

На правах рукописи



РЫЖОВА АННА ОЛЕГОВНА

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

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».

Научный руководитель: **Бехер Сергей Алексеевич**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Электротехника, диагностика и
сертификация» ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет путей
сообщения»

Официальные оппоненты: **Суханов Дмитрий Яковлевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией Электромагнитных
методов контроля Национального
исследовательского Томского
государственного университета

Макаров Сергей Викторович
доктор физико-математических наук, директор
Института цифровых технологий, электроники
и физики Алтайского государственного
университета в г. Барнаул

Защита состоится 31 января 2023 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат разослан « » 2022 года

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.13
кандидат технических наук, доцент



Е.А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 шейки 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 определяет потребность 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 Vach F., Рао Y.-H., Sachse W., Fukuoka H., Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н., Гузя А.Н., Махорта Ф.Г., Никитина 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 в 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, основанной 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 подшипника 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".

Критерий браковки интегрально-резонансным методом реализован в приборе УДС1-СИН, используемом для контроля колесных пар при среднем ремонте для обнаружения проворота внутренних колец подшипников на шейках осей. Прибор внедрен в эксплуатацию в вагонных ремонтных депо ОАО «ВРК-1» и ООО «НВК», что подтверждается актами внедрения.

Методология и методы исследования. В работе использовались экспериментальные и теоретические методы исследования, ультразвуковой, визуальный, измерительный и 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 дек. 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 сформулировал 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.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, который содержит 106 наименований, в том числе 38 на английском языке, двух приложений. Диссертация изложена на 145 страницах, содержит 89 рисунков и 11 таблиц.

Исследование выполнено **при финансовой поддержке** РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90016\19.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научно-квалификационной работы (диссертации) и степень проработанности темы исследования, определены задачи и цель, сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая и теоретическая значимость.

В первой главе проанализировано современное состояние акустических методов для контроля соединений с натягом и оценки уровня механических напряжений в материале деталей в промышленных условиях, контроля

сопрягаемых поверхностей. Описаны основные требования к формированию колесных пар и посадке внутренних колец подшипников на шейки осей колесных пар согласно нормативной и технической документации.

Во второй главе представлены результаты исследований способов определения механических напряжений кольца подшипника, напрессованного на шейку оси, акустоупругим методом при хордовом прозвучивании продольными и многократно прошедшими поверхностными волнами.

Методами тензометрии проведена тарировка испытательного стенда, позволяющего воспроизвести упругое напряженно-деформированное состояние кольца с различным уровнем механических напряжений (рис. 1). Разработаны, изготовлены и откалиброваны образцы прессовых соединений с установленным натягом в диапазоне от 20 до 120 мкм.

Экспериментальная установка (рис. 2, а) для реализации метода акустоупругости включала в себя стандартизированное оборудование утвержденного типа: дефектоскопы УД2-102 и УСД-50 для возбуждения акустических импульсов зондирующим с амплитудой более 100 В, цифровые запоминающие осциллографы TBS-2102 и TBS-2104 для регистрации эхо-импульсов со временем дискретизации 1 нс. Объекты исследования прозвучивались продольными волнами по отдельной схеме (рис. 2, б) и

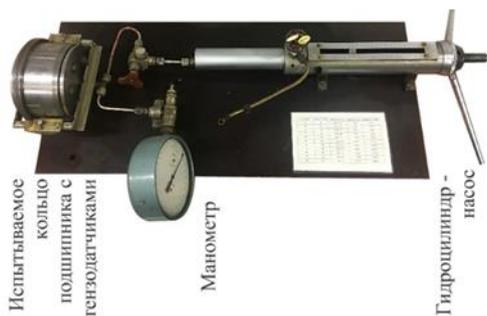


Рис. 1 – Внешний вид стенда для нагружения колец подшипников

поверхностными волнами Релея по совмещенной схеме (рис. 2, в). Сигналы сохранялись на цифровой носитель и обрабатывались с использованием стандартного и оригинального разработанного в научной лаборатории программного обеспечения.

Для исследования влияния механических напряжений на скорость распространения продольной волны рассчитана и изготовлена акустическая задержка из стали 20 (рис. 3). Излучающий преобразователь возбуждает волны, распространяющиеся по хорде относительно кольца подшипника, а принимающий устанавливается так, чтобы обеспечить максимальную амплитуду прошедшего через кольцо акустического импульса.

Жесткость конструкции акустической задержки обеспечивает постоянное расстояние между источником и приемником, пропилены и увеличенный радиус в средней части внутренней поверхности увеличивают время распространения по материалу задержки от источника до приемника мешающих волн (рис. 3).

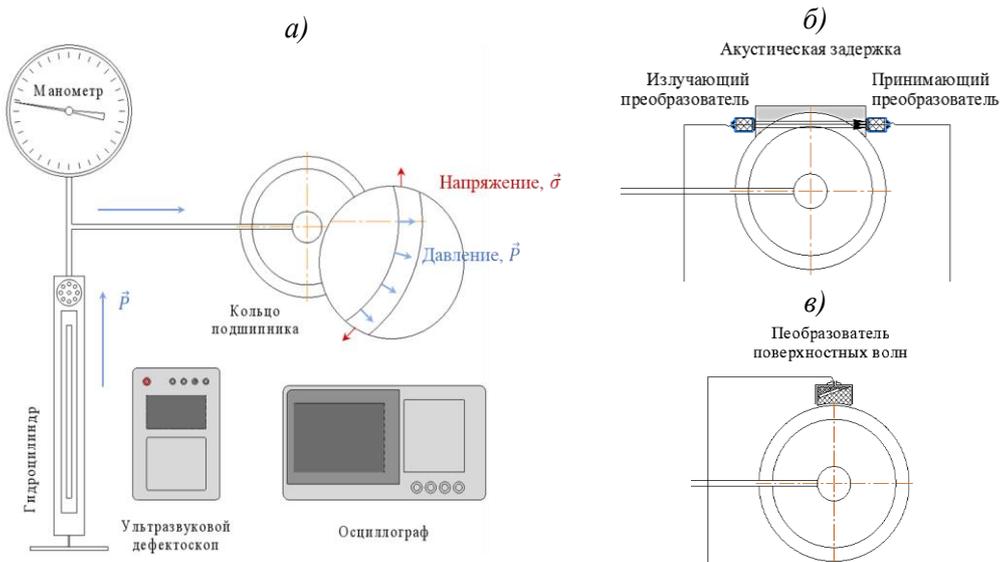


Рисунок 2 – Схема установки для испытания колец подшипников с использованием метода акустоупругости (а) при хордовом прозвучивании продольной волной (б) и многократно прошедшей поверхностной волной (в)

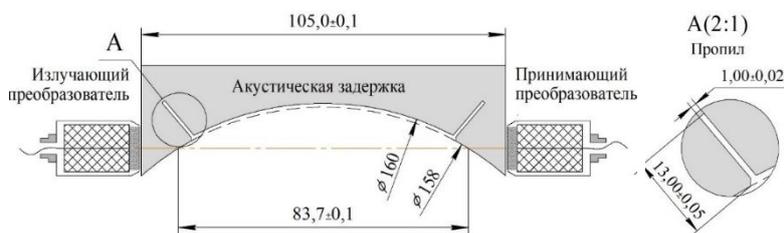


Рисунок 3 – Акустическая задержка с излучающим и принимающим преобразователями для хордового прозвучивания кольца подшипника продольной волной

Изменение скорости распространения волны измеряли по задержке сигнала относительно опорного, зарегистрированного на полностью разгруженном кольце (рис. 4).

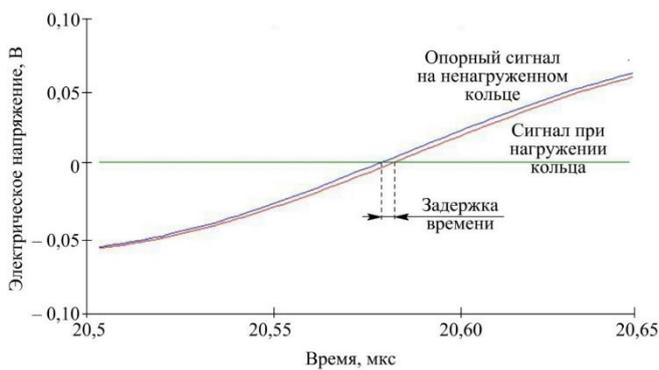


Рисунок 4 – Сигналы, зарегистрированные на ненагруженном (опорный) и нагруженном кольце подшипника

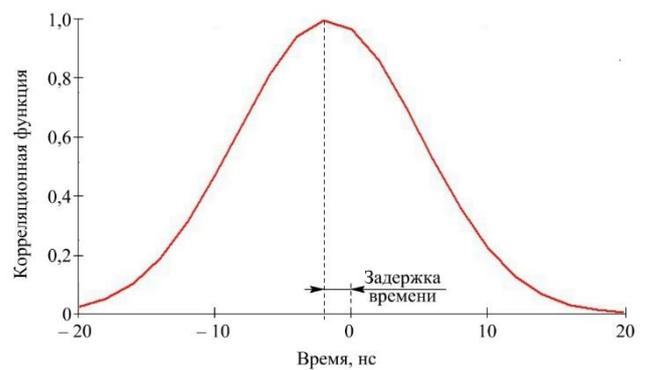


Рисунок 5 – Корреляционная функция двух сигналов, зарегистрированных с задержкой времени 2 нс

Для измерения малых изменений времен задержки сигналов реализован корреляционный метод, основанный на определении максимума дискретной

автокорреляционной функции Ac_k сигналов на нагруженном U_l и на ненагруженном U_{o_l} кольце на интервале от l_1 до l_2 (рис. 5):

$$Ac_k = \frac{\langle (U_{o_l} - \langle U_{o_l} \rangle) \cdot (U_{l+k} - \langle U_{l+k} \rangle) \rangle}{\sqrt{(\langle U_{o_l}^2 \rangle - \langle U_{o_l} \rangle^2) \cdot (\langle U_{l+k}^2 \rangle - \langle U_{l+k} \rangle^2)}}, \quad (1)$$

где Ac_k – значение корреляционной функции в k -ый момент времени; U_l и U_{o_l} – значения напряжения на приемнике в l -ый момент времени, мВ; $\langle \rangle$ – оператор усреднения, l и k – индексы.

Зависимость задержки времени акустического импульса продольной и многократно прошедшей поверхностной волны относительно опорного сигнала линейно зависит от механических напряжений в кольце с коэффициентом корреляции больше 0,98 и 0,99, соответственно (рис. 6). Методом наименьших квадратов определены коэффициенты пропорциональности α , равные коэффициентам акустоупругости по времени распространения. Для хордового прозвучивания продольной волной коэффициент составил $\alpha_l = (9,77 \pm 0,68) \text{ ТПа}^{-1}$, для прозвучивания поверхностной волной – $\alpha_R = (5,48 \pm 0,28) \text{ ТПа}^{-1}$.

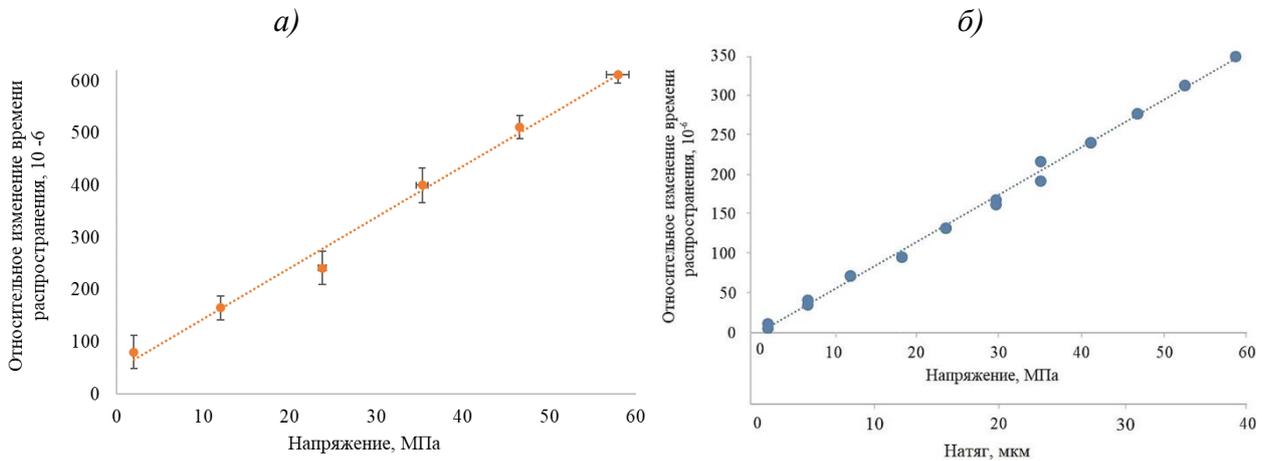


Рисунок 6 – Зависимость относительного изменения времени распространения продольной волны при хордовом прозвучивании кольца подшипника (а) и многократно прошедшей поверхностной волны (б) от механических напряжений

При хордовом прозвучивании продольной волной в процессе распространения по материалу кольца угол между главными механическими напряжениями и вектором скорости волны постоянно изменяется. Связь коэффициента α_l с принятыми в литературе коэффициентами акустоупругости $\beta_{i,j}$ установлена в рамках модели, учитывающий не параллельность волны и напряжений с использованием тензорного аппарата акустоупругости:

$$\delta v_{i,j} = \gamma_{i,j,m,n} \cdot \sigma_{m,n}, \quad (2)$$

где $\gamma_{i,j,m,n}$ – тензор акустоупругости для произвольного тензора напряжений, ТПа^{-1} , $\delta v_{i,j}$ – относительное изменение скорости волны.

В каждой точке угол φ между базисами главных напряжений xu и волны $z'y'$ определяется выражением (рис. 7):

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{z'}{\sqrt{R^2 - (l)^2}}. \quad (3)$$

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

$$A_{i,j} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Переход от базиса напряжений к базису скоростей определяется выражением:

$$\gamma_{i,j,m,n} = \gamma_{i,j,m',n'} \cdot A_{m',m} \cdot A_{n',n}, \quad (5)$$

где $A_{m',m}$ – матрица перехода от базиса напряжений к базису скоростей.

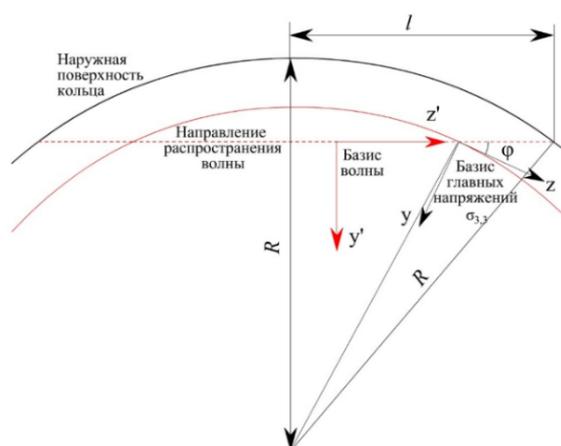


Рисунок 7 – Схема ориентации базиса волны $z'y'$ и базиса главных напряжений xu при распространения продольной волны в кольце подшипника

После подстановки (4) в (5) и в (2) с учетом (3) и одноосного напряженного состояния, при котором отлична от нуля только одна компонента тензора напряжений $\sigma_{3,3} = \sigma_0$, интегрирования по z' , относительное время задержки акустических волн, вызванное упругими растягивающими напряжениями, связанными с натягом кольца на шейку оси, составит:

$$\delta t_l = -\sigma_0 \cdot (0,89 \cdot \beta_{3,3} + 0,11 \cdot \beta_{2,2}). \quad (6)$$

Отношение акустоупругих коэффициентов для большинства сталей $\beta_{2,2}/\beta_{3,3} \approx 0,1$ и, следовательно, второе слагаемое в выражении (6) не превышает 1,2 % первого слагаемого. Используя результат аппроксимации (рис. 6, а) и выражение (6) значение коэффициента акустоупругости материала колец подшипников в изделии составит $\beta_{3,3} = -11,0 \text{ ТПа}^{-1}$ с относительной погрешностью не более 8%.

Разработанные способы позволяют реализовать контроль упругих механических напряжений в кольцах подшипников в процессе прессовой посадки, при условии установки преобразователей на ненагруженное кольцо, для определения действительных значений натяга. При испытаниях стандартных образцов получены недопустимые, более 40 % среднего значения, случайные разбросы результатов наблюдений (рис. 8). Основное влияние вызвано слабой повторяемостью параметров акустического контакта при повторных установках преобразователя на образец. Вариации толщины

контактного слоя жидкости находятся в диапазоне от 5 до 10 мкм и связаны с точностью размеров изготовления акустической задержки и кольца.

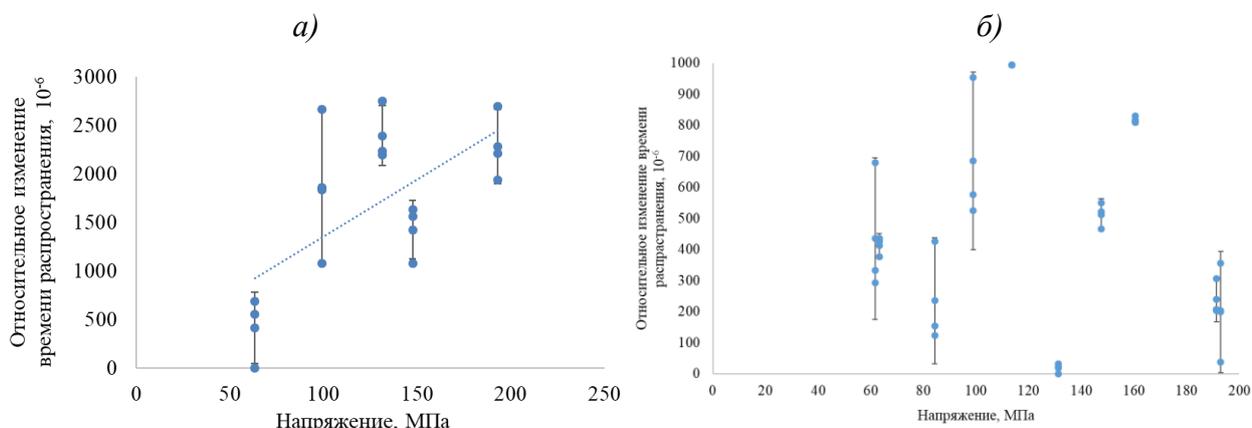


Рисунок 8 – Зависимость относительного изменения времени распространения продольной (а) и поверхностной (б) волн от механических напряжений для образцов натяга

В третьей главе представлена модель формирования серии переотраженных импульсов продольной волны от границы раздела сред, устанавливающая зависимость коэффициента ослабления амплитуды от толщины переходного слоя и позволяющая оценить состояние поверхности контактируемых деталей.

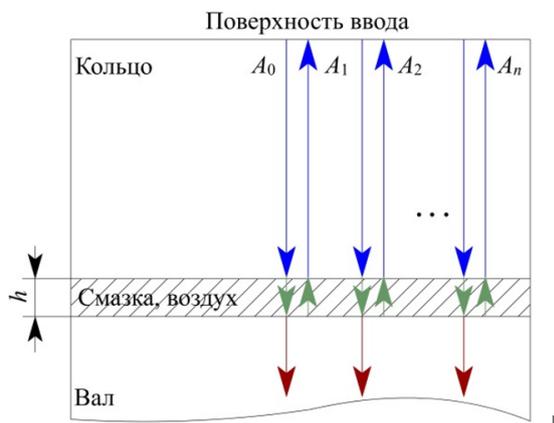


Рисунок 9 – Схематичное представление прохождения импульса акустической волны через границу кольцо-ось, разделенных слоем

последовательности отраженных от границ соединения и поверхности ввода импульсов с амплитудами A_1, A_2, \dots, A_n . В модели с плоскими границами и плоским фронтом волны амплитуда k -го принятого импульса пропорциональна амплитуде $(k - 1)$ -го импульса, коэффициентам отражения от поверхности ввода R_1 и границы раздела сред R_2 с учетом затухания волны:

$$A_k = A_0 \cdot (R_1 \cdot R_2 \cdot e^{-\delta \cdot 2 \cdot h})^k, \quad (7)$$

где A_0 – амплитуда зондирующего импульса; δ – коэффициент затухания, м^{-1} ; R_1 – коэффициент отражения от поверхности ввода, R_2 –

Соединение кольца с осью представляет собой границу двух объектов, которые разделены воздушной или масляной прослойкой (рис. 9). Толщина слоя – это один из определяющих факторов, от которых зависит надежность работы соединения.

В случае импульсного излучения ультразвуковых волн в один из элементов соединения, формируется акустический отклик в виде

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

Амплитуда k -го импульса в логарифмических относительных единицах:

$$N = 20 \cdot \text{Lg} \left(\frac{A_k}{A_0} \right) = \alpha \cdot k, \quad (8)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Подстановка (7) в (8) дает выражение для коэффициента пропорциональности α :

$$\alpha = 20 \cdot \text{Lg}(R_g) + 20 \cdot \text{Lg}(R_c \cdot e^{-\delta \cdot 2 \cdot l}). \quad (9)$$

Уравнение (9) устанавливает связь между коэффициентом пропорциональности амплитуды, выраженной в логарифмическом масштабе, и номером импульса с коэффициентом отражения от границ соединения. Коэффициент отражения рассчитан в диссертационной работе для квазинепрерывного излучения и позволяет по известному коэффициенту отражения определить толщину переходного слоя Δ :

$$R_g = \frac{A_1}{A_0} = \frac{z_3 - z_1}{z_3 + z_1} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{(z_2^2 - z_1^2) \cdot (z_3^2 - z_2^2)}{z_2^2 \cdot (z_3 - z_1)^2} \cdot \sin^2(k_2 \cdot \Delta)}{1 - \frac{(z_2^2 - z_1^2) \cdot (z_3^2 - z_2^2)}{z_2^2 \cdot (z_3 + z_1)^2} \cdot \sin^2(k_2 \cdot \Delta)}}, \quad (10)$$

где k_2 – волновое число в зазоре, м^{-1} ; Δ – толщина контактного слоя; z_1, z_2, z_3 – волновые сопротивления материала кольца, слоя и оси, соответственно.

Исследования акустических характеристик прессового соединения проводились дефектоскопом УСД-50 с использованием прямых преобразователей продольных волн с частотой 2,5, 5,0 и 10 МГц. Продольная ультразвуковая волна возбуждалась на поверхности дорожки качения кольца и распространялась по радиусу соединения (рис. 10). Регистрировалась серия эхо-импульсов, отраженных от внутренней и наружной цилиндрических поверхностей кольца (рис. 11). Коэффициенты корреляции для всех зависимостей амплитуды от порядкового номера импульса превышают 0,95. Для каждого эксперимента методом наименьших квадратов рассчитаны коэффициенты линейной регрессии. Максимальное без учета знака значение коэффициента пропорциональности (наклона зависимости) наблюдается для свободного кольца, для которого $R_g = 1$:

$$\alpha_0 = 20 \cdot \text{Lg}(R_c \cdot e^{-\delta \cdot 2 \cdot l}). \quad (11)$$

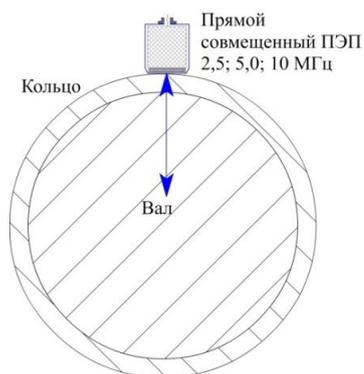


Рисунок 10 – Схема испытания неподвижного разъемного соединения кольца с осью эхо-методом

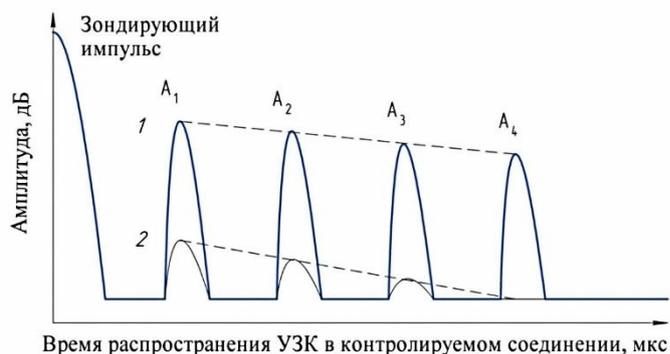


Рисунок 11 – Амплитудная развертка в логарифмическом масштабе: 1 – кольцо свободное, 2 – стандартный образец с натягом 72 мкм

Подстановка (11) в (9) дает выражение для коэффициента отражения от границы соединения, которое с использованием уравнения (10) позволяет определить зазор между соединяемыми деталями (рис. 12):

$$\text{Lg}(R_g) = \frac{\alpha_{\Delta} - \alpha_0}{20}. \quad (12)$$

где α_{Δ} и α_0 – коэффициенты пропорциональности контролируемого соединения и свободного кольца, соответственно.

Реализованный способ позволяет провести контроль прессового соединения и браковку соединений с неплотным сопряжением колец подшипников с осями колесных пар. При этом методика, основанная на сравнении акустических характеристик прессового соединения и свободного кольца, позволяет уменьшить влияние мешающих факторов: затухание, не прямолинейность поверхности ввода, дифракция ультразвукового пучка, описываемая диаграммой направленности преобразователя. Экспериментально полученные значения толщины переходного слоя для различных коэффициентов пропорциональности представлены на рисунке 12.

Использование интегрального метода свободных колебаний объекта контроля для обнаружения неплотности контакта колец с осями исследовалось экспериментально с определением спектральных и временных характеристик свободных колебаний колец, соединений колец подшипников с шейками осей, стандартных образцов и реальных осей колесных пар с кольцами подшипников, поступившими из эксплуатации в

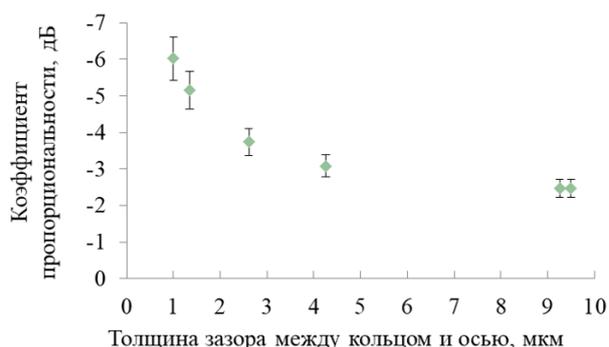


Рисунок 12 – График зависимости коэффициента пропорциональности от толщины слоя смазки между кольцом и осью

средний ремонт в вагонные ремонтные депо.

Собственные колебания колец возбуждались ударом стальным сферическим бойком диаметром 12 мм и массой 6,5 г, падающим на наружную цилиндрическую поверхность кольца (рис. 13). Направленность удара обеспечивалась трубкой, закрепленной под углом α к вертикальной оси. Угол наклона и место удара выбирались так, чтобы не допустить повторного удара.

Возбуждаемые при ударе с энергией (30 – 40) мДж колебания регистрировались двумя преобразователями, один из которых устанавливался вблизи места удара, второй под углом 90° . В экспериментах использовались два типа преобразователей: широкополосный GT-300 и резонансный с частотой 100 кГц. Сигналы регистрировались в частотном диапазоне от 1 до 100 кГц вне рабочей полосы частот преобразователей и оцифровывались осциллографом TDS-2014 с временем дискретизации 0,8 мкс, сохранялись и обрабатывались на ЭВМ.

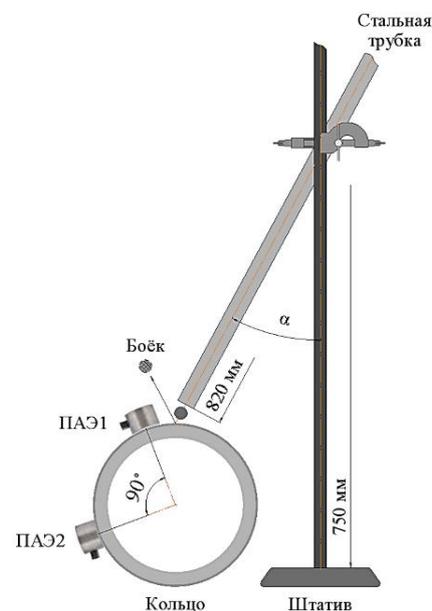


Рисунок 13 – Схема эксперимента

Амплитудно-частотные характеристики сигналов, регистрируемых в свободных кольцах (рис. 14), имеют 25 однозначно идентифицируемых

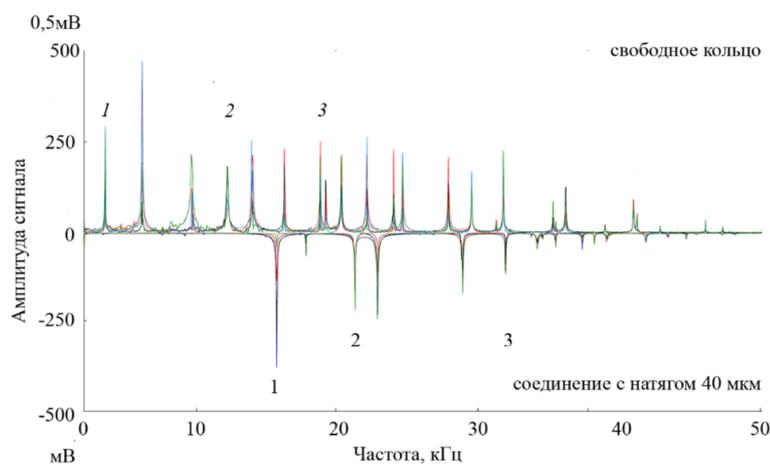


Рисунок 14 – Амплитудно-частотные характеристики сигналов с ПАЭ для кольца в свободном состоянии и соединения с натягом

локальных максимумов в диапазоне частот от 0 до 50 кГц. В образцах натяга низкочастотные колебания с частотой менее 15 кГц отсутствуют, а количество собственных частот в диапазоне от 15 кГц до 50 кГц не превышает 14. Собственные частоты свободных колец и образцов

не совпадают с учетом погрешности 0,05 кГц.

Методом конечных элементов рассчитаны собственные частоты кольца и образца натяга. Каждой собственной частоте установлено соответствие формы колебаний (рис. 15). Осесимметричные колебания кольца и образца приведены на рисунках 2, 3 и 4. Колебания, имеющие осевую симметрию n -го порядка (совпадают сами с собой при повороте на угол $(360/n)^\circ$). Колебания второго

порядка симметрии $n = 2$ для кольца показаны на рис. *a*, для образца – *e* и *жс*, третий порядок симметрии $n = 3$ – *б* и *и*. Рассчитанные методом конечных элементов собственные частоты с относительным отклонением не более 2 % соответствуют экспериментально установленным. Коэффициент корреляции экспериментальных и рассчитанных значений частот превышает 0,99.

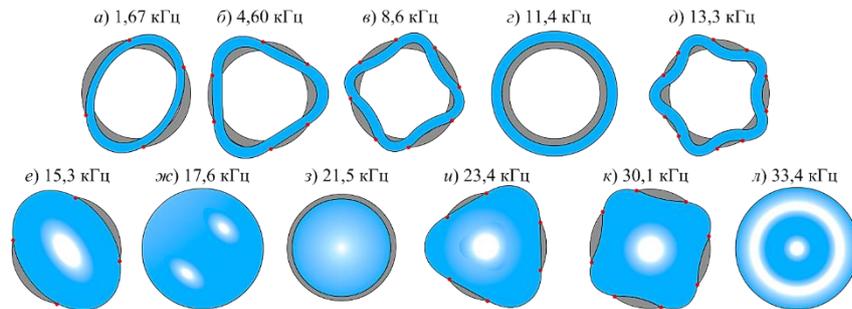


Рисунок 15 – Собственные частоты и форма колебаний свободного кольца (*a – д*) и образца натяга (*e – л*), точками обозначены узлы колебаний

Анализ закономерностей затухания свободных колебаний выполнен с помощью преобразования Фурье в последовательных временных окнах длительностью 13 мс с шагом 0,8 мс. Все гармоники сигнала являются затухающими с характерными временами от 2 до 30 мс (рис. 16).

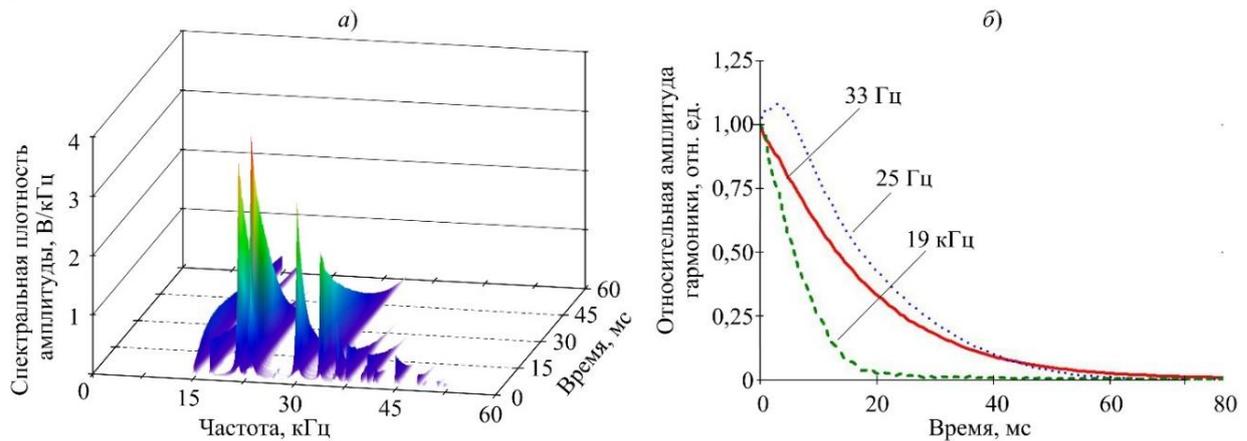


Рисунок 16. – Амплитудно-частотно-временная характеристика свободных колебаний образца натяга 40 мкм (*a*) и зависимость амплитуды гармоник свободных колебаний кольца подшипника от времени (*б*)

Для отдельных гармоник колебаний с осевой симметрией n -го порядка, кроме осесимметричных, наблюдается не монотонное изменение амплитуды сигнала, локальные максимумы на временной зависимости и, следовательно, нарушение экспоненциального характера затухания (см. рис. 16, *б*). Причина связана с биениями сигнала, которые возникают из-за одновременного возбуждения двух собственных колебаний осевой симметрии одного n -го порядка на близких частотах с разной фазой. Биения сильно зависят от

первоначального ударного воздействия и чувствительны к малым изменениям параметров удара, что затрудняет измерение коэффициентов затухания собственных колебаний осевой симметрией любого порядка n , кроме осесимметричных.

Спектры сигналов прессовых соединений колец с шейками осей, рассчитанные на интервале от 0,4 до 26,4 мс, приведены на рис. 17 *а, в, г, д* и на интервале от 3,2 до 29,2 мс – рис. 17 *б*. Спектры *а, б, в*, получены на бракованных соединениях с отрицательным натягом: *а, б* зазор заполнен индустриальным маслом, *в* – сухой зазор. Для соединений с плотной посадкой (натяг 50 мкм) спектр приведен на рис. 17 *г*, со слабой (натяг менее 5 мкм) – *д*.

Загрязнение соединения маслом (рис. 17, *а*) искажает спектр, который из линейчатого становится сплошным и отдельные гармоники не дифференцируются. Для анализа таких сигналов предложено использовать разное затухание гармоник. Смещение окна вычисления спектра от начала сигнала на 3,2 мс (рис. 17, *б*) позволило обнаружить совпадение спектра гармоник колебаний со спектром свободного кольца на пяти частотах (1,6; 13,5; 18,8; 19,2; 22,3 кГц) в анализируемом диапазоне от 0 до 25 кГц с погрешностью не более 0,1 кГц.

В спектре колебаний колец надетых на ось вручную без масла (рис. 17 *в*) однозначно идентифицируются 9 пиков спектральной плотности амплитуды на собственных частотах свободного кольца до границы 25 кГц, а на частотах от 25 до 50 кГц – 2 пика.

Спектры свободных колебаний соединений с допустимым натягом (рис. 17 *г*) и слабым, близким к нулю (рис. 17 *д*), подобны. Аналогично спектрам образцов натяга прессовых соединений (см. рис. 14) спектральные линии сосредоточены в области более 15 кГц. Спектральные линии соединений совпадают с собственными частотами образцов: 15,3 и 23,4 кГц. Для соединений со слабым натягом в отличии от соединений с плотным прилеганием кольца к оси (натяг более 40 мкм) в спектре обнаруживаются собственные частоты свободного кольца 4,6 и 20,4 кГц (рис. 17 *д*).

Критерием неплотности прессового соединения методом свободных колебаний является наличие в спектре собственных частот свободного кольца подшипника. При повторных испытаниях не обнаружено закономерных собственных гармоник, которые проявляются при слабом натяге, появление тех или иных частот связано с конфигурацией неплотного прилегания кольца подшипника к шейке оси. При этом, появляются гармоники, соответствующие собственным колебаниям произвольного порядка осевой симметрии.

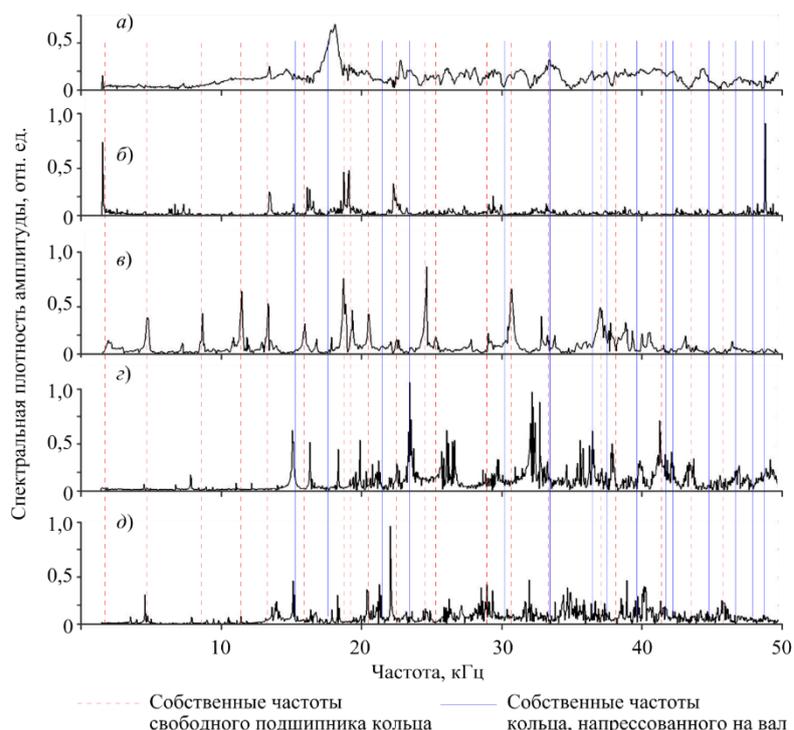


Рисунок 17 – Спектры свободных колебаний колец на шейках осей: *а)* кольцо свободно вращается, шейка оси покрыта маслом; *б)* тоже, начало интервала вычисления спектра сдвинуто от начала сигнала на 3,2 мс; *в)* тоже, шейка оси сухая; *г)* и *д)* неподвижное соединение кольца с осью с натягом более 40 мкм и менее 5 мкм, соответственно

В четвертой главе в развитие метода свободных колебаний разработан критерий браковки прессовых соединений интегрально-резонансным методом для реализации в ультразвуковом приборе УДС1-СИН контроля плотности прессовой посадки колец буксовых подшипников на шейку оси.

Стандартные образцы представляют собой элементы оси – валы из стали 45, на которые напрессованы новые и бывшие в эксплуатации внутренние передние и задние кольца подшипников роликовых цилиндрических.



Рисунок 18 – Пресс для формирования образцов натяга

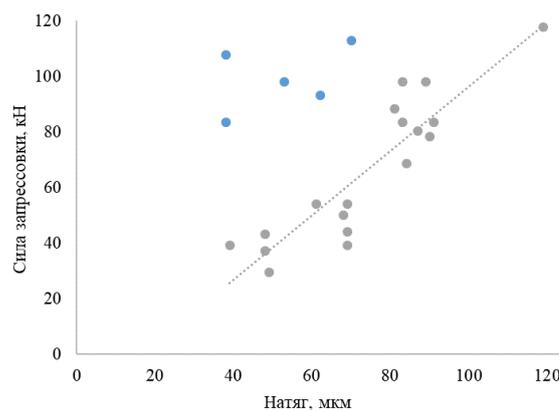


Рисунок 19 – Зависимости максимальной силы запрессовки от значения натяга

Способ посадки колец на валы выбирали из условия максимального

соответствия технологии, применяемой в вагоноремонтном депо. Соединения формировались на гидравлическом прессе (рис. 18), при этом фиксировалось максимальное усилие запрессовки (рис. 19). Для соединений с плавным возрастанием усилия в процессе прессовой посадки наблюдается монотонная зависимость силы трения скольжения от натяга, а соответствующий экспериментальным данным коэффициент трения составил 0,11. Часть экспериментальных данных (рис. 19) с немонотонной зависимостью силы от перемещения отклоняются в сторону больших усилий запрессовки.

Интегрально-резонансный способ заключался в последовательной посылке импульсов (рис. 20) в объект с возрастающим количеством C и периодом $(A + B)$ колебаний с шагом 2 мкс для каждого следующего. После окончания посылки регистрируется длительность и количество периодов свободных колебаний с амплитудой выше порога фиксации прибора 0,4 мВ. В результате одного испытания определяется матрица длительности свободных колебаний в зависимости от длительностей и числа импульсов в серии.

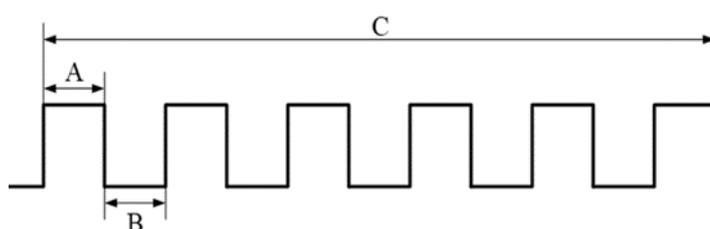


Рисунок 20 – Форма зондирующего импульса с изменяемыми: длительностью времени напряжения высокого A и низкого B уровней, количеством колебаний C

Графическое изображение матрицы представляет собой трехмерную диаграмму, у которой по оси абсцисс изменяется частота зондирующих импульсов, по оси ординат – количество периодов колебаний, по оси аппликат – время до уменьшения амплитуды колебаний ниже порогового уровня (рис. 21). Исходная диаграмма носит нестационарный характер со случайными локальными резонансами, которые визуально идентифицируются как выбросы-провалы и в значительной степени связаны с негармоническим характером прямоугольного зондирующего импульса, в спектре которого присутствуют высшие кратные гармоники. Для повышения информативности и уменьшения случайного разброса измеряемого

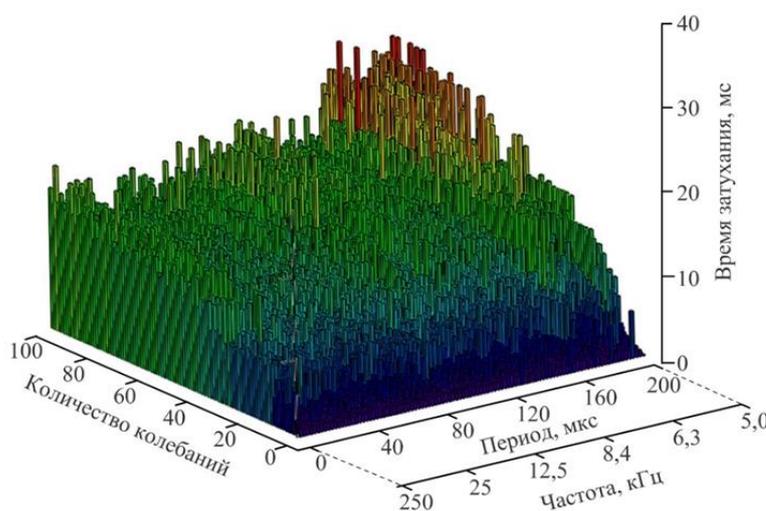


Рисунок 21 – Пример трехмерного графика матрицы свободных колебаний УДС1-СИН

параметра – времени регистрации свободных колебаний, выполнено усреднение по количеству периодов зондирующего импульса (рис. 22).

Для колец в свободном состоянии, надетых на ось с зазором и с неплотной посадкой, при увеличении количества периодов зондирующего импульса с 20 до 100 отсутствует заметный рост длительности колебаний (рис. 22 а). Для колец с плотной посадкой на ось, напрессованных в вагонном ремонтном депо, с гарантированным натягом наблюдается эффект накопления, при котором время затухания монотонно увеличивается (рис. 22 б).

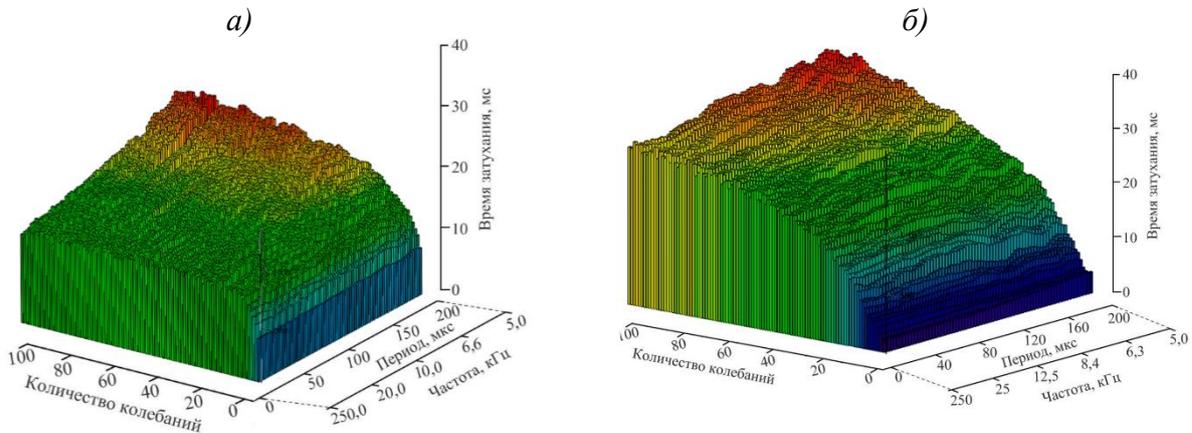


Рисунок 22 – Столбчатая диаграмма зависимости времени уменьшения амплитуды до порогового уровня от количества импульсов и частоты излучения свободного кольца (а) и соединения с натягом (б)

На основе обнаруженной закономерности предложен критерий обнаружения неплотности прессового соединения колец подшипников с шейками осей колесных пар (рис. 23) в диапазоне частот от 15 до 100 кГц:

$$K = \sum_{n=20}^{30} t_n / \sum_{n=60}^{70} t_n, \quad (13)$$

где n – количество периодов зондирующего импульса; t_n – среднее время до затухания амплитуды ниже порогового уровня в диапазоне частот от 15 до 100 кГц, с.

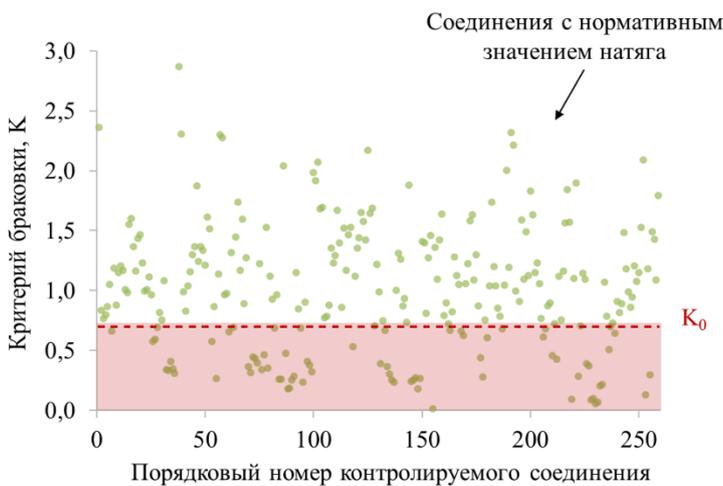


Рисунок 23 – Диаграмма распределения критерия браковки для всех исследуемых соединений

100 кГц, с.

По результатам испытаний в вагонном ремонтном депо колесных пар определено минимальное критическое значение коэффициента $K_0 = 0,65$, выше которого $K > K_0$ соединение бракуется. Критерий реализован в приборах, внедренных в вагонные ремонтные депо АО «ВРК-1» и

ООО «НВК», что подтверждается актами внедрения, а вероятности браковки годных и пропуска не плотных соединений не превышают 1 и 5 %, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные способы акустического контроля методом акустоупругости, свободных колебаний, зеркально-теневым методом и критерий браковки интегрально-резонансным методом позволяют обнаружить недопустимые соединения колец подшипников с шейками осей колесных пар как формируемые в депо, так и поступившие в ремонт, что обеспечивает повышение надежности их дальнейшей эксплуатации и, следовательно, безопасности железнодорожного транспорта. В результате диссертационного исследования получены следующие результаты.

1. В качестве объектов испытаний были разработаны и изготовлены стандартные образцы: стальные болванки из стали 45 с напрессованными на них внутренними передними и задними кольцами роликовых цилиндрических подшипников с погрешностью определения разности диаметров в системе посадки с натягом не более 1,5 %. Разработан и изготовлен стенд для нагружения колец подшипников, воспроизводящий напряженно-деформированное состояние в прессовом соединении, который обеспечивает нагружение кольца до напряжений, эквивалентных натягу 70 мкм. Разработан и изготовлен хордовый преобразователь, обеспечивающий прозвучивание кольца подшипника продольными и поперечными волнами с базой 96 мм.

2. 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. 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. Экспериментально определены акустоупругие коэффициенты для материала кольца подшипника (сталь ШХ15), как для измерений по скорости ультразвука, так и для измерений по времени распространения ультразвуковой волны.

3. На основе аналитической модели рассчитаны параметры отраженных и прошедших через границу прессового соединения и границу акустической

задержки и объекта контроля акустических волн. На основе акустической модели разработан и экспериментально реализован метод локального определения толщины слоя между кольцом подшипника и шейкой оси после прессовой посадки, основанный на регистрации многократно отраженных акустических импульсов и коэффициента пропорциональности логарифма амплитуды от номера импульса.

4. Экспериментально и теоретически получены амплитудно-частотные и амплитудно-временные характеристики сигналов для различных значений натяга. Методом конечных элементов экспериментально получены собственные частоты колец, посаженных на валы и шейки осей колесных пар с натягом, идентифицированы формы собственных колебаний на различных частотах. Определены коэффициенты затухания различных мод в зависимости от плотности посадки колец на ось. Обнаружена немонотонность уменьшения амплитуды колебаний поверхности, связанная с интерференцией нескольких мод колебаний на близких частотах.

5. Разработан способ и критерии браковки внутренних колец подшипников интегрально-резонансным методом по зависимости инкремента амплитуды колебаний прессового соединения при увеличении длительности внешнего периодического воздействия.

Выполненные исследования и полученные результаты могут являться основой для разработки акустических способов контроля плотности контакта других соединений, например, болтовых соединений строительных конструкций, и расширения области применения метода акустоупругости для измерения абсолютных значений механических напряжений в объектах сложной формы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и WoS

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

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

Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ

3. **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. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-2-20-29.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

4. 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.

5. 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.

6. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus

7. Popkov A., **Ryzhova A.**, Vyplaven V. (2022). Determination of the Tightness of Bearing Rings of Axle Box Unit of Freight Car Bogie by the Method of Frequency Analysis of Free Vibrations. 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.

8. 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.

9. 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/mateconf/201821603007.

10. 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.

Публикации в журналах, научных сборниках и других научных изданиях

11. **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.

12. **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.

13. **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.