



Брестер Альбина Фаритовна

ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛЬНО-
ТЕНЕВОГО МЕТОДА МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ
ПРУТКОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Специальность 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

Работа выполнена на кафедре «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»)

Научный руководитель: **Муравьева Ольга Владимировна**
доктор технических наук, профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»
(г. Ижевск)

Официальные оппоненты: **Бехер Сергей Алексеевич**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Физика, электротехника, диагностика и управление в технических системах» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»
(г. Новосибирск)

Федоров Алексей Владимирович
доктор технических наук, профессор факультета систем управления и робототехники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»
(г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр неразрушающего контроля «ЭХО+»
(г. Москва).

Защита состоится «22» декабря 2023 г. в 14:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.077.02 при ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» по адресу: 426067, г. Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УдмФИЦ УрО РАН и на сайте <http://www.udman.ru/ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н. *Махнева* Махнева Татьяна Михайловна

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Прутковый металлопрокат широко применяется в различных сферах машиностроительных производств для изготовления ответственных деталей оборудования: болтовых и сварных конструкций и инструмента (инструментальные стали), валов центробежных насосов (конструкционные углеродистые стали), пружин (рессорно-пружинные стали), насосных штанг, и т.д. Появление различных типов дефектов пруткового проката возможно в процессе любого технологического цикла производства проката и ведет к их развитию при эксплуатации в условиях высоких нагрузок, под воздействием коррозионных сред, температурных градиентов и, как следствие, к выходу из строя оборудования.

Одной из основных задач при проведении неразрушающего контроля пруткового проката является выявление дефектов на стадии прутков-заготовок. Преимущественное использование при контроле пруткового проката малого диаметра получили магнитный и вихретоковый виды контроля, обеспечивенные большим разнообразием автоматизированных установок. Перечисленные методы, несмотря на свое преимущество, заключающееся в бесконтактной работе, не позволяют обнаруживать внутренние дефекты. Наряду с этим на результаты контроля также могут влиять мешающие факторы в виде отклонений по электромагнитным свойствам объекта. Регламентированный ГОСТ 21120-75 ультразвуковой (УЗ) вид распространяется на контроль проката от 30 мм и реализуется с использованием эхо и зеркально-теневого методов. Применительно к контролю пруткового проката малых диаметров УЗ метод имеет ряд ограничений: сложность обеспечения надежного акустического контакта пьезопреобразователя с цилиндрической поверхностью и необходимостью создания специализированных притертых преобразователей; зависимость результатов дефектоскопии от качества акустического контакта с объектом контроля при использовании контактных (иммерсионных) пьезопреобразователей, особенно в случае горячекатаной поверхности объекта; необходимость обеспечения поступательно-вращательного движения объекта, приводящая к снижению производительности; наличие мертвой зоны; сложность выявления дефектов произвольной ориентации. Использование эффектов волноводного распространения место ограничения по минимальной длине прутка, обусловленные наличием мертвой зоны; недостаточная чувствительность к дефектам, протяженным вдоль всей длины прутка; низкая разрешающая способность.

Одним из перспективных подходов к дефектоскопии и структуроскопии пруткового проката малых диаметров является использование зеркально-теневого метода (ЗТМ) многократных отражений с применением для возбуждения и регистрации волн специализированных проходных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей. Результатом прозвучивания по диаметру прутка является серия импульсов многократных отражений, к которой не применим традиционно

используемый в качестве информативного амплитудный признак дефекта (эхо-метод, зеркально-теневой метод).

Степень разработанности темы

Большой вклад в исследования и разработки в области неразрушающего контроля с использованием ЭМА преобразователей внесли ведущие научные школы: МГТУ им. Н.Э. Баумана, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», УдмФИЦ УрО РАН, ИФМ УрО РАН, ИПМ УрО РАН, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», НИИИН МНПО «Спектр», НТУ «Харьковский политехнический институт», ООО «АКС», ООО «Компания «Нординкрафт», ЗАО «Ультракraft», и ученые Аббакумов К.Е., Алехин С.Г., Алешин Н.П., Баширов М.Г., Бобров В.Т., Буденков Г.А., Гобов Ю.Л., Гуревич С.Ю., Кириков А.В., Комаров В.А., Могильнер Л.Ю., Муравьева О.В., Мужицкий В.Ф., Самокрутов А.А., Смородинский Я.Г., Себко В. П., Сучков Г.М., Паврос С.К., Петрищев О.Н., Ремезов В.Б., Чабанов В.Е., Шевалдыкин В.Г., а также множество зарубежных исследователей: Dixon S.M., Edwards R.S., Hirao M., Kawashima K., Ogi H., Thompson R.V. и др. Вопросам акустической структуроскопии посвящены исследования Бломенштейна В.Ю., Баранниковой С.А., Гончара И.В., Горкунова Э.С., Зуева Л.Б., Ильясова Р.С., Качанова В.К., Ключникова В. А., Мишакина В.В., Муравьева В.В., Смирнова А.Н., Углова А. Л., Хлыбова О.С. и др.

Целью работы является повышение информативности электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода многократных отражений за счет обоснования новых информативных параметров и исследования их чувствительности к дефектам и структуре пруткового металлопроката малых диаметров.

Задачи исследования

1. Исследование закономерностей формирования акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя поперечных волн.
2. Экспериментальные исследования влияния характеристик искусственных дефектов пруткового проката на информативные параметры серии импульсов многократных отражений.
3. Исследование возможности использования метода главных компонент для сокращения количества информативных параметров и определения обобщенной характеристики дефекта.
4. Выявление структурно-чувствительных параметров упругих волн в образцах легированной стали с различной термообработкой в условиях механических одноосных растягивающих напряжений в упругой и пластической области.

Объектом исследований является неразрушающий контроль пруткового проката малого диаметра зеркально-теневым методом многократных отражений.

Предметом исследований является чувствительность информативных параметров зеркально-теневого метода многократных отражений при контроле пруткового проката с использованием проходных

ЭМА преобразователей поперечных волн.

Методы и средства исследования

В процессе исследований были использованы основные положения теории упругости и твердого тела акустики, реализованы методы численного моделирования в программной среде Comsol Multiphysics, а также методы численной обработки результатов экспериментальных исследований, реализованные в специализированных программных средах ПРИНЦ IX, WinПОС, PrNS_PCA, реализующих методы статистического анализа, спектрального анализа, метода главных компонент. Уникальная научная установка «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (ссылка на портале научно-технологической инфраструктуры Российской Федерации <https://ckp-rg.ru/catalog/usu/586308/>) использовалась для проведения экспериментальных исследований.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов обеспечивается корректным использованием теории акустики твердого тела, метода конечных элементов, методов статистической обработки, большим объемом экспериментальных данных на реальных объектах контроля, воспроизводимостью результатов экспериментов, сопоставлением теоретических и экспериментальных данных, обоснованностью полученных зависимостей, а также сравнением с результатами исследований других авторов.

Научная новизна

1. Установлено, что проходной ЭМА преобразователь поперечных волн осевой поляризации формирует сходящийся сферический фронт в радиальной плоскости сечения и близкий к плоскому фронт в осевой плоскости сечения, при этом коэффициент фокусировки увеличивается по логарифмическому закону с ростом частоты и по линейному закону с ростом диаметра; а радиус фокусного пятна уменьшается с частотой по степенному закону и не зависит от диаметра прутка, за исключением области низких частот.

2. Впервые исследована чувствительность статистических параметров серии многократных отражений во временной и спектральной областях к обобщенной характеристике дефекта, показавшая, что наиболее высокой чувствительностью к дефектам обладают информативные статистические параметры дисперсии и коэффициента выявляемости серии многократных отражений при анализе для потенцированного сигнала и его спектра и предложено использование метода главных компонент при анализе информативных параметров для оценки обобщенной характеристики дефекта, определяемой совместным влиянием глубины залегания и диаметра искусственного дефекта.

3. Исследовано влияние термообработки и растягивающих напряжений в области упругих и пластических деформаций в цилиндрических образцах стали 40Х на скорости объемных волн радиальных направлений, упругие модули среды и эффективность ЭМА преобразования, показавшее, что наиболее чувствительными к структуре, механическим свойствам и

напряженно-деформированному состоянию легированных сталей в упругой и пластической областях являются следующие информативные параметры: скорости поперечной и продольной волн осевой и радиальной поляризации, коэффициент Пуассона, коэффициент ЭМА преобразования, коэффициент акустоупругости.

4. Предложен способ ультразвукового контроля электропроводящих цилиндрических объектов для определения упругих модулей материала цилиндрических объектов, с использованием проходных ЭМА преобразователей объемных волн, позволяющий определять коэффициент Пуассона по соотношению скоростей упругих волн вне зависимости от результатов измерений диаметра образца, подтвержденный патентом РФ.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретической значимостью обладают: разработанная модель и математические выражения, описывающие формирование акустического поля проходного ЭМА преобразователя поперечных волн, позволяющая оценивать эффективность фокусировки для объектов любых диаметров и в различных частотных диапазонах; предложенный метод оценки обобщенной характеристики, учитывающей глубину залегания и диаметра искусственного дефекта, позволяющий оценить эквивалентную обобщенную характеристику обнаруживаемых естественных дефектов; выявленные зависимости акустических характеристик стали 40Х от режимов термообработки и механических свойств проката в условиях упругих и пластических деформаций растяжения.

Практической значимостью обладают: предложенный высокоточный способ определения упругих модулей и коэффициентов акустоупругости в области упругих и пластических деформаций (патент РФ № 2783297); научно обоснованные информативные параметры метода, обеспечивающие наибольшую чувствительность к дефектам и позволяющие выработать критерии браковки по исследованным параметрам.

Результаты работы были использованы при выполнении договоров на НИР «Экспертная оценка методик неразрушающего акустического контроля пружинной проволоки» (акт об использовании результатов диссертационной работы ООО «НПЦ «Пружина»), НИР «Оценка динамических упругих модулей и возможностей выявления внутренних и поверхностных дефектов цилиндрических стальных образцов» (акт об использовании результатов диссертационной работы АО «ИОМЗ»), гранта РФФИ 22-19-00252 «Электромагнитно-акустическая структуроскопия металлоизделий с особыми свойствами». Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 12.03.01 «Приборостроение» (акт об использовании результатов диссертационной работы ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»).

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная конечно-элементная модель, исследованные закономерности и аппроксимация полученных зависимостей обеспечивают возможность расчета акустического поля проходного ЭМА преобразователя поперечных

волн радиальных направлений с осевой поляризацией акустического поля в зависимости от рабочей частоты, добротности импульса возбуждения и диаметра объекта контроля.

2. Научно-обоснованные информативные статистические параметры дисперсии и коэффициента выявляемости серии многократных отражений позволяют повысить чувствительность электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода многократных отражений; использование метода главных компонент при анализе статистических параметров позволяет оценить обобщенную характеристику дефекта в объектах различного диаметра и с различной эффективностью ЭМА преобразования.

3. Результаты исследования влияния термообработки и растягивающих напряжений в образцах стали 40Х на акустические характеристики среды позволяют оценить напряженно-деформированное состояние объекта в области упругих и пластических деформаций в условиях растяжения.

4. Предложенный ультразвуковой способ определения упругих модулей материала цилиндрических объектов обеспечивает определение коэффициента Пуассона с методической погрешностью не хуже 0,1%.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях: XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, 21-25 мая 2018 г.; XXXI и XXXII Уральские конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», г. Екатеринбург, 2018 г., 2021 г.; V международный форум «Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2019» ИЕЕТ-2019, г. Ижевск, 20–22 ноября 2019 г.; XII, XIII, XIV, XVII, XVIII Международные научно-технические конференции «Приборостроение в XXI. Интеграция науки, образования и производства», (г. Ижевск, 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2021 г., 2022 г.); I Межвузовская научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные проблемы науки и техники», г. Сарapul, май 2020 г.

Личный вклад автора

Построение моделей, результаты численного моделирования, экспериментальные исследования и результаты их обработки проведены и получены автором лично. Экспериментальные установки, используемые при исследованиях, разработаны коллективом кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики». Выбор приоритетов, направлений и методов исследования и форм представления результатов, формирование структуры и содержания работы, формулирование основных положений выполнено при активном участии научного руководителя д.т.н., профессора Муравьевой О. В.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Содержание диссертации отвечает требованиям паспорта научной специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды соответствует специальности» и удовлетворяет следующим пунктам по паспорту

специальности: п.1 «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды» и п.6 «Разработка математических моделей, алгоритмического и программнотехнического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в т.ч. 6 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 5 из которых имеют переводные версии, входящие в базу данных Web of Science и Scopus, 11 статей в сборниках трудов и материалах конференций; 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 238 наименований. Основная часть работы изложена на 168 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок и 21 таблицу.

Содержание работы

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены виды пруткового проката, технология его изготовления, при этом особое внимание уделяется различным типам дефектов пруткового проката, возникающим в процессе изготовления и эксплуатации. Приведен анализ неразрушающих методов контроля пруткового проката, рассмотрены основные преимущества и недостатки методов, оценена эффективность методов для выявления внутренних и наружных дефектов. В настоящее время для выявления поверхностных дефектов проката преимущественное использование получили магнитные и вихретоковые методы, обеспеченные большим разнообразием автоматизированных установок контроля благодаря преимуществу бесконтактной работы, однако они имеют ряд недостатков, которые ограничивают область использования указанных методов

В качестве наиболее перспективного выбран акустический метод ввиду его относительной дешевизны, возможности реализации бесконтактного метода и достаточно высокой чувствительности, как к поверхностным, так и внутренним дефектам, а именно ЗТМ многократных отражений, реализованный с использованием специализированных бесконтактных ЭМА преобразователей проходного типа. На основании критического анализа литературы поставлена цель и основные задачи исследования.

Во второй главе решена задача по исследованию закономерностей формирования акустического поля проходного ЭМА преобразователя поперечных волн. Результаты, представленные в главе, опубликованы в работах автора [1, 5, 10-13, 16].

Акустическое поле проходного ЭМА преобразователя поперечных волн обеспечивает формирование акустического поля, неоднородного по сечению цилиндрического объекта с фокусировкой по центру и не соответствует общепринятым представлениям о формировании диаграмм направленности плоских преобразователей. При этом возникает необходимость оценки воздействия различных факторов (диаметра объекта, рабочей частоты и добротности импульса возбуждения), влияющих на формирование зоны фокуса и, соответственно чувствительности к дефектам, расположенным на различной глубине. В главе представлены численная модель и результаты моделирования акустического поля проходного ЭМА преобразователя поперечных волн в программной среде COMSOL Multiphysics (модуль Structural Mechanics).

Принцип действия проходного ЭМА преобразователя поперечных волн радиальных направлений по сечению представлен на рисунке 1. Основным механизмом возбуждения акустических волн ЭМА преобразователем является электродинамический эффект, определяемый взаимодействием вихревых токов i_e длиной dl с индукцией поля подмагничивания \overline{B}_0 (сила Ампера F_A). ЭМА преобразователь содержит соосный с прутком цилиндрический высокочастотный индуктор с током i , и источник поля подмагничивания с индукцией \overline{B}_0 . Преимущественное излучение поперечной t -волны обеспечивается за счет ориентации поля подмагничивания в радиальных направлениях в приповерхностной области прутка (зоне формирования вихревых токов). При этом поперечные волны с осевой поляризацией распространяются во всех радиальных направлениях в плоскости сечения, перпендикулярной оси прутка.

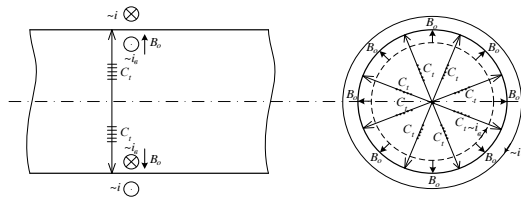


Рисунок 1 – Принцип действия проходного ЭМАП поперечных волн радиальных направлений по сечению: B_0 – индукция поля подмагничивания, i – ток в индукторе, i_e – вихревые токи

Моделирование процесса распространения поперечных волн по сечению цилиндра в трехмерной постановке представлено на рисунке 2, а. Полагается, что возбуждение акустических волн происходит за счет приложения импульса касательных напряжений $\tau(t)$ равномерно

распределенных по периметру цилиндра. Вид импульса напряжений представлен на рисунке 2, б.

Результаты численного моделирования процесса распространения поперечной акустической волны, излучаемой проходным ЭМА преобразователем, иллюстрирует рисунок 3, представляющий фронт акустической волны в плоскости XOY (а) и в плоскости YOZ (б) в различные моменты времени для объекта диаметром 10 мм на частоте 2 МГц. В радиальной плоскости сечения фронт волны является сходящимся сферическим, при этом в осевой плоскости сечения его форма близка по форме к фронту плоской волны. Таким образом, проходной ЭМА преобразователь формирует в цилиндре акустическую волну, ослабляющуюся по закону цилиндрического фронта.

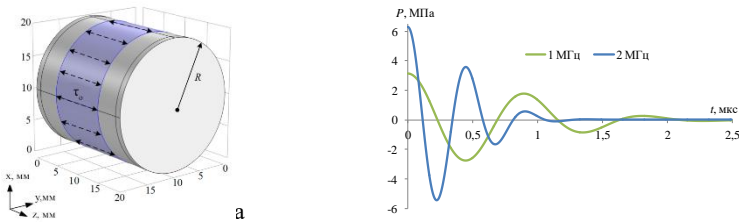


Рисунок 2 – Постановка задачи с силовым воздействием на цилиндр радиусом R (а), форма импульса касательных напряжений при различных частотах (б)

Распределение смещений в поперечной волне по диаметру D круглого цилиндра на примере диаметра 10 мм на частоте 1 МГц представлено на рисунке 4. При приближении к центральной области цилиндра амплитуда смещений возрастает, что объясняется эффектом фокусировки при формировании сходящегося волнового фронта вследствие сложения смещений двух поперечных волн осевой поляризации, распространяющихся в противоположных направлениях.

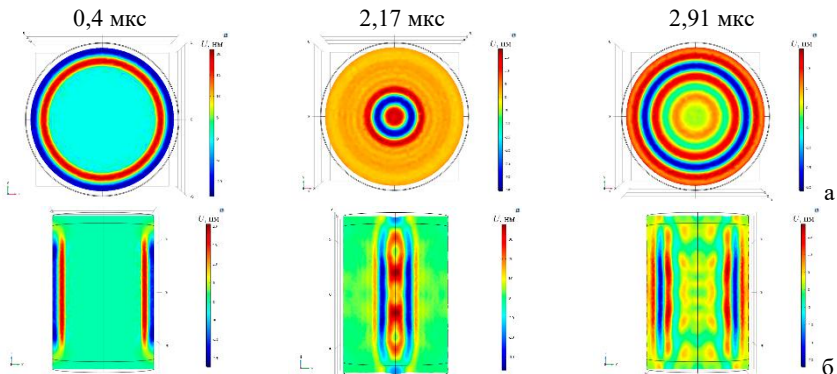


Рисунок 3 – Результаты моделирования волнового фронта поперечной волны в плоскости XOY (а) и в плоскости YOZ (б) цилиндра в различные моменты времени

Введем понятие эффективности фокусировки, определяемой коэффициентом фокусировки K_f и радиусом фокусного пятна R_f . За коэффициент фокусировки примем отношение максимальной амплитуды смещений в зоне фокуса U_{max} к минимальной амплитуде U_{min} , эквивалентной амплитуде начальных смещений U_0 (рисунок 4) $K_f = \frac{U_{max}}{U_0}$. За диаметр фокусного пятна примем диаметр круга D_f , соответствующий уменьшению амплитуды смещений в 0,707 раз относительно максимального значения (рисунок 4).

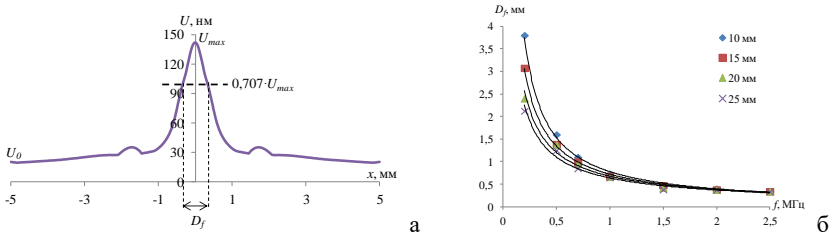


Рисунок 4 – К расчету параметров фокусировки (на примере диаметра 10 мм на частоте 1МГц) (а); зависимость диаметра зоны фокуса от рабочей частоты (б)

Показано, что коэффициент фокусировки увеличивается по закону, близкому к логарифмическому закону с ростом частоты и по линейному закону с ростом диаметра (рисунок 5). При этом радиус фокусного пятна уменьшается с частотой по степенному закону и не зависит от диаметра прутка, за исключением области низких частот (рисунок 4, б). В работе представлены результаты аппроксимации закономерностей фокусировки проходного ЭМА преобразователя поперечных волн приближенными формулами.

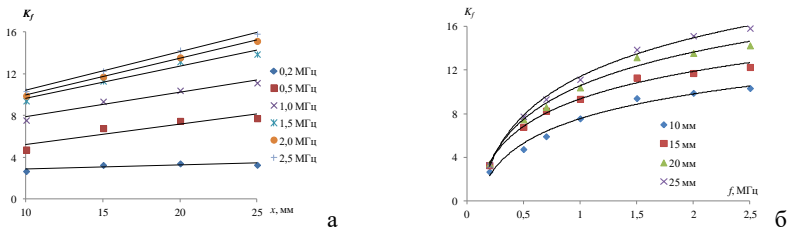


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента фокусировки от диаметра объекта контроля (а) и от рабочей частоты (б)

Результаты моделирования процесса фокусировки подтверждены экспериментально на цилиндре диаметром 43 мм, длиной 230 мм из стали 40Х. Блок-схема экспериментальной установки собрана на основе структуроскопа электромагнитно-акустического СЭМА (внесен в реестр средств измерений № 61957-15 RU.C.36.003.A №60174). ЭМА

преобразователь проходного типа, размещенный вблизи торца образца, излучает поперечные волны радиальных направлений по сечению с осевой поляризацией. В совмещенном режиме ЭМА преобразователь регистрирует серии импульсов многократных переотражений по диаметрам образца (рисунок 7, а). В раздельном режиме ЭМА излучения и пьезоприема осевая компонента смещений, излучаемых ЭМА преобразователем, регистрируется с помощью пьезопреобразователя П111-2,5-12 в виде продольной I -волны, излученной в прямом направлении, и отраженной от противоположного торца продольной II -волны (рисунок 7, б). Приемный преобразователь интегрирует осевую компоненту поля ЭМА преобразователя в пределах своей апертуры (12 мм). Перемещение преобразователя по диаметру относительно центра образца позволяет оценить распределение смещений по диаметру образца.

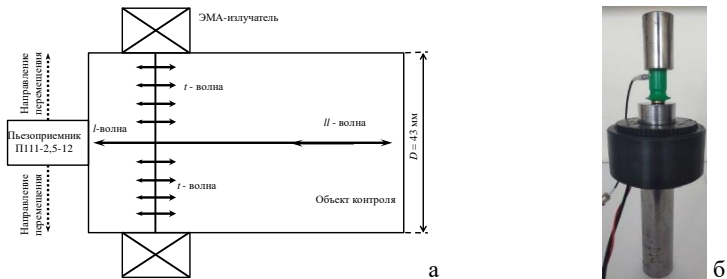


Рисунок 6 – Схема (а) и фото (б) раздельного ЭМА-излучения и пьезоприема поперечных волн осевой поляризации радиальных направлений по сечению

Полученные в ходе моделирования результаты (рисунок 7, в) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Исследованные закономерности свидетельствуют о том, что чувствительность ЗТМ на многократных отражениях к внутренним дефектам, расположенным в центральной области объекта, выше, чем к поверхностным и подповерхностным дефектам, при этом чувствительность к дефектам в значительной степени зависит от характеристик объекта и параметров контроля, что следует учитывать при формировании критериев браковки.

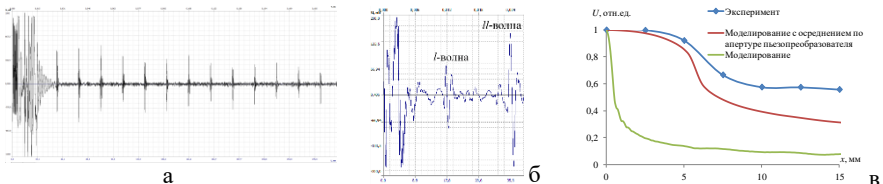


Рисунок 7 – Осциллограммы импульсов многократных отражений поперечной волны по диаметру прутка, регистрируемой ЭМА-преобразователем в совмещенном режиме (а), импульсов продольных волн в режиме раздельного ЭМА-излучения и пьезоприема по центру образца (б); относительное распределение амплитуд смещений по радиусу образца при перемещении пьезоприемника (в)

В третьей главе решена задача экспериментальных исследований влияния характеристик искусственных дефектов пруткового проката на информативные параметры серии импульсов многократных отражений. Результаты, представленные в главе, опубликованы в работах автора [2, 3, 6, 9, 18].

С целью получения выборки информативных параметров ЗТМ многократных отражений изготовлены настроечные образцы разных диаметров из марок сталей 03Х14Н7Б и 38ХГМ с различной эффективностью ЭМА-преобразования с нанесенными искусственными дефектами в виде плоскодонных отверстий (ПДО) радиальных направлений различных диаметров d с различной глубиной залегания (рисунок 8).

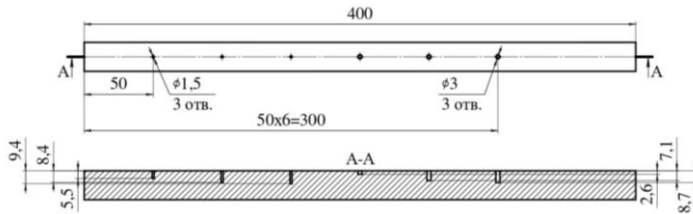


Рисунок 8 – Образец с плоскодонными отверстиями

Ввиду того, что проходной ЭМА преобразователь формирует акустические волны с фокусировкой по центру, ослабление сигнала существенно зависит не только от размера дефекта, но и от положения дефекта относительно центра цилиндрического образца (увеличивается с приближением дефекта к центру образца). С целью учета совместного влияния диаметра дефекта и глубины его залегания на ослабление серии импульсов многократных отражений введено понятие обобщенной характеристики дефекта G , определяемой произведением диаметра ПДО d и глубины ПДО h : $G = dh$. Обобщенная характеристика дефекта G_n , пронормированная на квадрат радиуса объекта, позволяет описать объект произвольного радиуса r : $G_n = \frac{dh}{r^2}$. Зеркально-теневой метод НК на многократных отражениях реализован с использованием специализированной информационно-измерительной системы, блок-схема и фото которой представлены на рисунке 9.

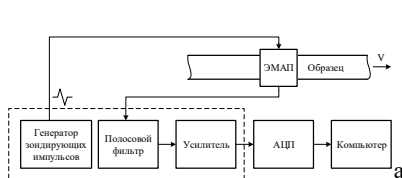


Рисунок 9 – Блок-схема (а) и фото (б) информационно-измерительной системы

Результатом измерений являются осциллограммы серии многократных отражений волны по диаметру образца. В качестве примера на рисунке 10 представлены результаты регистрации серии импульсов многократных переотражений в бездефектной части образца радиусом r и в области с искусственным дефектом типа ПДО. Видно, что осциллограммы характеризуется резким ослаблением серии многократных отражений и сокращением времени реверберации для участков образца с дефектом.

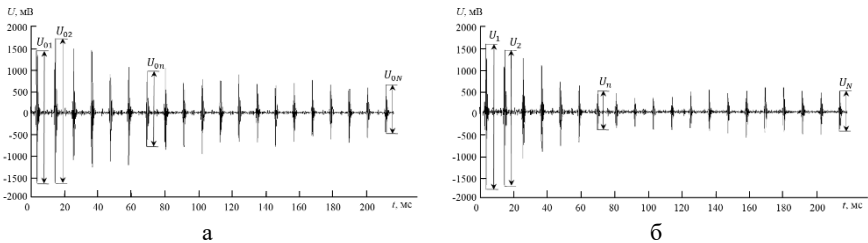


Рисунок 10 – Осциллограммы отраженных сигналов для бездефектного участка (а); для участка с искусственным дефектом (ПДО) диаметром $d=1,5$ мм с глубиной залегания $h=8,4$ мм (б)

С целью увеличения отношения «сигнал-шум» в области отсутствия отраженных сигналов при недостаточной эффективности ЭМА-преобразования использована операция возведения массива данных исходного сигнала в квадрат, что позволило уменьшить влияние на результаты анализа уровня шумов и помех. Исследовались следующие статистические характеристики осциллограмм серии многократных отражений, представляемых в виде последовательности данных в массиве x_n , определяемых диаметром объекта D и числом анализируемых отражений N : математическое ожидание M_x , дисперсия D_x , среднее квадратическое отклонение σ_x , асимметрия S_x и эксцесс E_x , определяемые известными формулами теории статистики.

Дополнительно введено понятие многократного коэффициента выявляемости K_N во временной области, определяемого формулой:

$$K = \sum_{n=1}^N K_n = \sum_{n=1}^N (U_{0n} - U_n) / U_{0n}, \quad (1)$$

где U_{0n} - значение амплитуды импульса при каждом n -м отражении для бездефектной области образца (опорный сигнал), U_n - значение амплитуды импульса при каждом n -м отражении для области с дефектом, N – количество анализируемых отражений (рисунок 10).

Статистические параметры оценивались с использованием специализированного программного обеспечения ПРИНЦ IX. С целью возможности сравнительной оценки результатов контроля прутков различных диаметров, размер анализируемого массива менялся пропорционально диаметру исследуемого прутка и включал количество отражений N , равное 20. Во избежание влияния на результаты анализа зондирующего импульса, соответствующий ему интервал времени удалялся из анализируемого

массива. Для отстройки от эффективности ЭМА преобразования, определяемого маркой стали, конструктивными зазорами между ЭМА преобразователем и объектом контроля, каждая статистическая характеристика C_d для дефектной области прутка была пронормирована относительно аналогичной характеристики C_0 для бездефектного участка: $C_n = \frac{C_d}{C_0}$, где C_n - нормированное значение статистической характеристики.

Нормированный коэффициент выявляемости определялся с использованием формулы $K_n = 1 - \frac{K}{N}$.

Дополнительно проведен спектральный анализ полученных сигналов методом дискретного преобразования Фурье с использованием программного обеспечения WinПОС на массиве данных с количеством отсчетов, соответствующих 20 отражениям. Вид амплитудных спектров сигналов для бездефектной области и области с искусственным дефектом представлены на рисунок 11.

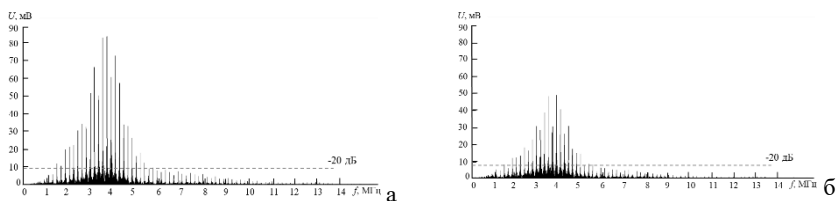


Рисунок 11 – Спектральная плотность исходного сигнала для бездефектной области (а) и области с дефектом $d = 3$ мм, $h = 7,1$ мм (б)

Спектр исходного сигнала представляется совокупностью отдельных гармоник, следующих с определенной периодичностью Δf , определяемой диаметром D объекта и скоростью C ультразвуковой волны: $C_t = D \cdot \Delta f$. Спектральной гармонике с максимальной амплитудой соответствует основная резонансная частота УЗ импульса. Для спектральных характеристик сигналов, представляемых в виде последовательности отсчетов по частоте f , были рассчитаны аналогичные статистические характеристики (математическое ожидание M_{ns} , дисперсия D_{ns} , среднее квадратическое отклонение σ_{ns} , асимметрия S_{ns} и эксцесс E_{ns}) и многократный спектральный коэффициент выявляемости K_S .

Результаты влияния нормированной обобщенной характеристики дефекта G_n на наиболее значимые статистические параметры при разных вариантах представления импульса представлены на рисунке 12. Исследования показали, что большинство исследованных нормированных параметров с увеличением обобщенной характеристики дефекта G имеет тенденцию к уменьшению. Исключением являются зависимости для параметров эксцесса и асимметрии. Для огибающей сигнала и потенцированного сигнала большинство характеристик имеет коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , превышающий 0,5, что говорит о значимости указанных зависимостей. При этом увеличение числа

анализируемых отражений радикально увеличивает коэффициент R^2 , что соответствует физическим представлениям о повышении чувствительности к дефектам при анализе сигнала на дальних отражениях.

Введем понятие чувствительности γ_{Cn} к обобщенному размеру дефекта данного информативного параметра, определяемой тангенсом угла наклона линии тренда для данного информативного параметра к оси абсцисс:

$$\gamma_{Cn} = \frac{C_{n\max} - C_{n\min}}{G_{\max}}, \quad (2)$$

где $C_{n\max}$ и $C_{n\min}$ - максимальное и минимальное значения нормированных параметров; G_{\max} - максимальное по модулю значение обобщенной характеристики дефекта.

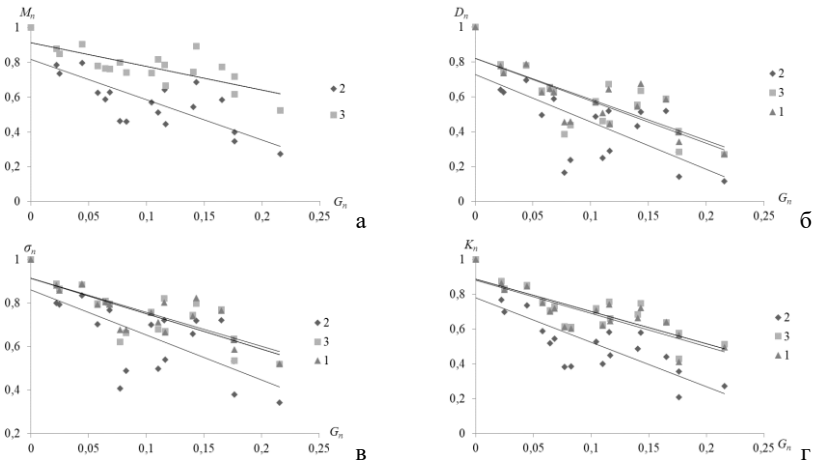


Рисунок 12 – Зависимости нормированных значений параметров математического ожидания M_n (а), дисперсии D_n (б), среднеквадратического отклонения σ_n (в), коэффициента выявляемости K_n (г), асимметрии S_n (д), эксцесса E_n (е) от обобщенной характеристики дефекта G_n для $N=20$: 1 – исходный сигнал, 2 – потенцированный сигнал, 3 – огибающая сигнала

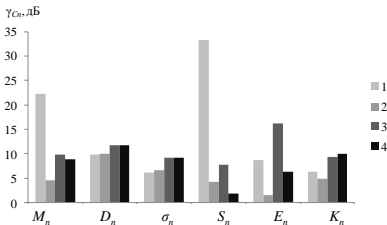


Рисунок 13 – Сравнительная чувствительность к обобщенной характеристике дефекта параметров сигналов: 1 – исходный сигнал, 2 – спектр исходного сигнала, 3 – сигнал, возведенный в квадрат, 4 – спектр сигнала, возведенного в квадрат

Анализ информативных параметров (рисунок 13) показывает, что нормированные параметры дисперсии D_n , и коэффициента выявляемости K_n показали наиболее достоверную корреляцию с обобщенной характеристикой искусственных дефектов различной глубины и размера и наиболее высокую чувствительностью при анализе сигналов и их спектров.

С целью сокращения количества информативных параметров при потере наименьшего количества информации при формировании критериев браковки и оценке характеристик дефекта предлагается использовать метод главных компонент. В качестве входного множества использованы данные статистических характеристик сигналов, выходным параметром является вектор обобщенных характеристик искусственных дефектов типа ПДО. Таким образом, данные преобразованы в систему $(f_k, X_{ik}), i = 1 \dots n, k = 1 \dots p$, где $p=18$ и соответствует числу анализируемых искусственных дефектов, $n=6$ соответствует числу анализируемых параметров сигналов. Метод главных компонент при оценке полученных результатов был реализован в специализированном программном обеспечении PrNS_PCA. Для обоснования выбора информативных параметров, обладающих наибольшей корреляцией были исследованы три типа сигналов: исходный сигнал, огибающая сигнала и потенцированный сигнал при различном числе анализируемых импульсов.

В общем виде уравнение регрессии для расчета обобщенной характеристики дефекта Y_n по методу главных компонент имеет вид:

$$Y_n = \alpha_0 + \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 + \alpha_4 F_4 + \alpha_5 F_5 + \alpha_6 F_6 \quad (3)$$

где $\alpha_0 - \alpha_6$ – коэффициенты регрессии, $F_1 - F_6$ – главные компоненты.

В качестве примера на рисунке 14 представлен вклад шести главных компонент для трех типов анализируемых сигналов.

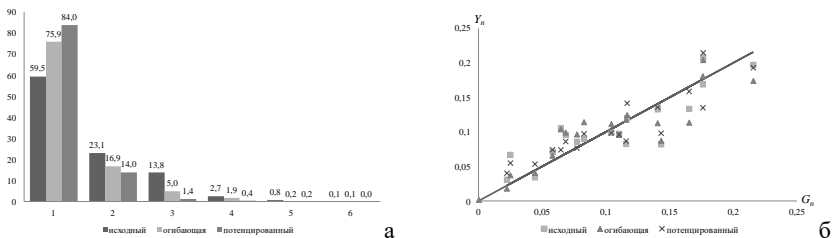


Рисунок 14 – Результаты влияния главных компонент (а), зависимость параметра Y_n по методу главных компонент от обобщенной характеристики дефекта G_n

Таблица 1 – Результаты регрессионной статистики

Тип сигнала	Множ. R	Станд. ошибка	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
Исходный	0,897	0,031	0,10	-0,024	-0,016	0,002	-0,011	-0,055	0,094
Огибающая	0,886	0,033	0,10	-0,022	-0,002	-0,012	0,041	0,065	0,085
Потенцированный	0,917	0,028	0,10	0,021	0,015	-0,003	0,068	0,030	-0,323

Результаты регрессионной статистики зависимостей для шести анализируемых компонент для всех видов сигналов приведен в таблице 1. Анализ регрессионной статистики показывает, что множественный коэффициент корреляции имеет максимальное значение для потенцированного сигнала.

На рисунке 14, б представлена зависимость результата расчета параметра Y_n дефекта по методу главных компонент и результатов прямых геометрических измерений обобщенной характеристики G_n , подтверждающая наличие более сильной корреляции при анализе потенцированного сигнала. Следует отметить, что погрешность оценки малых значений обобщенной характеристики с использованием метода главных компонент достаточно велика, что может объясняться недостаточностью количества точек в выборке в области малых значений. Искусственные дефекты в области средних и высоких значений обобщенной характеристики дефекта удовлетворительно описываются с использованием предложенного подхода.

Предложенный подход был использован для анализа информативных параметров и оценки обобщенных характеристик естественных дефектов прутков рессорно-пружинных сталей. Выявленные в процессе сканирования участки прутков с дефектами, где наблюдалось максимальное ослабление серии отражений, были подтверждены визуально (поверхностные дефекты) и металлографическими исследованиями (внутренние дефекты) (рисунок 15).

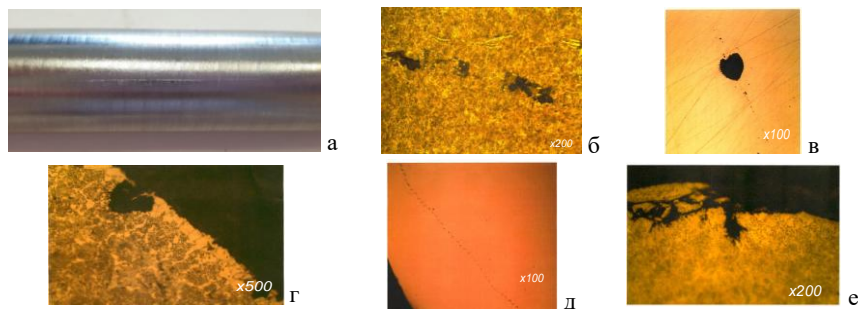


Рисунок 15 – Фото и результаты металлографии некоторых из выявленных дефектов: а - #1 (трещина, $\varnothing 25$, 60С2А), б - #2 (оксиды точечные 0,12x0,12x1 мм, $\varnothing 30$, 60С2ХФА), в - #3 (силикат недеформирующийся 0,15x0,15мм, $\varnothing 21$, 60С2ХФА), г - #4 (прокатная пленка глубины залегания 0,05-0,13мм силикат, $\varnothing 11,7$, 60С2Г), д - #5 (оксиды строчечные, $\varnothing 24$, 60С2А), е - #6 (раскатанный пузырь, закат, глубины залегания 0,05-0,13 мм, $\varnothing 12$, 60С2А

Результаты расчета значений главных компонент и соответствующие значения параметра Y_n с использованием регрессионного уравнения представлены в таблице 4. Обобщенная характеристика дефекта G для объекта радиуса r определена согласно формуле: $G = Y_n \cdot r^2$.

Таблица 2 – Главные компоненты, параметр Y_n , обобщенная характеристика дефекта G

Рассчитанные значения главных компонент и обобщенной характеристики для естественных дефектов по регрессионному уравнению (3)								
# образца	Главные компоненты для потенцированного сигнала						Y_n	G
#1	-1,159	3,513	0,737	0,058	0,022	0,050	0,114	17,8
#2	-0,709	2,908	0,632	0,019	-0,029	-0,097	0,158	35,6
#3	-0,376	-1,168	-0,212	0,103	0,051	-0,067	0,105	11,6
#4	0,553	0,177	0,421	0,995	1,082	0,420	0,078	2,7
#5	0,818	-3,310	-0,907	0,862	0,795	-0,051	0,171	24,6
#6	1,939	-3,766	-1,127	0,312	0,170	-0,099	0,148	5,3

Видно, что минимальные значения обобщенной характеристики имеют дефекты поверхности малой глубины #4 и #6 (плена, закат), наибольшие значения соответствуют внутренним дефектам типа скопления неметаллических включений (#2, #5). Указанные различия соответствуют представлениям о формировании акустического поля проходного ЭМА преобразователя с фокусировкой по центру и уменьшением амплитуды смещений при приближении к поверхности.

В четвертой главе решена задача выявления структурно-чувствительных параметров упругих волн в образцах легированной стали с различной термообработкой в условиях механических одноосных растягивающих напряжений в упругой и пластической области. Результаты, представленные в главе, опубликованы в работах автора [4, 7, 8, 14, 15, 17].

В качестве объекта исследований использованы образцы пруткового проката стали 40X по ГОСТ 4543-71. Сталь 40X нашла широкое применение при изготовлении деталей нефтедобывающего оборудования. Для оценки влияния структурного состояния, видов и режимов термической обработки, твердости и растягивающих напряжений на измеряемые параметры акустических волн были подготовлены цилиндрические образцы диаметром 14 и 20 мм. Образцы были подвергнуты различным видам термической обработки.

При исследованиях был использован ЗТМ многократных отражений, реализованный с использованием структуроскопа СЭМА. Для определения упругих модулей материала цилиндрических объектов применялся способ ультразвукового контроля электропроводящих цилиндрических объектов, подтвержденный патентом РФ (№2783297) (рисунок 16). В контролируемой зоне цилиндрического объекта последовательно с использованием проходных электромагнитно-акустических преобразователей возбуждают ультразвуковые поперечные и продольные волны, регистрируют осциллограммы серии импульсов, многократно прошедших по сечению объекта с помощью тех же электромагнитно-акустических преобразователей, по полученным осциллограммам определяют разности времен распространения между m -м и n -м импульсами продольных $\Delta t_{l(m-n)}$ и

поперечных $\Delta t_{l(m-n)}$ волн, по значениям времен, известному значению диаметра объекта D определяют скорости упругих волн C_l , C_t , по известным значениям скоростей упругих волн и известной плотности ρ материала объекта определяют упругие модули сдвига G , Юнга E , коэффициент Пуассона ν с использованием формул:

$$C_l = \frac{D(m-n)}{t_{tm} - t_{tn}} = \frac{D(m-n)}{\Delta t_{l(m-n)}}, \quad (4)$$

$$C_t = \frac{D(m-n)}{t_{tm} - t_{tn}} = \frac{D(m-n)}{\Delta t_{t(m-n)}}, \quad (5)$$

$$\nu = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2(C_l^2 - C_t^2)}, \quad (6)$$

$$G = \rho C_t^2, \quad (7)$$

$$E = \rho C_t^2 \frac{3-4C_t^2/C_l^2}{1-C_t^2/C_l^2}. \quad (8)$$

За счет высокой частоты дискретизации используемого оборудования (100 МГц), последующей интерполяции сигнала с использованием специализированного программного обеспечения, а также благодаря возможности измерений на дальних отражениях обеспечивается высокая точность определения скорости распространения акустических волн (0,5 м/с или 0,01%) при точности определения диаметра образца 30 мкм.

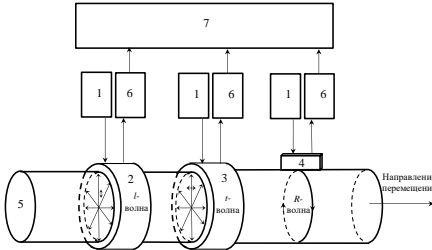


Рисунок 16 – Блок-схема устройства, реализующего способ контроля электропроводящих цилиндрических объектов

Как следует из таблицы 3, наблюдается существенное отличие скоростей и упругих модулей в зависимости от выбранного режима термообработки. Скорости продольной и поперечной волн достигают наибольших значений в образце после нормализации $C_l = 5941$ м/с и $C_t = 3251$ м/с. Для образца, полученного закалкой, имеющего структуру мартенсита с максимальной степенью искажений кристаллической решетки, скорость распространения продольных и поперечных волн имеет минимальное значение $C_l = 5882$ м/с и $C_t = 3193$ м/с. Последующий отпуск приводит к наиболее равновесной феррито-перлитной структуре и ведет к увеличению скорости ультразвуковых волн: на 2,2% для продольных волн, на 1,1% для поперечных волн. При этом механические свойства (твердость) образцов удовлетворительно коррелируют со скоростями распространения поперечных и продольных волн и коэффициентами Пуассона (рисунок 17). Показано, что наиболее чувствительными к структурному состоянию исследуемой стали являются поперечные волны и коэффициент Пуассона, при этом коэффициент Пуассона, в отличие от скоростей объемных волн, не зависит от

погрешности измерений диаметра образца.

Таблица 3 – Скорости продольных, поперечных и рэлеевских волн и упругие модули исследуемых образцов из стали 40X

Способ термообработки	C_L , м/с	C_T , м/с	C_R / C_{R0} , м/с	G , ГПа	E , ГПа	ν_{lt}	ν_{lR}
Нормализация: состояние поставки	5941	3251	3062 / 3002	82,6	212,6	0,2863	0,2863
Закалка: 855°C 35 мин в масле	5882	3193	3015 / 2956	79,7	205,9	0,2910	0,3000
Закалка: 855°C 35 мин в масле Отпуск: 420°C, 60 мин	5912	3218	3040 / 2980	80,9	208,8	0,2894	0,3044

Испытания на растяжение металлических образцов проводились с помощью испытательной машины Instron 300DX информационно-измерительной системы на базе структуроскопа СЭМА (рисунок 18, а).

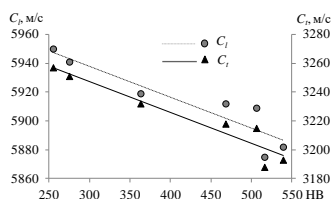


Рисунок 17 – Связь скоростей продольной и поперечной волн с твердостью исследованных образцов HB

Осевая поляризация поперечных волн U_z , распространяющихся в радиальных направлениях по сечению прутка, соответствует направлению нагружения, радиальная поляризация продольных волн U_r , распространяющихся в радиальных направлениях по сечению прутка, ориентирована поперек растягивающей нагрузки (рисунок 18, б). Испытания проводились на трех образцах с наиболее выраженными различиями в механических свойствах и микроструктуре: в состоянии поставки, полученных в ходе закалки, и после высокого отпуска. Осциллограммы серии перетражений в двухканальном режиме визуализации иллюстрирует рисунок 19.

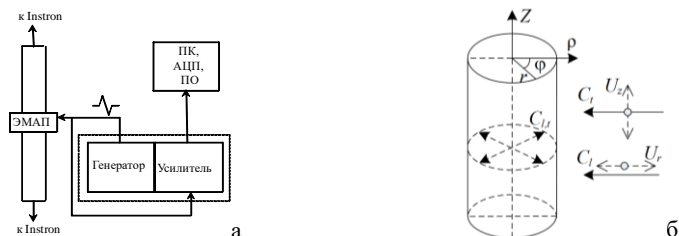


Рисунок 18 – Блок-схема экспериментальной установки нагружения образцов и регистрации (а), принятая система координат и поляризация используемых волн (б)

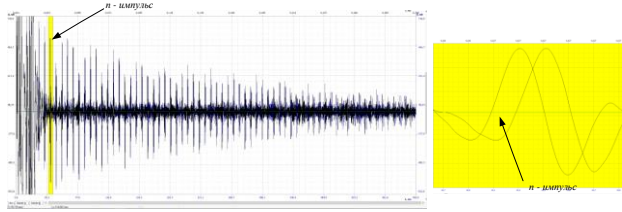


Рисунок 19 – Осциллограммы серии многократных отражений поперечной волны в двухканальном режиме визуализации в увеличенном масштабе на 7 отражении без нагрузки и при нагрузке 1600 МПа

Степень влияния напряжений σ_{zz} на скорости поперечной и продольной волн можно оценить по коэффициентам акустоупругой связи, рассчитываемым по формулам:

$$\beta_{zz}^c = \frac{\Delta C_t}{C_{t0} \cdot \sigma_{zz}} \quad (9)$$

$$\beta_{zz}^c = \frac{\Delta C_l}{C_{l0} \cdot \sigma_{zz}} \quad (10)$$

где $\Delta C_{l,t} / C_{l,t(0)}$ – относительное изменение скорости при нагружении, σ_{zz} – прикладываемая нагрузка.

С увеличением растягивающей нагрузки наблюдается существенное линейное снижение скорости распространения поперечных волн с осевой поляризацией (рисунок 20). Поведение кривой изменения скорости поперечной волны идентично поперечной деформации образца. При этом чувствительность поперечных волн к механическим напряжениям максимальна вследствие совпадения с направлением приложенной нагрузки. Следует отметить, что при переходе от зоны упругих деформаций к зоне пластических деформаций наблюдается нелинейность в поведении кривой, при этом коэффициенты акустоупругости увеличиваются. В отличие от образцов после нормализации или высокотемпературного отпуска (#1, #3), где наблюдается ярко выраженный переход от зоны упругости в зону пластичности, для образца #2 наблюдается плавное уменьшение скорости поперечной волны. При разгрузке скорость поперечной волны в образцах незначительно увеличивается по отношению к значениям в точке с максимальной нагрузкой. Изменение скорости радиально поляризованных продольных волн для исследованных образцов практически не меняется (находится в пределах погрешности измерений).

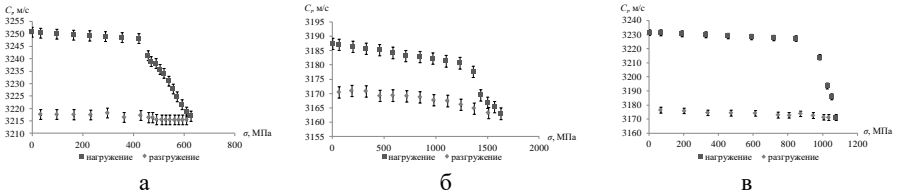


Рисунок 20 – Зависимости скорости поперечной волны C_t от величины нагрузки для образцов #1 (а), #2 (б), #3 (в)

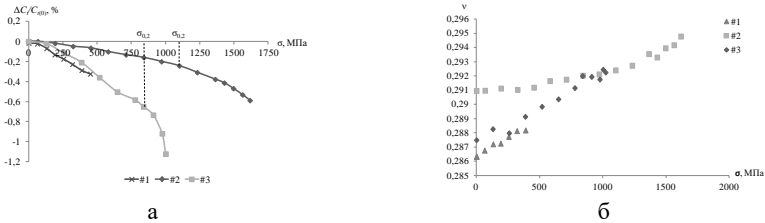


Рисунок 21 – Зависимость относительного изменения скорости поперечной волны (а) и коэффициента Пуассона (б) при нагружении

В качестве примера на рисунке 21 представлены зависимости относительного изменения скорости поперечной волны и коэффициента Пуассона от нагрузки для всех трех образцов в режиме нагружения. Для всех исследованных образцов отмечается резкое уменьшение скорости поперечной волны при достижении области текучести. Наблюдается линейный рост коэффициента Пуассона с увеличением растягивающей нагрузки, который наименее выражен для образца #2, полученного закалкой, и более выражен для образцов #1 и #3 после нормализации и высокого отпуска. В упругой области чувствительность поперечных волн осевой поляризации к растягивающим напряжениям (коэффициенты акустоупругости) не существенно различаются, в то время как, для зоны пластичности образцы #1 и #3 после нормализации и высокотемпературного отпуска имеют существенно большие коэффициенты акустоупругости в сравнении с образцом #2. Значения акустоупругих коэффициентов поперечных волн для исследуемых образцов в упругой и пластической области сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Коэффициенты акустоупругости β_{zz}^c , 1/ТПа

Номер образца	Зона упругой деформации	Зона пластической деформации
#1	-1,70	-44,3
#2	-1,73	-17,3
#3	-1,64	-77,7

Основные результаты и выводы

1. Разработана конечно-элементная модель формирования акустического поля проходного ЭМА преобразователя поперечных волн радиальных направлений с осевой поляризацией. Установлено влияние рабочей частоты и добротности импульса возбуждения и диаметра объекта контроля на коэффициент фокусировки и радиус фокусного пятна. Показано, что проходной ЭМА преобразователь формирует сходящийся сферический фронт в радиальной плоскости сечения и близкий к плоскому фронт в осевой плоскости сечения, при этом коэффициент фокусировки увеличивается по логарифмическому закону с ростом частоты и по линейному закону с ростом диаметра; а радиус фокусного пятна уменьшается с частотой по степенному закону и не зависит от диаметра прутка, за исключением области низких частот.
2. Исследовано влияние обобщенной характеристики искусственного дефекта, учитывающей глубину залегания и диаметр искусственного дефекта пруткового проката, на информативные статистические параметры (математическое ожидание, дисперсия, эксцесс, асимметрия, коэффициент выявляемости) серии импульсов многократных отражений во временной и спектральной областях. Доказано, что наиболее высокой чувствительностью к дефектам обладают информативные статистические параметры дисперсии и коэффициента выявляемости серии многократных отражений при анализе для потенцированного сигнала и его спектра.
3. Доказана возможность использования метода главных компонент для сокращения количества информативных параметров при оценке эквивалентной обобщенной характеристики естественного дефекта применительно к пруткам различного диаметра и с различной эффективностью ЭМА преобразования.
4. Предложен способ ультразвукового контроля электропроводящих цилиндрических объектов (патент РФ № 2783297), обеспечивающий определение коэффициента Пуассона по разности времен пробега двух типов волн по одному участку объекта, что позволяет отстроиться от погрешности измерения диаметра образца, при этом методическая погрешность определения коэффициента Пуассона не превышает 0,1 %.
5. Исследовано влияние вида термообработки цилиндрических образцов стали 40X на скорости объемных волн, упругие модули среды и эффективность ЭМА преобразования. Показано, что скорости распространения продольных и поперечных волн имеют минимальные значения для образцов после закалки со структурой мартенсита (5879 и 3187 м/с для продольных и поперечных волн соответственно); увеличение температуры отпуска до 570°C градусов ведет к увеличению скорости на 1,8% для продольных волн, на 0,73% для поперечных волн.
6. Исследовано влияние одноосных растягивающих механических напряжений цилиндрических образцов стали 40X на скорости объемных волн и коэффициент Пуассона. Доказано, что чувствительность поперечных волн с осевой поляризацией к механическим напряжениям максимальна вследствие

совпадения поляризации с направлением приложенной нагрузки; при этом снижение скорости распространения поперечных волн носит нелинейный характер и может достигать, 1,86% (60 м/с) для образцов в состоянии поставки; коэффициенты акустоупругости в существенной мере определяются видом термообработки и существенно различны для областей упругой и пластической деформаций (1,8 и 15,6 1/ТПа для образца в состоянии поставки).

7. Существенные преимущества зеркально-теневого метода многократных отражений при контроле пруткового металлопроката малых диаметров с использованием бесконтактных ЭМА преобразователей проходного типа:

- высокая чувствительность метода к внутренним дефектам
- высокая разрешающая способность при локализации дефектов по длине объекта, отсутствие мертвой зоны;
- возможность реализации УЗ контроля без иммерсионной жидкости и дополнительной подготовки поверхности с обеспечением достаточно высокой производительностью контроля;
- использование в качестве дополнительных информативных параметров скорости и затухания волн, эффективности ЭМА преобразования;
- возможность использования метода для контроля прутков из различных, в том числе, неферромагнитных металлов и сплавов.

8. Результаты исследований использованы при выполнении договоров на НИР с ООО «НПЦ «Пружина» при выполнении договора «Экспертная оценка методик неразрушающего акустического контроля пружинной проволоки», АО «ИОМЗ» при выполнении договора «Оценка динамических упругих модулей и возможностей выявления внутренних и поверхностных дефектов цилиндрических стальных образцов», а также в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 12.03.01 «Приборостроение».

Основное содержание диссертации опубликовано в работах Публикации ВАК

1. Муравьева, О.В. Закономерности фокусировки поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя поперечных волн / О.В. Муравьева, **А.Ф. Брестер**, А.Л. Владыкин // Контроль и диагностика. – 2023. – Т.26. – № 9. – С.27-41.
2. Муравьева, О.В. Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката / О.В. Муравьева, **А.Ф. Брестер**, В.В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2022. – № 8. – С. 36-51. Версия: Muraveva, O. V. Comparative Sensitivity of Informative Parameters of Electromagnetic-Acoustic Mirror-Shadow Multiple Reflections Method during Bar Stock Testing / O.V. Muraveva, **A.F. Brester**, V.V. Muravev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, No. 8. – P. 689-704. (**Scopus**, **Web of Science**).
3. Муравьева, О.В. Метод главных компонент при обработке многопараметровых акустических сигналов зеркально-теневого метода контроля проката / О.В. Муравьева, В.А. Тенев, **А.Ф. Брестер**, К.Ю. Белослудцев // Автометрия. – 2023. – Т.59. – № 5. – С.1-12.
4. Муравьева, О.В. Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона / О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)** [и др.] //

Сталь. – 2020. – № 8. – С. 63-68. Версия: Muraveva, O.V. Thermal Treatment Effect and Structural State of Rod-Shaped Assortment 40Kh Steel on the Speed of Ultrasound Waves and Poisson Coefficient / O.V. Muraveva, V.V. Murav'ev, **A.F. Basharova (A.F. Brester)** [et al.] // Steel in Translation. – 2020. – Vol. 50, No. 8. – P. 579-584. (Scopus).

5. Петров, К.В. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров, О.В. Муравьева, Ю.В. Мышкин, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)** // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. – С. 16-24. Версия: Petrov, K.V. Modeling Magnetic, Electric, and Acoustic Fields of a Pass-Through Transducer When Testing Cylindrical Objects / K.V. Petrov, O.V. Murav'eva, Y.V. Myshkin, **A.F. Basharova (A.F. Brester)** // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, No. 2. – P. 102-110. (Scopus, Web of Science).

6. Муравьева, О.В. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента / О.В. Муравьева, Л.В. Волкова, В.В. Муравьев, М.А. Синцов, Ю.В. Мышкин, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)** // Дефектоскопия. – 2020. – № 12. – С. 48-57. Версия: Murav'eva, O.V. Sensitivity of Electromagnetic-Acoustic Multiple Shadow Method Using Rayleigh Waves in Inspection of Oil Country Tubular Goods / O. V. Murav'eva, L.V. Volkova, V.V. Murav'ev, M.A. Sintsov, Y.V. Myshkin, **A.F. Basharova (A.F. Brester)** // 2020. – Vol. 56, No. 12. – P. 995-1004. (Scopus, Web of Science).

Патент

7. Патент № 2783297 С2 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Способ ультразвукового контроля электропроводящих цилиндрических объектов: № 2021110121 : заявл. 12.04.2021 : опубл. 11.11.2022 / О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, **А.Ф. Башарова (Брестер А.Ф.)**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение ФГБОУ ВО "Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова".

Статьи в сборниках материалов конференций

8. Muraviev, V.V. The influence of martensite content on acoustic, magnetic and electrical properties of chromium-nickel steel / V.V. Muraviev, O.V. Muravieva, K.V. Petrov, **A.F. Basharova (A.F. Brester)**, M.B. Rigmant, M.K. Korkh // AIP Conference Proceedings : Proceedings of the 12th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, Ekaterinburg, 21–25 мая 2018 года. Vol. 2053. – Ekaterinburg: American Institute of Physics Inc., 2018. – P. 020007. (Scopus, Web of Science).

9. **Башарова, А.Ф. (Брестер А.Ф.)** Влияние типа дефекта на коэффициент выявляемости при акустическом зеркально-теневом методе на многократных отражениях / А. Ф. Башарова (А.Ф. Брестер) // Приборостроение в XXI веке - 2021. Интеграция науки, образования и производства: сборник материалов XVII Всероссийской научно-технической конференции, Ижевск, 24–26 ноября 2021 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Управление информационных ресурсов, 2022. – С. 172-178.

10. **Башарова, А.Ф. (Брестер А.Ф.)** Методика расчета эффективности ЭМА-преобразователя продольных волн в условиях дополнительного намагничивания током высокочастотного индуктора / А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер), А.А. Наговицын, О.В. Муравьева // Приборостроение в XXI веке - 2020. Интеграция науки, образования и производства : сборник материалов XVI Всероссийской научно-технической конференции, Ижевск, Россия, 02–04 декабря 2020 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2020. – С. 46-52.

11. Наговицын, А.А. Моделирование магнитного поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн / А.А. Наговицын, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)**, О.В. Муравьева // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы

- I Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в городе Сарапуле, Сарапул, 01–31 мая 2020 года. – Сарапул: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2020. – С. 211-215.
12. Петров, К.В. Исследование фокусировки акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем / К.В. Петров, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)**, Г.Л. Федорова // Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI. Интеграция науки, образования и производства», - Ижевск, 2018, - С.298-307.
13. Петров, К.В. Моделирование распространения акустических волн в цилиндрических объектах с дефектами в COMSOL Multiphysics / К.В. Петров, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)**, Г.Л. Пушина, Е.В. Недзвецкая // Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства : Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции, Ижевск, 23–25 ноября 2016 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2017. – С. 284-291.
14. Murav'eva, O.V. Change in the Acoustic and Elastic Properties of the Cylindrical Steel Specimens during the Tensile / O.V. Murav'eva, S.V. Len'kov, A.A. Nagovitsyn, A.F. Basharova (**A.F. Brester**) // Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications - 2019 : Proceedings of the V International Forum, Ижевск, 20–22 ноября 2019 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2019. – Р. 76-84.
15. Петров, К. В. Влияние растягивающих напряжений на скорости рэлеевской и поперечной акустических волн в стальных цилиндрических объектах / К.В. Петров, О.В. Муравьева, В.А. Зорин, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)**, Г.Л. Федорова // Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI. Интеграция науки, образования и производства», - Ижевск, 2018, - С.190-197.
16. Петров, К.В. Моделирование формирования акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя в COMSOL Multiphysics / К.В. Петров, Г.Л. Пушина, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)**, В.С. Стрелков // Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства: Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции, Ижевск, 23–25 ноября 2016 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2017. – С. 292-298.
17. Муравьев, В.В. Влияние содержания мартенсита в хромоникелевой стали на акустические, магнитные и электрические параметры / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, М.Б. Ригмант, М.К. Корх, К.В. Петров, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)** // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : XII международная конференция : Сборник материалов, Екатеринбург, 21–25 мая 2018 года. – Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, 2018. – С. 320.
18. Муравьева, О.В. Коэффициент выявляемости при реализации зеркально-теневоего метода на многократных отражениях / О.В. Муравьева, С.В. Ленков, Ю.Б. Мышкин, В.А. Зорин, М.А. Синцов, К.В. Петров, **А.Ф. Башарова (А.Ф. Брестер)** // XXXI Уральская конференция "Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)": Тезисы докладов, Екатеринбург, 20 ноября 2018 года / Ответственный за выпуск А.Н. Сташков. – Екатеринбург: Издательство "Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН", 2018. – С. 16-17.