

На правах рукописи



Петров Кирилл Владимирович

**ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-
АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2020

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, профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», главный научный сотрудник управления научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск.

Официальные оппоненты:

Марков Анатолий Аркадьевич, доктор технических наук, заместитель генерального конструктора по развитию методов и средств неразрушающего контроля ОАО «Радиоавионика», г. Санкт-Петербург;

Воронкова Любовь Владимировна, кандидат технических наук, главный научный сотрудник лаборатории ультразвуковых методов исследования и метрологии института неразрушающих методов исследования металлов АО «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Защита состоится 28 января 2020 г. в 16⁰⁰ часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.10 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.etu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «27» ноября 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.238.10



Е.В. Садыкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Цилиндрические изделия в виде пруткового проката и изделий из него (валы, насосные штанги, ролики и др.) находят широкое применение в машиностроении, металлургии, транспорте, нефтяной и газовой промышленности. Для гарантированной безаварийной работы таких изделий необходимо выявление недопустимых дефектов как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации. Для неразрушающего контроля (НК) цилиндрических объектов используют преимущественно магнитный и вихретоковый методы, основное преимущество которых – бесконтактность. Однако, возможность обнаружения исключительно поверхностных и приповерхностных дефектов, а также мешающие факторы в виде аномалий электромагнитных свойств, краевых эффектов, шероховатости поверхности, снижают достоверность указанных методов. Достоверность и воспроизводимость результатов традиционного контактного ультразвукового (УЗ) метода в значительной мере определяются качеством подготовки поверхности и диаметром контролируемых объектов. Волноводный акустический метод, используемый для контроля протяженных цилиндрических объектов, имея в качестве основного преимущества высокую скорость контроля за счет отсутствия сканирования, обладает рядом недостатков - наличие значительной «мертвой зоны», особенно при контроле изделий с галтельными переходами (например, насосные штанги), а также недостаточная чувствительность к дефектам ввиду использования низких частот.

Перспективным подходом к решению вышеуказанных проблем при контроле цилиндрических изделий является использование зеркально-теневого метода (ЗТМ) контроля с применением проходных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей (далее ЭМА ЗТМ). К достоинствам данного метода относится бесконтактная природа возбуждения и приема УЗ волн, возможность возбуждения и приема любых объемных волн, возможность реализации метода многократных отражений благодаря отсутствию потерь на границе преобразователь - объект контроля, высокая чувствительность при оценке напряженно-деформированного состояния, структуроскопии, толщинометрии, дефектоскопии в условиях шероховатой и загрязненной поверхности объекта. Основным недостатком ЭМА преобразователей (ЭМАП) является низкий коэффициент преобразования.

Отсутствие исследований в области расчета акустического тракта зеркально-теневого метода контроля цилиндрических изделий с помощью проходных ЭМАП, подходов к построению эффективных проходных ЭМАП различных типов волн, недостаточное количество работ в области структуроскопии и оценки напряженно-деформированного состояния с помощью проходных ЭМАП существенно ограничивают использование данного метода при контроле цилиндрических изделий.

Степень разработанности темы

Развитие бесконтактных методов и средств НК с использованием ЭМА метода возбуждения и регистрации УЗ волн началось с 70-х годов двадцатого века. С тех пор теоретико-экспериментальные представления об особенностях работы

ЭМАП и практический опыт их применения претерпели значительные изменения. На сегодняшний день отечественными и зарубежными учеными (К.Е. Аббакумов, Н.П. Алешин, Б.А. Буденков, Г.А. Буденков, А.Н. Васильев, Н.П. Гайдуков, Н.А. Глухов, Э.С. Горкунов, С.Ю. Гуревич, И.В. Ильин, Р.С. Ильясов, А.В. Кириков, В.А. Комаров, А.В. Малинка, О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, В.Ф. Мужичкий, О.В. Неволин, С.К. Паврос, Ю.В. Петров, Ю.И. Сазонов, Г.М. Сучков, А.В. Харитонов, Н.Ф. Шаповалов, Ю.М. Шкарлет, К.Н. Шубаев, R. Dobbs, H. Frost, M. Hirao, J. Houck, V. Kaule, K. Kawashima, P. Larsen, D. Meredith, V. Maxfield, H. Ogi, R. Thompson и др.) ведущих научных школ (МГТУ им. Баумана, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», УдмФИЦ УрО РАН, ИФМ УрО РАН, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», НИИИН МНПО «Спектр») и производителями ЭМА приборов (ООО «Компания Нординкрафт», ЗАО «Ультракraft», ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр», ООО «АКС» и др.) созданы основы физических представлений о механизмах ЭМА преобразования в металлах с различными магнитными, электрическими, и другими физическими свойствами, при различных уровнях поля подмагничивания, температурах и пр.; разработаны методы расчета полей упругих волн, формируемых ЭМАП, предложено множество конструктивных решений преобразователей, позволяющих достичь высокой эффективности их работы в различных областях применения. Опубликовано большое количество работ по улучшению существующих и разработке новых методов и средств НК на основе известных фактов и явлений при ЭМА преобразовании. Бесконтактные ЭМА методы обеспечили принципиально новый подход к решению задач контроля изделий с загрязненной поверхностью (защитные покрытия, коррозия и пр.) и изделий в нагретом состоянии.

Успешными являются результаты внедрения на металлургических предприятиях установок серии «Волна» и «Север» для автоматизированного УЗ контроля листового проката, круглых и квадратных заготовок, в том числе, проката при температурах до 750°C (производитель – ООО «Компания Нординкрафт»). Имеются сведения о попытках разработки ЭМА дефектоскопов для контроля рельсов в условиях пути (НПО «РДМ-ВИГОР, ЗАО «Ультракraft»), разрабатываются различные варианты ЭМА толщиномеров (ООО «АКС»). Широкое внедрение для контроля в настоящее время получили разработки английской компании «Tube Investments Ltd».

Целью работы является усовершенствование зеркально-теневого метода контроля цилиндрических изделий с использованием электромагнитно-акустических преобразователей с позиций разработки эффективных проходных ЭМА преобразователей, исследования акустического тракта, применения метода для структуроскопии, оценки напряженно-деформированного состояния и овальности поперечного сечения объекта. Цель соответствует следующим областям исследования по паспорту специальности 05.11.13: п.1. «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»; п.2. «Разработка и оптимизация методов расчета и проектирования элементов, средств, приборов и систем аналитического и неразрушающего контроля с учетом особенностей объектов контроля».

В работе решались следующие **задачи**:

1. Анализ литературы в области неразрушающего контроля цилиндрических изделий.
2. Моделирование и разработка эффективных проходных ЭМАП объемных волн для контроля цилиндрических изделий различных диаметров из ферромагнитных и неферромагнитных металлов.
3. Моделирование и исследование акустического тракта при контроле цилиндрических изделий с помощью ЭМА ЗТМ на многократных отражениях.
4. Исследование применимости ЭМА ЗТМ на многократных отражениях для оценки овальности сечения цилиндрических изделий.
5. Исследование применимости ЭМА ЗТМ на многократных отражениях для структуроскопии и оценки напряженно-деформированного состояния цилиндрических изделий.

Работа выполнялась по проекту №3.751.2014/К в рамках проектной части государственного задания на 2014-2016 гг; в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда; в рамках программы стратегического развития «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на 2012-2016 гг.

Объектом исследования является неразрушающий контроль цилиндрических изделий с помощью ЭМА ЗТМ на многократных отражениях.

Предмет исследования: магнитные, электромагнитные и акустические поля проходного ЭМАП, конструкции проходных ЭМАП, методики ЭМА ЗТМ на многократных отражениях для структуроскопии, оценки напряженно-деформированного состояния и овальности сечения цилиндрических изделий.

Методы исследования

При разработке моделей процессов распространения объемных волн, формирования электрических и магнитных полей ЭМАП использованы методы теории упругости, акустики твердого тела и электромагнитного поля. Численное моделирование акустических, магнитных и электромагнитных полей ЭМА преобразователей выполнено методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics. Обработка сигналов выполнена с использованием специализированных программ MathCAD и WinПЛОС, реализующих, в том числе, методы статистического анализа и теории вероятности.

Для экспериментальных исследований использован ЭМА ЗТМ на многократных отражениях. Подтверждение результатов экспериментов проводилось с помощью металлографических исследований и механических испытаний.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается корректным использованием методов теории акустики твердого тела, теории упругости, 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. Разработаны модели формирования магнитных полей и полей вихревых токов проходных ЭМАП объемных волн для цилиндрических изделий из ферромагнитных и неферромагнитных металлов в широком диапазоне диаметров,

оптимизированы их параметры с позиций достижения максимальных коэффициентов ЭМА преобразования при оптимальном зазоре между преобразователем и объектом контроля, минимизации массогабаритных параметров, требуемой акустической помехозащищенности.

2. Впервые разработана модель и исследован акустический тракт зеркально-теневого метода на многократных отражениях в зависимости от характеристик объекта и параметров контроля, описывающий закономерности распределения смещений и фокусировки акустических волн по сечению.

3. Предложен метод расчета процесса распространения импульсов ультразвуковых волн по сечению эллиптического цилиндра в условиях излучения-приема волн, реализованный в лучевом приближении и с использованием метода конечных элементов, представлен способ оценки овальности сечения цилиндрических изделий, основанный на оценке периода огибающей модулированной серии импульсов многократных отражений, обусловленной искажением волнового фронта акустической волны.

4. Показана возможность использования ЭМА ЗТМ на многократных отражениях для оценки напряженно-деформированного состояния и структуры цилиндрических изделий, основанная на корреляционных зависимостях указанных характеристик со скоростями продольной и поперечной волн осевой поляризации.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретической значимостью обладают: разработанные модели и результаты моделирования акустических, электромагнитных и магнитных полей проходного ЭМАП; результаты экспериментальных исследований зависимости скорости акустических волн от внешних растягивающих напряжений в цилиндрических изделиях, позволяющие определить коэффициенты акустоупругости в области упругих деформаций, пластичности и текучести; результаты исследования акустического тракта при контроле цилиндрических изделий зеркально-теневым методом многократных отражений, позволяющие определить степень выявляемости дефектов различного местоположения, а также возможность оценки овальности сечения цилиндрических объектов.

Практической значимостью обладают результаты исследования влияния конструктивных особенностей проходного ЭМАП на параметры магнитных полей и полей вихревых токов, позволившие оптимизировать конструкции ЭМАП с целью достижения максимальной эффективности, улучшения акустической помехозащищенности и уменьшения массогабаритных параметров; а также разработанный специализированный проходной ЭМАП разъемного типа, позволяющий проводить контроль цилиндрических изделий, имеющих локальные увеличения диаметра, например, насосные штанги (патент РФ на полезную модель № 179018).

Результаты работы были использованы при проведении УЗ контроля прутков из инструментальной и рессорно-пружинной сталей, прутков-заготовок насосных штанг в рамках договоров с предприятиями машиностроения (АО «ИЭМЗ «Купол», ООО УК «Промтехкомплект», ООО «ПКНМ-Урал»), что подтверждается соответствующими актами об использовании результатов диссертационной работы.

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»).

Положения, выносимые на защиту

1. Увеличение рабочей частоты и диаметра объекта оказывает существенное влияние на акустическое поле проходного ЭМАП, что приводит к увеличению чувствительности к дефектам вблизи центра объекта контроля, при этом наблюдается максимальная неравномерность в распределении смещений по сечению.

2. При формировании серии многократных отражений по сечению эллиптического цилиндра проявляется закономерность, состоящая в появлении модуляции серии импульсов многократных отражений, период огибающей которой уменьшается с ростом эллиптичности.

3. Кореляционные зависимости скоростей продольной волны радиальной поляризации и поперечной волны осевой поляризации с механическими свойствами и напряженно-деформированным состоянием, исследованные с помощью ЭМА ЗТМ в цилиндрических образцах из конструкционных сталей, показывают уменьшение скоростей с увеличением растягивающей нагрузки, ростом твердости, пределов прочности и текучести, и увеличение с ростом относительного удлинения.

4. Исследованные закономерности формирования магнитных полей и полей вихревых токов проходных ЭМАП продольных и поперечных волн в условиях ферромагнитных и неферромагнитных объектов контроля, а также различных технологических зазоров между преобразователем и объектом, позволили провести оптимизацию конструкции преобразователей с позиций достижения максимальной эффективности ЭМА преобразования и максимальной акустической помехозащищенности.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2016 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг 2016» (г. Челябинск, 2016 г.); XXII, XXIII Петербургская конференция «Ультразвуковая дефектоскопия металлов и перспективных материалов» (г. Санкт-Петербург, 2016 г., 2019 г.); XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, 2017 г.); IV Международная конференция «Информационные технологии в промышленности и производстве» (г. Томск, 2016 г.); Международная научно-техническая конференция «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» (г. Могилёв, 2017 г.); IV Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest 2017» (г. Новосибирск, 2017 г.); XXIX Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» (г. Екатеринбург, 2016 г.); III Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль, диагностика – 2014» (г. Ижевск, 2014 г.); X-XIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки,

образования и производства» (г. Ижевск, 2014 - 2018 гг.); II-IV Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке» (г. Ижевск, 2013 г., 2015 г., 2016 г.).

Личный вклад автора. Численное моделирование, аналитические расчеты, исследование акустического тракта, магнитных и электромагнитных полей ЭМАП, экспериментальные исследования, а также разработка конструкций преобразователей были проведены автором лично. Выбор приоритетов, направлений и методов исследований и форм представления результатов, формулирование основных положений выполнено при активном участии научного руководителя д.т.н., профессора Муравьевой О.В.

Публикации. Результаты диссертации изложены в 24 публикациях, в т.ч. 4 статьях в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 6 статьях SCOPUS, Web of Science. Получен патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 134 страницах, состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка используемой литературы из 169 наименований. Диссертация включает 78 рисунков, 14 таблиц и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены технологические процессы изготовления цилиндрических изделий, и возможные типы дефектов. Изучены виды и методы НК цилиндрических изделий, сформулированы их основные преимущества и недостатки. Особое внимание уделено акустическому виду контроля: рассмотрены эхо-импульсный, волноводный и зеркально-теневой методы, показаны используемые дефектоскопы. На основе изученного материала сделан вывод о перспективности использования УЗ зеркально-теневого метода для контроля цилиндрических изделий в связи с рядом преимуществ: возможность выявления дефектов любой формы, ориентации, дефектов, дающих слабые эхо-сигналы, возможность выявления дефектов в «мертвой зоне», возможность использования бесконтактных ЭМАП и реализации метода многократных отражений, относительная простота и дешевизна.

Во второй главе разработаны модели формирования магнитных полей и полей вихревых токов проходных ЭМАП объемных волн для цилиндрических изделий из ферромагнитных и неферромагнитных металлов, оптимизированы их параметры с позиций достижения максимальных коэффициентов ЭМА преобразования при оптимальном зазоре между преобразователем и объектом контроля, минимизации массогабаритных параметров, требуемой акустической помехозащищенности. Рассчитанное методом конечных элементов пространственное распределение магнитного поля системы подмагничивания проходного ЭМАП продольных волн представлено на рисунке 1, а.

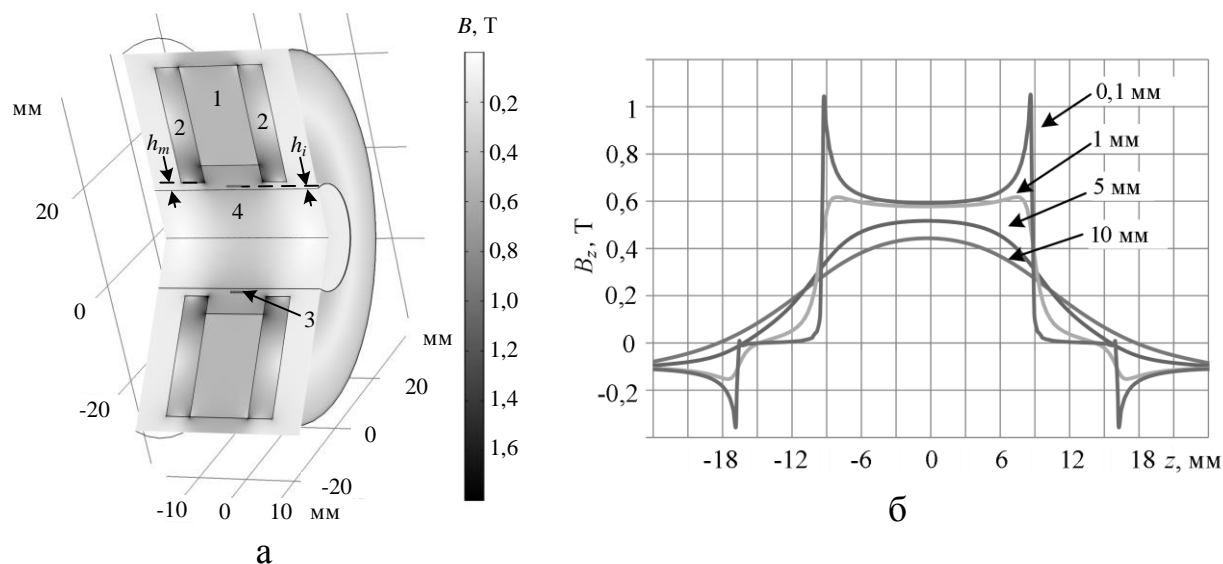


Рисунок 1 – Распределение магнитного поля ЭМАП продольных волн (а), распределение осевой составляющей магнитной индукции B_z на поверхности объекта при различных зазорах h_m (б)

В объекте контроля наблюдаются равномерное распределение магнитного поля по радиусу объекта и преобладание осевой составляющей магнитной индукции B_z в области размещения высокочастотного индуктора. Распределение B_z на поверхности объекта контроля при различных зазорах h_m показано на рисунке 1, б. Влияние зазора h_i между индуктором и объектом контроля на плотность и распределение вихревых токов на поверхности цилиндра показано на рисунке 2, а.

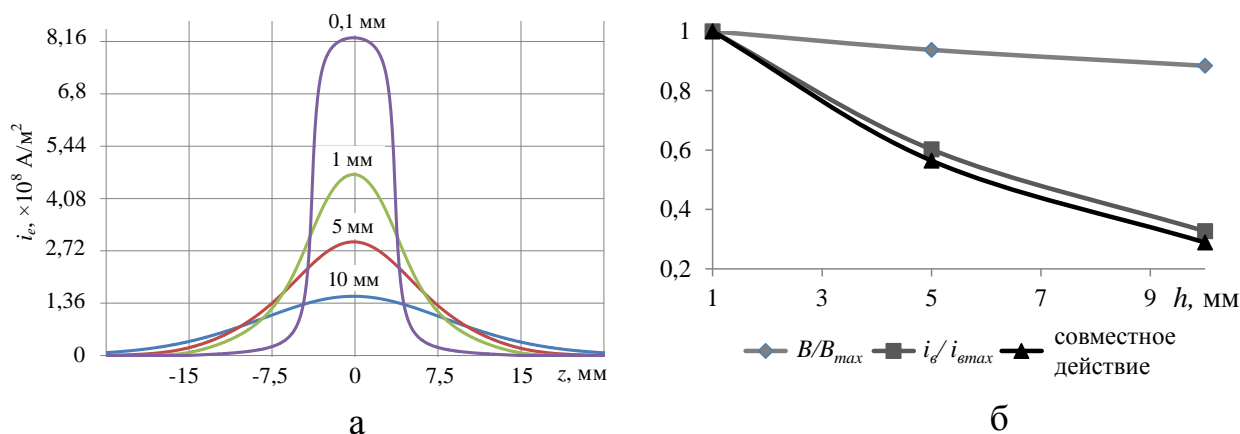


Рисунок 2 – Распределение плотности вихревых токов на поверхности объекта при различных зазорах h_i (а), влияние зазора h между преобразователем и объектом контроля на относительную эффективность ЭМА преобразования (б)

Обобщающий график зависимости влияния зазора h между преобразователем и объектом контроля на относительную эффективность ЭМА преобразования представлен на рисунке 2, б. Результаты расчета показывают экспоненциальную зависимость амплитуды вихревых токов от глубины их проникновения под центром катушки индуктивности в радиальном направлении.

Отношение полезной и мешающей компонент магнитного поля определяет акустическую помехозащищенность преобразователя, которая может меняться в зависимости от размера и положения высокочастотного индуктора. В положении I

на рисунке 3, а формируется магнитное поле с преимущественным направлением вектора индукции по радиусам объекта (радиальная составляющая B_r), это вызывает формирование поперечной T волны осевой поляризации. В положении III имеет место максимальная осевая составляющая поля B_z , при этом формируется продольная L волна. При размещении индуктора в области существования двух компонент поля B_r и B_z (положение II) возможно одновременное излучение (прием) двух типов волн.

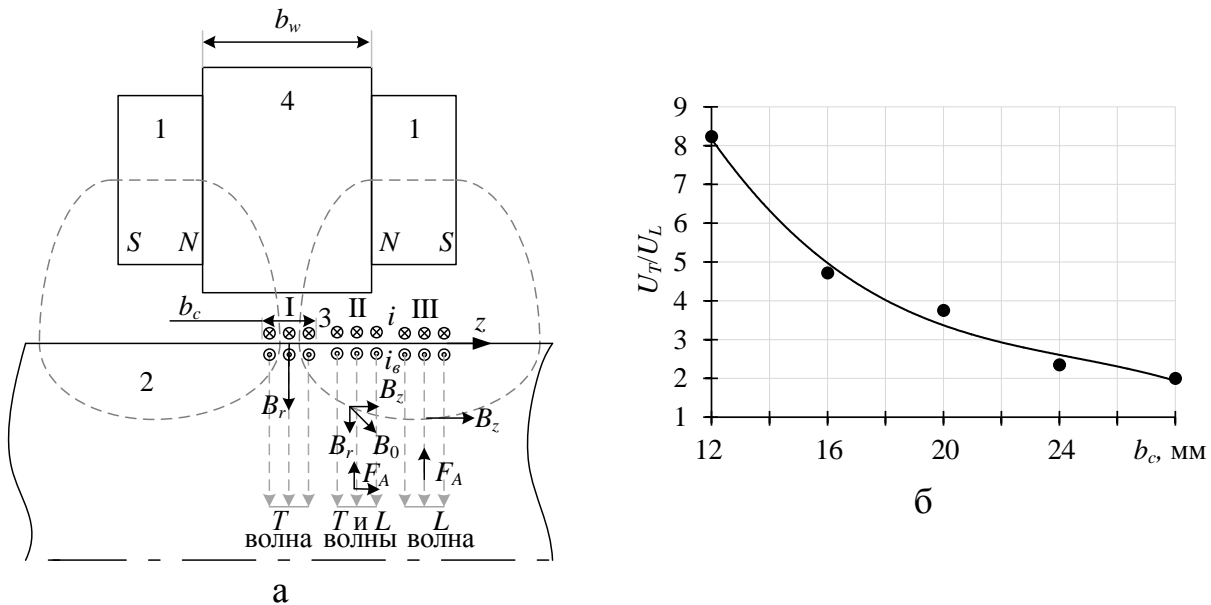


Рисунок 3 – Схема возбуждения продольных и поперечных волн проходящим ЭМАП (а) (1 – магниты, 2 – объект контроля, 3 – индуктор, 4 – магнитопровод); зависимость отношения U_T/U_L от величины b_c (б)

Указанные закономерности исследованы экспериментально на стальном цилиндрическом объекте диаметром 17 мм. При фиксированной ширине концентратора магнитного поля $b_w=10$ мм ступенчато изменялась ширина индуктора b_c от 8 до 28 мм (индуктор находится в положении I согласно рисунку 3, а), при этом регистрировались осциллограммы серии многократных отражений при помощи установки ДЭМА-П (рисунок 4), реализующей ЭМА ЗТМ на многократных отражениях. Зависимость отношения амплитуды поперечной U_T и продольной U_L волн от ширины индуктора b_c на втором отражении представлена на рисунке 3, б. Характер зависимости U_T/U_L подобен зависимости отношения B_r/B_z от координаты по оси z .

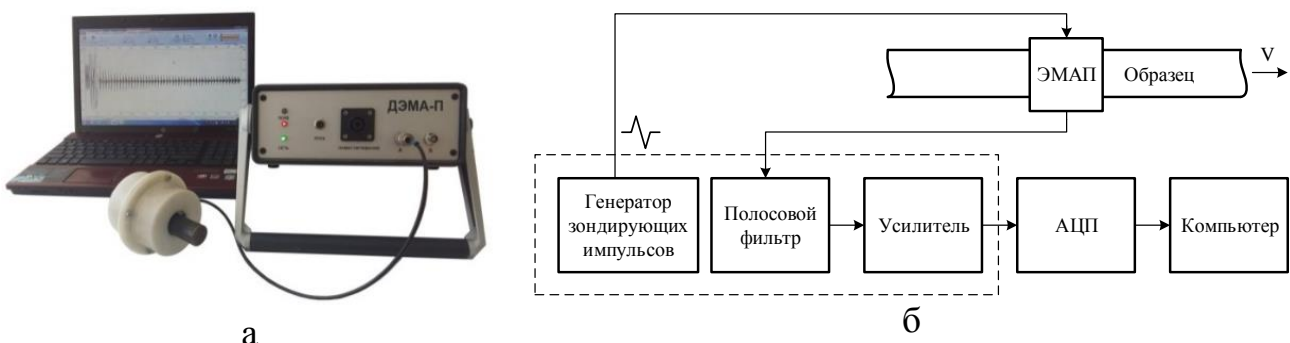


Рисунок 4 – Внешний вид (а) и структурная схема установки ДЭМА-П (б)

Из-за жестко фиксированного внутреннего диаметра проходного ЭМАП область его применения ограничивается цилиндрическими изделиями, имеющими одинаковый диаметр по всей длине, однако, существует множество цилиндрических объектов контроля, имеющих локальные увеличения диаметра в виде галтельных переходов, высаженных концов головок насосных штанг, резьбы большего диаметра, сварки. Для контроля таких объектов разработан проходной ЭМАП разъемного типа (рисунок 5, патент № 179018 РФ).



Рисунок 5 – Разъемный ЭМАП на объекте контроля

В третьей главе разработана модель и исследован акустический тракт ЭМА ЗТМ в зависимости от характеристик объекта (диаметр, материал) и параметров контроля (частота, форма зондирующего импульса). Предложен метод расчета процесса распространения импульсов УЗ волн по сечению эллиптического цилиндра в условиях излучения-приема волн, реализованный в лучевом приближении и с использованием метода конечных элементов, предложен способ оценки овальности сечения цилиндрических изделий, основанный на оценке периода огибающей модулированной серии импульсов многократных отражений, обусловленной искажением волнового фронта акустической волны.

Разработанная модель для случая продольной волны и круглого цилиндра представлена на рисунке 6, а. Возбуждение волн происходит за счет приложения импульса смещений $U(t)$, равномерно распределенных по периметру цилиндра. Величина смещений U_0 рассчитана с использованием закона Гука для всестороннего однородного сжатия. Результат моделирования акустического поля иллюстрирует рисунок 6, б. Распределения смещений в поперечной и продольной волне по диаметру цилиндра представлены на рисунке 7. В центральной области амплитуда смещений возрастает, что объясняется эффектом фокусировки. Для случая продольной волны в центре формируются нулевые смещения, обусловленные расфазировкой импульсов, распространяющихся в противоположных направлениях. В случае поперечной волны в центре наблюдается максимум амплитуды смещений. Коэффициент фокусировки K_f , определяемый как отношение максимальной амплитуды смещений в зоне фокуса U_{\max} к минимальной амплитуде U_{\min} , тем больше, чем выше частота волн и диаметр цилиндра. Размер фокусного пятна (площадь кольца S_f , соответствующего уменьшению амплитуды смещений на 6 дБ относительно максимального значения) уменьшается с увеличением частоты волн.

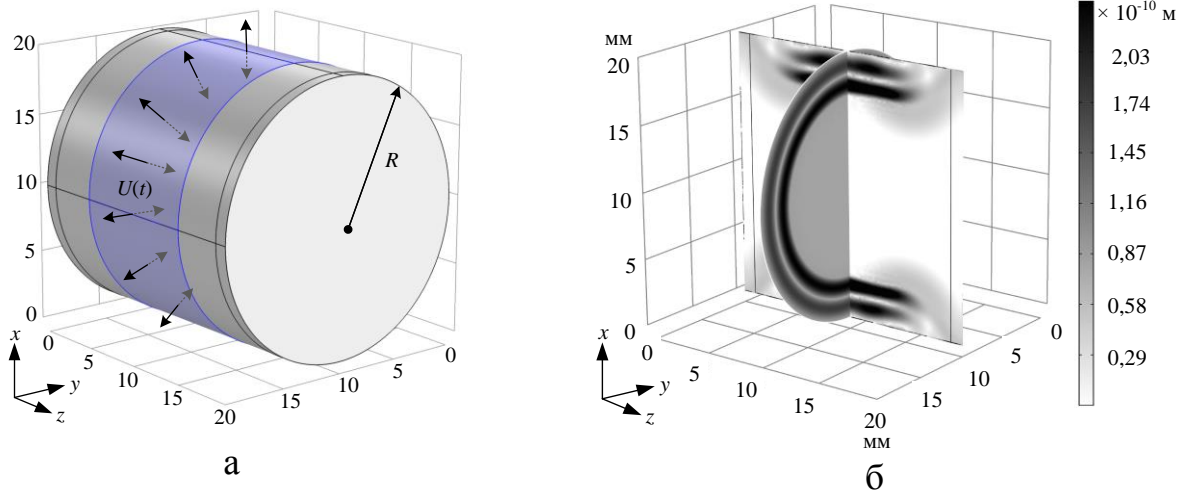


Рисунок 6 – Трехмерная модель (а) и рассчитанный волновой фронт в начальный момент времени (б) для продольной волны

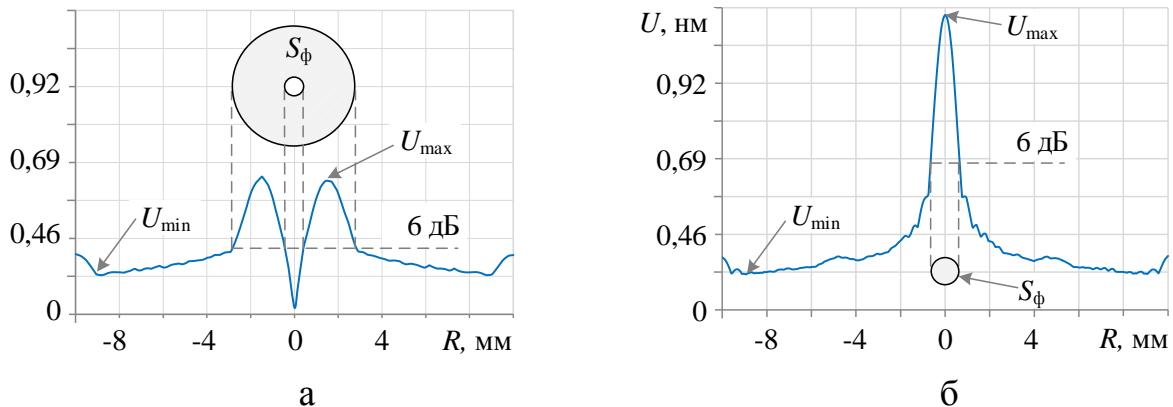


Рисунок 7 – Распределение смещений продольной (а) и поперечной (б) волн по диаметру цилиндра

Разработанная аналитическая модель распространения УЗ волн по сечению эллиптического цилиндра основана на законах геометрической акустики. Полагается, что каждый элементарный источник вдоль огибающей цилиндра излучает УЗ волну с максимумом в направлении, перпендикулярном касательной к образующей в каждой исследуемой точке. В лучевом приближении формируемая серия многократных отражений $U_{\Sigma}(t)$ в условиях излучения-приема импульсов УЗ волн во всех радиальных направлениях с помощью совмещенного проходного ЭМАП может быть рассчитана аналитически как результат суперпозиции временных разверток $U(t_{nk})$, формируемых элементарными (малыми в сравнении с длиной волны) излучателями, равномерно распределенными по огибающей цилиндра и принятых элементарными приемниками при прохождении расстояния r_{nk} и многократно переотраженных K раз на границе эллипса:

$$U_{\Sigma}(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K U(t_{nk}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^N (U_0(t) \cdot e^{i(r_{nk}/C_1 + \pi n/2)} \cdot R(r_{nk})), \quad (1)$$

где K – число элементарных излучателей и приемников по огибающей цилиндра; $U(t) = U_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot e^{-i\omega t}$ – зондирующий импульс с амплитудой U_0 ; β – параметр,

описывающий ослабление зондирующего импульса во времени, пропорциональный частоте колебаний f ; $R(r_{nk})$ - коэффициент ослабления, обусловленный затуханием и расхождением волны; C_l - скорость продольной волны; $e^{i\pi n/2}$ - фазовый сдвиг на $\pi/2$, обусловленный прохождением встречно распространяющихся волн через цилиндрический фокус и отражением от свободной границы цилиндра

На рисунке 8 представлены результаты расчета хода лучей из точки A для первых 30 отражений УЗ волны по эллиптическому сечению цилиндра и формируемая серия многократных отражений $U_{\Sigma}(t)$.

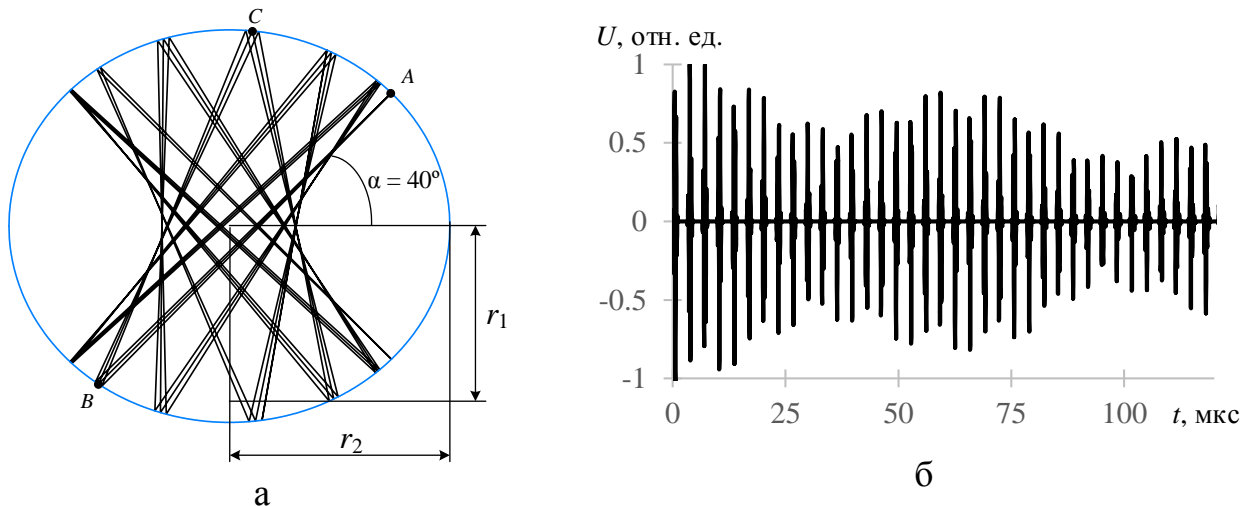


Рисунок 8 – Ход УЗ луча по сечению цилиндра при эллиптичности $\Delta=1$ мм и $r_1=10$ мм (а), рассчитанная серия импульсов многократных отражений $U_{\Sigma}(t)$ для цилиндра с эллиптичностью $\Delta=0,05$ мм и $r_1=10$ мм.

Конечно-элементная модель для случая эллиптического цилиндра аналогична рисунку 6, а. В результате моделирования обнаружено, что при эллиптичности цилиндра наблюдается искажение волнового фронта, что приводит к искажениям формы импульсов и временных задержек на осциллограмме многократных отражений. На рисунке 9 представлены результирующие серии выпрямленных импульсов многократных отражений, полученные в ходе моделирования для круглого и эллиптического цилиндров.

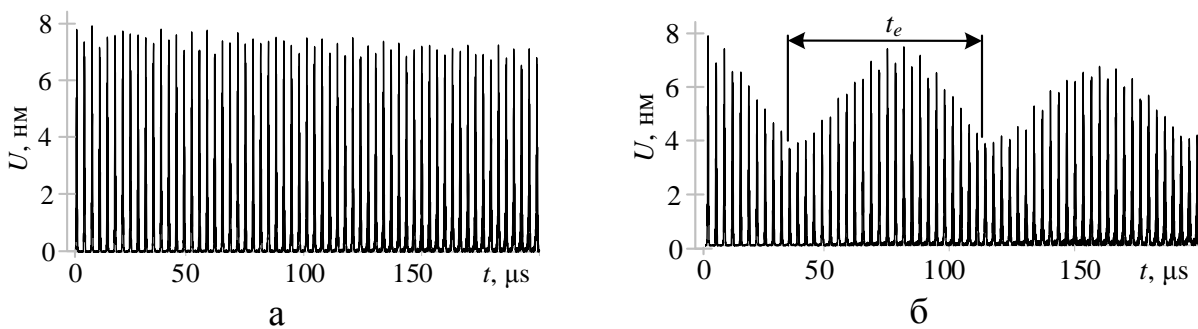


Рисунок 9 – Результаты моделирования осциллограмм серии импульсов многократных отражений для круглого цилиндра (а) для цилиндра с эллиптичностью 0,05 мм (б) (частота $f=1$ МГц, $r_1=10$ мм)

При наличии эллиптичности сечения наблюдается модуляция в огибающей амплитуд импульсов многократных отражений с периодом огибающей импульсов t_e , также происходит изменение положения эхо-импульса на временной оси (запаздывание эхо-импульса по времени Δt_n в сравнении с круглым сечением радиуса r_1), существеннее выраженное на дальних отражениях (рисунок 10, а). На рисунке 10, б представлены графики зависимостей периода огибающей импульсов t_e и параметра разности времен прихода Δt_{10} 10-го эхо-импульса от эллиптичности.

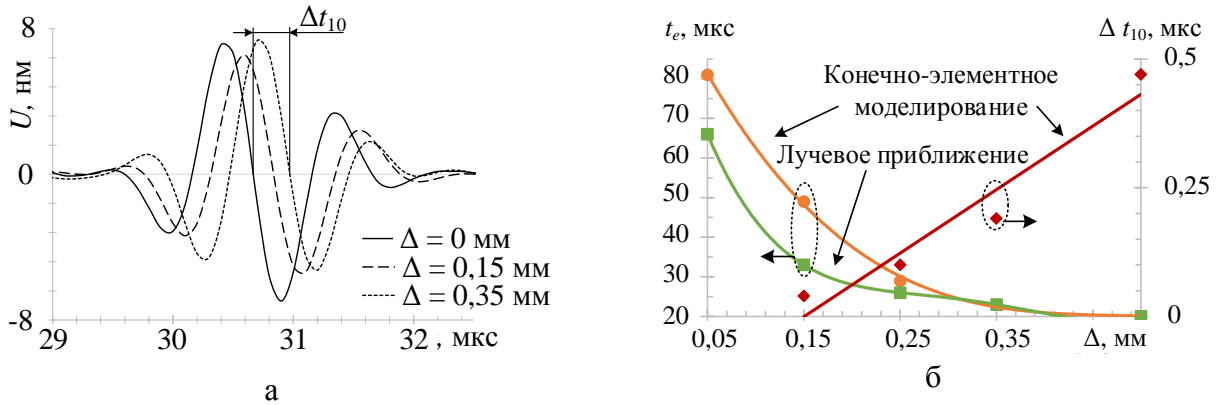


Рисунок 10 – Форма 10-го эхо-импульса в серии многократных отражений при различной эллиптичности Δ (частота $f=1$ МГц, $r_1=10$ мм) (а), зависимости периода огибающей t_e и разности времен прихода Δt_{10} 10-го эхо-импульса от эллиптичности Δ ($f=3$ МГц) (б)

По результатам вероятностно-статистического анализа полученных осциллограмм обнаружено, что с ростом эллиптичности увеличивается максимум плотности вероятности, при этом среднеквадратическое отклонение данных в массиве уменьшается. Совместное использование предложенных информативных параметров позволяет с достаточной точностью оценить эллиптичность сечения цилиндра, как в области малых, так и больших значений.

В четвертой главе исследована возможность использования ЭМА ЗТМ на многократных отражениях для оценки напряженно-деформированного состояния (в упругой и упругопластической зонах) и механических свойств цилиндрических изделий, основанная на корреляционных зависимостях указанных характеристик со скоростями продольной и поперечной волн. Представлены результаты дефектоскопии прутков с помощью зеркально-теневого метода многократных отражений с использованием проходных ЭМАП.

Для оценки влияния структурного состояния на скорость акустических волн использованы образцы пруткового проката из стали 40Х, применяемого для изготовления ответственных деталей нефтедобывающего оборудования. Исследования проводилась на прутках в состоянии поставки и подвергнутых дополнительной термической обработке. Для определения скорости на каждом образце были сняты осциллограммы многократных отражений УЗ волн с помощью установки ДЭМА-П (рисунок 4). В структуре мартенсита (образец № 1) скорость имеет минимальное значение (рисунок 11, а). Нормализация приводит к увеличению скорости ультразвуковых волн. Для наиболее равновесных ферритно-перлитных структур (образцы № 4 и 5) скорости объемных волн принимают максимальное значение. В то же время в структурах мелкодисперсного зернистого

сорбита (образцы № 2, 3, 6) скорость волн имеет промежуточное значение. Наиболее высокая степень корреляции (коэффициент корреляции $R = 0,96$) отмечена между пластичностью и скоростью поперечных волн (рисунок 11, б). Для твердости, пределов прочности и текучести корреляция со скоростью поперечных волн также высока и составляет $-0,88$, $-8,81$, $-0,85$ соответственно.

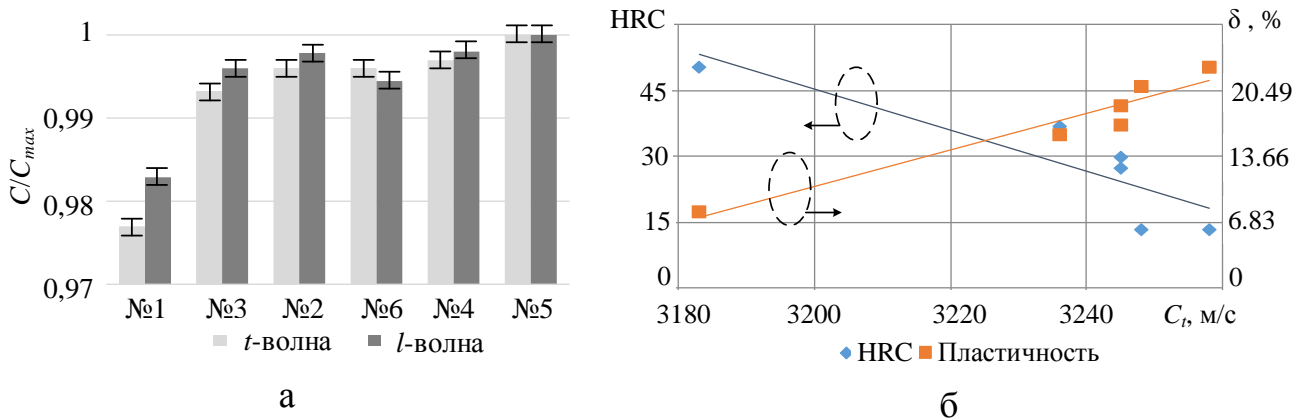


Рисунок 11– Зависимость скорости объемных волн от режима термообработки (а), пластичности и твердости (б)

Для исследования влияния напряженно-деформированного состояния на акустические свойства были использованы образцы пруткового проката из сталей 60Г, 40Х, 15Х2ГМФ, 40ХГМ, 03Х14Н7В применяемых для изготовления пружин, насосных штанг и валов центробежных насосов. Образцы подвергали ступенчатому растяжению в направлении продольной оси, в процессе растяжения регистрировали осциллограммы многократных отражений и измеряли диаметр объекта. По результатам измерений рассчитывали скорости УЗ волн. С увеличением растягивающей нагрузки в упругой области наблюдается линейное снижение скорости поперечных волн для всех исследованных образцов, при этом чувствительность поперечных волн к механическим напряжениям максимальна вследствие их осевой поляризации, совпадающей с направлением приложенной

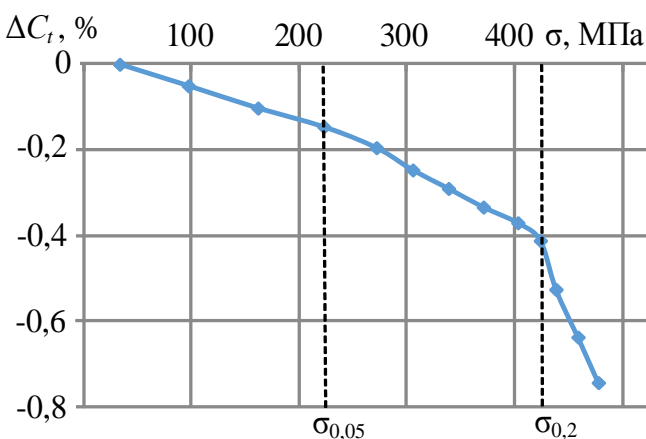


Рисунок 12 – Зависимости скорости поперечных волн от приложенной растягивающей нагрузки для стали 60Г в упругопластической области

нагрузки. Образец из стали 60Г, предварительно подвергнутый высокотемпературному отжигу, был нагружен до значений предела пластичности (рисунок 12). Наблюдается нелинейность в поведении зависимости скорости при переходе в зону пропорциональности (220 МПа), и далее в зону текучести (420 МПа) при этом коэффициенты акустоупругости увеличиваются. Значения акустоупругих коэффициентов исследуемых марок стали сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Коэффициенты акустоупругости

| Акустоупругий коэффициент по скорости β_{zz}^c , 1/ГПа | Марка стали | | | | |
|--|-------------|-------|----------|-------|---------|
| | 40X | 60Г | 03X14H7B | 40XГМ | 15X2ГМФ |
| в области упругости | -1,8 | -6,5 | -4,7 | -5,5 | -8,8 |
| в области пропорциональности | -6,4 | -14,5 | - | - | - |
| в области пластичности | -16,6 | -55,3 | - | - | - |

Для исследования чувствительности ЭМА ЗТМ к дефектам проведен контроль цилиндрических прутков диаметром 10 мм (сталь 14X17H2), цилиндрических прутков-заготовок для изготовления насосных штанг диаметром 22 мм (сталь 30XГМ, сплав «монель»), прутков-заготовок для изготовления утяжеленных насосных штанг. диаметром 32 и 44 мм из сталей 20H2M, 30XMA, 40, 40X. Для первичного поиска дефектов были использованы дефектоскопы АДНШ и АДНКТ, реализующие волноводный метод контроля на стержневых и крутильных волнах. При обнаружении дефектов волноводными методами координата дефекта определяется с точностью ± 50 мм. Забракованные прутки были подвергнуты контролю зеркально-теневым методом на многократных отражениях с применением проходных ЭМАП, что позволило уточнить координаты выявленных дефектов с точностью ± 5 мм для дальнейшего металлографического анализа с целью подтверждения дефектов. По результатам металлографического анализа подтверждено наличие дефектов различного типа (рисунок 13).

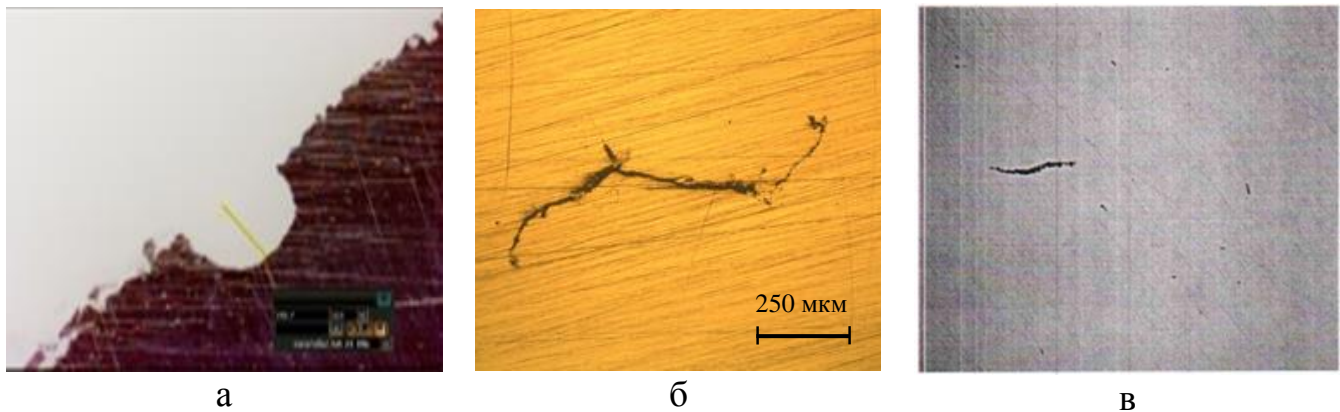


Рисунок 13 – Обнаруженные дефекты: поверхностный (глубина 0,15, длина 0,26 мм), сталь 14X17H2, диаметр 10 мм (а), неметаллическое включение (x100), сплав «монель», диаметр 19 мм (б) неметаллические включения (нитриды точечные 1 балл, силикаты хрупкие 3 балла), сталь 40X, диаметр 44 мм (в)

Заключение

1. Разработана модель акустического тракта зеркально-теневого метода многократных отражений при контроле цилиндрических изделий, описывающая закономерности распределения смещений и фокусировки акустических волн по сечению в зависимости от характеристик объекта и параметров контроля. Обнаружено существенное влияние роста рабочей частоты и диаметра объекта на акустический тракт, состоящее в увеличении чувствительности к дефектам вблизи центра объекта за счет усиления эффекта фокусировки и большей неравномерности в распределении смещений по сечению.

2. Предложены методы расчета процесса распространения импульсов ультразвуковых волн по сечению эллиптического цилиндра в условиях излучения-приема волн по огибающей, реализованные в лучевом приближении и с использованием метода конечных элементов В результате исследования серии импульсов многократных отражений выявлена закономерность уменьшения периода огибающей амплитуд серии импульсов с ростом эллиптичности.

3. Исследованы закономерности поведения продольных и поперечных волн осевой и радиальной поляризации в цилиндрических образцах из конструкционных сталей в условиях различной структуры и напряженно-деформированного состояния, показавшие наличие следующих корреляционных зависимостей: уменьшение скорости волн с ростом твердости, пределов прочности и текучести, уменьшением относительного удлинения и увеличением растягивающих напряжений.

4. Разработаны модели формирования магнитных полей и полей вихревых токов, создаваемых системой подмагничивания и высокочастотным индуктором, позволившие оптимизировать конструкции проходных ЭМА преобразователей продольных и поперечных волн для ферромагнитных и неферромагнитных материалов с позиций достижения компромисса между максимально возможным технологическим зазором между преобразователем и объектом контроля, максимальной эффективностью ЭМА-преобразования, максимальной акустической помехозащищенностью и минимальными массогабаритными параметрами.

5. На основании результатов исследований предложены методики оценки овальности сечения, структурного и напряженно-деформированного состояния цилиндрических объектов; были разработаны конструкции эффективных ЭМА-преобразователей, в том числе, разъемного типа (патент РФ на полезную модель № 179018).

6. Результаты работы были использованы при проведении УЗ контроля прутков из инструментальной и рессорно-пружинной сталей, прутков-заготовок насосных штанг на предприятиях машиностроения, что подтверждается соответствующими актами. Результаты контроля показали высокую чувствительность к поверхностным (трещины, закаты, раковины, риски) и внутренним (неметаллические включения, трещины) дефектам в широком диапазоне диаметров. Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 12.03.01 «Приборостроение».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**В изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Муравьев, В.В. Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, **К.В. Петров** // Дефектоскопия. - 2017. - № 8. - С. 20-28.

2. **Петров, К.В.** Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров, О.В. Муравьева, Ю.В. Мышкин и др. // Дефектоскопия. - 2019. - № 2. - С. 16-24.

3. Муравьева, О.В. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка / О.В. Муравьева, **К.В. Петров**, М.Ю. Соков, и др. // Дефектоскопия. – 2015. – №. 7. – С. 17-23.

4. Муравьева, О.В. Акустическое поле, формируемое в условиях импульсного излучения-приема на поверхности эллиптического цилиндра / О.В. Муравьева, **К.В. Петров** // Акустический журнал. – 2019. - Т. 65. – № 1. – С. 110-119.

Патенты

5. Патент № 179018 РФ, МПК В06В 1/02 (2006.01). Электромагнитно-акустический преобразователь / О.В. Муравьева, **К.В. Петров**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». - № 2017141861; заявл. 30.11.2017; опубл. 25.04.2018, бюл. №12.

В изданиях SCOPUS, Web of Science

6. Murav'ev, V.V. Contactless electromagnetic acoustic techniques of diagnostics and assessment of mechanical properties of steel rolled bars / V.V. Murav'ev, O.V. Murav'eva, **K.V. Petrov** // Materials Physics and Mechanics. – 2018. - Vol. 38. – No. 1. – P. 48-53.

7. **Petrov, K.V.** Mathematical modeling of the acoustic wave propagation generated by the through-type transducer in a cylindrical object / K.V. Petrov, O.V. Muravieva, M.A. Gabbasova // Journal of Physics: Conference Series. –2017. - Vol. 803. –No. 1. –P. 012114.

8. **Petrov, K.V.** Possibilities of the mirror through transmission electromagnetic-acoustic technique on multiple reflections / K.V. Petrov, O.V. Muravieva, M.A. Gabbasova, V.A. Zorin // Journal of Physics: Conference Series. –2017. - Vol. 881. –No. 1. –P. 012018.

9. Muravieva, O.V. Modeling interactions between the magnetic and eddy current fields of the electromagnetic-acoustic transducer / O.V. Muravieva, **K.V. Petrov**, Yu.V. Myshkin // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE. - 2016. – P. 1-4.

10. Muravieva, O.V. Electromagnetic-acoustic structural analysis of rolled bars / O.V. Muravieva, V.V. Muraviev, M.A. Gabbasova, **K.V. Petrov**, V.A. Zorin // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing. - 2016. – Vol. 1785. – No. 1. – P. 030017.

11. Muravieva, O.V. Electromagnetic-acoustic sensor of the rod cross section ellipticity / O.V. Muravieva, V.V. Muraviev, **K.V. Petrov**, M.A. Gabbasova // 2015

International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – IEEE, - 2015. – P. 1-5.

В других изданиях

12. **Петров, К.В.** Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К.В. Петров, М.Ю. Соков, О.В. Муравьева // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. - 2018. - Т. 21. - № 2. - С. 135-146.

13. Мышкин, Ю. В. Моделирование акустического поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток в трубах и прутках / Ю. В. Мышкин, **К. В. Петров** // Сборник статей 6-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017. – С. 519-529.

14. **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 и др. // Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке - 2018. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 190-197.

15. **Петров, К.В.** Исследование фокусировки акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем / К.В. Петров, Г.Л. Федорова, А.Ф. Башарова // Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке - 2017. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 298-307.

16. **Петров, К.В.** Моделирование распространения акустических волн в цилиндрических объектах с дефектами в COMSOL Multiphysics / К.В. Петров, А.Ф. Башарова, Г.Л. Пушина и др. // Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 284-291.

17. **Петров, К.В.** Моделирование формирования акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя в COMSOL Multiphysics / К.В. Петров, Г.Л. Пушина, А.Ф. Башарова и др. // Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке - 2016. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 292-298.

18. Muravieva, O.V. Probabilistic and statistical characteristics of signals in mirror through transmission technique on multiple reflections for rod cross section ellipticity testing / O.V. Muravieva, **K.V. Petrov**, M.A. Gabbasova // Сборник статей I Международного форума ИЕТ-2015 «Приборостроение, электроника и телекоммуникации - 2015». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 148-151.

19. Муравьева, О.В. Электромагнитно-акустическая структуроскопия пруткового проката / О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, М.А. Габбасова, **К.В. Петров**, В.А. Зорин // Сборник материалов X Международной конференции

«Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2016. – С. 284-285.

20. **Петров, К.В.** Моделирование магнитного поля и поля вихревых токов проходного преобразователя в программной среде COMSOL Multiphysics / К.В. Петров, О.В. Муравьева, Д.А. Егоров // Сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 374-379.

21. Муравьева, О.В. Моделирование взаимодействия проходного электромагнитно-акустического преобразователя с эллипсностью прутка / О.В. Муравьева, **К.В. Петров** // Сборник материалов X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборостроение в XXI веке - 2014. Интеграция науки, образования и производства». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 227-232.

22. **Петров, К.В.** Информативные параметры зеркально-теневого электромагнитно-акустического метода при контроле эллиптичности сечения пруткового проката / К.В. Петров, О.В. Муравьева // Сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 331-334.

23. **Петров, К.В.** Моделирование систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей для контроля неферромагнитных объектов / К.В. Петров, О.В. Муравьева // Сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика - 2014». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – С. 136-140.

24. Стерхов, В.Д. Влияние местоположения индуктора проходного электромагнитно-акустического преобразователя на его акустическую помехозащищенность / В.Д. Стерхов, **К.В. Петров**, О.В. Муравьева // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – С. 581-586.