

На правах рукописи

Тенитилов Евгений Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ
СВОБОДНЫХ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ БУКСОВОГО УЗЛА
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет
путей сообщения» (СГУПС)

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Степанова Людмила Николаевна
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Сергей Иванович Буйло
- кандидат технических наук,
Борис Михайлович Лапшин
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Иркутский государственный
университет путей сообщения"
(г. Иркутск)

Защита состоится 20 декабря 2011г. в 17-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет по адресу: 634028 г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд.215 (актовый зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет по адресу: 634034 г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан 14 ноября 2011г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент



Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Парк прицепного подвижного состава, эксплуатируемого на железных дорогах РФ, исчисляется миллионами единиц. Поэтому необходима разработка и внедрение новых, совершенных и эффективных приборов и методов, осуществляющих их периодический контроль. Особое требование предъявляется к автоматизации процесса контроля, так как при этом повышается надежность и достоверность результатов измерения. Достижение высокой прочности и надежности объектов железнодорожного транспорта - это одни из необходимых факторов, позволяющих обеспечить безопасность его эксплуатации.

Подшипниковые узлы тягового подвижного состава, устанавливаемые на осях и валах, являются важнейшими конструктивными элементами, от технического состояния которых в значительной степени зависит безопасность движения. После поступления в депо грузового вагона его тележка полностью демонтируется. После разбора подшипниковых узлов свободные кольца подшипников (КП) проходят проверку с использованием методов неразрушающего контроля (НК). Эффективность применения традиционных методов НК (вихретокового и магнитного) в значительной степени зависит от квалификации дефектоскописта.

Следует отметить сложный характер взаимодействия колеса и рельса. Основными дефектами КП буксового узла являются дефекты усталостного происхождения, а к причинам выхода их из строя можно отнести нарушение режимов работы, загрязненность смазки, наличие трещин, сколов, раковин и выкрашиваний на дорожках качения. Установлено, что до 45 % подшипниковых узлов выходят из строя при половине расчетного пробега, составляющего $2 \cdot 10^6$ км. Проведение НК термообработанных КП осложняется тем, что их материал обладает низкой пластичностью. Это приводит к быстрому развитию усталостной трещины.

В процессе эксплуатации подшипников поверхности дорожек качения на внешних и внутренних кольцах, по которым перекачиваются шарики или ролики, повреждаются механически (из-за проникновения в подшипник посторонних частиц или грязи) и электрически (от протекания тока). Во время эксплуатации подшипники подвергаются очень большим нагрузкам, что вызывает их перегрев и последующее разрушение. Это может привести к катастрофам из-за схода вагонов.

Проблема мониторинга подшипника ставит перед железнодорожной отраслью задачи, связанные с созданием приборов и методов, позволяющих эффективно и надежно проверять состояние подшипников. Необходимость создания новых приборов для контроля различных конструкций предопределила решение важнейшей проблемы, связанной с разработкой современных методов исследования на уровне структурных свойств материалов КП.

Для решения этих задач в последние годы все более широко применяется метод акустической эмиссии (АЭ). При его использовании на исследуемый объект контроля (ОК) воздействуют нагрузкой, вызывающей появление дефор-

мации. Трещина или другой дефект, появившийся в напряженной конструкции, излучает звуковые волны, которые распространяются внутри исследуемого объекта и регистрируются преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ).

В процессе АЭ-контроля КП разнообразные дефекты выступают как концентраторы напряжений и излучают дискретные акустические волны. При использовании метода АЭ процесс измерения автоматизируется и на микроуровне обнаруживаются наружные и внутренние дефекты, рассчитываются их координаты и классифицируются повреждения по степени опасности. Однако процесс инициирования развития дефекта сопровождается шумами с характеристиками, близкими к характеристикам сигналов АЭ, что усложняет определение связи их информативных параметров с параметрами процессов структурных изменений и разрушения материала.

Вследствие высоких контактных напряжений в системе качения «ролик-кольцо» дефекты колец располагаются близко к поверхности. Анализ работ, связанных с испытаниями свободных КП методом АЭ показал, что особенности их контроля при статическом нагружении до сих пор недостаточно изучены. Основные работы по АЭ-контролю подшипников, как за рубежом, так и в нашей стране посвящены исследованиям безразборных вращающихся подшипниковых узлов. В известных отечественных работах, как правило, используется один акустический преобразователь, в результате чего АЭ-система записывает смесь сигналов от дефектов и шумов, которые по своим спектральным и энергетическим характеристикам практически идентичны и такие сигналы сложно разделить. Основными регистрируемыми параметрами являются суммарный счет и распределение энергии либо в функции времени, либо нагрузки. Локализация дефекта отсутствует, что существенно ограничивает возможности метода АЭ.

Объектом исследования являются подшипниковые узлы тягового подвижного состава.

Предмет исследования: теоретические и экспериментальные методы контроля свободных КП.

Целью диссертационной работы является разработка методики повышения надежности АЭ-контроля дефектов в свободных КП буксового узла подвижного состава.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка метода локализации источников сигналов АЭ в объектах с малыми геометрическими размерами.
2. Анализ влияния погрешностей координат установки пьезопреобразователей на точность локализации источников сигналов АЭ.
3. Исследование погрешностей локализации сигналов АЭ в свободных КП при статическом нагружении.
4. Разработка информационных критериев браковки свободных КП по анализу сигналов АЭ.
5. Разработка методики АЭ-контроля свободных КП.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели использовались методы цифровой обработки сигналов, математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, кластерного анализа.

Результаты, полученные в ходе отбраковки дефектных КП, подтверждены экспериментально на основе фрактографии зон разрушения. Экспериментальные исследования проводились с использованием микропроцессорных АЭ и тензометрических систем, сертифицированных в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии.

Научная новизна.

1. Предложен способ АЭ-контроля свободных КП при их статическом нагружении с последующим поворотом на 180°.
2. Дана оценка влияния погрешностей координат установки пьезопреобразователей на точность локализации источников сигналов АЭ.
3. Разработан метод АЭ-контроля объектов с малыми геометрическими размерами, позволяющий снизить погрешности локализации сигналов АЭ.
4. Разработаны информационные критерии браковки дефектных КП.

Практическая значимость работы. По результатам работы подготовлены и практически реализованы в ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» методики АЭ-контроля объектов с малыми геометрическими размерами. В процессе проведенных испытаний использовались АЭ-системы СЦАД-16.03 (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C. 27.007.А.№39729, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 18892-10), СЦАД-16.10 (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C. 27.007.А. №40707, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под № 45154-10), сертифицированные в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии. Получен патент РФ на разработанный способ АЭ-контроля КП буксового узла и устройства для его осуществления. При контроле свободных внешних и внутренних КП железнодорожных транспортных средств применяются разработанные методики контроля. Разработанный метод локализации источников сигналов АЭ в объектах с малыми геометрическими размерами используется при контроле образцов, а также в лекциях и практических занятиях в СГУПС по курсу «Автоматизация измерений».

На защиту выносятся:

1. Метод АЭ-контроля в объектах с малыми геометрическими размерами с определением времени прихода сигналов АЭ по вейвлет-коэффициентам.
2. Методика локализации сигналов АЭ в свободных КП.
3. Критерии браковки дефектных свободных КП буксового узла при АЭ-контроле.
4. Анализ влияния погрешностей координат пьезопреобразователей на точность локализации сигналов АЭ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на VI Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы Сибири» (Новосибирск, 2009 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Ка-

чество и инновации – основа современных технологий» (Новосибирск, 2010 г.), конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2010, V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Аэродинамика и прочность авиационных конструкций», посвященной 70-летию со дня основания СибНИА (Новосибирск, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы в соавторстве опубликовано 11 работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, утвержденных ВАК РФ, получен патент РФ, опубликована монография.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 93 наименования. Работа изложена на 134 страницах, содержит 52 рисунка, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, научная и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы основные задачи исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается технология деповского ремонта подшипниковых узлов, предусматривающая их полный, либо частичный демонтаж и проведение дефектоскопирования всех деталей. Анализируются различные методы НК, используемые в депо при контроле свободных КП и безразборных вращающихся подшипников как в нашей стране, так и за рубежом. Отмечается актуальность темы, связанной с АЭ-контролем КП.

Среди неисправностей внутренних КП буксового узла метод АЭ способен выявить дефекты, являющиеся последствием естественной усталости металла под действием высоких контактных давлений, проскальзывания роликов, вдавливания твердых частиц отслаивающегося металла. АЭ-контроль технического состояния подшипниковых узлов при вращении относится к технологии безразборной диагностики. Метод основан на регистрации и анализе акустических сигналов. Взаимодействие элементов качения в работающем подшипниковом узле приводит к появлению большого числа виброакустических сигналов в широком частотном диапазоне. Если дефект расположен на дорожке качения внутреннего кольца, то он периодически находится в зоне действия нагрузки. Энергия вибрации передается от внутреннего кольца к датчику через элементы качения, сепаратор, наружное кольцо и корпус подшипника. При распространении вибрации информативные сигналы испытывают значительные потери энергии. Помимо этого, дефект перемещается и часто находится вне зоны нагрузки. Кроме того, выборки сигналов, по которым производится усреднение, достаточно длинные и охватывают один полный оборот вала. В противном случае может оказаться так, что в выборки не будут попадать самые мощные участки сигнала АЭ, когда дефект внутреннего кольца проходит зону нагрузки.

Известные отечественные приборы АЭ-контроля вращающихся КП являются одноканальными, а, следовательно, могут определять ограниченный набор параметров сигналов (суммарный счет и амплитудное распределение). Акустический преобразователь устанавливается на крышку или корпус узла и в процессе прохождения через них сигнал существенно искажается. Кроме того, при использовании одного акустического датчика сложно справиться с шумами от вибрации оборудования. Такие шумы необходимо отделять от полезных сигналов. Однако паразитные шумовые сигналы и сигналы АЭ, полученные от дефектов, обладают практически одинаковым спектром и формой, что еще более осложняет процесс контроля. В таких приборах отсутствует локализация дефектов КП, так как контроль подшипникового узла проводится с использованием одного акустического преобразователя. За рубежом метод АЭ получил широкое распространение в процессе безразборного контроля КП. При этом разработанная технология основана на использовании четырех ПАЭ, устанавливаемых на подшипниковый узел. В процессе диагностики определялась корреляция между энергией сигналов АЭ и размерами дефектов.

Во второй главе приводится анализ методов повышения точности локализации сигналов АЭ в свободных КП при их статическом нагружении. В процессе испытаний образование и развитие микротрещин, характеризующих наличие дефекта в КП, сопровождались высокой скоростью счета, большим суммарным счетом (от 200 импульсов и выше), а также регистрацией высокоамплитудных сигналов АЭ.

Для определения координат источника сигналов АЭ использовались аналитические методы. Пример реализации данного метода локализации в дефектном КП представлен на рис. 1.

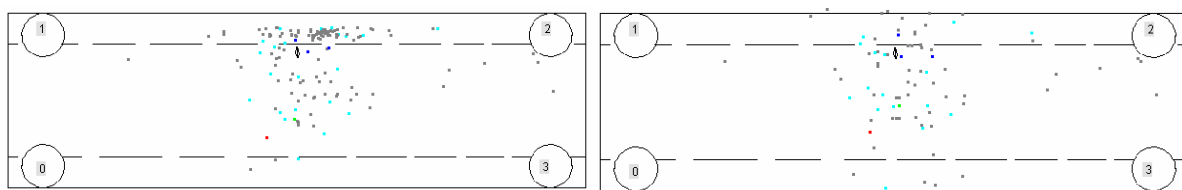
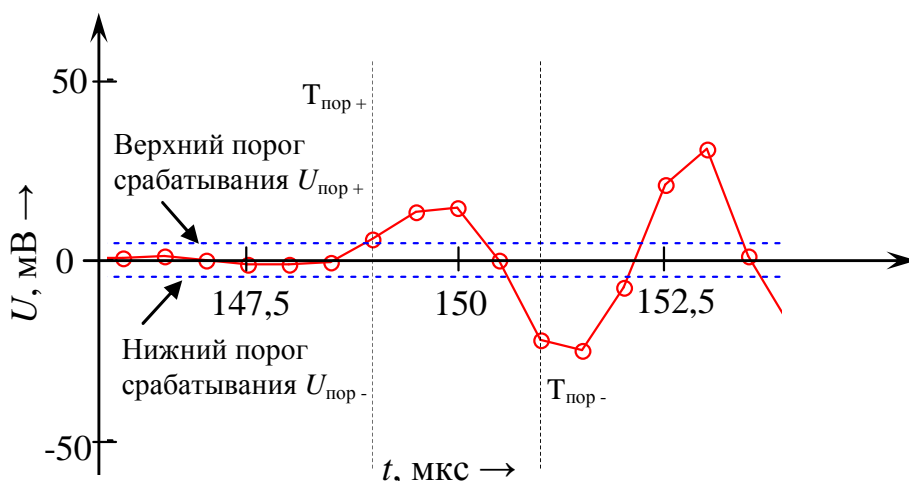


Рис. 1 - Применение табличного (а) и аналитического (б) методов локализации сигналов АЭ в дефектном КП при статическом нагружении

Проведенный анализ позволил оценить погрешности локализации дефекта. Основной недостаток существующей методики состоит в большой чувствительности погрешности локализации к точности определения разности времен прихода (РВП) сигнала на акустические датчики. Ошибка при определении времени прихода сигнала на один из датчиков в несколько микросекунд приводит к значительному перемещению точки локализации источника на развертке объекта. К основным факторам, увеличивающим ошибку в определении координат дефекта, относятся неточное определение координат ПАЭ, погрешности в расчете РВП сигналов, поступающих на акустические датчики, погрешности в оценке скорости распространения акустической волны.

Особенности усталостного разрушения КП (отсутствие заметных остаточных деформаций, внезапный характер заключительной стадии разрушения, разброс параметров и т.д.) чрезвычайно затрудняют предсказание его момента разрушения. Влияние на погрешность локализации погрешности определения РВП Δt_{ij} (Δt_{01} , Δt_{02} , Δt_{12}) имеет сложное распределение внутри пьезоантенны и в общем случае для каждой пары датчиков она различна. При этом радиальная погрешность локализации превышает максимальную из погрешностей определения РВП. За время прихода сигнала АЭ принято время превышения им либо нижнего $U_{пор-}$, либо верхнего $U_{пор+}$ порога (рис.2).

Помимо погрешности Δt_{ij} РВП на точность локализации существенное



влияние оказывают ошибки Δx_i , Δy_i в определении координат датчиков пьезоантенны. Их вклад в погрешность локализации источника сигнала АЭ представляется в виде:

Рис. 2 – Определение времени прихода сигнала АЭ пороговым методом по нижней и верхней полуволне

$$\begin{cases} \Delta x(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_2) = \frac{\partial x}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial x}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial x}{\partial y_2} \Delta y_2 \\ \Delta y(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_2) = \frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial y}{\partial y_2} \Delta y_2 \end{cases},$$

где Δx_1 , Δx_2 , Δy_2 - погрешности определения координат датчиков пьезоантенны.

С использованием системы СЦАД-16.10 исследовались зависимости задержки сигналов АЭ по времени от расстояния до источника S . Расчет координат источников сигналов АЭ осуществлялся аналитически пороговым методом, позволяющим определять начало сигнала АЭ. Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) $f_{АЦП}$ в АЭ-системе СЦАД-16.10 изменялась в пределах (4; 2; 1; 0,5) МГц. При обработке экспериментальной информации среднеквадратическое отклонение (СКО) σ координат x , y источников сигналов рассчитывалось как:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{cp} - x_i)^2}{n-1}}; \quad s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{cp} - y_i)^2}{n-1}},$$

где n - число зарегистрированных сигналов АЭ; X_{cp} , Y_{cp} - среднее значение координат x и y выборки; x_i , y_i - текущее значение координат x и y выборки.

На рис. 3, а, б показаны точки локализации с координатами X_{cp} и Y_{cp} , являющиеся центрами окружностей для различных частот дискретизации АЦП $f_{АЦП}$ АЭ-системы. Точкой S обозначен источник сигналов АЭ. Необходимо отметить уменьшение разброса локализованных источников и радиус – вектора R , а, следовательно, и повышение точности при увеличении частоты дискретизации $f_{АЦП}$.

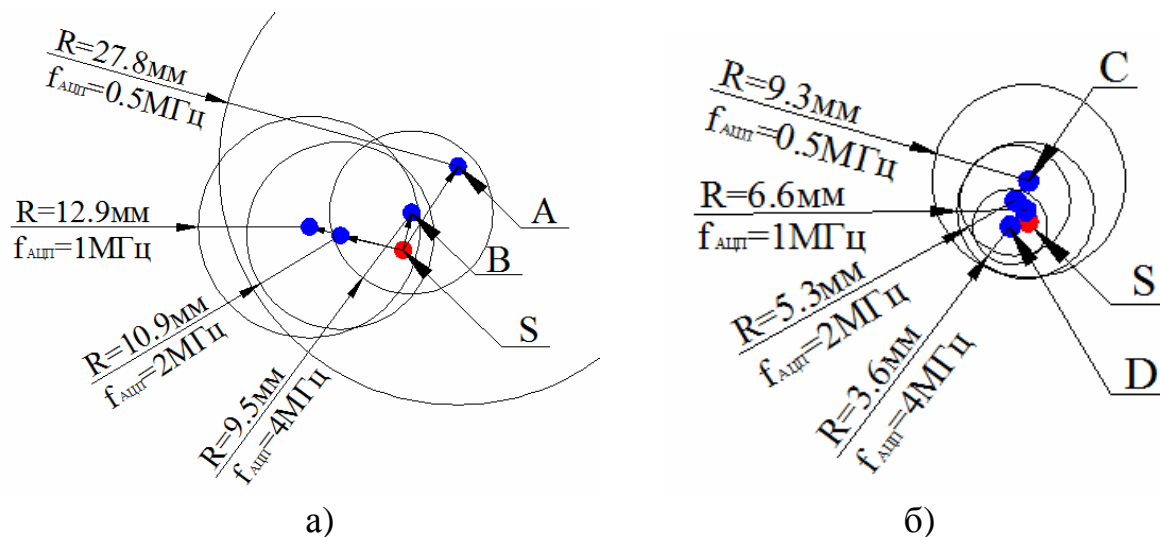


Рис. 3 - Взаимное расположение источника сигналов АЭ и точек локализации: а - ПАЭ типа ПК02-05; б - ПАЭ типа GT300

При использовании полосовых датчиков типа ПК02-05 при частоте дискретизации $f_{АЦП} = 0,5$ МГц, радиус-вектор равен $R = 27,8$ мм, а величина погрешности локализации составила $l_{SA} = 11,7$ мм. При частоте дискретизации $f_{АЦП} = 4$ МГц величина погрешности локализации уменьшилась до $l_{SB} = 4,5$ мм. При использовании широкополосных датчиков GT300 погрешности локализации значительно уменьшились и обозначены на рис. 3, б соответственно отрезками $l_{SC} = 3,9$ мм при частоте дискретизации $f_{АЦП} = 0,5$ МГц и $l_{SD} = 1,7$ мм при частоте дискретизации $f_{АЦП} = 4$ МГц. Установлено, что погрешности $\pm x_i$; $\pm y_i$ определения координат акустических датчиков пьезоантенны существенно влияют на погрешность локализации сигналов АЭ.

Особенно это проявляется при использовании низкой частоты дискретизации АЦП измерительного канала АЭ-системы и при работе с низкочастотными ПАЭ. Пороговый метод определения времени прихода сигнала АЭ позволил установить корреляцию радиус-вектора R отклонения локализованных источников сигналов АЭ и погрешности локализации от частоты дискретизации $f_{АЦП}$.

При контроле объектов с малыми геометрическими размерами возникает проблема, связанная с локализацией дефектов. В таких объектах время распространения акустического сигнала оказывается сравнимым с погрешностями АЭ-системы, что приводит к большим разбросам координат источников сигналов в зоне локализации. Обработка информации в режиме реального времени

обычно осуществляется по упрощенной модели ОК. При этом из ПАЭ образуются зоны контроля. Поверхность ОК покрывается сетками браковки с прямоугольными ячейками. Ячейки браковочных сеток, заполненные локализованными сигналами АЭ, представляют собой кластеры, объединенные координатами расположения источника сигнала.

Для пьезоантенны, состоящей из трех ПАЭ, расчет координат осуществляется по двум значениям РВП. На рис. 4,а приведена схема образования четырех пьезоантенн z_1, z_2, z_3, z_4 на развертке объекта цилиндрической формы (рис.4,б). Пьезоантенна z_2 состоит из трех ПАЭ, образующих треугольник с координатами ПАЭ 0 (0;0); ПАЭ 1 ($x_1; 0$); ПАЭ 2 ($x_2; y_2$). Анализ показал, что различные методы аналитического расчета координат источников по-разному влияют на погрешность локализации. Например, при расчете по приближенному методу, для ОК цилиндрической формы происходит искажение локационной картины, как показано на рис. 5.

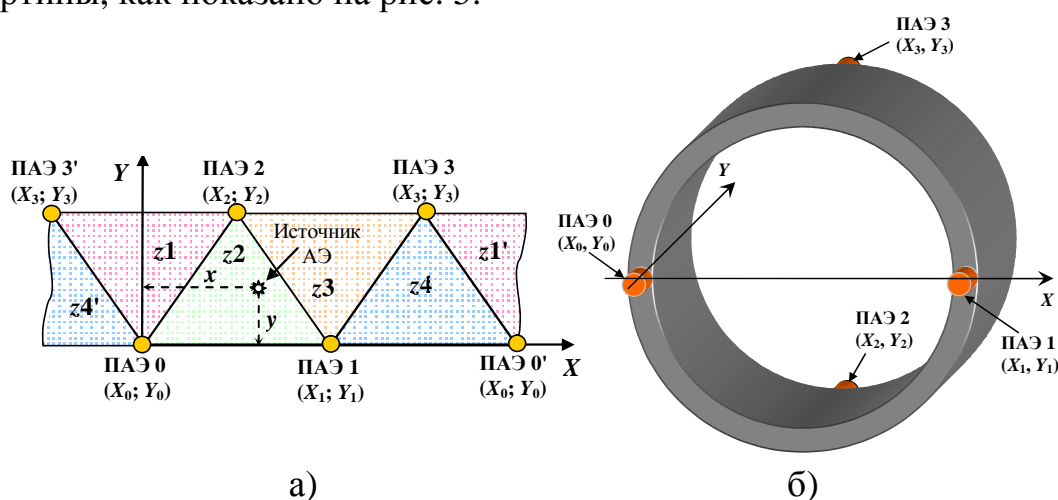


Рис. 4 - Схема установки ПАЭ на объекте цилиндрической формы: а - положение ПАЭ и источника сигналов АЭ на развертке ОК; б - расположение ПАЭ на объекте цилиндрической формы

В зоне I помещена сетка, состоящая из $N = 560$ источников сигналов АЭ и представляющая собой прямоугольный треугольник, в острых углах которого размещены ПАЭ 0 и ПАЭ 2. Локализация источников в данной зоне обозначена фигурой А (рис. 5). Фигура А содержит $n = 30$ источников, что составляет 5,4 % от их общего числа N , для которых абсолютная разница между исходными и вычисленными координатами $|\Delta x|$ и $|\Delta y|$ не превышает 1 мм. Порядка 10 % источников локализовались с погрешностью $|\Delta x| = |\Delta y| \leq 2$ мм.

Для сравнения в зоне II рассчитывались координаты источников, расположенных в прямоугольной сетке (рис. 5). В результате расчета получена картина локализации, обозначенная буквой P (рис. 5). Известные алгоритмы определения координат для ОК с малыми геометрическими размерами, не позволяют осуществлять локализацию источников сигналов АЭ с высокой точностью. В разработанном методе контроля искомые координаты x и y источников сигналов

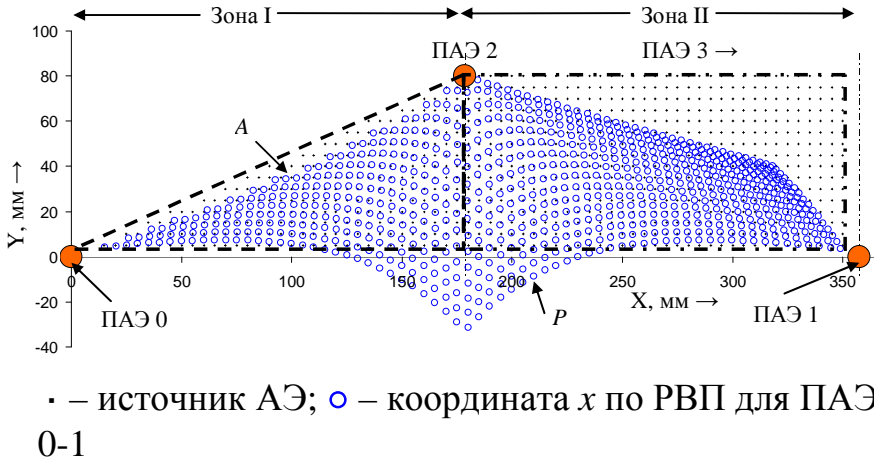


Рис. 5 – Локализация сигналов АЭ по методу линейного приближения: расчет по РВП для ПАЭ 0-ПАЭ1

АЭ определяются в единицах РВП как:

$$x = \frac{x_1^2 + t_0^2 - t_1^2 + 2T_s(t_0 - t_1)}{2x_1}; \quad y = \frac{y_2^2 + x_2^2 + t_0^2 - t_2^2 + 2T_s(t_0 - t_2) - 2xx_2}{2y_2},$$

где x_1, x_2 - абсциссы ПАЭ 1, ПАЭ 2 в единицах РВП; y_2 - ордината ПАЭ 2 в единицах РВП; T_s - наименьшее положительное значение из двух корней (T_1 и T_2) квадратного уравнения вида:

$$K_2T^2 + K_1T + K_0 = 0, \quad (1)$$

где $K_0 = 2(A_1B_1b - A_2B_2a)$; $K_1 = A_1^2b - A_2^2a$; $K_2 = B_1^2b - B_2^2a - ab$; $a = \frac{(t_0 - t_1)^2}{4}$;

$$b = \frac{x_1^2 - (t_0 - t_1)^2}{4}; \quad A_1 = \frac{t_0 - t_1}{x_1}; \quad B_1 = \frac{t_0^2 - t_1^2}{2x_1}; \quad A_2 = \frac{t_0 - t_2}{y_2} - \frac{x_2(t_0 - t_1)}{x_1y_2};$$

$$B_2 = \frac{y_2^2 + x_2^2 + t_0^2 - t_2^2}{2y_2} - \frac{x_2(x_1^2 + t_0^2 - t_1^2)}{2x_1y_2}.$$

Локализация источников сигналов АЭ проводилась по методу пересечения гипербол с вычислением корней T_1, T_2 уравнения (1). На развертке пьезоантенны помещается сетка (ячейки квадратной формы со стороной $a = 5$ мм), в узлах которой расположены источники сигналов АЭ. Все координаты источников, рассчитанные по наименьшим положительным корням T_1 уравнения (1), совпадают с координатами соответствующих узлов сетки. Локализация с применением отрицательных корней T_2 является ложной. Основным достоинством метода гипербол является отсутствие при расчете неоднозначности в выборе корней уравнения (1), что позволяет избежать дополнительных вычислений для идентификации источников внутри пьезоантенны и сократить время обработки при АЭ-контроле КП.

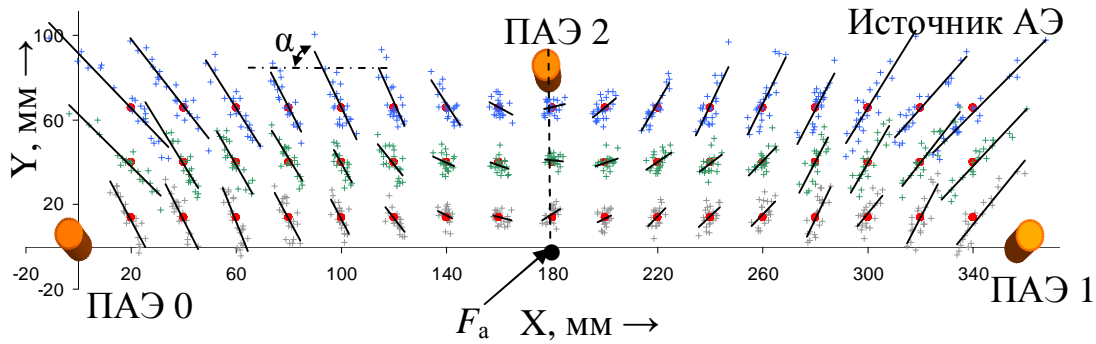


Рис. 6 - Линейная аппроксимация ошибок локализации при расчете по методу гипербол

На рис. 6 показано влияние погрешностей определения РВП Δt_{ij} сигналов АЭ на погрешность локализации. Для оценки погрешностей локализации к расстояниям от ПАЭ 0, ПАЭ 1, ПАЭ 2 до каждого из узлов сетки, добавлялась случайная величина λ , изменяющаяся в диапазоне от $-a$ до $+a$.

В результате на развертке пьезоантенны получим рассеянную группу точек локализации, представляющую собой вытянутые эллипсы ошибок. Для их аппроксимации используются прямые, параметры которых рассчитываются по методу наименьших квадратов (рис. 6):

$$y = rx + d,$$

где коэффициенты r и d определяются по формулам:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad d = \bar{y} - r \cdot \bar{x},$$

где $\bar{x}; \bar{y}$ - средние арифметические значения координат x и y .

Коэффициент r при переменной x , определяющий угол наклона аппроксимирующей прямой α ($r = tg\alpha$), зависит от положения источника внутри пьезоантенны (рис.6). На рис. 7,а показана зависимость коэффициента r наклона линий аппроксимации, полученных расчетом и экспериментально от координаты x источников. Коэффициент корреляции составил 0,9. В точке F_a пересечения графиков зависимостей $r = f(x)$ с осью абсцисс происходит изменение направлений наклона линий аппроксимации (рис.7,б). Малый размер зоны локализации приводит к тому, что даже небольшие погрешности в оценке времен прихода сигналов АЭ вызывают значительные погрешности определения координат источника.

Проведенные вычисления позволили установить зависимость между погрешностью $\pm\delta_{РВП}$ (в мкс) в определении времени прихода быстрой моды сигнала АЭ на первый принявший ПАЭ с погрешностью $\pm\delta_y$ (в мм) в определении координат y источников.

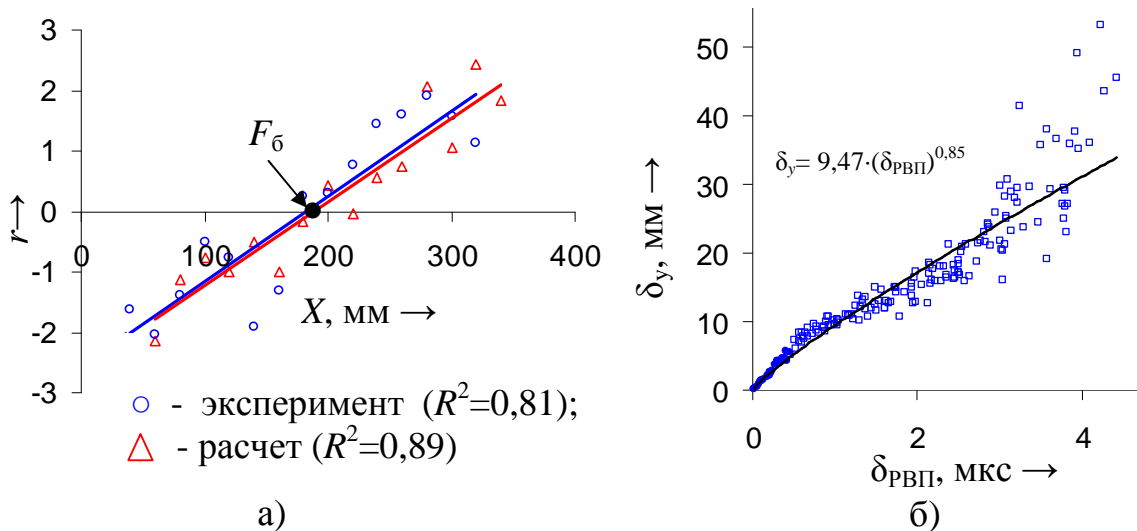


Рис. 7 - Погрешности локализации при расчете по методу гипербол: а - зависимость коэффициента r уравнения линий аппроксимации от значений абсцисс X координат источников АЭ; б - зависимость ошибки средней координаты Y локализованного источника АЭ от ошибки времени прихода сигнала АЭ

Для источника сигналов АЭ с координатами $x_{ист} = 260$ мм; $y_{ист} = 40$ мм данная зависимость с наибольшей достоверностью может быть описана уравнением (рис. 7,б):

$$d_y = 9,47 \cdot (d_{РВП})^{0,85}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при погрешности РВП, равной $\delta_{РВП} = \pm 1$ мкс, возникает погрешность по координате Y , равная $\delta_y = \pm 9,47$ мм. Однако при высокой погрешности в определении РВП ($\delta_{РВП} \geq 3$ мкс) формула (2) становится некорректной для описания зависимости $\delta_y = f(\delta_{РВП})$.

Используемая временная локализация частот, содержащихся в сигнале АЭ, обусловлена дисперсией скорости распространения акустических волн в материале ОК. Для решения данной задачи применялось оконное преобразование Фурье (ОПФ) и вейвлет-преобразование. Однако вейвлет-преобразование имеет преимущество перед ОПФ при анализе сигналов АЭ, так как использует подвижное и масштабируемое частотно-временное «окно» (базисный вейвлет). Это позволяет иметь высокие разрешения по оси частот для низкочастотных компонентов сигнала АЭ и по оси времени для его высокочастотных компонент. Для получения вейвлет - скалограмм сигналов АЭ использовалась программа *AGU-Vallen Wavelet*, осуществляющая процедуру вейвлет-преобразования на основе базисного вейвлета Габора. Его размер составлял $n = 200$ отсчетов. Сигналы исследовались в частотном диапазоне от 0 до 255 кГц с шагом $f_{шаг} = 1$ кГц. Установление максимальных значений коэффициентов вейвлет-преобразования k_{WT} для всех сигналов АЭ позволяет определить соответствующие им параметры частот f и времен t . Исследования показали, что для уменьшения погрешностей локализации в объектах с малыми геометрическими размерами целесообразно применять вейвлет-преобразование, позволяющие

более точно определять время прихода сигналов АЭ в момент достижения вейвлет-коэффициентом k_{WT} максимального значения.

В третьей главе рассмотрены вопросы построения нагружающих устройств (НУ) для испытания свободных КП. Выбор и реализация режима нагружения при АЭ-контроле объектов является важной методической задачей. Поэтому для отработки методики контроля КП наряду с методом АЭ использовалась тензометрия, поскольку при нагружении кольца необходимо измерять максимальную испытательную нагрузку, достаточную для инициализации сигналов АЭ от дефектов. На рис. 8 показан внешний вид стенда для АЭ-контроля свободных КП.

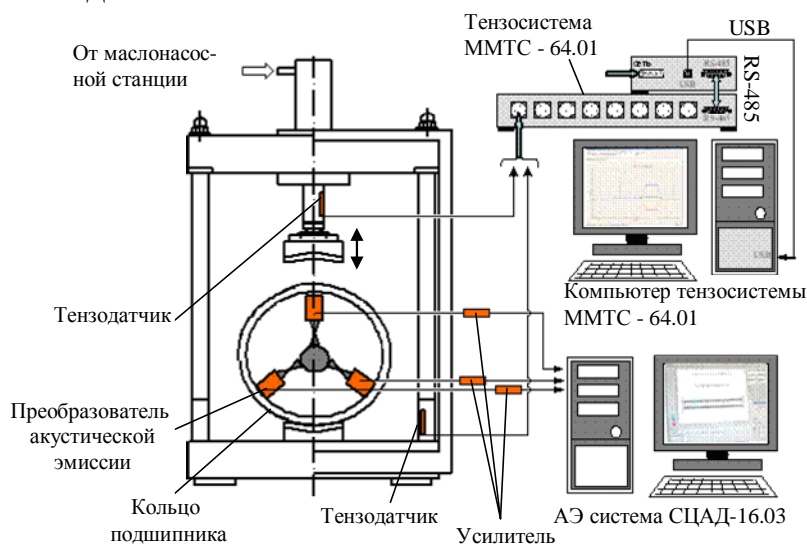


Рис.8 - Внешний вид стенда для АЭ-контроля свободных КП

При нагружении металла сигналы отражают характер пластической деформации на микроуровне и позволяют классифицировать повреждения по степени опасности в зависимости от положения и ориентации дефекта.

Тензодатчики, наклеенные на шток и стойку, подключались к параметрическому каналу АЭ-системы. За счет использования информации параметрического канала

осуществлялась привязка времени прихода сигналов АЭ к моменту нагружения. При регистрации АЭ-сигналов в их «заголовок» записывалось текущее значение механического напряжения выбранного канала тензометрии. Эта информация в дальнейшем позволяла отбраковывать паразитные сигналы. Измерения осуществлялись микропроцессорной многоканальной тензометрической системой

ММТС-64.01 (сертификат RU.C.28.007.A № 10749, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под номером 21760-01). При проведении тензометрии внешнего КП за каждым механическим нагружением следовал его односторонний поворот в захватах стенда на угол $\alpha_{\text{шаг}} = 3,5^\circ$. Таким образом, полный угол поворота внешнего кольца при проведении эксперимента составил $\alpha_{\text{полн}} = 77^\circ$. Область контакта 1/2 части верхнего захвата с 1/4 частью внешнего кольца имеет общую площадь $S = 1280 \text{ мм}^2$ и приведена на рис. 9. Представленная модель кольца построена в программной среде *Solid Works*.

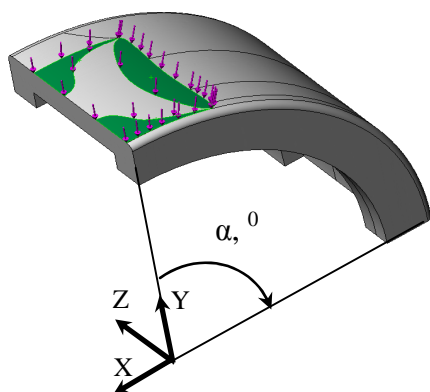


Рис. 9 - Зона приложения нагрузки к внешнему КП

Максимум растягивающих напряжений составляет 135 МПа в диапазоне угла $\alpha = \pm 4^\circ$. Сжимающие напряжения возрастали с приближением угла α к 90° . Максимум сжимающего напряжения не превышал -93,33 МПа.

Построенная пространственная модель кольца (рис.9) является твердотельным объектом. Граничными условиями модели являются регистрация выреза кольца функцией «симметрия» и ограничение его перемещений вдоль оси Z. Статическими граничными условиями модели КП является нормально действующая сила на область контакта «верхний захват – кольцо».

Пара тензодатчиков 1 и 2, установленных на бурте внешнего КП, при испытаниях позволила определить распределение механических напряжений в материале кольца в диапазоне углов $\alpha = -2,8^\circ \dots 97,8^\circ$. При воздействии суммарной испытательной силы, равной 10 кН, определено наличие растягивающих напряжений в зоне кольца, ограниченной сегментом с угловыми координатами $\alpha = \pm 41,9^\circ$ (рис. 10).

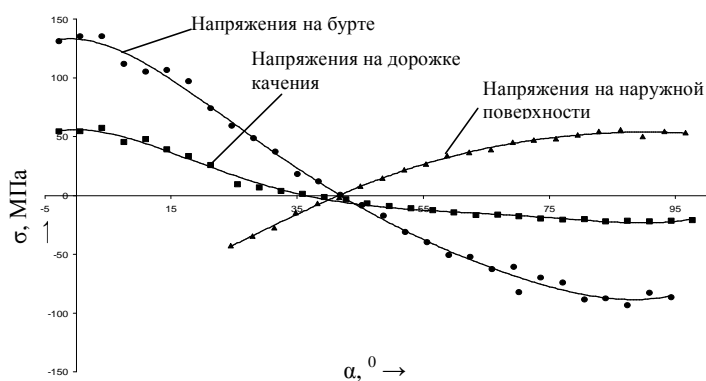


Рис. 10 - Результаты тензометрии внешнего КП

напряжения для угла $\alpha = 0^\circ$ составляет 40 МПа, а для угла $\alpha = 90^\circ$ – 5,8 МПа (рис. 11).

Расчет внешнего КП методом конечных элементов выявил некоторые особенности распределения напряжений в материале кольца при механических испытаниях. При этом выяснилось, что наиболее нагруженным элементом внутренней поверхности кольца является наружная кромка бурта A (рис.12) в поперечном сечении кольца под углом $\alpha = 0^\circ$.

Второй раздел третьей главы посвящен разработке методики проведения статических испытаний с использованием метода АЭ и тензометрии. Для проведения тензометрии были отобраны три бездефектных кольца: наружное, внутреннее и внутреннее с буртом. При испытаниях использовались проволочные тензодатчики типа ПКС-5-120 (сертификат RU.C.28.007.A № 30935, зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений под № 37343-08) с базой, равной 5 мм и номинальным сопротивлением 120 Ом. На внешней поверхности наружного кольца было наклеено два тензодатчика. Кроме того, два тензодатчика наклеены в середине бурта на внутренней поверхности и четыре тензодатчика - на дорожке качения. На внутреннее кольцо было наклеено три тензодатчика. На внутреннее кольцо с буртом наклеено шесть тензодатчиков.

На рис. 11 показан график, иллюстрирующий сопоставление экспериментальных результатов по тензометрированию внешнего кольца и результатов статического анализа, полученных методом конечных элементов. На графике приведены кривые распределения главных напряжений σ_I и σ_{III} по середине ширины бурта внешнего КП. Модуль разности расчетных и экспериментальных значений

При этом три тензодатчика располагались на внутренней поверхности кольца и три тензодатчика – на внешней поверхности.

Установлено, что активность источников сигналов АЭ существенно зависит от величины максимальных растягивающих напряжений, возникающих в материале кольца при его нагружении.

При этом материал КП деформируется, разнообразные дефекты выступают как концентраторы напряжений и излучают дискретные акустические волны локальной упругой разгрузки материала.

Среди неисправностей внутренних КП буксового узла, метод АЭ выявляет дефекты (коды) 1.3.01, 02, 03, 04, 13, 20, которые, в основном, являются следствием естественной усталости металла под действием высоких контактных давлений, проскальзывания роликов, вдавливания твердых частиц отслаивающегося металла.

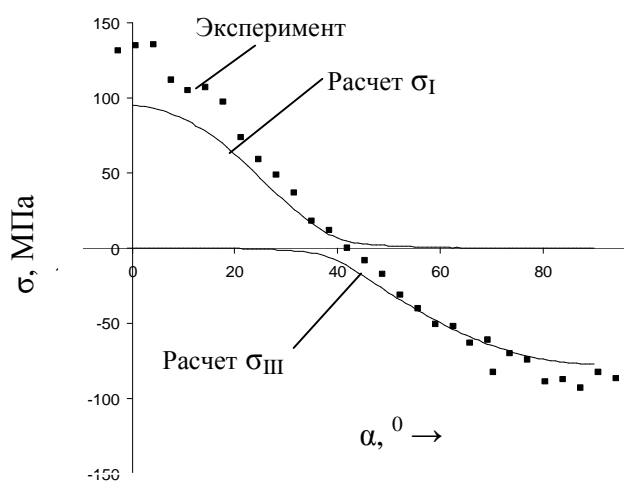


Рис. 11 - Распределение напряжений σ_I и σ_{III} по середине ширины бурта внешнего КП при испытательной нагрузке $F=10$ кН

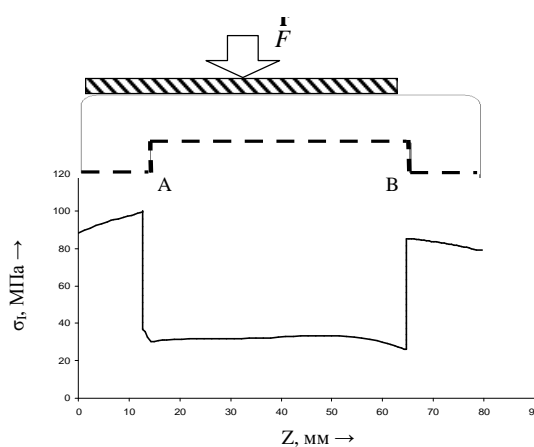


Рис. 12 - Зависимость напряжения σ_I от ширины внешнего КП при испытательной нагрузке $F=10$ кН

В четвертой главе приведены результаты применения разработанных методик при проведении экспериментальных исследований в лабораторных условиях и в депо. При проведении АЭ - испытаний КП механически нагружали на специализированном гидравлическом стенде (рис. 13). Для вычисления места возникновения сигналов АЭ в материале КП применялся линейный тип локализации по двум ПАЭ. Этот алгоритм позволял определять координату источника вдоль окружности кольца. Неоднозначность, связанная с топологией ОК, устранялась за счет использования третьего ПАЭ.

Преобразователи ПАЭ 1 и ПАЭ 2 (рис. 13) образуют первую однозначную линейную зону локализации, а ПАЭ 1 и ПАЭ 3 - вторую линейную зону. Разделение источников по зонам проводилось в зависимости от РВП сигналов АЭ на ПАЭ 2 и ПАЭ 3.

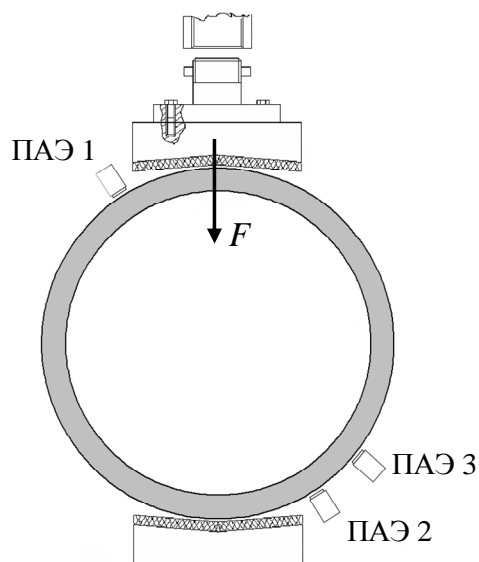


Рис.13 - Схема установки для механического нагружения КП

Контроль каждого КП состоял из трех нагружений с последовательными поворотами вокруг оси вращения на 60° . При испытаниях полный цикл изменения нагрузки от минимального до максимального значения в 60 кН проводили за время (20...30) с. Порог дискриминации для АЭ-сигналов на входе ПУ изменялся в диапазоне (20 ... 80) мВ.

График линейной регрессии приведен на рис. 14 в виде прямой линии

$$N(F) = k \cdot (F - F_0), \quad (3)$$

где k - коэффициент пропорциональности, характеризующий угол наклона аппроксимирующей прямой; F_0 - значение механической нагрузки, до превышения которой ОК акустически себя не проявлял.

Средний коэффициент корреляции по 16 измерениям составил 0,987, СКО равно 0,006.

Результаты статистически обрабатывались методом наименьших квадратов параметров k и F_0 в функции (3) по 12 кольцам. Для уточнения закономерностей изменения сигналов АЭ при многократных нагружениях, провели испытания одного и того же бездефектного кольца без разгрузки. Регистрация сигналов АЭ осуществлялась только при увеличении испытательного усилия на кольцо. Источники АЭ, возникающие при разгрузке детали, не анализировались. В результате обработки экспериментальных данных установлена тенденция к снижению активности сигналов АЭ с первого нагружения до третьего (рис. 15). Активность в последующих испытаниях существенно не изменялась в пределах статистического разброса от 2 до 8 сигналов.

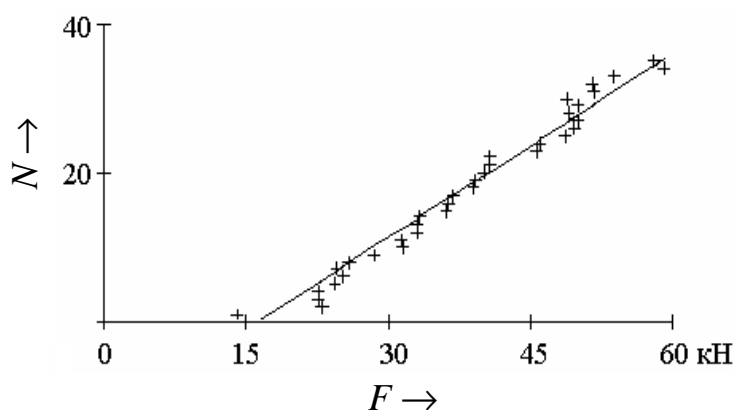


Рис.14 - График зависимости числа сигналов АЭ N от механической силы F при испытаниях бездефектного КП

Пространственное распределение источников сигналов АЭ в материале кольца связано с распределением главных механических напряжений и мест его взаимодействия с захватами НУ. Источники сигналов АЭ сконцентрированы в областях максимальных растягивающих напряжений вблизи полярных углов $\varphi = 0$ и 180° .

Под углом 90° к линии приложения нагрузки эмиссия не возникает, что объясняется недостаточным в этой части

материала уровнем растягивающих напряжений, составляющих половину ам-

плитуды напряжений на внутреннем бурте и отсутствием взаимодействия захватов с поверхностью кольца.

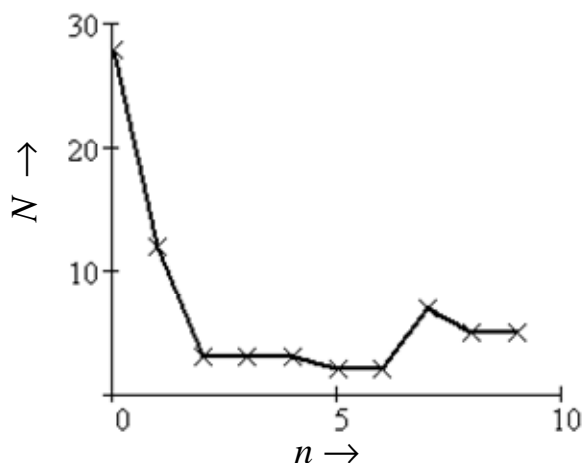


Рис.15 - График зависимости числа сигналов АЭ N в одном испытании от порядкового номера испытания n для одного кольца

Для испытания дефектных КП характерно значительно большее количество сигналов по сравнению с бездефектными кольцами (более 200). Временные зависимости величины испытательной нагрузки, числа сигналов АЭ и их активности приведены на рис. 16. В отличие от аналогичных экспериментальных функций, полученных на бездефектных кольцах, в данном случае наблюдается ненулевая активность сигналов АЭ даже в отсутствии монотонного роста среднего значения испытательной нагрузки. Во временных интервалах (30 ... 40) с и (45 ... 60) с при

постоянном среднем значении силы регистрировались сигналы АЭ. В начале интервалов скорость счета возрастает, достигая максимального значения более 15 сигн./с, а затем постепенно уменьшается за время, равное 10 с.

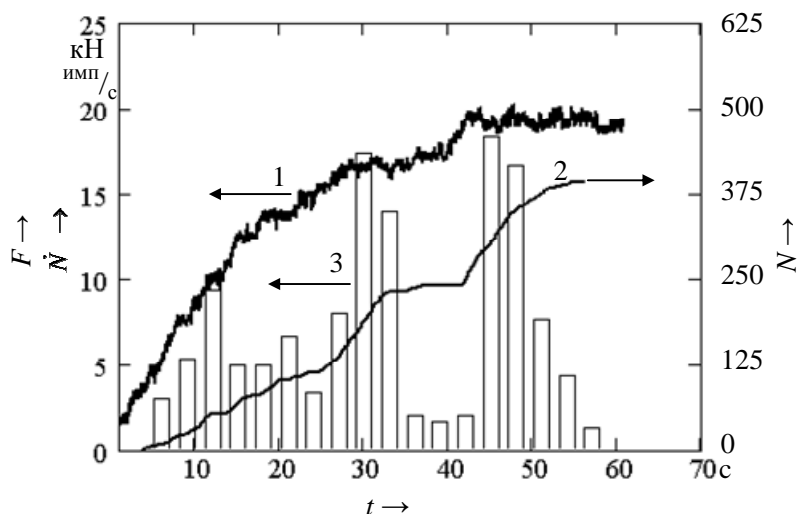


Рис.16 - Зависимость испытательной нагрузки F (1), числа импульсов N (2) и скорости счета \dot{N} (3) от времени t

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ работ, связанных с прочностными испытаниями свободных КП методом АЭ показал, что выбор режима нагружения кольца подшипникового узла является важной методической задачей. Контроль за величиной механической нагрузки, прикладываемой к кольцу, осуществлялся с использованием

тензометрии. При разработке стендов для АЭ-контроля свободных КП учитывалась необходимость обеспечения нагружения для инициирования сигналов АЭ, так как при нагружении металла кольца они отражают характер пластической деформации на микроуровне.

2. Измерение деформаций кольца, распределение напряжений по поверхности кольца при испытаниях проводились с использованием тензометрии. Для этого на внутренние и наружные поверхности колец наклеивались проволочные тензодатчики ПКС-5-120. Информация с тензодатчиков поступала на вход автоматизированной микропроцессорной тензометрической системы ММТС-64.01. Между компьютерами тензосистемы ММТС-64.01 и АЭ-системы СЦАД-16.10 осуществлялся обмен информацией.

3. При АЭ-контроле свободных КП буксового узла нагружение производилось сжимающей, монотонно увеличивающейся механической нагрузкой. В процессе нагружения измеряли величину механической нагрузки в функции времени, регистрировали сигналы АЭ, осуществляли их перевод в цифровой эквивалент с последующей обработкой по разработанному для КП алгоритму, фильтрацию помех, регистрацию РВП и определение координат развивающихся дефектов. Результаты испытаний были подтверждены фрактографией зоны кольца, где были локализованы сигналы АЭ.

4. Разработан метод расчета координат источников сигналов АЭ в объектах с малыми геометрическими размерами при их статическом и циклическом нагружении в процессе ресурсных испытаний. Показано, что при АЭ-контроле малогабаритных объектов время распространения акустического сигнала и погрешность в определении времени прихода современными микропроцессорными АЭ-системами оказываются соизмеримыми величинами. Это приводит к большим погрешностям локализации дефектов в объектах с малыми геометрическими размерами. Поэтому было предложено применять вейвлет-преобразования, позволяющие более точно вычислять время прихода сигналов АЭ в момент достижения вейвлет-коэффициентом k_{WT} максимального значения.

5. Предложено к применению три методики браковки дефектных КП. В первой методике браковка осуществляется по критерию, связанному с превышением порогового уровня по скорости счета и амплитуде сигналов АЭ. Она позволяет браковать кольца с развитыми усталостными дефектами. Для повышения надежности браковки на микроуровне разработана вторая методика браковки на основе локально-динамического критерия. При этом осуществляется одновременный анализ параметров сигналов АЭ (скорость счета, амплитуда, РВП, локализация) при возрастающей испытательной нагрузке. Третья методика браковки основана на использовании метода кластеризации по оцифрованной форме сигналов АЭ. При этом находится максимум корреляционной функции между сигналами АЭ. Если при выполнении АЭ-контроля КП уровень энергии в кластерах будет превышать установленное пороговое значение, то исследуемое кольцо бракуется.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, полный список которых приведен в тексте диссертации, в том числе монография, действующий патент РФ, и 4 публикации в журналах, включенных ВАК РФ в Перечень периодических изданий для кандидатских диссертаций.

Публикации в центральных изданиях, включенных ВАК РФ в Перечень периодических изданий для кандидатских диссертаций:

1. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Ивлиев В.В., Кабанов С.И., Бехер С.А., Власов К.В., Бобров А.Л., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Канифадин К.В., Рамазанов И.С., Тенитилов Е.С.- / Под ред. Л.Н.Степановой, А.Н.Серьезнова – Новосибирск: Наука, 2011 - 272 с.
2. Патент РФ №2391656, МПК G 01 N 29/15. Акустико-эмиссионный способ диагностирования колец подшипников буксового узла железнодорожного транспортного средства и устройство для его осуществления/ Л.Н. Степанова, С.А. Бехер, С.И.Кабанов, Е.С.Тенитилов – Опубл. 10.06.2010, Бюл. №16.
3. Бехер С.А., Тенитилов Е.С. Зависимость числа импульсов АЭ при механических испытаниях колец подшипников буксового узла // Дефектоскопия. 2006. № 8. С.54-62.
4. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Тенитилов Е.С. Методика определения координат дефектов при акустико-эмиссионном контроле свободных колец подшипников // Контроль. Диагностика. 2010.№4. С.61-65.
5. Кареев А.Е., Степанова Л.Н., Тенитилов Е.С. Влияние погрешностей координат установки датчиков пьезоантенны на точность локализации источников сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2010. №11. С.21-28.

Основные публикации в других изданиях:

1. Степанова Л.Н., Серьезнов А.Н. Канифадин К.В., Тенитилов Е.С. Перспективы развития метода акустической эмиссии при техническом диагностировании объектов контроля // «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды», конф. с участием иностранных ученых. 28 июня-2 июля 2010 г. т.Ш. Машиноведение – Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2010. С.72 – 77.
2. Степанова Л.Н., Тенитилов Е.С. Локализация сигналов акустической эмиссии в кольцах подшипников// «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды», конф. с участием иностранных ученых. 28 июня-2 июля 2010 г. т.Ш. Машиноведение – Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2010. С.77 – 81.
3. Степанова Л.Н., Тенитилов Е.С. Акустико-эмиссионная диагностика свободных колец подшипников буксового узла // Ресурс и диагностика материалов и конструкций»: тезисы V Российской науч.-технич. конф. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2011, с.38.

4. Кареев А.Е., Степанова Л.Н., Тенитилов Е.С. Анализ погрешностей локализации дефектов при акустико-эмиссионном контроле колец подшипников локомотива // «Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта»: Межвуз. темат. сб. науч.тр. – Омский гос. ун-т путей сообщения: Омск, 2011.- С.49-53.
5. Степанова Л.Н., Тенитилов Е.С. Анализ методов определения времени прихода сигналов акустической эмиссии// «Качество и инновация – основа современных технологий»: Сб.тр. Всерос. Науч.-практ. конф. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010, С.107-112.
6. Степанова Л.Н., Тенитилов Е.С. Анализ частотно-временных характеристик сигналов акустической эмиссии при локализации дефектов в малогабаритных объектах контроля //Всероссийская науч.-техн. конф. «Аэродинамика и прочность летательных аппаратов», посвященная 70-летию со дня основания СибНИА, Новосибирск: СибНИА, 2011.

Подписано в печать 07.11.2011 г.
1,5 печ.л. Тираж 120 экз. Заказ № 2498

Издательство ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет путей
сообщения»
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191