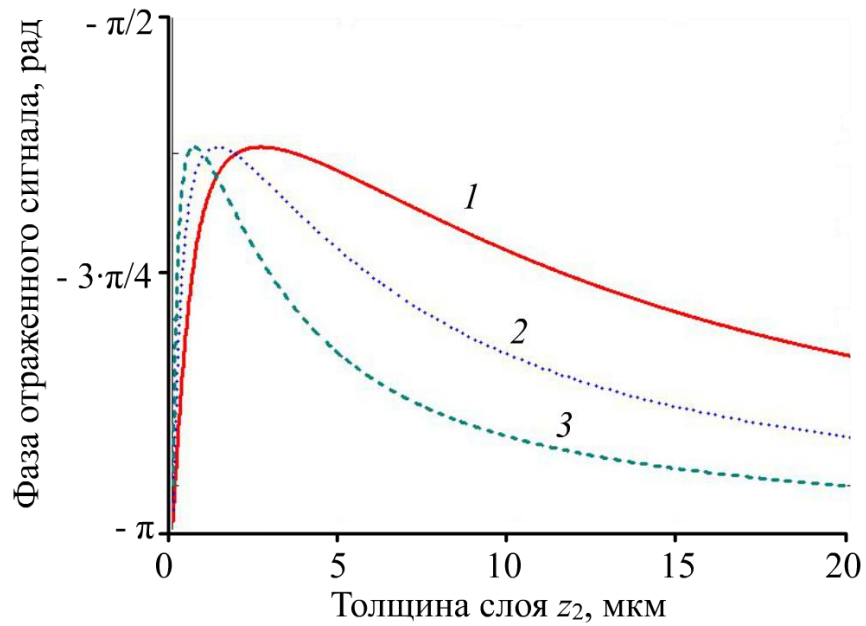


Рисунок 3.4 – Графики зависимости фазы отраженной продольной волны от толщины слоя z_2 при $z_1 > z_3$ для различных длин волн в слое: 1 – 1,2 мм; 2 – 0,6 мм; 3 – 0,3 мм

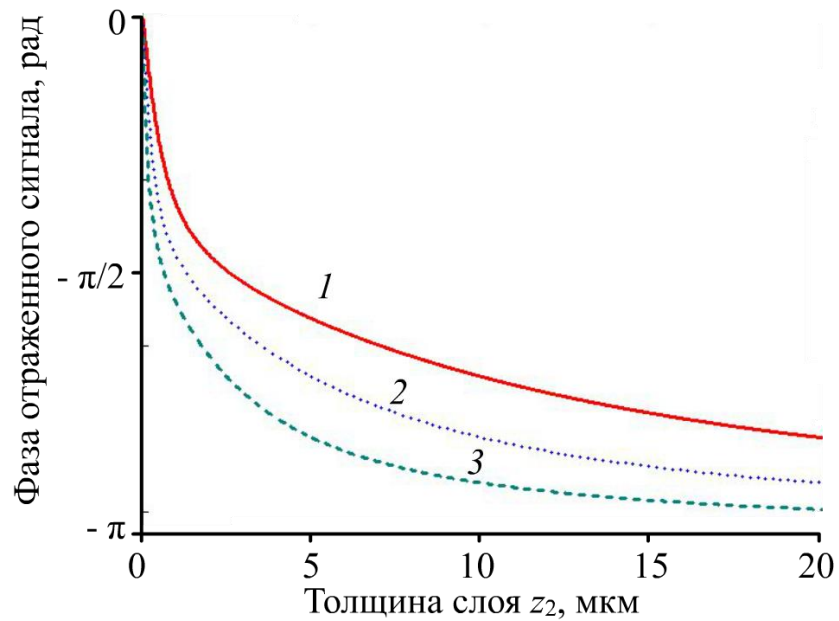


Рисунок 3.5 – Графики зависимости фазы отраженной продольной волны от толщины слоя z_2 при $z_1 < z_3$ для различных длин волн в слое: 1 – 1,2 мм; 2 – 0,6 мм; 3 – 0,3 мм

Изменение фазы волны при малых толщинах, для которых выполняется условие (3.33), знак изменения фазы волны при увеличении частоты излучаемых и принимаемых сигналов является индикатором соотношения акустических сопротивлений объекта контроля и акустической задержки. При условии $z_1 > z_3$

увеличение частоты приводит к уменьшению фазы волны, а при $z_1 < z_3$ к ее увеличению.

Влияние контактного слоя между сопрягаемыми деталями на акустические сигналы приводит к существенным погрешностям измерения временных задержек в методе акустоупругости, достигающим (20 – 50) % результата измерений, что существенно ограничивает область его применения. Однако использование эффектов, связанных с взаимодействием акустической волны с границей соединения, позволяет оценивать характеристики слоя сопряжения двух материалов, в том числе влияющих на его работоспособность.

Прессовое соединение колец подшипников с осью представляет собой границу двух объектов, которые разделены воздушной или масляной прослойкой. Схематично соединение и взаимодействие с ним волны показаны на рисунке 3.6. На схеме представлены элементы: вал или ось, зазор, который может быть заполнен воздухом при тепловой посадке или смазкой при прессовой посадке. Толщина слоя между элементами соединения является одним из факторов, от которых зависит надежность работы прессового соединения.

В случае импульсного излучения ультразвуковых волн в один из элементов прессовых соединений подшипника регистрируется акустический отклик в виде последовательности отраженных от границ прессового соединения и поверхности ввода импульсов с амплитудами $A_1, A_2, \dots, A_n$, схема формирования которых приведена на рисунке 3.6. В модели с плоскими границами и плоским фронтом волны амплитуда k -го принятого импульса пропорциональна амплитуде $(k - 1)$ -го импульса, коэффициенту отражения от поверхности ввода R_1 и границы раздела сред R_2 и определяется коэффициентом затухания. В общем виде амплитуда $(k - 1)$ -го импульса может быть записана в виде [20]:

$$A_k = A_0 \cdot (R_1 \cdot R_2 \cdot e^{-\delta \cdot 2 \cdot h})^k, \quad (3.37)$$

где A_0 – амплитуда зондирующего импульса; δ – коэффициент затухания, м^{-1} ; R_1 – коэффициент отражения от поверхности ввода

ультразвуковых колебаний, R_2 – коэффициент отражения от прессового соединения; h – толщина кольца, м.

Для удобства дальнейших вычислений представим выражение (3.37) в логарифмических относительных единицах:

$$N = 20 \cdot \text{Lg} \left(\frac{A_k}{A_0} \right) = \alpha \cdot k, \quad (3.38)$$

где α – коэффициент, который зависит от затухания, толщины кольца и коэффициентов отражения.

Подстановка (3.37) в (3.38) позволяет получить выражение для коэффициента пропорциональности α :

$$\alpha = 20 \cdot \text{Lg}(R_g) + 20 \cdot \text{Lg}(R_c \cdot e^{-\delta \cdot 2 \cdot l}). \quad (3.39)$$

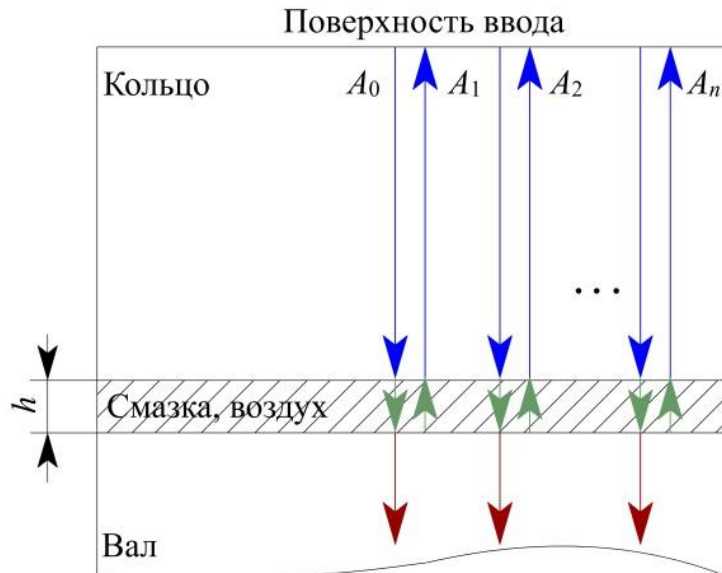


Рисунок 3.6 – Схематичное представление прохождения импульса акустической волны через границу кольцо-ось, разделенных слоем

Уравнение (3.39) устанавливает связь между коэффициентом пропорциональности амплитуды, выраженной в логарифмическом масштабе, и номера импульса с коэффициентом отражения от границ прессового соединения. Коэффициент отражения, в свою очередь, определяется с помощью уравнения (3.22) и напрямую определяет толщину переходного слоя от одного элемента прессового соединения к другому.

Исследования акустических характеристик прессового соединения для определения плотности посадки колец подшипников на шейку оси колесной пары по отражательной способности переходного слоя проводились универсальным ультразвуковым дефектоскопом УСД-50 (зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под № 34900-07), с использованием прямых совмещенных преобразователей П111-2,5-К12, П111-5,0-К10 и П111-10-К6 с рабочими частотами 2,5, 5,0 и 10,0 МГц. Продольная ультразвуковая волна возбуждалась на поверхности дорожки качения кольца подшипника и распространялась по радиусу соединения, как показано на рисунке 3.7.

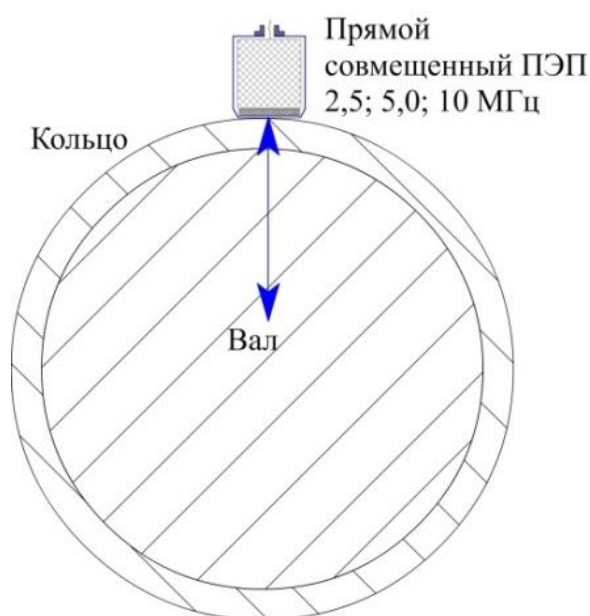


Рисунок 3.7 – Схема испытания неподвижного разъемного соединения кольца с осью эхо-методом

Дефектоскопом регистрировалась серия эхо-импульсов, отраженных от внутренней и наружной цилиндрических поверхностей кольца подшипника (рисунок 3.8). Наиболее устойчивые результаты получены для преобразователя П-111-5 с рабочей частотой 5 МГц. По результатам измерений на свободных кольцах и настроечных образцах с известным натягом построены в полулогарифмическом масштабе зависимости амплитуды от номера сигнала (рисунок 3.9). Коэффициенты корреляции для всех зависимостей превышают 0,95. Для каждого эксперимента методом наименьших квадратов рассчитаны коэффициенты линейной регрессии.

Минимальное без учета знака значение коэффициента пропорциональности (наклона зависимости) наблюдается для свободного кольца подшипника, что вызвано максимальным коэффициентом отражения от границы сопряжения прессового соединения кольца с шейкой оси.

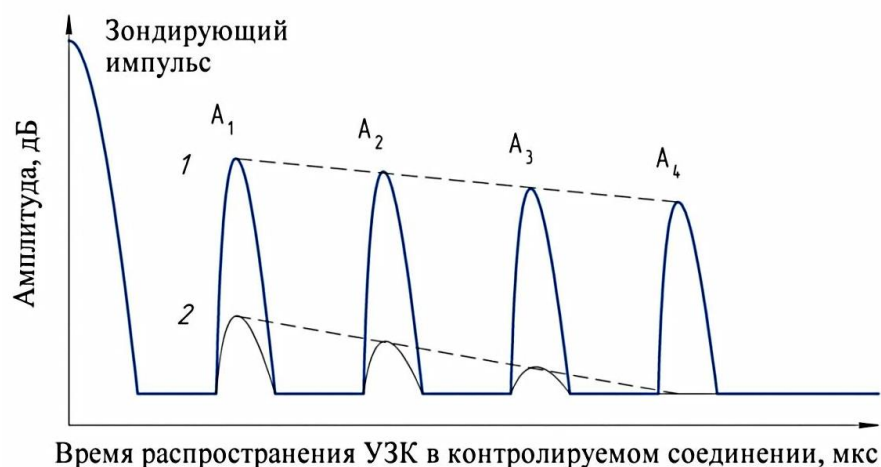


Рисунок 3.8 – Амплитудная развертка в логарифмическом масштабе: 1 – кольцо свободное, 2 – настроечный образец с натягом 72 мкм

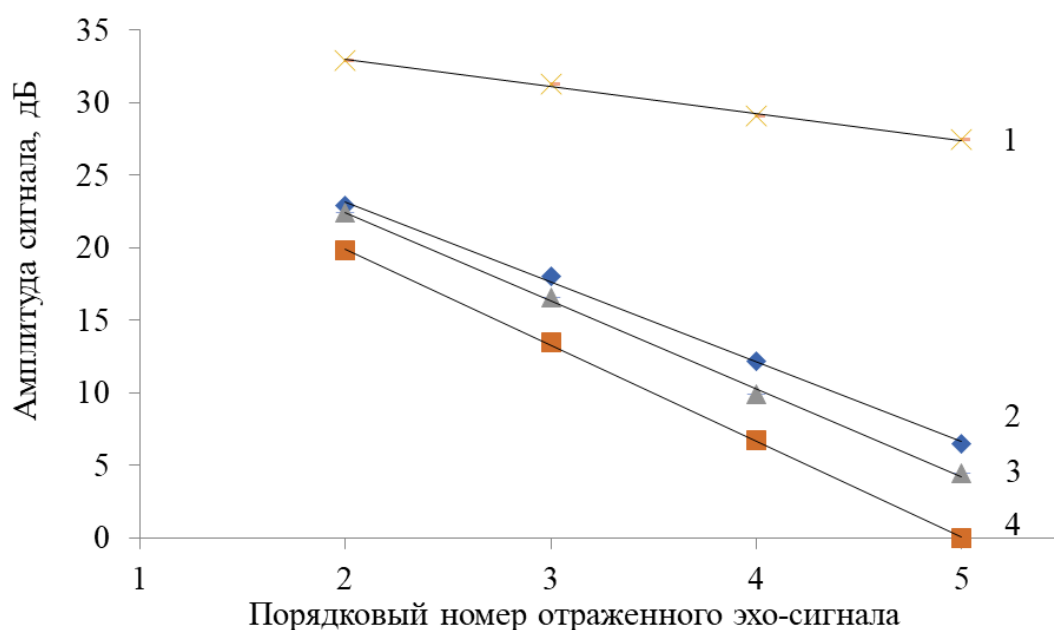


Рисунок 3.9 – Зависимости амплитуды зарегистрированных сигналов от номера сигнала для свободного кольца (1) и образцов натяга 29 мкм (2), 126 мкм (3) и 72 мкм (4)

На значение коэффициента пропорциональности оказывают влияние мешающие факторы, такие как затухание, непрямолинейность поверхности ввода, дифракция ультразвукового пучка, описываемая диаграммой направленности

преобразователя. Для исключения влияния мешающих величин предложено использовать информативный параметр – логарифмический коэффициент отражения границы соединения, характеризующий плотность прилегания колец подшипников к шейке оси и рассчитываемый по формуле:

$$\text{Lg}(R_g) = \frac{\alpha_{\Delta} - \alpha_0}{20}. \quad (3.40)$$

где α_{Δ} и α_0 – коэффициенты пропорциональности, рассчитанные по экспериментальным данным, зависимости логарифма амплитуды, зарегистрированных сигналов от их порядкового номера, для образца натяга Δ и свободного кольца.

Измеренные значения коэффициентов отражения на настроечных образцах составили от 0,56 до 0,62, что в соответствии с (3.22) свидетельствует о толщине переходного слоя прессового соединения от 0,19 до 0,27 мкм. Рассчитанные значения толщины контактного слоя соответствуют нормативным значениям шероховатости поверхностей вала $R_a < 0,8$ мкм и кольца $R_a < 1,25$ мкм. На рисунке 3.10 приведены результаты измерений коэффициента пропорциональности α_{Δ} на настроечных образцах натяга, свободных кольцах подшипника и на реальных осях колесных пар с недопустимым натягом. Падение коэффициента пропорциональности α_{Δ} (рисунок 3.10 поз. 1) наблюдается в области малых натягов (менее 30 мкм).

Результаты контроля в условиях вагоноремонтного депо ультразвуковым методом реальных соединений колец подшипников и осей колесных пар с недопустимым натягом приведены на рисунке 3.10 поз. 2. У прессовых соединений, имеющих коэффициент пропорциональности близкий к коэффициенту пропорциональности свободного кольца, наблюдаются сверхнормативные значения овальности и конусности цилиндрической посадочной поверхности оси. При контроле таких осей среднее квадратическое отклонение (СКО) коэффициента пропорциональности, измеренное в разных сечениях соединения, в 3 – 4 раза превышает аналогичное значение у колец с нормальным натягом.

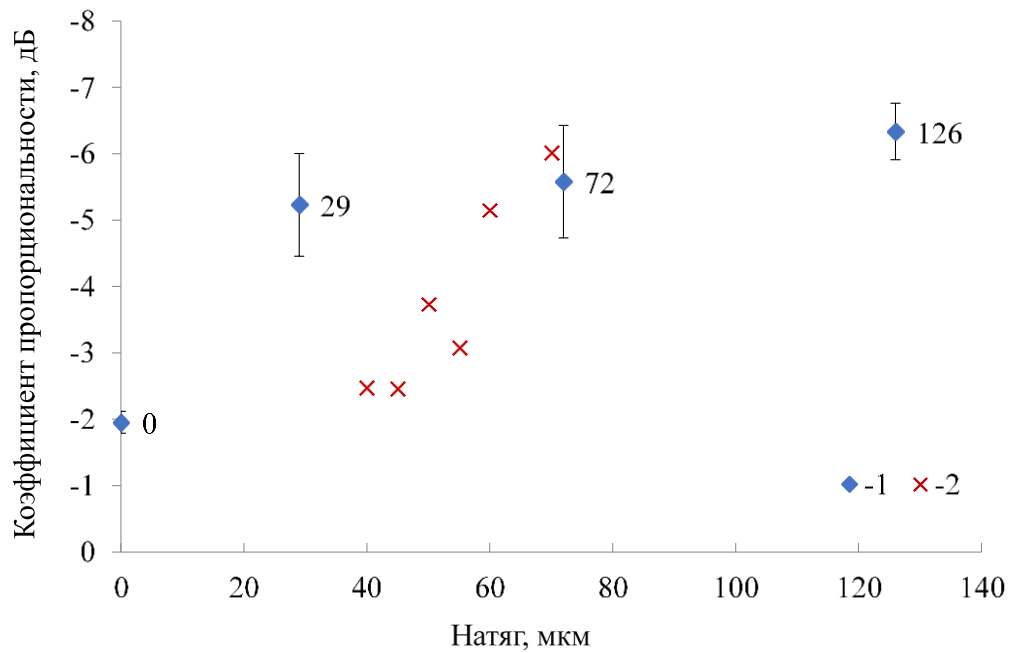


Рисунок 3.10 – Значения коэффициента пропорциональности α для различных образцов натяга и свободного кольца (1), для реальных объектов с натягами меньше допустимого (2)

Толщина зазора между кольцом и осью, рассчитанная для соединений вагоноремонтного депо по формуле 3.22, представлена на рисунке 3.11.

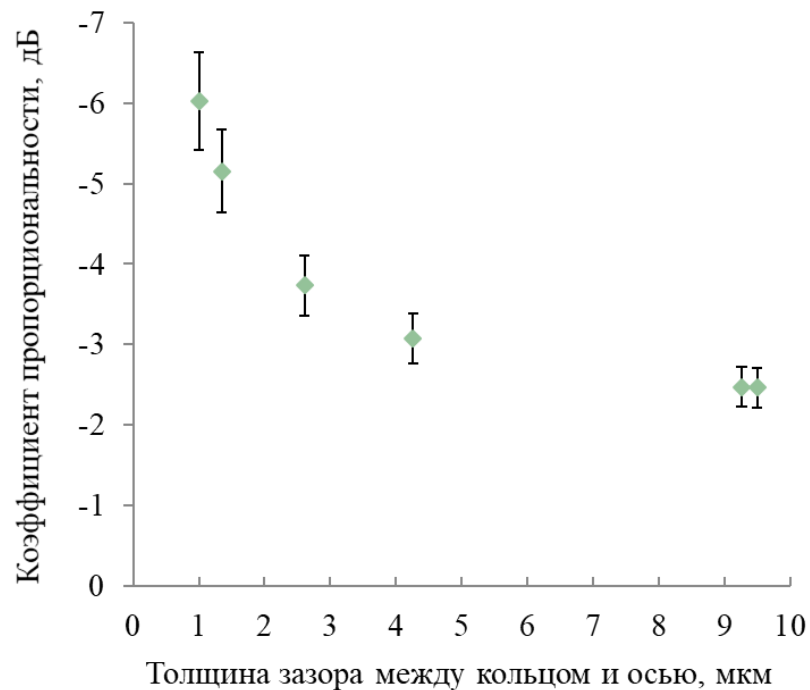


Рисунок 3.11 – График зависимости коэффициента пропорциональности от толщины слоя смазки между кольцом и осью

3.2 Исследование спектральных и временных характеристик свободных

колебаний прессовых соединений с натягом колец подшипников и шеек осей колесных пар

Закономерности свободных колебаний исследовались как на свободных кольцах подшипников, так и на кольцах, напрессованных на шейки осей колесных пар, бывших в эксплуатации и нового формирования. Для экспериментов отбирались кольца подшипников, наиболее распространенных в вагонном хозяйстве типов: 36-42726Е2М, 30-42726Е2М, 36-232726Е2М с роликами цилиндрической формы. Размеры буксовых подшипников: внутренний посадочный диаметр 130 мм, наружный – 250 мм, длина 80 мм.

Возбуждение собственных колебаний объекта контроля осуществлялось ударным способом по наружной цилиндрической поверхности катания. Боек представлял собой стальной шарик радиусом 6 мм, масса которого составляла $(6,5 \pm 0,1)$ г (рисунок 3.12). Для создания стабильного и управляемого удара использовалась дюралевая труба диаметром 14 мм, которая устанавливалась таким образом, чтобы не допустить повторного удара бойка по кольцу подшипника.

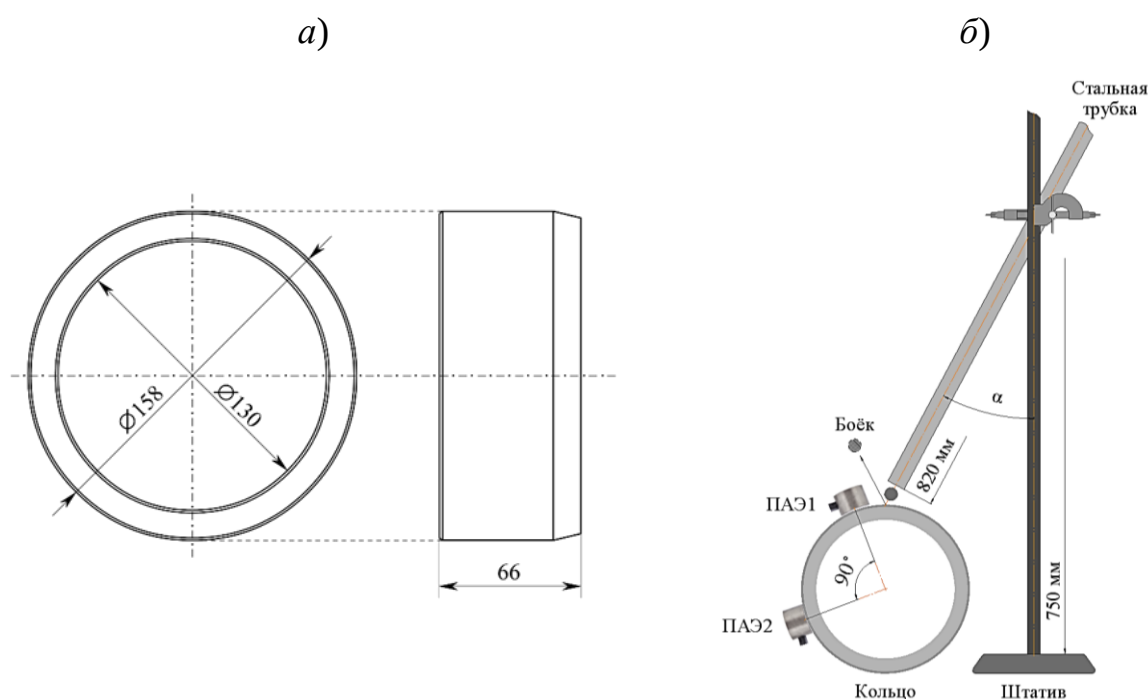


Рисунок 3.12 – Схематическое изображение безбуртового кольца подшипника (а) и схема расположения преобразователей 1 и 2 и способа удара (б)

Энергия удара бойка массой $m = 6,5 \cdot 10^{-3}$ кг составила (43 – 47) мДж:

$$\varepsilon = m \cdot g \cdot h \cdot \cos \alpha, \quad (3.41)$$

где α – угол наклона направляющей трубки, который изменялся в пределах (25 – 35)°, h – длина направляющей, $h = 0,82$ м.

Для регистрации колебаний кольца, на поверхности наружной дорожки катания устанавливались два пьезопреобразователя, которые удерживались магнитными креплениями. Расстояние между преобразователями составляло $\frac{1}{4}$ окружности, их оси пересекались под прямым углом (см. рисунок 3.12).

В исследовании использовались преобразователи двух типов: стандартный широкополосный преобразователь акустической эмиссии GT-300 и оригинальный пьезоэлектрический датчик, встроенный в конструкцию ультразвукового прибора УДС1-СИН с пьезопластиной цилиндрической формы радиусом 7,5 мм с собственной частотой 100 кГц без демпфера. Регистрируемые в кольце подшипника сигналы находились в низкочастотной области до 100 кГц. Преобразование сигналов в цифровую форму осуществлялось осциллографом TDS2104, зарегистрированным в реестре за номером 66636-17. Шаг дискретизации аналого-цифрового преобразования по времени составлял 0,8 мкс.

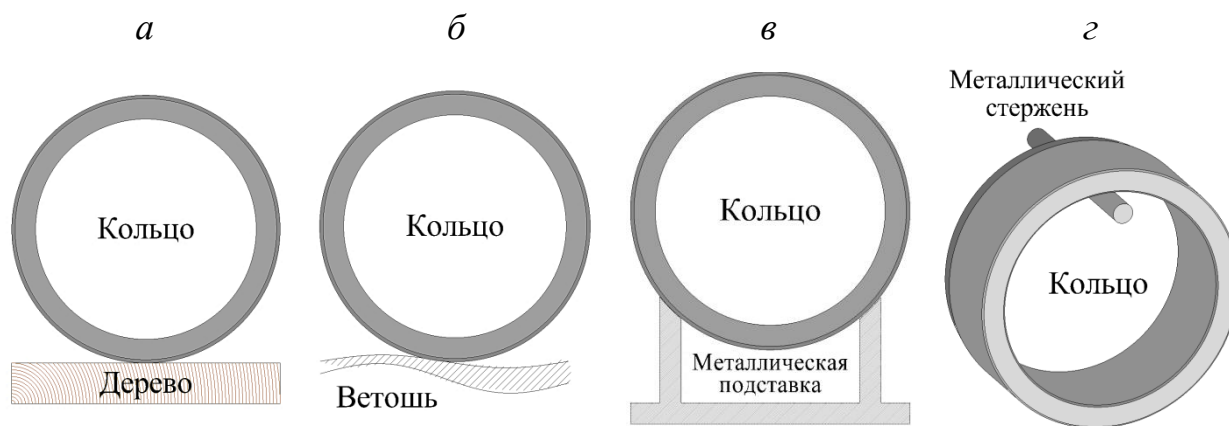


Рисунок 3.13 – Способы установки свободного кольца подшипника при исследовании влияния граничных условий на характеристики свободных колебаний

Влияние граничных условий – способа опирания кольца подшипника исследовалось для четырех вариантов: установка на подставку, изготовленную из деревянной плиты (рисунок 3.13, а), тканевую подстилку (рисунок 3.13, б), металлическую подставку (рисунок 3.13, в) и вешивание на металлическом

пруте-стержне (рисунок 3.13, з). Результаты экспериментов показали, что использованные в опытах граничные условия не влияют на спектр свободных колебаний. Свободные колебания колец подшипников, напрессованных на шейку оси, исследовали в условиях опирания колесами на рельсы и бетонный пол непосредственной в вагонных ремонтных депо.

Огибающая сигналов с пьезопреобразователей близка к экспоненциальной, характерной для затухания на интервале времени от 1 до 4 мс (рисунок 3.14). Сигналы на преобразователях, оси которых пересекаются под прямым углом, имеют коэффициент корреляции менее 0,2, несмотря на то что они, очевидно, связаны друг с другом. Этот эффект является следствием различного сдвига фаз для разных форм собственных колебаний кольца подшипника. Например, для осесимметричных колебаний сдвиг фаз на двух преобразователях равен 0, а для колебаний с симметрией вращения 2-го порядка – π рад, 3-го порядка – $\pi/2$ рад, 4-го порядка – 0 рад. Так как регистрируемый сигнал является суммой всех колебаний, то среднее значение коэффициента корреляции много меньше 1.

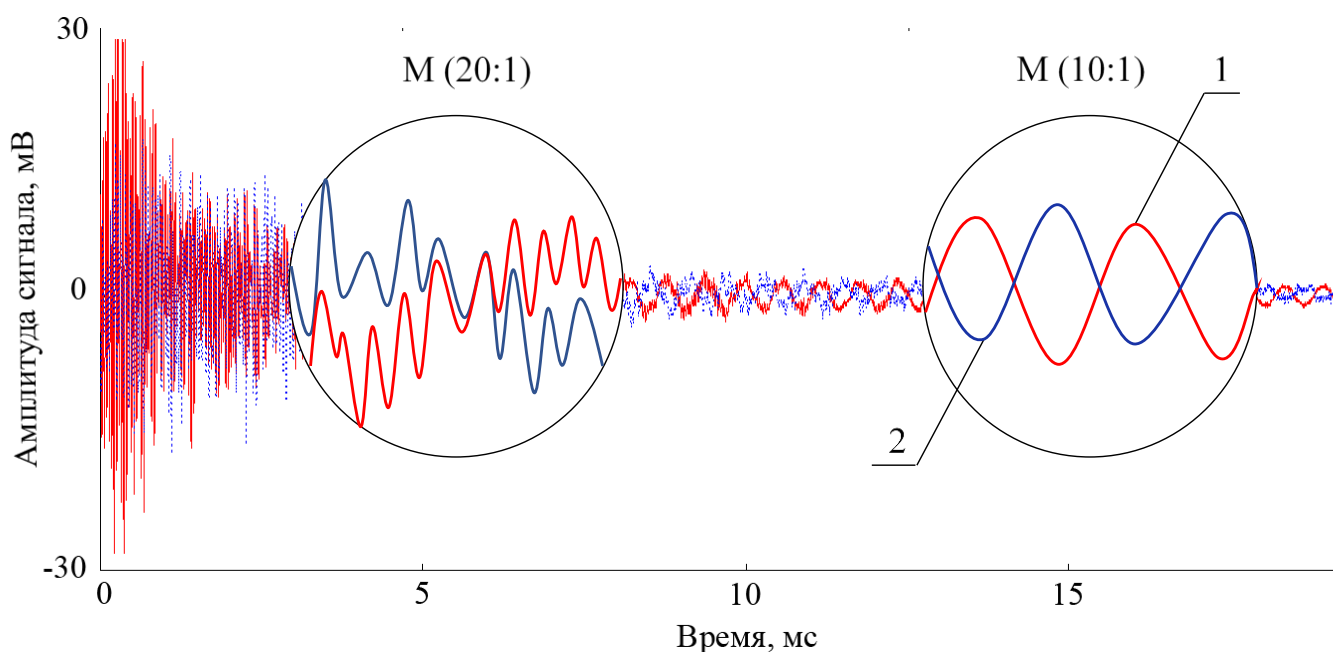


Рисунок 3.14 – Характерный вид сигналов, зарегистрированных преобразователями ПАЭ1 (1) и ПАЭ2 (2)

На рис. 3.14 показаны увеличенные по амплитуде и по времени участки сигналов, находящиеся в одной фазе и сдвинутые по фазе на π рад. В одной фазе

находятся сигналы осесимметричных колебаний, сдвинуты на π рад сигналы колебаний осевой симметрии второго порядка.

Спектры акустических сигналов колец подшипников в свободном состоянии (рисунок 3.15) содержат 25 уверенно определяемых визуально и пороговым методом пиков, равномерно распределенных в нижнем диапазоне частот до 50 кГц. В экспериментах с образцами натяга, которые представляют собой напрессованные на валы кольца, в диапазоне до 15 кГц собственные частоты отсутствуют, а в верхней части исследуемого диапазона от 15 до 50 кГц обнаруживаются 14 гармоник. Все собственные частоты свободных колец отличаются более чем на 0,05 кГц от собственных частот колец, напрессованных на валы (рисунок 3.15).

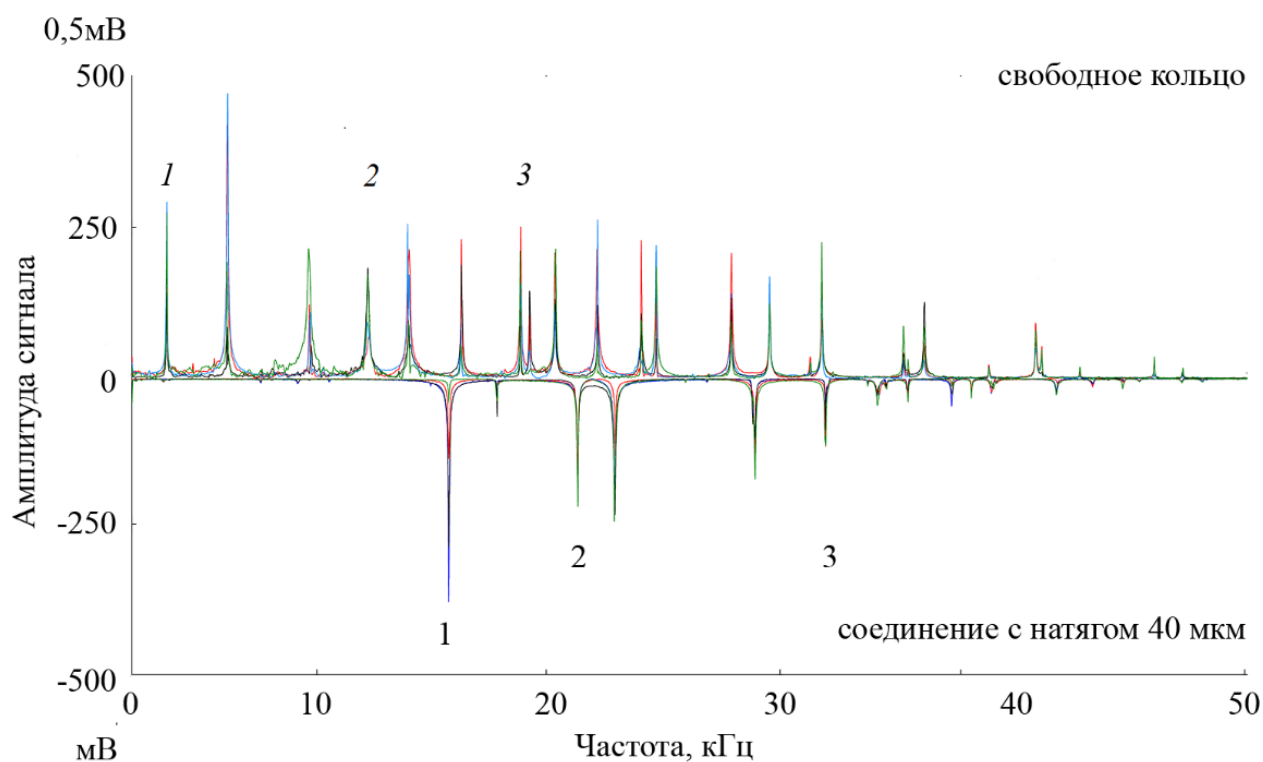


Рисунок 3.15 – Амплитудно-частотные характеристики сигналов для кольца в свободном состоянии и в соединении с натягом

Методом конечных элементов выполнено моделирование собственных колебаний колец подшипников (рисунок 3.16, а) и образцов (рисунок 3.16, б) для определения соответствия значений частот и форм колебаний. Модель разбивалась на тетрагональные элементы со средним размером 1 мм, для проверки сходимости

получены решения с шагом сетки 2 мм и 0,5 мм. Отклонения результатов расчета на разных размерах не превышали 1 %.

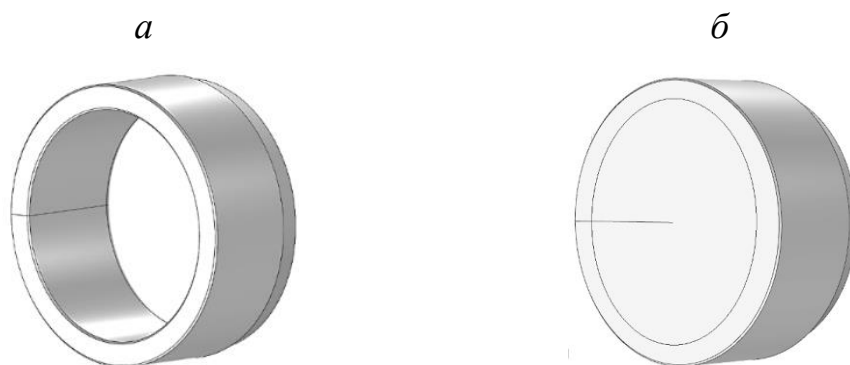
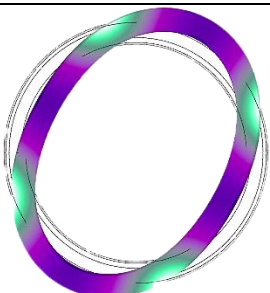
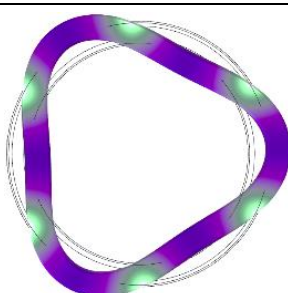
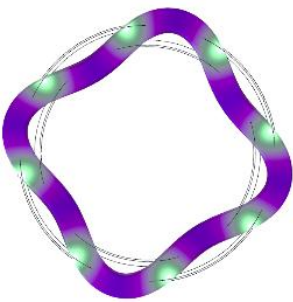
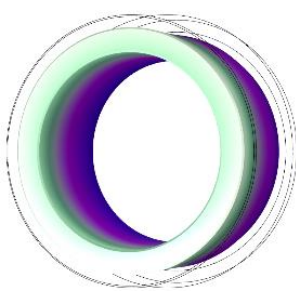
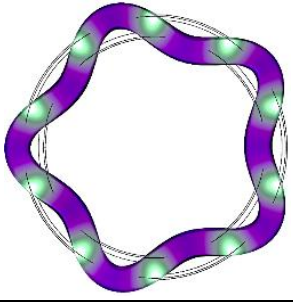
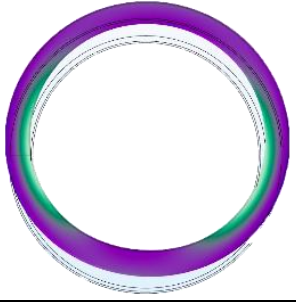
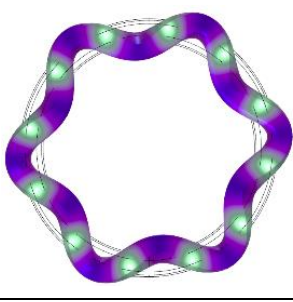
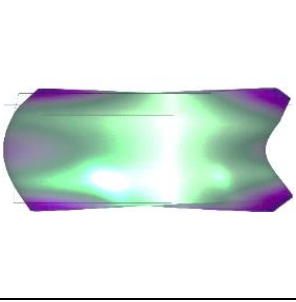
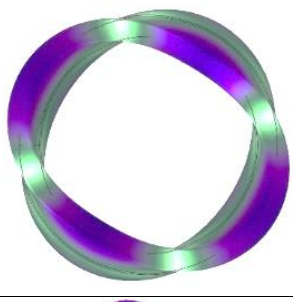
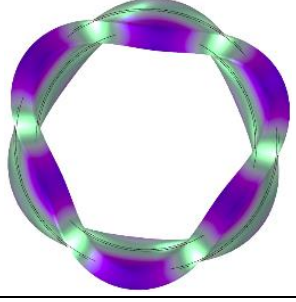
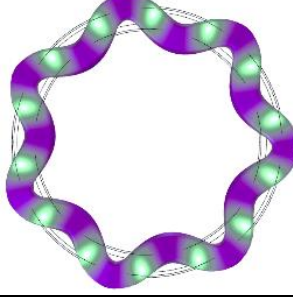
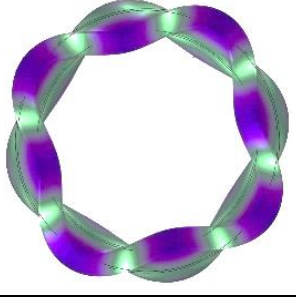


Рисунок 3.16 – Снимок экрана монитора с моделью кольца подшипника в свободном состоянии (а) и в соединении с валом (б)

В результате моделирования получены значения собственных частот колебаний их форма, характеризуемая распределением смещения элементов кольца. Полученные данные приведены в таблицах 3.2 и 3.3. Теоретические значения частот совпадают с экспериментальными с погрешностью не более 2 %. Колебания с осевой симметрией свободного кольца (№ 4 в таблице 3.2) и образца (№ 3, 6 в таблице 3.3) не смотря на подобную форму на поверхности кольца находятся в противоположных частях спектра на частотах 11,37 и 21,46, 33,4 кГц. При увеличении порядка симметрии частота уменьшается, так для второго порядка кольца частота составляет 1,67 кГц для кольца (№ 1 таблица 3.2) и 15,28 кГц для образца (№ 1 таблица 3.3).

Таблица 3.2 – Собственные частоты и форма колебаний свободного кольца

№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний	№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний
1	$1,67 \pm 0,01$		2	$4,60 \pm 0,04$	

№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний	№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний
3	$8,56 \pm 0,10$		4	$11,37 \pm 0,13$	
5	$13,34 \pm 0,10$		6	$15,86 \pm 0,05$	
7	$18,69 \pm 0,09$		8	$19,15 \pm 0,05$	
9	$20,38 \pm 0,03$		10	$22,40 \pm 0,05$	
11	$24,53 \pm 0,12$		12	$25,25 \pm 0,02$	

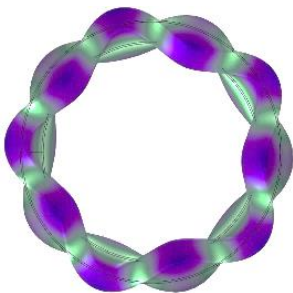
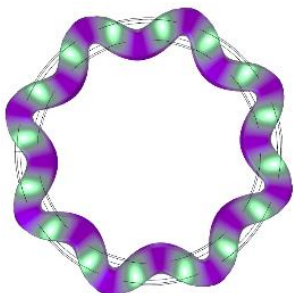
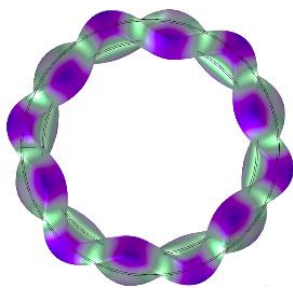
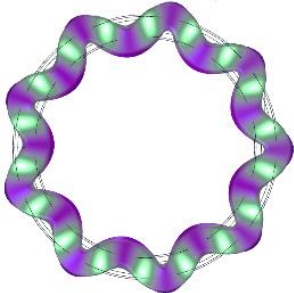
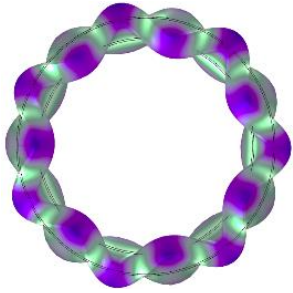
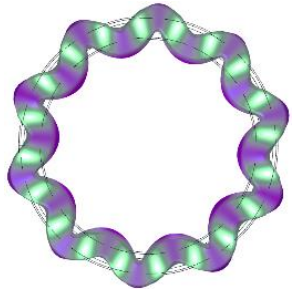
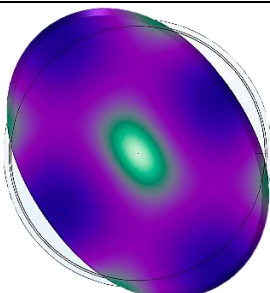
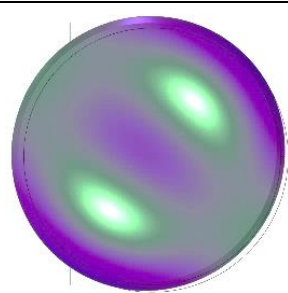
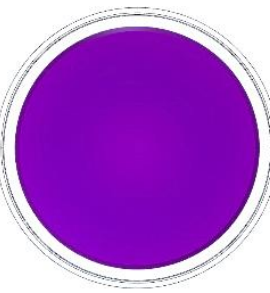
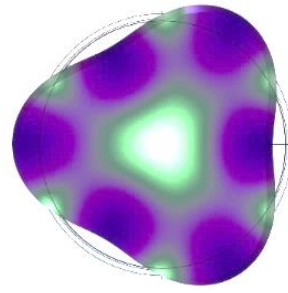
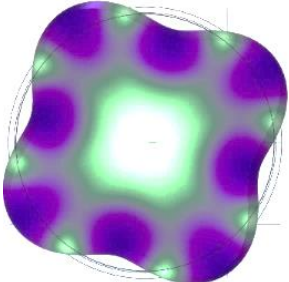
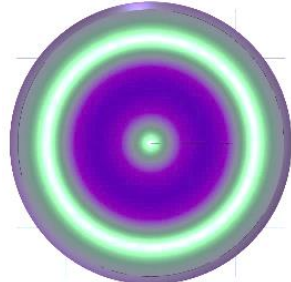
№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний	№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний
13	$28,88 \pm 0,02$		14	$30,73 \pm 0,04$	
15	$33,23 \pm 0,01$		16	$37,17 \pm 0,01$	
17	$38,17 \pm 0,02$		18	$43,63 \pm 0,38$	

Таблица 3.3 – Собственные частоты и форма колебаний образца натяга

№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний	№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний
1	$15,28 \pm 0,01$		2	$17,59 \pm 0,04$	
3	$21,46 \pm 0,02$		4	$23,35 \pm 0,16$	

№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний	№ п/п	Частота, кГц	Характерный вид колебаний
5	$30,12 \pm 0,41$		6	$33,42 \pm 0,03$	

Полученные при моделировании и в эксперименте собственные частоты находятся в достаточно тесной зависимости (рисунок 3.17), коэффициент корреляции для частот до 50 кГц не менее 0,99. Отклонение модели от эксперимента носит мультипликативный характер, при котором относительная разница частот не превышает 2 %. Для каждой экспериментально обнаруженной частоты удалось установить в соответствие моду колебаний модели и наоборот.

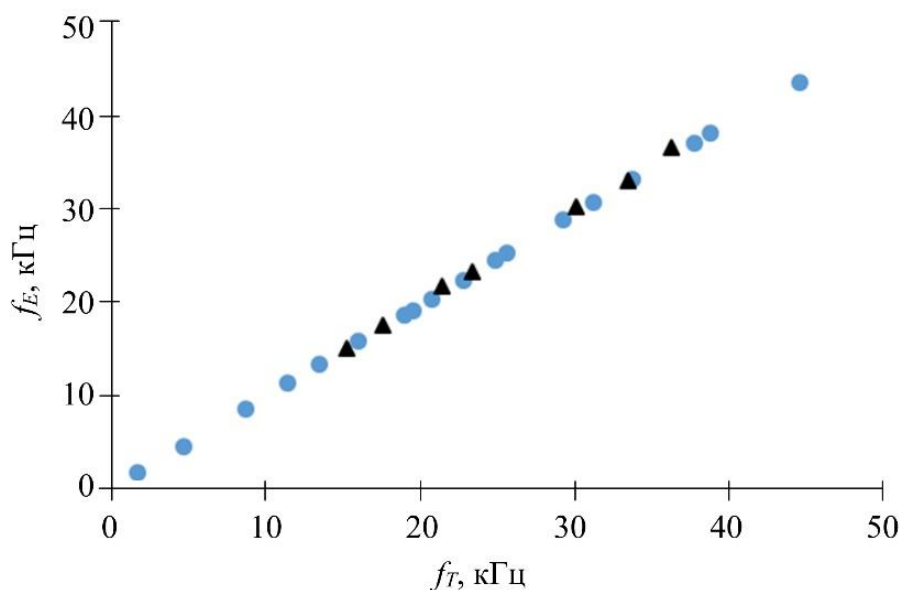


Рисунок 3.17 – Зависимости частот в спектре сигнала f_E от рассчитанных методом конечных элементов f_T для кольца (O) и образца (Δ)

Исследование затухания – процесса уменьшения амплитуды свободных колебаний проводилось с помощью бегущего окна, в котором вычислялся спектр сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье. Длительность окна составляла 12 мс, смещение окна на следующем шаге принималось равным 0,8 мс.

Развертка спектра сигнала во временной области приведена на рисунке 3.18, *а*. Все амплитуды гармоник являются убывающими во времени, однако часть из них убывают не монотонно, что связано с биениями сигнала, вызванного возбуждением на близких частотах колебаний, между которыми в начальный момент времени существует разность фаз.

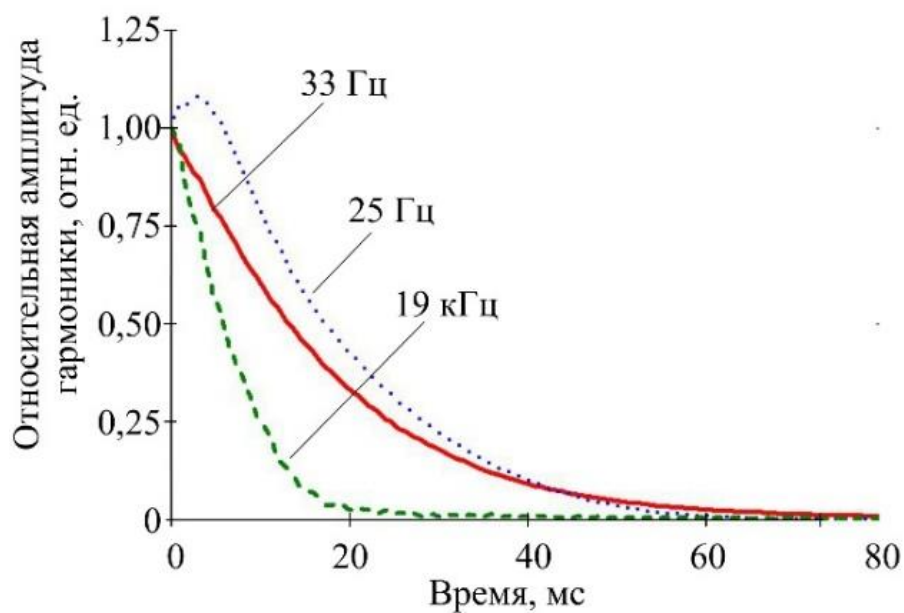
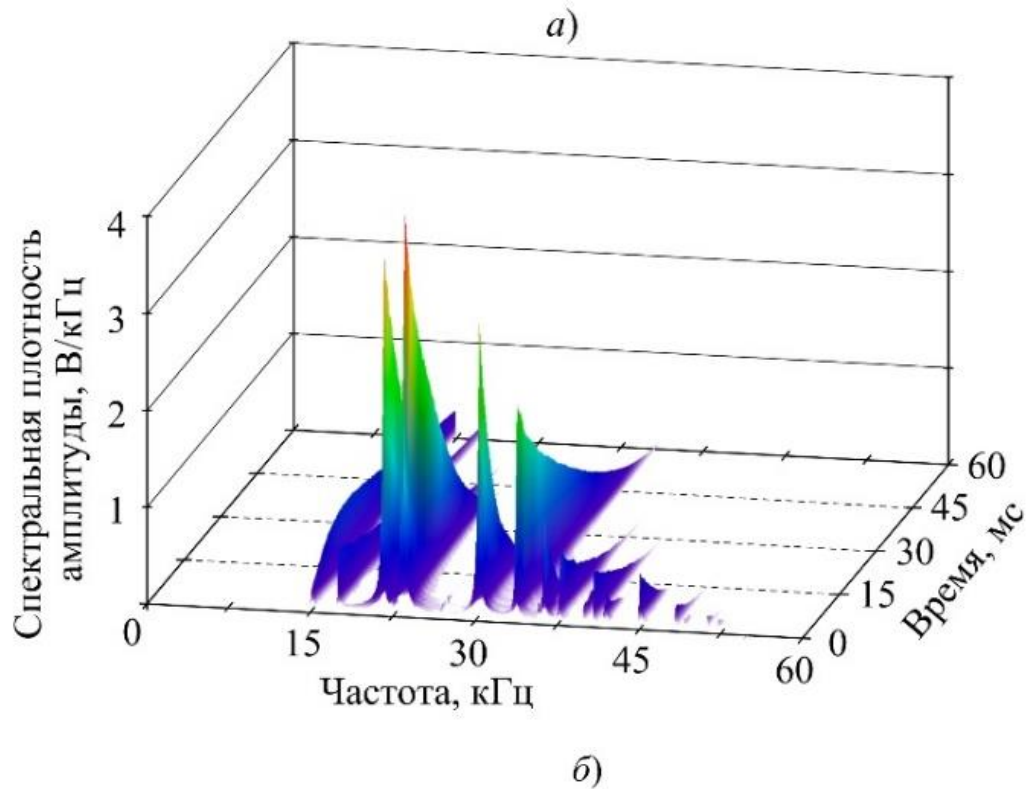


Рисунок 3.18. – Амплитудно-частотно-временная характеристика свободных колебаний образца натяга 40 мкм (*а*) и зависимость амплитуды гармоник свободных колебаний кольца подшипника от времени (*б*)

Небольшое отклонение частот $\Delta f = f_2 - f_1 \ll f_1, f_2$ приводит к медленному изменению разности фаз и, следовательно, изменению амплитуды колебаний как в сторону увеличения, так и в сторону ее уменьшения. На рисунке 3.19 иллюстрируется возбуждение на двух близких частотах двух идентичных мод колебаний 3-го порядка симметрии, имеющих разность фаз π рад. На рисунке 3.18, б показана зависимость амплитуды колебаний от времени с экспоненциальным законом на частоте 33 кГц, более быстрым уменьшением по сравнению с экспонентой – 19 кГц и с немонотонным изменением – 25 кГц. Характерные времена затухания, оцениваемые традиционным способом как знаменатель аргумента экспоненциальной функции, для разных гармоник составляют от 5 до 20 мс.



Рисунок 3.19 – Формы собственных колебаний кольца осевой симметрии одного n -го порядка:
а) 4,601 кГц; б) 4,599 кГц

Нарушение экспоненциального затухания, связанные с биениями, являются чувствительными к небольшим изменениям условий эксперимента таким, как параметры ударного воздействия бойка, способ крепления объекта контроля. Это определяет случайный характер изменений закона уменьшения амплитуды от времени, отсутствие повторяемости и делает невозможным использование зависимости амплитуды от времени для оценки состояния прессового соединения без разработки специализированных методик регистрации и анализа. Тем не менее разные времена затухания мод колебаний, позволяют избирательно обнаруживать медленно затухающие колебания простым сдвигом окна вычисления спектра от

времени удара.

В реальных условиях вагоноремонтного предприятия выполнены исследования спектров колебаний соединений колец подшипников, напрессованных на шейки осей, с различным техническим состоянием. Амплитудно-частотная характеристика рассчитывалась для интервала общей продолжительностью 26 мс. Для уменьшения влияния первоначального воздействия и искажения спектра интервал был сдвинут от момента удара на 0,4 мс.

Исследовались колесные пары с отрицательным натягом, когда кольцо подшипника свободно одевалось на шейку без использования специализированного пресса (рисунок 3.20 *а, б, в*), колесные пары со слабым натягом менее 5 мкм (рисунок 3.20 *д*.) и с нормативным значением натяга (рисунок 3.20 *г*). Акустические свойства прессовых соединений в значительной степени зависят от наличия загрязнений и масла в месте сопряжения кольца и оси, различие спектров соединений с маслом и с сухим контактом показано на рисунках 3.20 *а* и *б*, соответственно. Для повышения отношения сигнал/шум в спектре колебаний загрязненного соединения окно вычисления спектра сдвинуто дальше от момента удара на 3,2 мс, что позволило выделить колебания с меньшим временем затухания (рисунок 3.20 *б*).

Загрязненность маслом контактирующих поверхностей преобразует спектр к непрерывному типу, в котором практически отсутствуют однозначно идентифицируемые собственные частоты (рисунок 3.20 *а*). Это связано с уменьшением более чем в 400 раз амплитуды колебаний, при этом возрастает роль амплитудно-частотной характеристики формы (огibaющей) сигнала, которая превышает амплитуды гармоник. Смещение окна во временную область, где амплитуда сигнала убывает медленнее, позволило получить исходный линейчатый спектр (рисунок 3.20 *б*). При этом в нижней части спектра до 25 кГц однозначно обнаруживается 5 из 11 собственных частот свободного кольца, которые наблюдаются на соединениях без натяга и без масляных загрязнений. Применяемый способ не позволяет выделить частоты в верхнем диапазоне выше 25 кГц, так как они быстрее затухают при наличии масла.

Прессовые соединения с отрицательным натягом могут быть идентифицированы по наличию собственных частот свободных колец подшипников. Так на рисунок 3.20 в наблюдаются совпадения 11 частот прессового соединения с частотами свободного кольца.

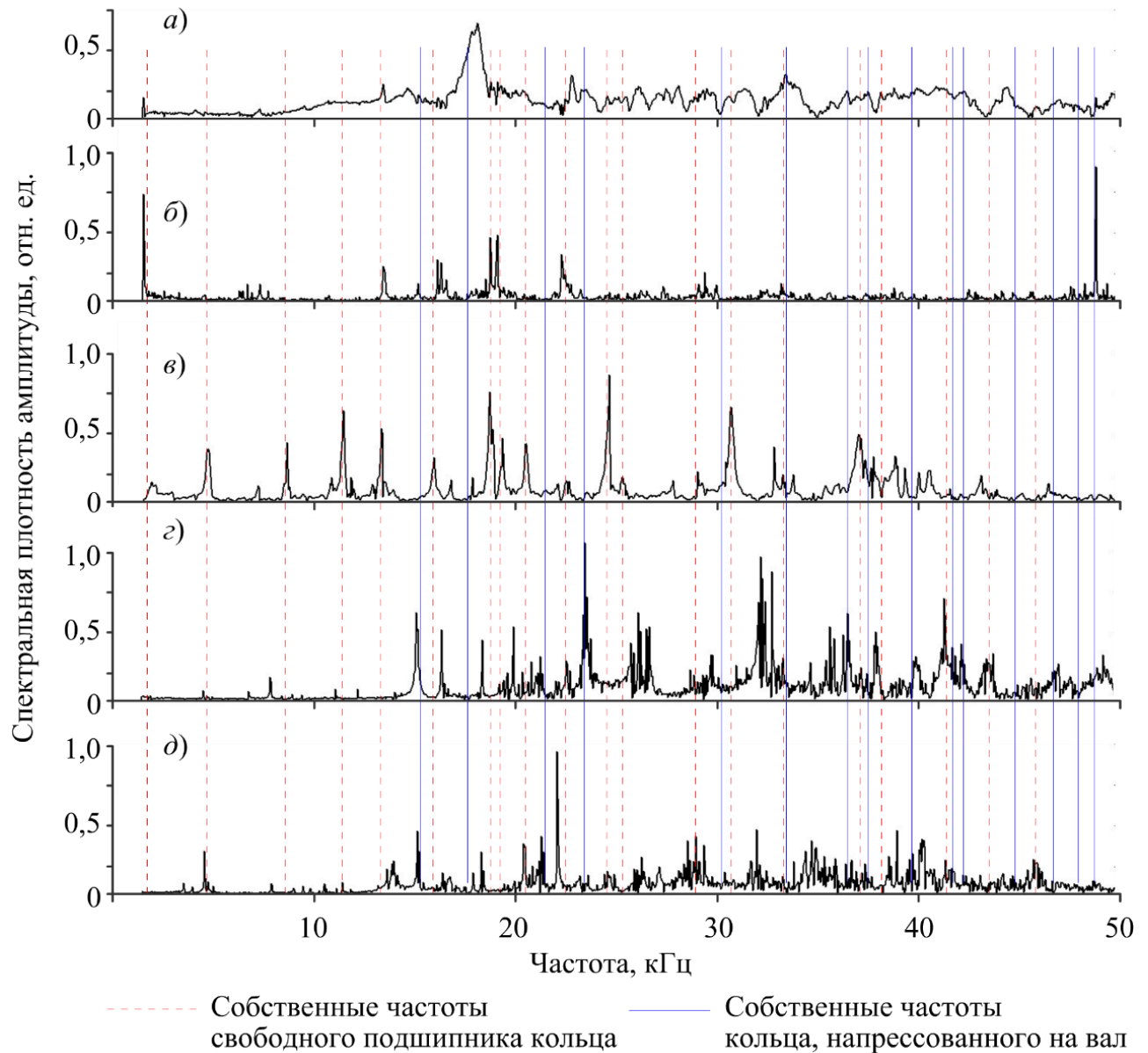


Рисунок 3.20 – Спектры свободных колебаний колец подшипников на шейках осей колесных пар: а) кольцо свободно вращается, шейка оси покрыта маслом; б) тоже, начало интервала вычисления спектра сдвинуто от начала сигнала на 3,2 мс; в) тоже, шейка оси сухая; г) и д) неподвижное соединение кольца с осью с натягом более 40 мкм и менее 5 мкм, соответственно

Амплитудно-частотные характеристики сигналов, возбуждаемых при ударном воздействии в реальных соединениях колец с осями с недопустимым, но положительным натягом (рисунок 3.20 д) и с нормативным натягом (рисунок

3.20 з), подобны и близки к спектру образцов натяга (рисунок 3.15). Спектральные линии на частотах менее 15 кГц практически отсутствуют, как и на образцах наблюдаются максимумы амплитуды на частотах 15,3 и 23,4 кГц. Слабый натяг соединения (рисунок 3.20 д) приводит к появлению отдельных гармоник, характерных для свободного кольца 4,6 и 20,4 кГц. Появление в спектре колебаний прессового соединения максимумов амплитуды на любой из собственных частот свободного кольца является критерием неплотности посадки кольца на шейку оси.

3.3 Выводы к третьей главе

На основе аналитической модели рассчитаны параметры отраженных акустических волн, прошедших через слой, разделяющий границы деталей прессового соединения или акустическую задержку и объект контроля. Показано, что влиянием переходного слоя можно пренебречь при более жестком условии, чем принято традиционно. Обосновано условие малости слоя $\Delta \ll \frac{\alpha}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{z_2}{z_3} \cdot \lambda_2$, где λ_2 – длина волны в контактном слое, мм; z_2 и z_3 – акустические сопротивления материалов слоя и принимающей ультразвуковую волну среды.

На основе акустической модели разработан и экспериментально реализован способ локального контроля плотности прессового соединения, основанный на регистрации многократно отраженных акустических импульсов и коэффициента пропорциональности логарифма амплитуды от номера импульса. Показана возможность обнаружения локальных мест с неплотным прилеганием кольца подшипника к шейке оси, в которых толщина масляного зазора превышает 1 мкм, при использовании прямого преобразователя продольных волн с частотой 5 МГц.

Экспериментально методом свободных колебаний и теоретически методом конечных элементов определены собственные частоты колец подшипников и образцов прессовых соединений колец и валов в диапазоне частот от 0,5 до 50 кГц. Относительное отклонение экспериментальных значений от теоретических не превышает 2 %.

Показано, что свободные колебания затухают с характерным временем от 2

до 30 мс. Зависимость амплитуды колебаний от времени удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией только для осесимметричных колебаний свободного кольца и соединения кольца с валом. Для других типов колебаний амплитуда сложным образом изменяется во времени, в том числе немонотонно. Явление биений связано с одновременным возбуждением на близких частотах двух и более колебаний, пучности и узлы которых в пространстве не совпадают. Биения сильно зависят от начальных условий и чувствительны к малым изменениям первоначального воздействия.

Для избирательного обнаружения медленно затухающих гармоник предложен и реализован способ, основанный на выборе временного «окна» сигнала. Смещение «окна» вычисления спектра относительно начала сигнала на время Δt позволяет повысить относительную амплитуду гармоник, характерное время затухания которых больше неинформативных составляющих спектра сигнала.

Критерием неплотности прилегания кольца подшипника к шейке оси колесной пары является наличие в спектре свободных колебаний прессовых соединений собственных частот свободного кольца. Для соединения, в котором кольцо свободно надето на ось без натяга, однозначно обнаруживаются 9 собственных частот свободного кольца из 11 в диапазоне от 0,5 до 25 кГц. Добавление индустриального масла в соединении между кольцом и шейкой оси снижает амплитуду информативных гармоник в 500 раз, при этом отдельные гармоники в спектре не идентифицируются. Для их регистрации может быть использовано смещение интервала быстрого преобразования Фурье на 3,2 мс, что позволяет повысить амплитуду информативных составляющих сигнала и однозначно идентифицировать 5 собственных частот спектра свободного кольца подшипника.

В условиях вагоноремонтного предприятия показано, что в спектре свободных колебаний прессовых соединений колец подшипников с шейками осей колесных пар с нормативным натягом от 40 до 110 мкм в диапазоне частот от 0,5 до 25 кГц отсутствуют гармоники на собственных частотах свободных колец

подшипников. Неплотность прилегания кольца к шейке оси является причиной появления гармонических затухающих колебаний хотя бы на одной собственной частоте свободного кольца. Разработанный способ может быть использован для оценки надежности прессовых соединений колец подшипников на валы и оси колесных пар.

4 Разработка критериев плотности посадки колец подшипников на шейку оси колесной пары интегрально-резонансным методом акустического контроля

4.1 Функциональная схема прибора УДС1-СИН

Для оценки плотности посадки внутренних колец подшипников на ось колесной пары применяется ультразвуковой прибор УДС1-СИН, в котором используются свойства объекта контроля: накапливать энергию ультразвуковых колебаний на собственных частотах при периодическом внешнем воздействии, поглощать и рассеивать энергию ультразвуковых свободных колебаний после прекращения внешнего воздействия. В разделе 3.2 показано, что значения резонансных частот и коэффициенты затухания колебаний связаны с плотностью прилегания и состоянием сопряжения кольца подшипника с шейкой оси колесной пары.

Параметры контакта сопрягаемых деталей прессового соединения, такие как плотность прилегания и зазор, определяют закономерности изменения амплитуды вынужденных и свободных колебаний элементов прессового соединения – кольца подшипника. В результате воздействия на кольцо акустических сигналов с различным периодом и длительностью в прессовом соединении формируются колебания, продолжительность которых после прекращения внешнего воздействия является информативным параметром, по которому судят о прочности соединения.

Прибор УДС1-СИН разработан в 2000-х годах и внесен в Государственный реестр средств измерений под № 21975-09 от 08.05.2018 г. для контроля прессовых соединений, полученных методом тепловой посадки. В 2010-2015 гг. в произошла смена технологии и для формирования соединений колец осей с шейкой оси используется прессовая посадка. При этом виде посадки контакт поверхностей соединяемых деталей заполнен смазкой, которая существенно изменяет акустические свойства соединений и, следовательно, сигналы прибора. В 2019 году прибор был усовершенствован и реализован на новой современной

микропроцессорной базе. Все это определило необходимость повторной разработки методики и адаптации критериев браковки для реализации в приборе УДС1-СИН.

Функциональная блок-схема разработанного прибора приведена на рис. 4.1. Прибор включает в себя пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) и электронный блок (ЭБ), состоящий из двух функциональных блоков: аналогового (АБ) и блока микроконтроллера (БМ). Последний взаимодействует с электронно-вычислительной машиной (ЭВМ) через цифровой интерфейс USB 2.0. Электронно-вычислительная машина взаимодействует с оператором с использованием ПО для операционной системы Android «УДС1-СИН» (Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № RU 2020615523 от 25.05.2020 г.).

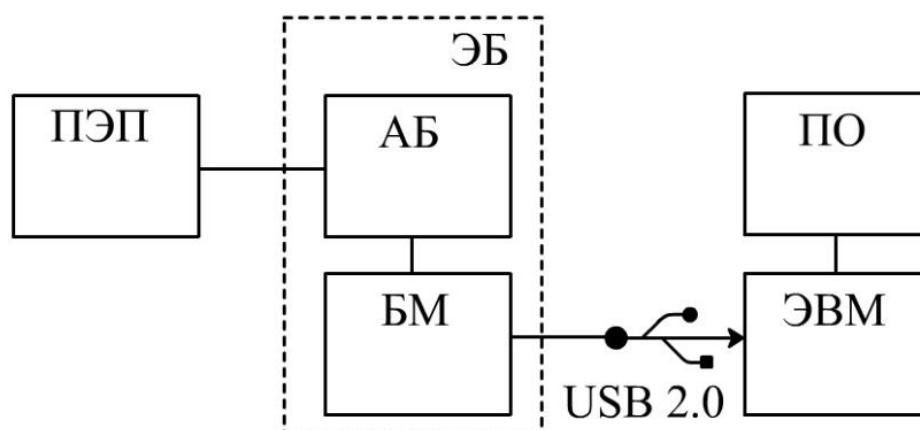


Рисунок 4.1 – Функциональная блок-схема прибора

Блок микроконтроллера обеспечивает формирование периодических цифровых сигналов различной длительности и частоты для возбуждения преобразователя и регистрацию параметров сигналов, поступающих от преобразователя, обработку данных контроля, выдачу результатов о разности диаметров соединения внутреннего кольца подшипника и оси колёсной пары, обмен цифровой информацией с электронно-вычислительной машиной через интерфейс USB.

Аналоговый блок в режиме излучения преобразует цифровые сигналы от блока микроконтроллера в электрическое напряжение, подаваемое на преобразователь, а в режиме приема аналоговый сигнал, поступающий с

преобразователя, реализуется в цифровой для последующей передачи в блок микроконтроллера для цифровой обработки.

Электронно-вычислительная машина через USB-интерфейс осуществляет питание электронного блока, передачу команд и прием результатов контроля. Электронно-вычислительная машина с программным обеспечением делает возможным взаимодействие с пользователем: ввод сведений о контролируемом соединении, получение и передача команды выполнения контроля, представление пользователю и хранение результатов контроля. Внешний вид прибора, устанавливаемого на систему сопряжения внутреннего кольца подшипника с осью колесной пары в корпусе, представлен на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Внешний вид прибора УДС1-СИН: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку; *в* – контактная поверхность

В комплект прибора входит:

- зарядное устройство для планшета, выступающего в роли электронно-вычислительной машины (поз. 1 на рисунке 4.3);

- планшет, используемый для ввода сведений о контролируемом соединении, получении и передаче команды выполнения контроля, представления пользователю и хранения результатов контроля (поз. 2 на рисунке 4.3);
- кабель для соединения прибора УДС1-СИН с планшетом (поз. 3 на рисунке 4.3);
- прибор УДС1-СИН (поз. 4 на рисунке 4.3);
- емкость для контактной жидкости, обеспечивающей прохождение акустического сигнала через границу протектора преобразователя с металлом кольца (поз. 5 на рисунке 4.3);
- ветошь (поз. 6 на рисунке 4.3);
- стандартный образец СОП-СИН с известным значением натяга (поз. 7 на рисунке 4.3).

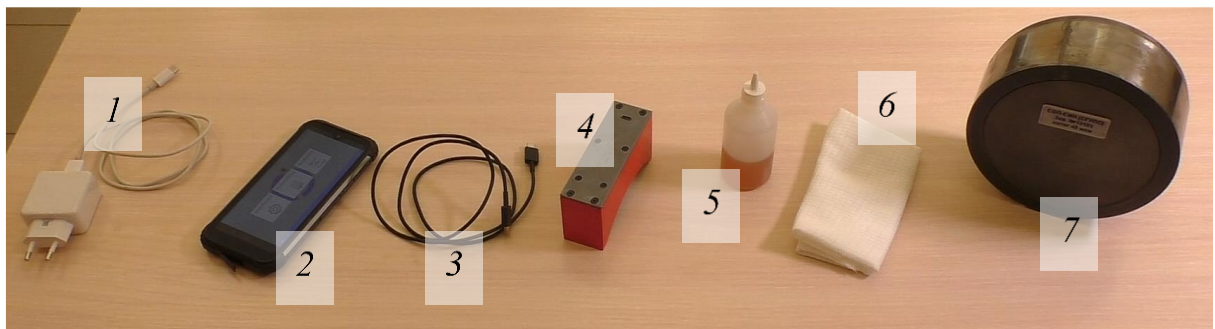


Рисунок 4.3 – Комплектация прибора УДС1-СИН

Обработка получаемой информации производится после аналого-цифрового преобразования в микропроцессорном устройстве программными средствами. Устройство позволяет генерировать прямоугольные сигналы с периодом от 2 до 64 мкс с постоянной амплитудой 5 В. Характерная форма представлена на рисунке 4.4. Число генерируемых периодов колебаний задается программно в диапазоне от 1 до 127.

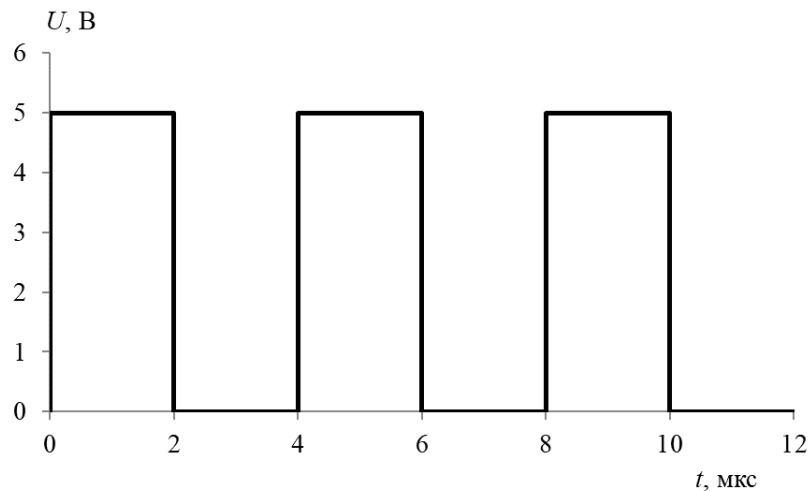


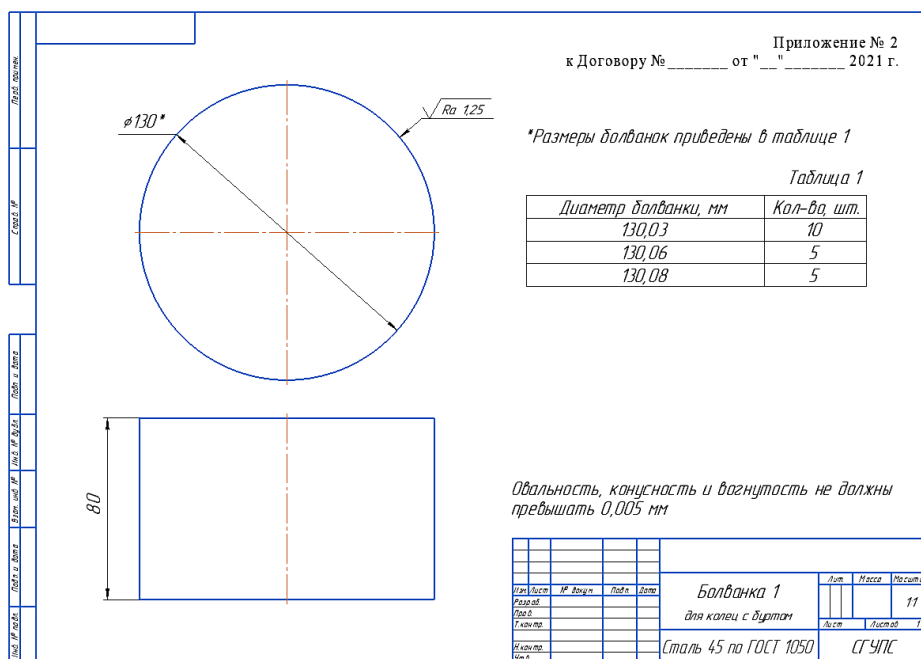
Рисунок 4.4 – Вид генерируемого прямоугольного сигнала с периодом 2 мкс и 3 импульсами, подаваемого на аналогово-цифровой преобразователь

В режиме излучения возбуждается определенное количество вынужденных колебаний с заданным периодом. В последующем сразу за режимом излучения режиме приема регистрируется количество и продолжительность свободных колебаний до их уменьшения ниже установленного порога дискриминации 10 мВ.

4.2 Стандартные образцы для калибровки и проверки работоспособности прибора

Были разработаны и изготовлены три стандартных образца СОП-СИН для калибровки и поверки работоспособности ультразвукового специализированного прибора УДС1-СИН, обеспечивающих минимальный (29 мкм), максимальный (126 мкм) и средний (72 мкм) значения натягов, и двадцать стандартных образцов СОП-СИН для проверки работоспособности прибора со значениями натяга в диапазоне от 38 до 119 мкм.

Стандартные образцы (образцы натяга) представляют собой элементы оси – болванки из стали 45 по [21], изготовленные по разработанным чертежам (рисунок 4.5), на которые напрессованы новые и бывшие в эксплуатации внутренние передние и задние кольца подшипников роликовых цилиндрических типа 36-42726E2M в соответствии с [8].



Кольца были отобраны исходя из их годности в соответствии с критериями оценки, приведенными в [64]. Кольца подвергались визуальному и измерительному контролю, магнитопорошковому контролю для обнаружения недопустимых дефектов. Шероховатость цилиндрических поверхностей контролировали

измерителем шероховатости TR200, у отобранных колец она не превышала 1,25 мкм.

Перед напрессовкой проводились измерения диаметра и формы (конусности, овальности) колец подшипников и стальных болванок. Для стандартных образцов, которые изготавливались с целью калибровки прибора УДС1-СИН, измерения проводились в ФГУП "ВНИИФТРИ" с погрешностью не более 1,5 мкм в соответствии с МИ 2106-90 «Кольца установочные к приборам для измерения диаметров отверстий». Все измерения проводили с помощью поверенного оборудования и государственного вторичного эталона единиц длины в диапазоне значений от 0 до 1000 мм ВЭТ 2-14-59 в сечениях, приведенных на рисунках 4.6 и 4.7.

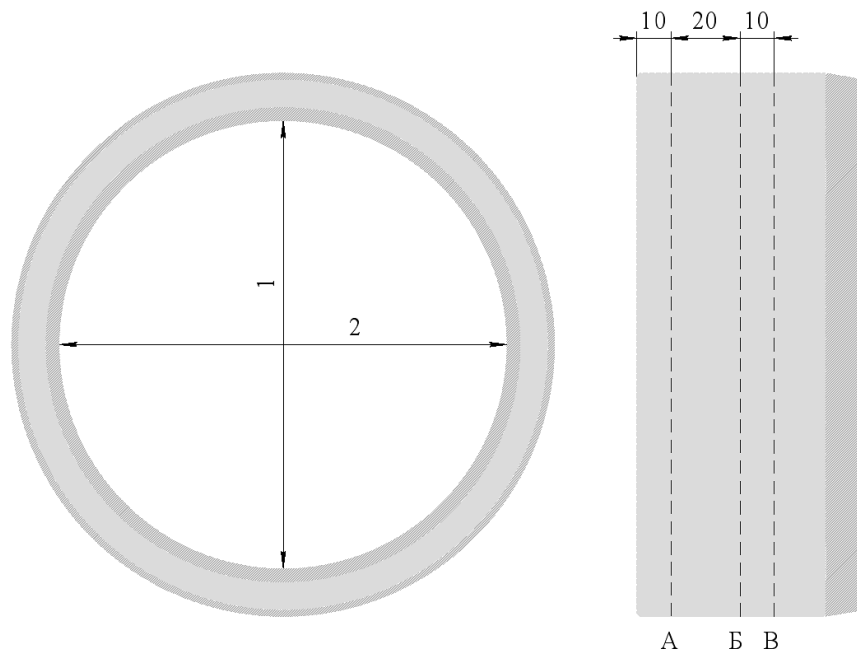


Рисунок 4.6 – Схема измерений внутренних диаметров колец в сечениях А, Б и В, где 1 и 2 – плоскости измерения

После проведения измерений проведена обработка результатов и вычисление неопределенности в соответствии с [12]. Расширенная неопределённость действительных измеренных размеров составила 1,5 мкм. Результаты измерений внутреннего диаметра колец подшипников, наружного диаметра цилиндрических элементов осей и полученная при прессовой посадке разность диаметров представлены для каждого образца в таблицах 4.1-4.3. После измерений для каждой

детали определялся средний внутренний диаметр d_v колец подшипников и средний наружный диаметр d_n элементов осей.

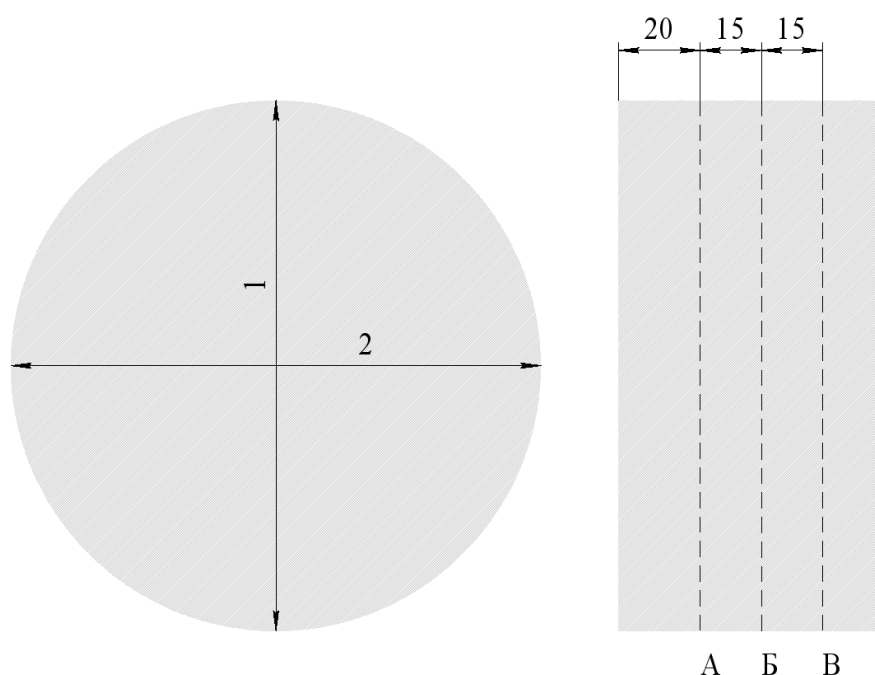


Рисунок 4.7 – Схема измерений диаметров стальных болванок в сечениях А, Б и В, где 1 и 2 – плоскости измерения

Таблица 4.1 – Данные измерений внутреннего диаметра кольца и наружного диаметра фрагмента оси меры № 1

Сечение	Внутренний диаметр кольца, мм		d_v , мм	Наружный диаметр оси, мм		d_n , мм	Отрицательная разница диаметров, мм
	Плоскость 1	Плоскость 2		Плоскость 2	Плоскость 1		
А	129,9860	129,9860	129,9856	130,0153	130,0150	130,0148	0,0293
Б	129,9855	129,9860		130,0147	130,0149		
В	129,9850	129,9850		130,0145	130,0146		

Таблица 4.2 – Данные измерений внутреннего диаметра кольца и наружного диаметра фрагмента оси меры № 2

Сечение	Внутренний диаметр кольца, мм		$d_{в}$, мм	Наружный диаметр оси, мм		$d_{н}$, мм	Отрицательная разница диаметров, мм
	Плоскость 1	Плоскость 2		Плоскость 2	Плоскость 1		
А	129,9840	129,9845	129,9839	130,0562	130,0558	130,0559	0,0720
Б	129,9840	129,9835		130,0561	130,0559		
В	129,9835	129,9840		130,0555	130,0559		

Таблица 4.3 – Данные измерений внутреннего диаметра кольца и наружного диаметра фрагмента оси меры № 3

Сечение	Внутренний диаметр кольца, мм		$d_{в}$, мм	Наружный диаметр оси, мм		$d_{н}$, мм	Отрицательная разница диаметров, мм
	Плоскость 1	Плоскость 2		Плоскость 2	Плоскость 1		
А	129,9825	129,9825	129,9814	130,1072	130,1077	130,1078	0,1263
Б	129,9810	129,9810		130,1080	130,1084		
В	129,9810	129,9805		130,1077	130,1075		

Результаты измерений оформлены в виде сертификата о калибровке № 10-1603 (рисунок 4.8).

Геометрические размеры стальных болванок, изготовленных с целью формирования образцов натяга для проверки работоспособности прибора УДС1-СИН, определялись на заводе-изготовителе. Внутренние диаметры колец подшипников измерялись прибором для измерения среднего диаметра отверстия внутренних колец подшипника – Модель 4152-130, штатным средством измерения вагонного ремонтного депо.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ»
(ФГУП «ВНИИФТРИ»)
Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ»
West-Siberian branch of Federal State Unitary Enterprise
«Russian metrological institute of technical physics and radio engineering»

Сертификат калибровки
Calibration certificate

Номер сертификата **10-12-2022** Дата калибровки **17.01.2022** Страница **1** из **2**
Certificate number Date when calibrated Page of

Объект калибровки: **Комплект образцов настроечных СОП-СИН**
Item calibrated: **наименование образца / средства измерения / идентификация**

Заказчик: **ФГБОУ ВО «СГУПС», ИНН 5402113155**
Customer: **наименование и контактные данные заказчика**

Метод калибровки: **МК 01-17-2021**
Method of calibration: **идентификация, наименование метода (дополнение), отклонение или исключение из метода**

Все измерения вносят погрешность к единицам Международной системы СИ, которые воспроизводятся национальными эталонами НМИ.
Данный сертификат может быть воспроизведен только полностью. Любая копия или частичное воспроизведение содержания сертификата являются нарушением правил НМИ, являющегося сертификатом.
All measurements are traceable to the SI units which are realized by national measurement standards of NMI.
This certificate shall not be reproduced, except in full. Any publication extracts from this calibration certificate requires written approval of the issuing NMI.

Утверждающая подпись:
Authorizing signature

Заместитель директора:
Deputy Director:
Начальник отдела:
Chief of Laboratory:

Дата выдачи:
Date of issue

Класс № **002829**

пр. Демитрова 4, г. Новосибирск, 630004, Россия, тел. (383) 2100814, факс. (383) 2101360 e-mail: director@vniiftri.ru
pr. Demitrova, 4, Novosibirsk, 630004, Russia, tel: (383) 2100814, fax: (383) 2101360 e-mail: director@vniiftri.ru

Сертификат калибровки
Calibration certificate

Номер сертификата **10-12-2022** Страница **2** из **2**
Certificate number Page of

Калибровка выполнена с применением: **См. приложение №1.**
Calibration is performed by using: **наименование эталонов и их статус / идентификация / доказательство прослеживаемости**

Условия калибровки: **температура воздуха 20 °C; относительная влажность 51%; атмосферное давление 100,9 кПа.**
Calibration conditions: **условия окружающей среды и другие влияющие факторы**

Результаты калибровки, включая неопределенность:
Calibration results including uncertainty: **См. приложение №1**

заявление о том, что результаты относятся только к объектам, прошедшим калибровку; результаты калибровки
См. приложение №1

Расширенная неопределенность получена путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата k = 2, соответствующий уровню доверия приблизительно равному 95 % при допущении нормального распределения. Оценки неопределенности проведены в соответствии с ГОСТ 34100.3.2-2017/ISO/IEC Guide 98-3:Suppl 2:2011. The expanded uncertainty is obtained by multiplying the combined standard uncertainty by a coverage factor k = 2 corresponding to a confidence interval of approximately 95 % assuming a normal distribution. The evaluation of uncertainty is conducted according to the ISO/IEC Guide 98-3:Suppl 2:2011.

Дополнительная информация:
Additional information: **Дата изучения объекта калибровки (при необходимости), составные объекты калибровки /**
расширенная неопределенность объекта калибровки до сих калибровки

Подпись лица, выполнившего калибровку: **Анфилофьева И.Д. инженер 2 кат.**
Signature of the person who has performed calibration: **И.Д. Анфилофьева**

Класс № **002829**

Приложение №1 к сертификату № 10-12-2022

Калибровка выполнена с помощью Calibration is performed by using	Государственный эталон единицы длины 3 разряда в диапазоне значений от 0 до 500 мм. Регистрационный номер № 3.1.ZZH.0095.2013. Государственный эталон единицы длины 1 разряда в диапазоне значений от 0,5 до 100 мм. Регистрационный номер № 3.1.ZZH.0046.2012			
Наименование эталонов и их статус / идентификация / доказательство прослеживаемости Description of the reference measurement standards / identification / evidence of traceability				
Результаты калибровки, включая неопределенность Calibration results including uncertainty				
Номер СОП-СИН	Диаметр вала, мм	Диаметр кольца, мм	Напряг, мм	Расширенная неопределенность измерений, мм
№1	130.035	129.980	0,055	0.0004
№2	130.020	129.945	0,075	0.0004
№3	130.043	129.945	0,0975	0.0005

Расширенная неопределенность получена путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата k = 2, соответствующий уровню доверия приблизительно равному 95 % при допущении нормального распределения. Оценки неопределенности проведены в соответствии с ГОСТ 34100.3.2-2017/ISO/IEC Guide 98-3:Suppl 2:2011. The expanded uncertainty is obtained by multiplying the combined standard uncertainty by a coverage factor k = 2 corresponding to a confidence interval of approximately 95 % assuming a normal distribution. The evaluation of uncertainty is conducted according to the ISO/IEC Guide 98-3:Suppl 2:2011.

Подпись лица, выполнившего калибровку

И.Д. Анфилофьева

Рисунок 4.8 – Сертификат калибровки колец подшипников и стальных болванок (фрагментов осей)

После измерений все внутренние кольца подшипников были с помощью прессы механически насажены на фрагменты осей. Способ посадки колец на болванки выбирали из условия максимального соответствия технологии посадки, применяемой в вагоноремонтном депо. На посадочные поверхности деталей

наносилась смазка ЭмПИ-1, предотвращающая их разрушение силами трения в процессе прессовой посадки. На первом этапе для обеспечения соосности выполнялась предварительная тепловая посадка колец подшипников на болванки на глубину от 10 до 20 мм (рисунок 4.9, а). Кольца нагревались в печи до температуры 120 °С, при которой не образуется коррозионных повреждений поверхности и изменения свойств материала колец подшипников (рисунок 4.9, б).

а)



б)



Рисунок 4.9 – Предварительная тепловая посадка колец подшипников на стальные болванки

Окончательно соединение формировалось при нормальных условиях на гидравлическом прессе (рисунок 4.10).

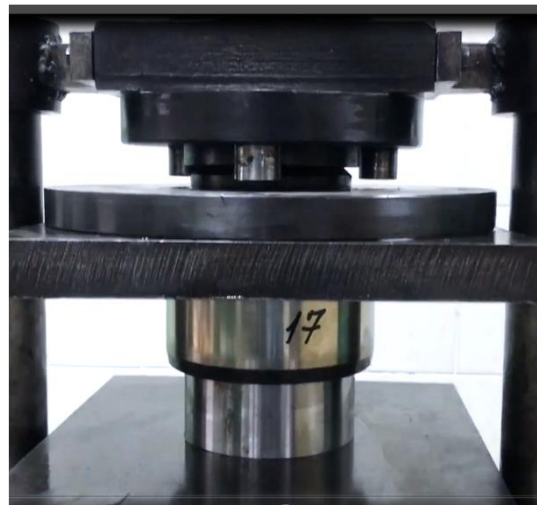


Рисунок 4.10 – Пресс для формирования образцов натяга

По результатам измерения усилий запрессовки образцов построены зависимости максимальной силы запрессовки и теоретически рассчитанных сил трения покоя (рисунок 4.11, *а*, поз. 1) и скольжения (рисунок 4.11, *а*, поз. 2), за счет которых кольца подшипников удерживаются на валах, от значения натяга (рисунок 4.11, *а*) для первой партии соединений. И зависимость максимальной силы запрессовки от значения натяга для всех изготовленных стандартных образцов (рисунок 4.11, *б*).

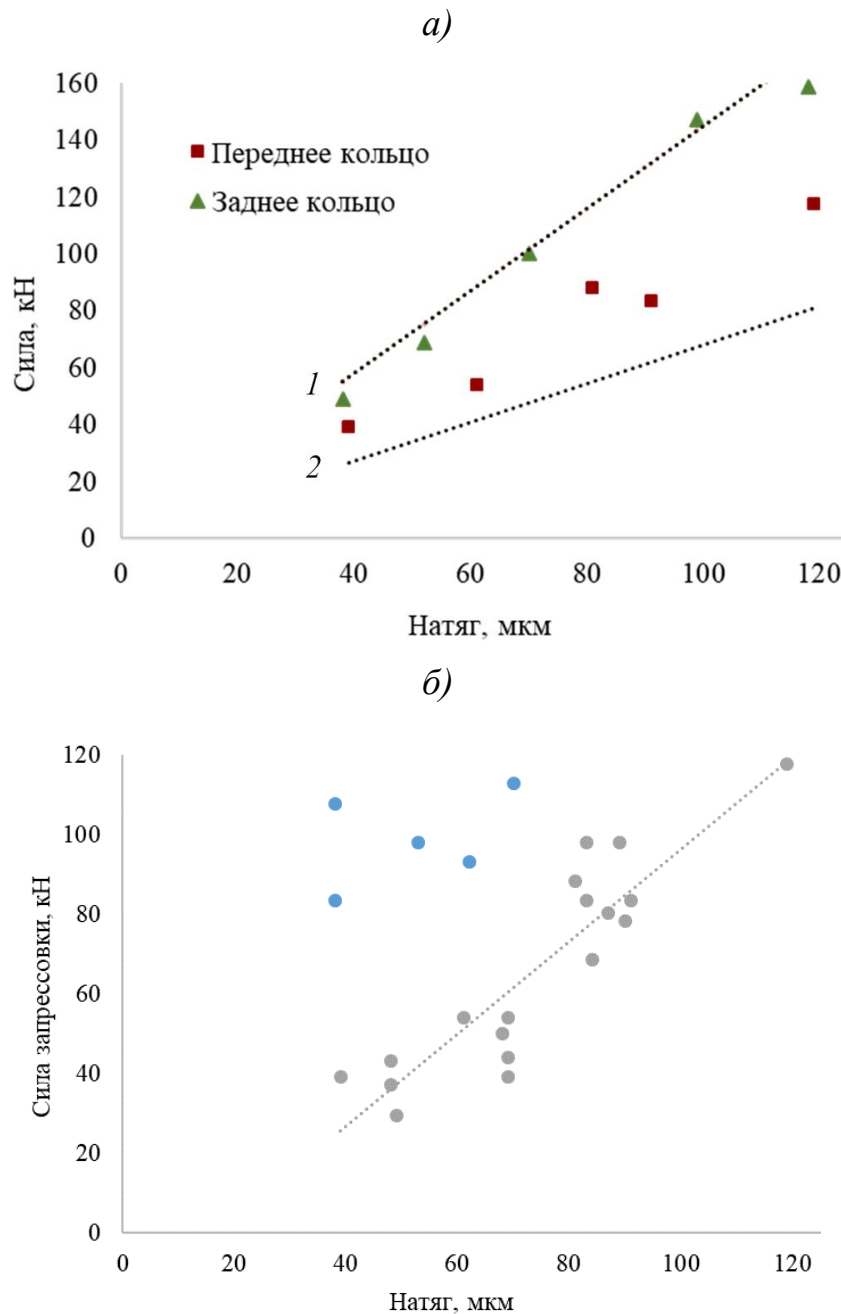


Рисунок 4.11 – Зависимости максимальной силы запрессовки и сил трения покоя (1) и скольжения (2) от значения натяга для стандартных образцов соединений (*а*) и настроенных образцов (*б*)

Отклонения экспериментальных значений силы запрессовки от расчетных значений силы трения скольжения не превышают 15 %. Силы трения были рассчитаны по формулам:

- для соединения с передним кольцом подшипника (рисунок 4.12, а)

$$F_{\text{тр}} = \frac{\mu \cdot 2 \cdot E \cdot \Delta D_{\min} \cdot h \cdot \pi \cdot l}{D_{\max}}, \quad (4.1)$$

- для соединения с задним кольцом подшипника (рисунок 4.12, б)

$$F_{\text{тр}} = \frac{\mu \cdot E \cdot \Delta D_{\min} \cdot 2 \cdot (h \cdot 0,8 + (h + h') \cdot 0,2) \cdot \pi \cdot (l + l')}{(D_{\max} \cdot 0,8) + ((D_{\max} + 2 \cdot h') \cdot 0,2)}, \quad (4.2)$$

где μ – коэффициент трения: скольжения – 0,09; покоя – 0,15; экспериментально установленный – 0,11; E – модуль Юнга, Па; $\Delta D_{\min}$ – натяг, м; $D_{\max}$ – внешний диаметр кольца подшипника, м.

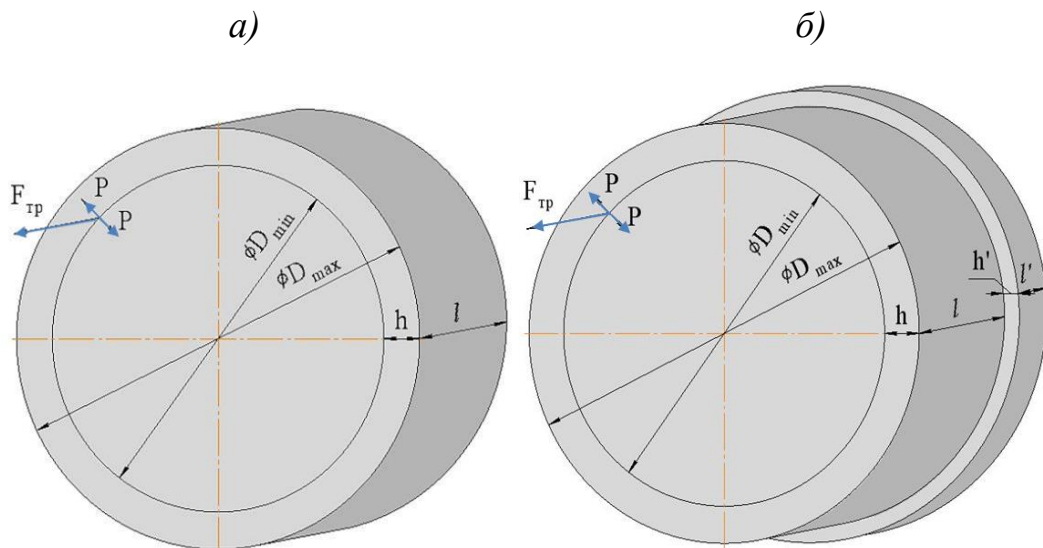


Рисунок 4.12 – Модели переднего безбуртового (а) и заднего буртового (б) колец подшипников с обозначениями основных параметров для расчета сил трения, удерживающих кольца на валах

Аппроксимация зависимостей экспериментальных данных, представленных на рисунке 4.11, выполнена методом наименьших квадратов с коэффициентом корреляции не менее 0,96 для передних колец подшипников:

$$F = 0,9 \cdot \Delta d - 1,3 \quad (4.3)$$

и не менее 0,98 для задних колец подшипников:

$$F = 1,4 \cdot \Delta d - 3,8, \quad (4.4)$$

где F – максимальная сила запрессовки, кН; Δd – натяг, мкм;

Из уравнений (4.3) и (4.4), следует, что на каждые 1 мкм натяга сила трения увеличивается на 0,9 кН для соединений с передними кольцами и на 1,4 кН для соединений с задними кольцами подшипника. В допустимом диапазоне натягов от 45 до 110 мкм предельные значения силы трения в соединениях составят от 43 до 155 кН.

Изготовленные стандартные образца (рисунок 4.13) воспроизводят прессовое соединение: напряжения в материале кольца подшипника и оси, работу контактного слоя «кольцо–зазор–вал».



Рисунок 4.13 – Готовые соединения колец подшипников со стальными болванками

4.3 Методика и критерии браковки плотности прилегания кольца подшипника к шейке оси

Разработка критериев браковки прессовых соединений прибором УДС1-СИН проводилась на следующих объектах:

- кольца подшипников в свободном состоянии, соответствующие требованиям, предъявляемым к ним ремонтной документацией и документацией на их изготовление;
- изготовленные стандартные образцы СОП-СИН;
- кольца, надетые на ось вручную без натяга;
- соединения с заполненным индустриальным маслом зазором между контактирующими поверхностями кольца и оси;
- «сухое» соединение;

- кольца, напрессованные на ось в вагонном ремонтном депо с плотной посадкой (натяг от 40 до 60 мкм);
- кольца, напрессованные на ось в вагонном ремонтном депо со слабой посадкой с натягом 5 мкм;
- дефектное кольцо с трещиной, установленное на ось.

Цикл контроля включал в себя посылку импульсов в исследуемый объект с разным последовательно увеличивающимся количеством и периодом вынужденных колебаний. Дискретность изменения периода составляла 2 мкс. В результате контроля определяется двухмерная матрица количества зарегистрированных свободных колебаний, превышающих установленный порог в зависимости от периода и числа вынужденных колебаний. Графически матрица представляет собой трехмерный график, в котором по одной оси изменяется период (частота), а по другой оси – количество вынужденных колебаний, по оси аппликат – время до уменьшения амплитуды ниже порогового уровня (рисунок 4.14).

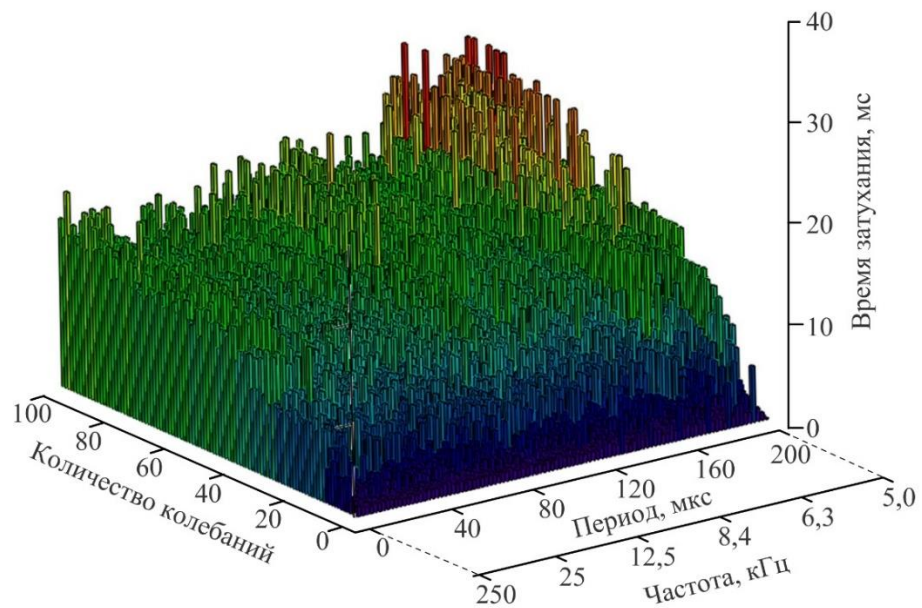


Рисунок 4.14 – Пример трехмерного графика матрицы отражений УДС1-СИН

На каждом объекте проводили по пять измерений в разных точках, равномерно распределенных по кругу катания. Результаты измерений в разных точках одного и того же комплекта сопряженных деталей отличаются слабо, и

колебания каждого пакета отражений, и их суммарное число отражений отклонялись от среднего не более, чем на 15 %.

Для сглаживания графика и упрощения последующих вычислений усредняли матрицу по частоте, разбивая её на интервалы от 20 до 30 кГц. Внешний вид матрицы после усреднения представлен на рисунке 4.15.

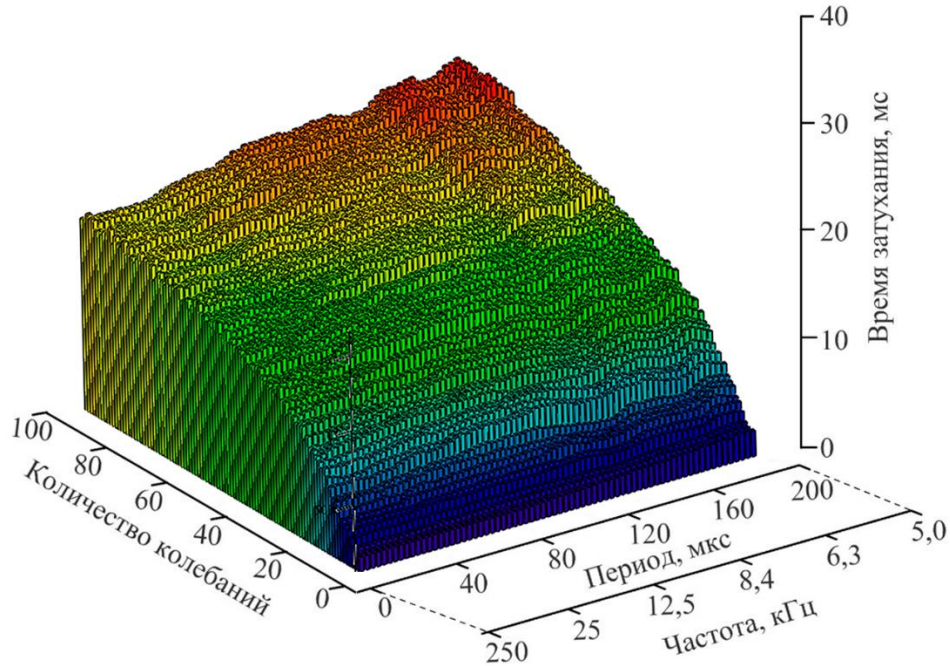
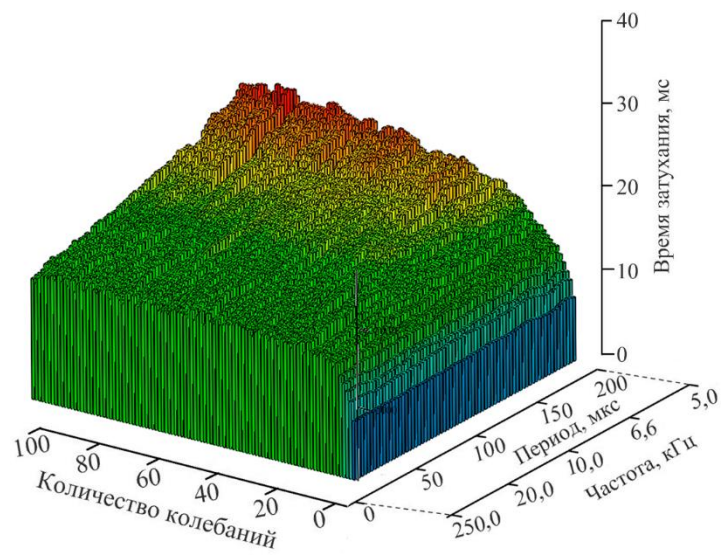


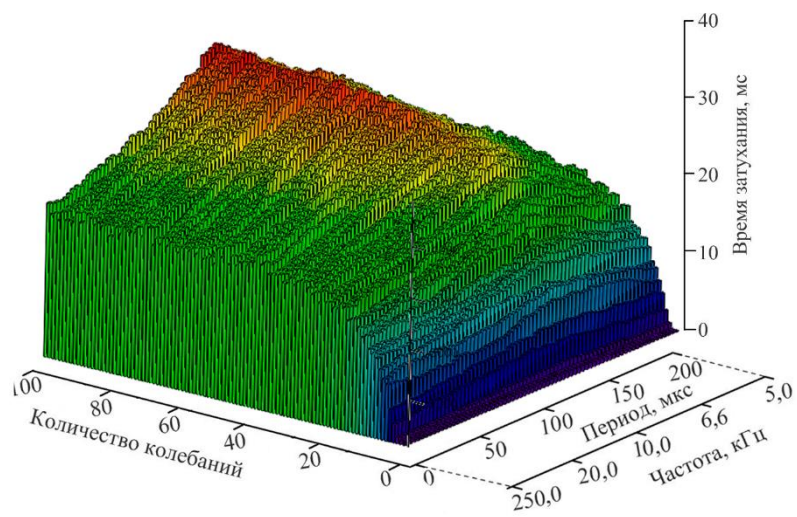
Рисунок 4.15 – Пример трехмерного графика матрицы отражений УДС1-СИН после усреднения по частоте

Для колец в свободном состоянии (рисунок 4.16, *а*), колец, надетых на ось с зазором (рисунок 4.16, *б*), и кольца, напрессованного на ось с трещиной (рисунок 4.16, *в*), при последовательной посылке импульсов не происходит «накачка» сигналов, амплитуда не увеличивается, время до уменьшения амплитуды ниже порогового уровня не растет (рисунок 4.17). Это связано с высоким декрементом колебаний для свободного кольца и затуханием колебаний на определенных частотах в масляной прослойке между кольцом и осью или на трещине для колец со слабым натягом соответственно и напрессованных на ось с трещиной.

a)



б)



в)

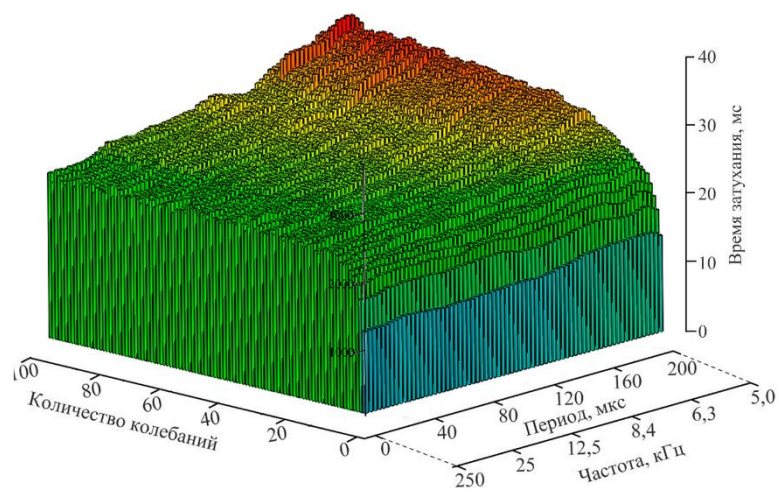


Рисунок 4.16 – Трехмерные графики матриц отражений УДС1-СИН от кольца в свободном состоянии (а), кольца, надетого на ось с зазором (б), кольца, напрессованного на ось с трещиной (в)

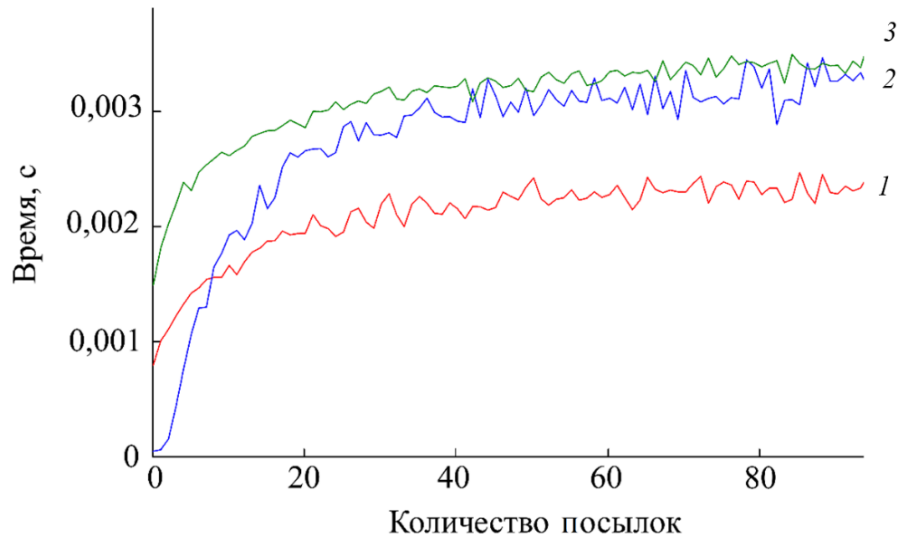


Рисунок 4.17 – Зависимости времени уменьшения амплитуды импульсов до порогового уровня от количества посылок для кольца в свободном состоянии (1), кольца, надетого на ось с зазором (2), кольца, напрессованного на ось с трещиной (3)

Для колец подшипников, напрессованных на ось колесной пары в вагонном ремонтном депо, с гарантированным натягом при последовательной посылке импульсов происходит накопительный эффект незатухающих сигналов. Время до уменьшения амплитуды ниже порогового уровня растет (рисунок 4.18, 4.19).

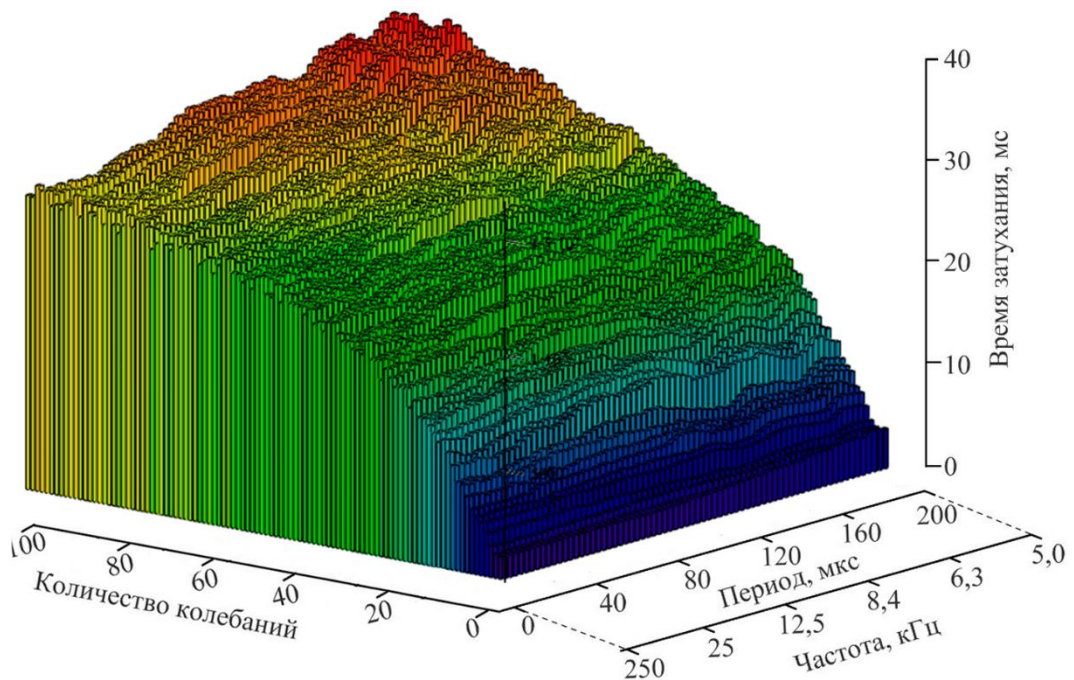


Рисунок 4.18 – Трехмерный график матрицы отражений УДС1-СИН для кольца, напрессованного на ось с гарантированным натягом



Рисунок 4.19 – Зависимости времени уменьшения амплитуды импульсов до порогового уровня от количества посылок для кольца, напрессованного на ось с гарантированным натягом

Таким образом, в качестве главного оцениваемого показателя выбран рост времени до затухания амплитуды ниже порогового уровня с увеличением количества посылок (рисунок 4.20). По данной зависимости вычисляли основной критерий браковки:

$$K = \sum_{n=20}^{30} t / \sum_{n=60}^{70} t, \quad (4.5)$$

где n – количество посылок импульсов; t – время до затухания амплитуды ниже порогового уровня, с.

По результатам экспериментальных исследований и исходя из допустимого диапазона значений натяга согласно [64], определено пороговое значение критерия браковки $K_0 = 0,65$. Если отношение, вычисленное по формуле (4.5), превышает K_0 , то натяг исследуемого соединения соответствует нормативной плотности. Соответственно, при $K < K_0$ соединение считается неплотным и бракуется (рисунок 4.21).

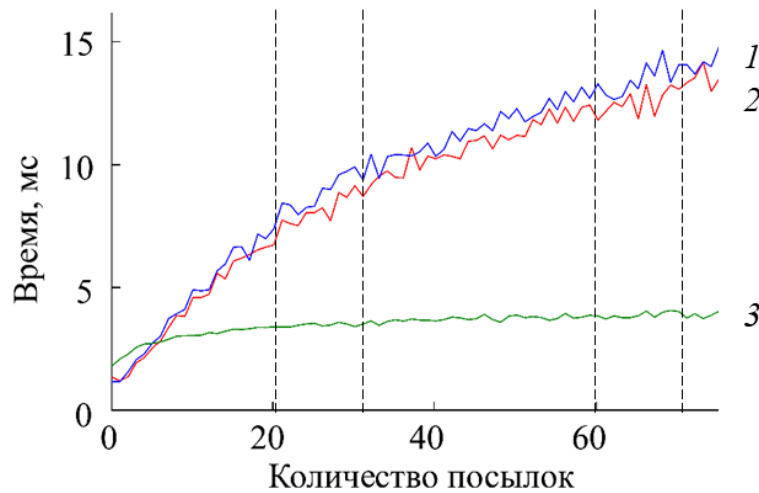


Рисунок 4.20 – Зависимости времени уменьшения амплитуды импульсов до порогового уровня от количества посылок свободного кольца (1), кольца, напрессованного на ось с трещиной (2) и соединения с натягом (3)

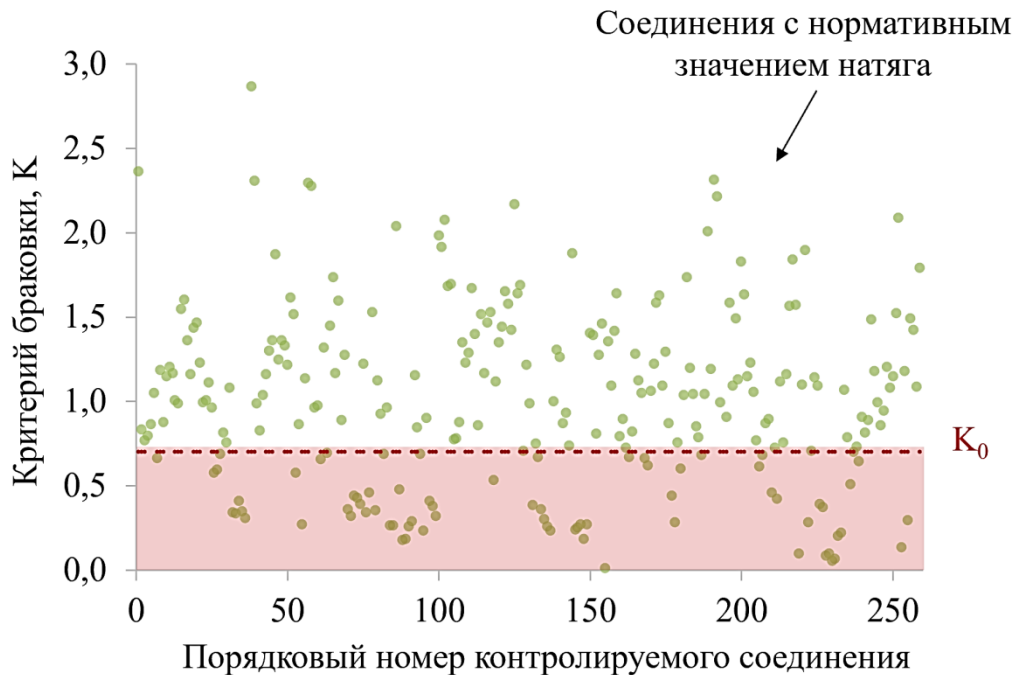


Рисунок 4.21 – Диаграмма распределения критерия браковки для всех исследуемых соединений

При проведении экспериментальных исследований на стандартных образцах УДС1-СИН матрица существенно отличается от представленных выше. Даже после её усреднения по частоте она имеет совершенно другой характер изменения при увеличении количества посылок и длительности импульсов. Несмотря на то, что матрицы, полученные в результате регистрации сигналов, отраженных от стандартных образцов СОП-СИН существенно отличаются от матриц, построенных в результате измерений колец, напрессованных на шейки оси,

оценив характер затухания для каждого стандартного образца по результатам экспериментальных исследований, можно проводить на них достоверную настройку и калибровку (поверку) прибора УДС1-СИН.

4.4 Программное обеспечение для работы с прибором УДС1-СИН

Для проведения измерений с передачей данных в портативный персональный компьютер совместно с программистами научно-исследовательской лаборатории «Физические методы контроля качества» на базе Сибирского государственного университета путей сообщения (НИЛ «ФМК» СГУПС) разработано программное обеспечение и связь с измерительным блоком с помощью кабеля. Вклад автора заключается в участии в разработке интерфейса, алгоритмов обработки первичных сигналов с преобразователя и критериев браковки.

Программа работы с устройством измерения натяга УДС1-СИН имеет удобный интерфейс, позволяющий выбрать необходимый режим работы в окне визуализации главного меню программы (рисунок 4.23) в зависимости от решаемой задачи. Программа реализует три основных визуализированных режима работы:

- режим контроля – непосредственное проведения контроля натяга с запоминанием и сохранением результатов;
- режим работы по просмотру и переносу результатов контроля на другие электронные устройства;
- режим настройки на мерах, позволяющий провести коррекцию измеряемых параметров.

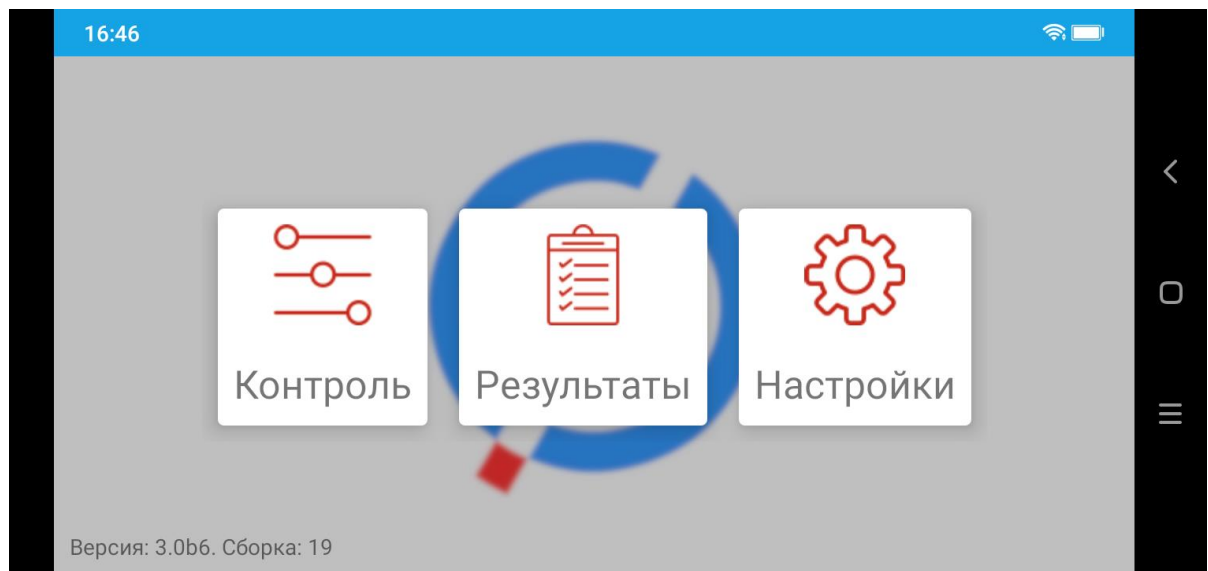


Рисунок 4.23 – Окно главного меню программы управления работой прибора УДС-1СИН

В режиме настройки (рисунок 4.24) есть возможность:

- изменять номер прибора, подключенного к портативному персональному компьютеру, на который передается измерительная информация и реализуются параметры настройки;
- включать режим непосредственных измерений на мерах для корректировки параметров связи измеряемых параметров импульсов с величиной разности диаметров, сопрягаемых в прессовом соединении оси и кольца;
- обновлять программное обеспечение устройства при наличии подключения к сети Интернет;
- получить матрицу результатов измерений.

Для проведения контроля необходимо зайти в одноименный режим в главном окне меню программы. После ввода данных специалиста и номера оси, на которой будут проводиться измерения, реализуется режим непосредственного измерения. Измерения инициируются последовательно на каждом кольце, при нажатии на виртуальный образ этого кольца (рисунок 4.25).

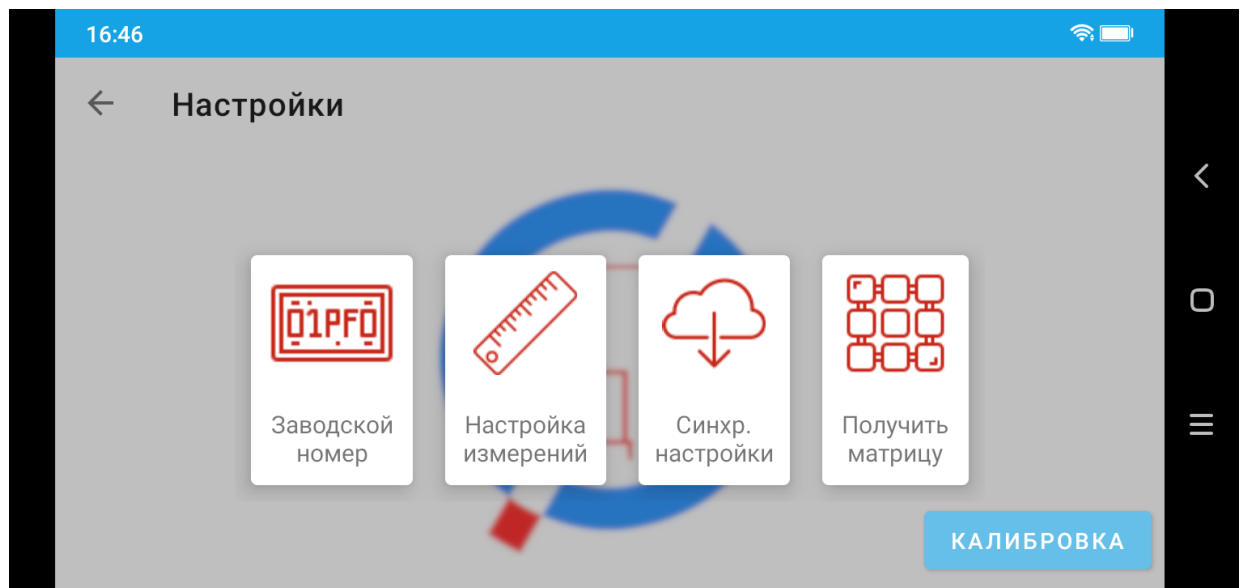


Рисунок 4.24 – Окно меню настройки прибора УДС1-СИН



Рисунок 4.25 – Визуализация измерений на всех кольцах заданной оси

После проведения измерений есть возможность сохранить результаты, сформировав виртуальный протокол результатов, нажав виртуальную клавишу «Сохранить протокол», и перейти к измерениям на другую ось, нажав виртуальную клавишу «Новая ось».

После проведения измерений или в любой другой момент дефектоскопист может просмотреть результаты контроля в режиме журнала результатов (рисунок 4.26).

02:29

Номер коленной пары: 222 Дата и время: 02.07.2021 02:27:38

Специалист: ИВАНОВ ИВАН ИВАНОВИЧ

Левое переднее, мкм: 70

Левое заднее, мкм: < 45

Правое переднее, мкм: < 45

Правое заднее, мкм: < 45

Брак

Номер коленной пары: 55 Дата и время: 02.07.2021 02:28:57

Специалист: ИВАНОВ ИВАН ИВАНОВИЧ

Левое переднее, мкм: 70

Левое заднее, мкм: 71

Правое переднее, мкм: 70

Правое заднее, мкм: 69

Годно

Рисунок 4.26 – Окно результатов контроля

В режиме просмотра результатов контроля, который переносится и в электронном виде, в том числе и по сети, отображаются:

- номер проконтролированной оси;
- фамилия, имя и отчество дефектоскописта, который проводил измерения;
- цифровые результаты величины натяга по каждому внутреннему кольцу подшипника на оси с цветовым выделением колец с допустимой и недопустимой величиной разности диаметров осей колесных пар и насаженных колец подшипника;
- дата проведения измерений;
- заключение о состоянии колесной пары, на основании которого принимается решение об объеме последующего ремонта.

4.5 Выводы к четвертой главе

Для метрологического обеспечения прибора УДС1-СИН разработана технология и изготовлены образцы натяга прессовых соединений колец подшипников и валов в диапазоне от 20 до 120 мкм. Создана метрологическая и

конструкторская документация образцов. Погрешность воспроизведения разности диаметров в системе посадки с натягом не превышает 1,5 %.

Экспериментально показано, что максимальные усилия напрессовки и, следовательно, усилия сдвига линейно зависят от натяга с коэффициентом корреляции не менее 0,96. Для передних «безбуртовых» колец подшипников коэффициент пропорциональности усилия напрессовки составляет 0,9 кН/мкм, задних «буртовых» 1,4 кН/мкм, что соответствует коэффициенту трения покоя 0,15, трения скольжения 0,09.

С использованием образцов натяга, эталонных колесных пар с надетыми кольцами подшипников, колесных пар с «проворотом» колец и ослабленной посадкой разработаны критерии предельного состояния плотности прессового соединения интегрально-резонансным методом, реализованном в приборе УДС1-СИН. Критерий основан на отношении среднего времени затухания до порогового уровня колебаний поверхности кольца подшипника в диапазоне частот от 30 до 100 кГц при возбуждении колебаний 10-20 импульсами к аналогичной величине при 75-85 импульсах. Отношение является показателем добротности объекта контроля и характеризует способность прессового соединения накапливать и рассеивать энергию колебаний. Установленное в условиях вагоноремонтного предприятия критическое значение отношения составило 0,65. Вероятность ошибки браковки годных прессовых соединений не превышает 1 %, вероятность пропуска дефекта не более 5 %.

Разработанные критерии и интерфейс реализованы в программном обеспечении прибора УДС1-СИН, внедренном в четырех вагонных ремонтных депо ООО «НВК» (Приложение А) и шести депо ОАО «ВРК-1» (Приложение Б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При плановых видах ремонта годные кольца подшипников допускается не распрессовывать с шеек осей. Это позволяет снизить затраты на ремонт и предотвратить повреждения осей при демонтаже. Нарушения технологии установки колец на ось, коррозия, перегрев буксовых узлов в эксплуатации приводят к ослаблению прессовой посадки и повышают вероятность отказа прессового соединения и проворота кольца, повреждения и разрушения оси, схода, аварии, крушения вагона. Надежность прессовых соединений колец буксовых подшипников с шейками осей после среднего ремонта может быть обеспечена только при условии контроля плотности прилегания соединяемых деталей в депо.

1. Обоснована возможность и разработан способ контроля упругих механических напряжений в кольцах подшипников акустоупругим методом в процессе прессовой посадки продольными и поверхностными волнами.

Аттестовано испытательное оборудование – стенд для нагружения колец подшипников. Оборудование позволяет воспроизвести напряженно-деформированное состояние кольца, эквивалентное соединению с натягом до 70 мкм. Разработан и изготовлен хордовый преобразователь, обеспечивающий прозвучивание кольца подшипника продольными волнами с базой 96 мм.

Предложена модель, учитывающая изменение угла между направлением распространения и осью главных напряжений при хордовом прозвучивании колец подшипников продольными волнами и позволяющая установить зависимость относительного изменения времени распространения от уровня механических напряжений:

$$\delta t_l = -\sigma_0 \cdot \left(\beta_{2,2} + (\beta_{3,3} - \beta_{2,2}) \cdot \sqrt{(R/l)^2 - 1} \cdot \arctg \left(\frac{1}{\sqrt{(R/l)^2 - 1}} \right) \right).$$

Предложен и реализован способ контроля упругих напряжений поверхностными волнами, основанный на оптимизации временных параметров корреляционного метода для определения малых (менее периода колебаний) времен задержки двух сигналов. Оптимальные временные параметры интервала

вычисления корреляционной функции соответствуют средней части импульса с амплитудой колебаний более 50 % ее максимального значения. В экспериментах неопределенность времени задержки импульсов поверхностных волн не превышала времени дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) осциллографа, равного 1 нс.

Для стали ШХ15 экспериментально определены значения акустоупругого коэффициента продольной волны, распространяющейся вдоль направления действия главных механических напряжений, $\beta_{3,3} = (11,0 \pm 0,9) \text{ МПа}^{-1}$ и коэффициента акустоупругости поверхностной волны $\beta = -(0,74 \pm 0,14) \text{ ТПа}^{-1}$.

Основная погрешность измерения абсолютных значений механических напряжений связана с непостоянством и невоспроизводимостью акустического контакта преобразователя с объектом контроля из-за вариаций толщины контактного слоя и может достигать 50 % измеряемой величины. Практическая значимость разработанных способов акустоупругости заключается в возможности оперативного контроля изменения механических напряжений в кольце подшипника в процессе прессовой посадки.

2. Разработана методика ультразвукового контроля толщины переходного слоя прессового соединения прямым преобразователем продольных волн, главной измеряемой характеристикой в котором является коэффициент пропорциональности амплитуды и порядкового номера многократно отраженного акустического импульса.

Разработана аналитическая модель, в рамках которой рассчитаны параметры отраженных и прошедших через границу прессового соединения, границу акустической задержки и объекта контроля акустических волн. Показано, что влиянием переходного слоя можно пренебречь при более жестком условии, чем принято традиционно. Обосновано условие малости слоя $\Delta \ll \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{Z_2}{Z_3} \cdot \lambda_2$, где λ_2 – длина волны в слое, мм; Z_2 и Z_3 – акустические сопротивления материалов слоя и принимающей ультразвуковую волну среды.

На основе акустической модели разработан и экспериментально реализован

метод локального определения толщины слоя между кольцом подшипника и шейкой оси колесной пары после прессовой посадки, основанный на регистрации многократно отраженных акустических импульсов и коэффициента пропорциональности логарифма амплитуды от номера импульса. Показана возможность обнаружения ослабления посадки с натягом менее 30 мкм, в которых толщина масляного зазора превышает 1 мкм, при использовании прямого преобразователя продольных волн с частотой 5 МГц.

3. Экспериментально и методом конечных элементов установлены закономерности распределения свободных колебаний в кольцах, образцах натяга и прессовых соединениях колец подшипников с шейками осей в диапазоне частот от 0,5 до 50 кГц. Спектры колебаний линейчатые, отклонения рассчитанных и экспериментальных значений собственных частот не превышают 2 %.

Показано, что свободные колебания затухают с характерным временем от 2 до 30 мс. Зависимость амплитуды колебаний от времени удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией только для осесимметричных колебаний свободного кольца и соединения кольца с валом. Для других типов колебаний амплитуда сложным образом изменяется во времени, в том числе немонотонно. Обнаружены биения и установлена их причина: одновременное возбуждение на близких частотах двух и более колебаний, пучности и узлы которых в пространстве не совпадают. Эффект биений чувствителен к малым изменениям первоначального воздействия. Показано, что смазка в месте контакта деталей уменьшает амплитуду информативных гармоник в 500 раз и более. Для повышения отношения сигнал/шум предложено смещать интервал вычисления быстрого преобразования Фурье от начала сигнала в область, в которой неинформативные гармоники затухают сильнее собственных частот кольца.

Предложен критерий неплотности прилегания кольца подшипника к шейке оси колесной пары, основанный на регистрации в спектре свободных колебаний прессовых соединений собственных частот свободного кольца. Показано, что в соединениях с «сухим» контактом неплотного соединения регистрируются до 9 собственных частот свободного кольца из 11 в диапазоне от 0,5 до 25 кГц, при

наличии индустриального масла «мокрый» контакт – до 5 собственных частот. Разработанный способ может быть использован для оценки плотности прессовых соединений колец подшипников с валами и осями колесных пар.

4. Разработаны критерии браковки прессовых соединений для обнаружения неплотности контакта деталей интегрально-резонансным методом, реализованные в приборе УДС1-СИН, внедренном в 10 вагонных ремонтных депо компаний ООО «НВК» (Приложение А) и ОАО «ВРК-1» (Приложение Б).

Для метрологического обеспечения прибора УДС1-СИН разработана технология и изготовлены образцы натяга прессовых соединений колец подшипников и валов в диапазоне от 20 до 120 мкм. Создана метрологическая и конструкторская документация образцов. Погрешность воспроизведения разности диаметров в системе посадки с натягом не превышает 1,5 %.

Экспериментально показано, что максимальные усилия напрессовки и, следовательно, усилия сдвига линейно зависят от натяга с коэффициентом корреляции не менее 0,96. Для передних «безбуртовых» колец подшипников коэффициент пропорциональности усилия напрессовки составляет 0,9 кН/мкм, задних «буртовых» - 1,4 кН/мкм, что соответствует коэффициенту трения покоя 0,15, трения скольжения 0,09.

Главной измеряемой характеристикой критерия обнаружения колесных пар с «проворотом» колец и коррозией интегрально-резонансным методом является отношение среднего времени затухания до порогового уровня колебаний поверхности кольца подшипника в диапазоне частот от 30 до 100 кГц при возбуждении колебаний 10-20 импульсами к времени затухания при 75-85 импульсах. Установленное в условиях вагоноремонтного предприятия критическое значения отношения составляет 0,65 с вероятностью браковки годных прессовых соединений не более 1 % и вероятностью пропуска дефекта не более 5 %.

Выполненные исследования и полученные результаты могут являться основой для разработки акустических способов контроля плотности контакта болтовых соединений строительных конструкций, совершенствования метода акустоупругости для измерения абсолютных значений механических напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов В. А. Неразрушающий контроль. Том 4. Справочник. Кн. 1., Акустическая тензометрия / В. А. Анисимов, Б. И. Каторгин, А. Н. Куценко и др. // Под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2006. – 226 с.
2. Бабкин С. Э. Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком / С. Э. Бабкин // Дефектоскопия. – 2020. – № 4. – С. 32–39.
3. Бобренко В. М. Общий вид уравнений акустоупругости для главных напряжений / В. М. Бобренко, А. Н. Куценко, А. С. Шереметиков // Дефектоскопия. – 1982. – № 6. – С. 23–27.
4. Буденков Г. А. Исследование и оценка напряженно-деформированного состояния и нагрузочной способности соединений с натягом акустическим эхометодом / Г. А. Буденков, В. П. Иванников, А. В. Иванникова, А. В. Щенятский // Вестник ИжГТУ. – 2007. – № 2. – С. 44–48.
5. Буденков Г.А. Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатанных вагонных колес методом акустической тензометрии/ Г.А. Буденков, В.В. Муравьев, О.В. Коробейникова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – № 3 (6). – С. 111–117.
6. Буденков Г.А. Ультразвуковой контроль качества соединений с натягом / Г.А. Буденков, В.П. Иванников, А.В. Кабакова, В.А. Стрижак // Дефектоскопия. – 2009. – № 8. – С. 73–81.
7. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия (с Поправками) . – Введен 2015-01-01. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Стандартинформ, 2014. – 32 с.
8. ГОСТ 18572-2014. Подшипники качения. Подшипники буксовые роликовые цилиндрические железнодорожного подвижного состава. Технические

условия. – Введен 2015-07-01. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Стандартинформ, 2015. – 64 с.

9. ГОСТ 20799-88. Масла индустриальные. Технические условия . – Введен 1990-01-01. – М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР: Стандартинформ, 2011. – 6 с.

10. ГОСТ 23887-79. Сборка. Термины и определения . – Введен 1981-01-01. – М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР: Изд-во стандартов, 1992. – 18 с.

11. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введен 1975-01-01. – М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР: Стандартинформ, 2018. – 7 с.

12. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения . – Введен 2018-09-01. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Стандартинформ, 2018. – 104 с.

13. ГОСТ 4835-2013. Колесные пары железнодорожных вагонов. Технические условия. – Введен 2014-07-01. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Стандартинформ, 2014. – 32 с.

14. ГОСТ 7931-76. Олифа натуральная. Технические условия . – Введен 1976-27-02. – М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР: Изд-во стандартов, 1989. – 10 с.

15. ГОСТ 982-80. Масла трансформаторные. Технические условия . – Введен 1982-01-01. – М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР: Стандартинформ, 2011. – 6 с.

16. Гузь А. Н. Введение в акустоупругость / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуц. – Киев: Наукова думка, 1977. – 152 с.

17. Гузь А. Н. Физические основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт // Прикладная механика. – 2000. – т. 36. – № 9. – С. 3 – 34.

18. Гузь А. Н. Определение напряжений в твердых телах ультразвуковым методом / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуц // Неразрушающий контроль материалов и элементов конструкций. Под ред. А. Н. Гузя. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 115 – 146.
19. Девиченский А. Ю. Диагностика остаточных напряжений в металлах с помощью широкополосных поверхностных акустических импульсов / А. Ю. Девиченский, А. М. Ломоносов, С. Е. Жаринов, В. Г. Михалевич, М. Л. Лямшев, Т. О. Иванова, Н. С. Меркулова // Акустический журнал. – 2009. – № 1. – С. 39–46.
20. Ермолаева З.И. Влияние внутренних напряжений в сталях улучшаемой группы на скорость ультразвука / З. И. Ермолаева // Дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук – Новосибирск, 1999. – 132 с.
21. Ермолов И. Н. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге // Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. Москва: Машиностроение, 2006. – 864 с.
22. Жаринов А. Н. Лазерно-ультразвуковое исследование остаточных напряжений в трубах из аустенитной стали / А. Н. Жаринов, А. А. Карабутов, Е. А. Миронова, С. Н. Пичков, Е. В. Саватеева, В. А. Симонова, Д. Н. Шишулин, Е. Б. Черепецкая // Акустический журнал. – 2019. – № 3. – С. 372–381.
23. Иванников В. П. Исследования соединений с натягом методом многоакурсного ультразвукового зондирования / В. П. Иванников, А. В. Кабакова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – № 9. – С. 49–53.
24. Иванников В.П. Ультразвуковая томография соединений с натягом / В.П. Иванников, А.В. Кабакова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – № 11 (81). – С. 36–39.
25. Карабутов А. А. Определение одноосных напряжений в стальных конструкциях лазерно-ультразвуковым методом / А. А. Карабутов, Н. Б. Подымова, Е. Б. Черепецкая // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – № 3. – С. 146–155.

26. Карпов И. Г. Измерение напряжений в плетях бесстыкового пути акустическим методом / И. Г. Карпов, Е. В. Филатов, М. В. Лопатин, С. Ю. Лагерева // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – №1 (31). – С.53–59.

27. Коробов А. И. Влияние статической реверсивной нагрузки на механические и упругие свойства поликристаллического сплава алюминия АМГб / А. И. Коробов, Н. В. Ширгина, А. И. Кокшайский, В. М. Прохоров // Акустический журнал. – 2018. – № 4. – С. 424–431.

28. Коробов А. И. Диагностика металлических пластин с остаточными напряжениями и дефектами методами нелинейной лазерной сканирующей виброметрии / А. И. Коробов, М. Ю. Изосимова, Н. И. Одина // Акустический журнал. – 2015. – № 3. – С. 317–324.

29. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., исп. и доп. – М.: Главная редакция физико-математической литературы: Наука, 1987. – 248 с.

30. Маркочев В. М. Современные методы измерения деформаций и напряжений / В. М. Маркочев. – М.: Машиностроение, 1990. – 46 с.

31. Муравьев В. В. Экспериментальная оценка остаточных напряжений и натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 4. – С. 98–104.

32. Муравьев В.В. Исследование структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, А.В. Платунов, И.В. Булдакова, Л.В. Гущина // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2018. – № 2 (21). – С. 13–23.

33. Муравьев В.В. К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах / В.В. Муравьев, К.А. Тапков, С.В. Леньков // Дефектоскопия. – 2018. – № 10. – С. 3–9.

34. Муравьев В.В. Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости / В.В. Муравьев, К.А. Тапков, С.В. Леньков // Дефектоскопия. – 2019. – № 1. – С. 10–16.
35. Муравьев В.В. Остаточные напряжения в рельсах по результатам разрушающих и неразрушающих испытаний / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, А.В. Платунов, И.В. Булдакова // Механика, ресурс и диагностика. – 2018. – С. 52.
36. Муравьев В.В. Распределение остаточных напряжений и скорости головной волны в рельсах / В.В. Муравьев, К.А. Тапков, С.В. Леньков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – № 3 (16). – С. 370–376.
37. Муравьев В.В. Связь внутренних напряжений и механических свойств дифференциально-упрочненных рельсов с параметрами акустических волн / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, А.В. Платунов, Л.В. Гущина // Сталь. – 2018. – № 10. – С. 64–67.
38. Муравьев В.В. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, А.В. Платунов, В.А. Куликов // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 12–20. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
39. Никитина Н. Е. Новая технология определения механических напряжений в металлоконструкциях на основе явления акустоупругости / Н. Е. Никитина, В. А. Смирнов // В мире НК. – 2009. – № 1 (43). – С. 26–28.
40. Никитина Н. Е. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин / Н. Е. Никитина, С. В. Казачек // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 4 (32). – С.18–28.
41. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения – Н. Новгород: ТАЛАН, 2005. – 208 с.

42. Никитина Н.Е. Измерение двухосных напряжений в трубопроводах методом акустоупругости / Н.Е. Никитина, А.В. Камышев, В.А. Смирнов и др. // Мир измерений. – 2006. – № 11. – С. 4–9.

43. Никитина Н.Е. Использование явления акустоупругости при исследовании напряженного состояния технологических трубопроводов / Н.Е. Никитина, А.В. Камышев, С.В. Казачок // Дефектоскопия. – 2009. – № 12. – С. 53–59.

44. Никитина Н.Е. Исследование методом акустоупругости плоского напряженного состояния пластины с отверстием / Н.Е. Никитина, С.В. Казачок, О.В. Кулизина, Ю.Н. Казачок // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 6. – С. 54–59.

45. Никитина Н.Е. Новая технология определения механических напряжений в металлоконструкциях на основе явления акустоупругости / Н.Е. Никитина, В.А. Смирнов // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 1 (43). – С. 26–28.

46. Никитина Н.Е. Определение двухосных напряжений в трубах с помощью неразрушающего метода ультразвукового контроля / Н.Е. Никитина, А.В. Камышев, В.А. Смирнов // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 3. – С. 36–39.

47. Никитина Н.Е. Определение осевых и окружных напряжений в стенке закрытой трубы ультразвуковым методом на основе явления акустоупругости / Н.Е. Никитина, А.В. Камышев, В.А. Смирнов, А.В. Борщевский, Ю.М. Шарыгин // Дефектоскопия. – 2006. – № 3. – С. 49–54.

48. Никитина Н.Е. Современное состояние и перспективы развития ультразвукового метода исследования напряженного состояния трубопроводов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4–5. – С. 2395–2397.

49. Пат. 1087876 А1 Союз Советских Социалистических Республик, МПК G 01 N 29/00. Способ измерения коэффициента затухания ультразвуковых колебаний / А. Ф. Мельканович, Г. В. Пябус, Л. Б. Ливенцова, Л. М. Куцкулей;

заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт по разработке неразрушающих методов и средств контроля качества материалов. – № 3508379; заявл. 03.11.1982; опубл. 23.04.1984, Бюл. № 15.

50. "Пат. 2 726 277 Российская Федерация, С1 МПК G01N 29/30. Способ настройки чувствительности ультразвукового дефектоскопа / С. А. Бехер, А. О. Рыжова, Т. В. Сыч, А. Л. Бобров, А. А. Попков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2019145701; заявл. 31.12.2019; опубл. 10.07.2020."

51. Пат. 2 739 385 Российская Федерация, С1 МПК G01N 29/04. Способ ультразвукового контроля паяных соединений / С. А. Бехер, А. О. Рыжова, А. Л. Бобров, А. А. Попков, А. О. Коломеец; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2020117368; заявл. 14.05.2020; опубл. 23.12.2020.

52. Пат. 2301420 С2 Российская Федерация, МПК G 01N 29/00. Способ определения коэффициента затухания продольных ультразвуковых колебаний в материале / А. С. Кузьбожев, Р. В. Агинеи, В. А. Попов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Уралтрансгаз" (ООО "Уралтрансгаз"). – № 2005126996/28; заявл. 26.08.2005; опубл. 20.06.2007, Бюл. № 17.

53. Пат. 2389988 С1 Российская Федерация, МПК G 01 L 1/06. Способ определения механически напряжений в стальных конструкциях / Р. В. Агинеи, А. С. Кузьбожев, Ю. В. Александров, А. В. Комаров; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ" (ООО "ГазпромВНИИГАЗ"). – № 2009115369/28; заявл. 22.04.2009; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.

54. Пат. 249716 А1 Союз Советских Социалистических Республик, МПК G 01 N 11/16. Способ определения коэффициента затухания металлов при ультразвуковых колебаниях/ В. С. Миротворский, Г. И. Погодин-Алексеев; заявитель и патентообладатель Особое конструкторско-технологическое бюро Комитета по делам изобретений и открытий. – № 1241475/25-28; заявл. 15.05.1968; опубл. 05.08.1969, Бюл. № 25.

55. Пат. 2544257 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Лазерный ультразвуковой дефектоскоп / А. А. Карабутов, В. Г. Шипша, А. А. Карабутов (мл.) и др.; заявитель и патентообладатель Карабутов А. А. – № 2010140186/28; заявл. 30.09.2010; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 8.

56. Пат. 2641613 С2 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ контроля качества посадок с натягом/ А.В. Кабакова, В.П. Иванников; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Удмурдский государственный университет" г. Ижевск. – № 2014121583; заявл. 27.05.2014; опубл. 18.01.2018, Бюл. № 2.

57. Пат. 266405 А1 Союз Советских Социалистических Республик, МПК В 01b 1/06. Способ измерения скорости и коэффициента затухания ультразвуковых колебаний в средах/ М. З. Медведев, Л. П. Бобриков; заявитель и патентообладатель Институт механики полимеров АН Латвийской ССР. – № 1129790/18-10; заявл. 30.01.1967; опубл. 17.03.1970, Бюл. № 11.

58. Пат. 2670723 С1 Российская Федерация, МПК G 01 L 1/00. Способ определения напряженно-деформированного состояния различных упругих объектов / А. Л. Бидуля, Г. М. Волохов, М. Н. Овечников, Ю. А. Панин, А. С. Пономарев, С. В. Чунин, В. И. Шабуневич; заявитель и патентообладатель Акционерное общество Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО "ВНИКТИ"). – № 2017144958; заявл. 21.12.2017; опубл. 24.10.2018, Бюл. № 30.

59. Пат. 2719276 С1 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Способ исследования соединений с натягом с применением ультразвуковой томографии / В.П. Иванников, А.В. Кабакова, Чайкина А.Ю; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Удмурдский государственный университет" г. Ижевск. – № 2018141351; заявл. 24.11.2018; опубл. 17.04.2020, Бюл. № 11.

60. Пат. 2723146 С1 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Ультразвуковой способ определения механических напряжений в рельсах и устройство для его осуществления/ Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, С.А. Бехер, А.Е.

Ельцов, А.Н. Курбатов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет путей сообщения" (СГУПС) г. Новосибирск. – № 2019135929; заявл. 07.11.2019; опубл. 09.06.2020, Бюл. № 16.

61. Пат. 2723148 С1 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Ультразвуковой способ определения механических напряжений в рельсах / Л.Н. Степанова, А.Н. Курбатов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет путей сообщения" (СГУПС) г. Новосибирск. – № 2019134354; заявл. 25.10.2019; опубл. 09.06.2020, Бюл. № 16.

62. Приданцев М. В. Конструкционные стали. Справочник / М. В. Приданцев, Л. Н. Давыдова и И. А. Тамарина. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.

63. РД ВНИИЖТ 27.05.01 2017 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм.

64. Рыжова А. О. Возможности акустических методов для контроля натяга прессовых соединений / А. О. Рыжова, С. А. Бехер, А. Л. Бобров // Политранспортные системы: Материалы X Междунар. науч.-техн. конф. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2018. – С. 341-345.

65. Рыжова А. О. Исследование зависимостей параметров акустических сигналов, отраженных от границы с объектом контроля, со свойствами материала объекта контроля / А. О. Рыжова, С. А. Бехер // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции с международным участием/ Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. – С. 64 – 71.

66. Рыжова А. О. Исследование спектральных и временных характеристик свободных колебаний прессовых соединений колец подшипников для решения задач неразрушающего контроля / А. О. Рыжова, С. А., Бехер // Интеллектуальные системы в производстве, 2022, № 2 (20), С. 20-29.

67. Рыжова А. О. Оценка возможности контроля плотности посадки прессовых соединений ультразвуковым методом / А. О. Рыжова, С. А. Бехер // «Приборостроение в XXI веке – 2020. Интеграция науки, образования и производства»: сборник материалов XVI Всероссийской научно-технической конференции (Ижевск, 2–4 дек. 2020 г.). – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. – С. 135 – 141.

68. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610164 / С. А. Бехер, А. О. Коломеец, М. М. Нартова, А. А. Попков, А. О. Рыжова, Т. В. Сыч; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2019666732; заявл. 17.12.2019; опубл. 17.12.2019, Реестр программ для ЭВМ.

69. Степанова Л.Н. Использование эффекта акустоупругости для исследования влияния напряжений в рельсе на время распространения ультразвуковых волн / Л.Н. Степанова, А.Н. Курбатов, Е.С. Тенитилов // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте. материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2013. – С. 76–80.

70. Степанова Л.Н. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии / Л.Н. Степанова, С.А. Бехер, А.Н. Курбатов, Е.С. Тенитилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 7 (655). – С. 103–109.

71. Степанова Л.Н. Исследование характеристик проволочных и полупроводниковых тензодатчиков, используемых для измерения ударных процессов / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, С.И. Кабанов, К.В. Канифадин, С.А. Бехер, М.С. Никитенко // Датчики и системы. – 2013. – № 1. – С. 28–33.

72. Степанова Л.Н. Микропроцессорные многоканальные тензометрические системы для динамических испытаний конструкций / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, С.А. Бехер // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 29–34

73. Степанова Л.Н. Определение продольных напряжений в рельсах с использованием эффекта акустоупругости и тензометрии / Л.Н. Степанова, А.Н.

Курбатов, Е.С. Тенитилов // Вестник ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3 (63). – С. 104–111.

74. Углов А. Л. Акустический метод оценки поврежденности аустенитной стали при термопульсациях / А. Л. Углов, А. А. Хшбов, С. Н. Пичков, Д. Н. Шишулин // Дефектоскопия. – 2016. – № 2. – С. 3–10.

75. Bekher S.A. Testing the Loading of Bearing Rings with Surface Waves Using Acoustoelasticity Effect / Bekher S.A., Stepanova L.N., Ryzhova A.O. et al. // Russ J Nondestruct Test 57, 261–268 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1061830921040033>.

76. Biot M.A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media // Journal of the Acoustical Society of America. – 1962. – Vol. 34. – P. 1254–1264.

77. Biot M.A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media // Journal of Applied Physics. – 1962. – Vol. 33. – P. 1482–1498.

78. Budenkov G. A. Ultrasonic Quality Control of Press-Fit Joints / V. P. Ivannikov, A. V. Kabakova, V. A. Strizhak // Russian Journal of nondestructive testing. – 2009. – Vol. 8(45). – P. 575–581.

79. Castellano A. Some advancements in the ultrasonic evaluation of initial stress states by the analysis of the acoustoelastic effect / Anna Castellano, Aguinardo Fraddosio, Salvatore Marzano, Mario Daniele Piccioni // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 199. – P. 1519–1526. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.494>.

80. Deputat J. Application of the acoustoelastic effect in measurements of residual stresses / Archives of Acoustics. – 1990. – Vol. 15. – P. 57–68.

81. Dive, V. Recent Research Progress on Residual Stress Measurement Using Non-Destructive Testing / Vikas Dive, Sanjay Lakade // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 47(4). – P. 3282–3287. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.094>.

82. Geľatko M. Longitudinal critically refracted (L-CR) ultrasonic wave for residual stress measurement / M. Geľatko, M. Hatala, R. Vandžura and F. Botko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1199. – P. 631–635. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1199/1/012060>.

83. He J. Comparison of the Lcr wave TOF and shear-wave spectrum methods for the uniaxial absolute stress evaluation of steel members / Jingbo He, Zuohua Li, Jun

Teng, Ying Wang // Structural Control and Health Monitoring. – 2019. – Vol. 26(11)
<https://doi.org/10.1002/stc.2348>.

84. Javadi Y. Employing the L-CR Waves to Measure Longitudinal Residual Stresses in Different Depths of a Stainless Steel Welded Plate / Yashar Javadi and Sergej Hloch // Advances in Materials Science and Engineering. – 2013. – Vol. 2013(3).
<https://doi.org/10.1155/2013/746187>.

85. Jin C. Study on relationship between critically refracted longitudinal wave and internal stress in pre-stretched aluminium alloy plate / C. Jin, C. Lu, Y. W. Shi, J. Liang, X. Wang // Materials Research Innovations. – 2015. – Vol. 19.
<https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000001360>.

86. Jingbo He. Absolute stress field measurement in structural steel members using the Lcr wave method / Jingbo He, Zuohua Li, Jun Teng, Ming Li, Ying Wang // Measurement. – 2018. – № 122. – P. 679–687.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.022>

87. Johnson G. C. On the Applicability of Acoustoelasticity for Residual Stress Determination // J. Appl. Mech. – 1981. – Vol. 48(4).– P. 791–795.
<https://doi.org/10.1115/1.3157735>.

88. Karabulov A. A. Use of acoustoclasticity effect with application of laser sources of the ultrasound for control of the stress state of rail-bars of the continuous welded rails / A. A. Karabulov, N. B. Podymova, V. A. Simonova // Int. J. App. Eng. Res. – 2015. – Vol. 10(20). – P. 41121–41128.

89. Karabutov A. Laser ultrasonic diagnostics of residual stress / Alexander Karabutov, Anton Devichensky, Alexander Ivochkin, Michael Lyamshev, Ivan Pelivanov, Upendra Rohadgi, Vladimir Solomatin, Manomohan Subudhi // Ultrasonics. – 2008. – Vol. 48. – P. 631–635. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2008.07.006>.

90. Leon-Salamanca, T. Residual Stress Measurement in Steel Plates and Welds Using Critically Refracted Longitudinal (L-CR) Waves / T. Leon-Salamanca, D. F. Bray // Research in Nondestructive Evaluation. – 1996. – Vol. 7:4. – P. 169–184.
<https://doi.org/10.1080/09349849609409576>.

91. Li, D. Non-destructive Evaluation of Absolute Stress in Steel Members Using Shear-Wave Spectroscopy / Diankun, Li, He Jingbo, Li Zuohua and Teng Jun // Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. – 2018. – Vol. 35. – P. 236–243 <https://doi.org/10.16356/j.1005-1120.2018.02.236>.

92. Li Z. Absolute stress measurement of structural steel members with ultrasonic shear-wave spectral analysis method/ Zuohua Li, Jingbo He, Jun Teng, Qin Huang and Ying Wang // Structural Health Monitoring. – 2019. – № 18(1) – P. 216–231. <https://doi.org/10.1177/1475921717746952>.

93. Li Z. Cross-correlation-based algorithm for absolute stress evaluation in steel members using the longitudinal critically refracted wave / Zuohua Li, Jingbo He, Jun Teng and Ying Wang // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2018. – Vol. 14(10) <https://doi.org/10.1177/1550147718803312>.

94. Li Z. Influence of Uniaxial Stress on the Shear-Wave Spectrum Propagating in Steel Members / Zuohua Li, Jingbo He, Diankun Liu, Nanxi Liu, Zhili Long and Jun Teng // Sensors 2019 – 2019. – № 19 (3) <https://doi.org/10.3390/s19030492>.

95. Li Z. Internal Stress Monitoring of In-Service Structural Steel Members with Ultrasonic Method / Zuohua Li, Jingbo He, Jun Teng and Ying Wang // Materials. – 2016. – Vol. 9(4) <https://doi.org/10.3390/ma9040223>.

96. Li Z. Stress measurement for steel slender waveguides based on the nonlinear relation between guided wave group velocity and stress / Zuohua Li, Yingzhu Wang, Junchao Zheng, Nanxi Liu, Ming Li, Jun Teng // Measurement. – 2022. – № 190. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109465>.

97. Liu H. Design and experiment of array Rayleigh wave-EMAT for plane stress measurement / Haibo Liu, Tianran Liu, Peixun Yang, Yankun Liu, Sijia Gao, Yapeng Li, Te Li, Yongqing Wang // Ultrasonics. – 2022. – Vol. 120. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106639>.

98. Liu H. Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement using ultrasonic longitudinal critically refracted (LCR) wave / Haibo Liu, Yapeng Li, Te Li, Xiang Zhang, Yankun Liu, Kuo Liu, Yongqing Wang // Applied

Acoustics. – 2018. – Vol. 141. – P. 178–187.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.07.017>.

99. Liu H. Uniaxial stress in-situ measurement using EMAT shear and longitudinal waves: Transducer design and experiments / Haibo Liu, Tianran Liu, Yapeng Li, Yankun Liu, Xiang Zhang, Yongqing Wang, Sijia Gao // *Applied Acoustics*. – 2021. – Vol. 175. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107781>.

100. "Lomonosov A. M. Laser-based surface acoustic waves in material science / A. M. Lomonosov, A. P. Mayer, P. Hess // *Modern acoustical techniques for the measurement of*

101. *mechanical properties*. – 2001. – Vol. 39. – P. 66–134."

102. Mohammadi M. Determination of acoustoelastic/acoustoplastic constants to measure stress in elastic/plastic limits by using LCR wave / Mohammad Mohammadi, Javad Jafari Fesharaki // *NDT & E International*. – 2019. – Vol. 104. – P. 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.04.003>.

103. Muravev V.V. Measurement of Residual Stresses of Locomotive Wheel Treads During the Manufacturing Technological Cycle / V.V. Muravev, O.V. Muraveva, L.V. Volkova, M. Sága, Z. Ságová // *Management Systems in Production Engineering*. – 2019. – Vol. 27(4). – P. 236–241. <https://doi.org/10.1515/mspe-2019-0037>.

104. Murnaghan F. D. Finite Deformations of an Elastic Solid // *American Journal of Mathematics* – 1937. – Vol. 59. – № 2. – P. 235–260. <https://doi.org/10.2307/2371405>

105. Pei C. A modified meander-line-coil EMAT design for signal amplitude enhancement / Cuixiang Pei, Siqi Zhao, Pan Xiao, Zhenmao Chen // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2016. – Vol. 247. – P. 539–546. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.07.006>.

106. Pei C. Measurement of residual stress with laser-EMAT ultrasonic method / Cuixiang Pei, Wenjiang Wu, M. Uesaka, K. Demachi, T. Fukuchi, Shunsuke Hirai // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2014. – Vol. 45. – P. 109–114. <https://doi.org/10.3233/JAE-141819>.

107. Popkov A. Determination of the Tightness of Bearing Rings of Axle Box Unit of Freight Car Bogie by the Method of Frequency Analysis of Free Vibrations /

Popkov A., Ryzhova A., Vyplaven V. // In: Manakov, A., Edigarian, A. (eds) International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 403. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_36.

108. Rossini N.S. Methods of measuring residual stresses in components / N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabib // Materials & Design. – 2012. – Vol. 35. – P. 572–588. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>.

109. Ryzhova A.O. Capabilities of acoustic methods in testing of interference-fit joints [Электронный ресурс] / Anna Ryzhova, Sergei Bekher, Aleksey Bobrov // MATEC Web of Conferences, X International Scientific and Technical Conference „Polytransport Systems-2018”. – 2018. – Vol. 216; doi: 10.1051/matecconf/201821603007.

110. Ryzhova A.O. Patterns of Acoustic Wave Propagation in the Contact Layer of Press Joints [Электронный ресурс] / Anna Ryzhova, Sergei Bekher, Artem Popkov // Published: 1 January 2021 by Elsevier BV in Transportation Research Procedia Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 54. – pp. 455-460; doi:10.1016/j.trpro.2021.02.095.

111. Ryzhova A.O. The acoustic waves propagation laws in the force-fit connections for test of the interference fit [Электронный ресурс] / Anna Ryzhova, Sergei Bekher, Aleksey Bobrov // Journal of Physics: Conference Series Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2018), JPCS. – 2018. – Vol. 1050; doi:10.1016/j.trpro.2021.02.095.

112. Ryzhova A.O. Using the Method of Acoustoelasticity for Evaluating Elastic Mechanical Stresses in the Material of Bearing Rings / Ryzhova A.O., Bekher S.A. & Popkov A.A. // Russ J Nondestruct Test 56, 898–906 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1061830920110078>.

113. Sanderson R.M. Measurement of residual stress using laser-generated ultrasound / R.M. Sanderson, Y.C. Shen // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2010. – Vol. 87. – P. 762–765. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2010.10.001>.

114. Vangi D. Stress evaluation by pulse-echo ultrasonic longitudinal wave / D. Vangi // *Experimental Mechanics*. – 2001. – Vol. 41. – P. 277–281. <https://doi.org/10.1007/BF02323145>.

115. Wang W. An improved ultrasonic method for plane stress measurement using critically refracted longitudinal waves / Wei Wang, Chenghai Xu, Yumin Zhang, Yufeng Zhou, Songhe Meng, Ya Deng // *NDT & E International*. – 2018. – Vol. 99. – P. 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.07.006>.

116. Wang Y. Combination of transverse and longitudinal ultrasonic waves for plane stress measurement of steel plates / Yingzhu Wang, Xupeng Zhu, Yunxuan Gong, Nanxi Liu, Zuohua Li, Zhili Long, Jun Teng // *Applied Acoustics*. – 2022. – Vol. 188. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108500>.

117. Wang Y. Three-dimensional stress measurement for structural steel plates using ultrasonic T-waves and P-waves / Yingzhu Wang, Nanxi Liu, Yunxuan Gong, Xupeng Zhu, Zuohua Li, Zhili Long, JunTeng, Jie Chen // *Measurement*. – 2022. – № 190. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110310>.

118. Withers P.J. Residual stress. Part 1 – Measurement techniques / P.J. Withers, H.K.D.H. Bhadeshia // *Materials Science and Technology*. – 2001. – Vol. 17(4). – P. 355–365. <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>.

119. Xu C. Nondestructive Testing Residual Stress Using Ultrasonic Critical Refracted Longitudinal Wave / Chunguang Xu, Wentao Song, Qinxue Pan, Huanxin Li, Shuai Li // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 70. – P. 594–598. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.030>.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ ООО «НВК»

Утверждаю:
Начальник Управления
технической политики
ООО «НВК»



А. В. Хоблов

АКТ

Настоящий акт внедрения составлен о том, что в соответствии с договором № 1144-НВК/164-22 от 01.03.2022 года научно-исследовательской лабораторией «Физические методы контроля качества» Сибирского государственного университета путей сообщения внедрено в технологический процесс ремонта грузовых вагонов четыре прибора УДС1-СИН контроля плотности посадки колец подшипников на шейку оси при среднем ремонте без снятия колец подшипников в вагонных ремонтных депо Волховстрой, Кочетовка, Новокузнецк, Чита.

Реализованные в программном обеспечении приборов УДС1-СИН критерии браковки прессовых соединений буксовых подшипников, разработанные Рыжовой Анной Олеговной в рамках диссертационного исследования «Акустические методы контроля прессовых соединений колец подшипников с шейками осей колесных пар» обеспечивают контроль плотности посадки в соответствии с требованиями нормативного документа п. 21.1.3 Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм (РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017). Экономический эффект от внедрения прибора связан с выполнением ремонта колесных пар без демонтажа внутренних колец подшипников с шейки оси и составляет 283 тыс. руб. в год в одном депо.

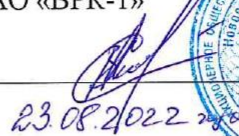
Заместитель начальника отдела по
сертификации, лицензированию
и аттестации ООО «НВК»

А.А. Жёлтиков

АКТ ВНЕДРЕНИЯ ОАО «ВРК-1»**ВАГОННАЯ
РЕМОНТНАЯ
КОМПАНИЯ-1****НОВОСИБИРСКОЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО**

Утверждаю:

Заместитель директора

Новосибирского представительства
АО «ВРК-1»
В.А. Синицын

АКТ

Настоящий акт составлен о том, что шесть приборов ультразвуковых специализированных УДС1-СИН, поставленных в вагонные ремонтные депо компании АО «ВРК-1» в период с декабря 2021 по февраль 2022 года Сибирским государственным университетом путей сообщения (г. Новосибирск) по договору №ИП1340/21/480-21 от 26.11.2021 года, соответствуют требованиям нормативных и технических документов и обеспечивают выполнение технологии среднего ремонта колесных пар без демонтажа внутренних колец подшипников.

Интерфейс программного обеспечения и реализованные в нем критерии браковки, представленные в диссертации Рыжовой Анны Олеговны, отвечают требованиям руководящего документа РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017.

Всего в период с 01.02.2022 по 01.08.2022 в депо АО «ВРК-1» приборами УДС1-СИН проконтролировано 3654 колесные пары, в том числе забраковано 168 колесных пар. Экономический эффект на один прибор за 6 месяцев составил 406тыс. руб.

Ревизор по безопасности движения
поездов Новосибирского представительства
АО «ВРК-1»



А.А. Больчанов