

УДК 620.179.162

На правах рукописи



Синцов Максим Анатольевич

Чувствительность амплитудного теневого метода с использованием
рэлеевских волн при структуроскопии и дефектоскопии металлоизделий
пруткового и трубного сортамента

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

Ижевск, 2023

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:

Муравьев Виталий Васильевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дымкин Григорий Яковлевич
доктор технических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра по неразрушающему контролю ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (г. Санкт-Петербург)

Михайлов Алексей Вадимович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории комплексных методов контроля ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург)

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (г. Новосибирск)

Защита состоится «01» марта 2024 г. в 16:00 часов на заседании 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 и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте УдмФИЦ УрО РАН, <http://udman.ru/ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Махнева Татьяна Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Экономически обоснованные увеличения производительности, интенсивности эксплуатации и срока службы технических устройств трубопроводного транспорта и технологических трубопроводов сопровождается повышением уровня механических сил, тепловых нагрузок и продолжительности их воздействия. В этих условиях обеспечить безотказность и долговечность ответственных технических объектов возможно только при повышении требований к качеству используемых при изготовлении материалов и изделий. На нефтедобывающих, нефтеперерабатывающих предприятиях и предприятиях теплоэнергетического комплекса безаварийная работа в значительной степени зависит от эксплуатационных свойств труб и соединительных муфт. Определяющую роль в технологическом процессе изготовления этих изделий играют методы неразрушающего контроля, в том числе дефектоскопии и структуроскопии для оценки дефектности и качества термообработки трубного и пруткового проката. Эффективная система неразрушающего контроля на предприятии-изготовителе и комплексный подход, объединяющий оценку состояния структуры материала и обнаружение дефектов, позволит обеспечить надежность эксплуатации опасных производственных объектов и снизить их аварийность в условиях повышения их производительности.

Стандартизированными методами неразрушающего контроля катаных труб и прутков являются ультразвуковой, магнитный и вихретоковый методы. Каждый из них имеет ограниченную чувствительность и достоверность результатов. Например, возможности ультразвукового контроля ограничены непостоянством акустического контакта, вихретокового и магнитного – вариациями зазора между преобразователем и объектом контроля, изменениями магнитных характеристик и электропроводности в материале объекта контроля. Применение ультразвукового контроля является наиболее перспективным, так как данный метод позволяет обнаруживать дефекты, расположенные как на поверхности, так и внутри изделия, и оценивать структуру материала. Для создания технологии ультразвукового контроля пруткового и трубного проката необходимо решить актуальные задачи: снижения влияния акустического контакта за счет применения электромагнитно-акустических преобразователей, повышения чувствительности за счет использования способов многократных отражений и разработке информативных параметров акустического контроля, чувствительных в структуре материала. Существенные преимущества рэлеевских волн в области акустической структуроскопии металлов позволяют с использованием ЭМА способа реализовать амплитудный и временной теневой методы с многократным прохождением рэлеевской волны и повысить чувствительность к дефектам. Актуальной научной задачей неразрушающего контроля является постоянное усовершенствование методик, позволяющих определять несплошности в металлах, а также физико-механические характеристики металлопроката и готовых изделий.

Вопросы акустической структуроскопии и дефектоскопии с использованием рэлеевских волн рассматривались в МВТУ им. Н.Э. Баумана (Алешин Н.П.), ПГУПС (Дымкин Г.Я.), СГУПС (Бехер С.А., Бобров А.Л.), ЦНИИТМАШ (Воронкова Л.В.), МЭИ (Качанов В.К.), НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Хлыбов А.А.), ИФПМ СО РАН (Зуев Л.Б.), КузГТУ (Смирнов А.Н., Абабков Н.В.), СпбГЭТУ-ЛЭТИ (Аббакумов К.Е., Коновалов С.И.), СибГИУ (Громов В.Е.), а также такими исследователями как: Буденков Г.А., Муравьев В.В., Никитина Н.Е., Углов А.Л., Мерсон Д.Л., Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Yongdong Pan, Steve Dixon, Laurence J, Kim C., Pei C., Zhao S., Liu T., Chen Zh., Pfeifer D., Kim J., Jacobs L.J., Rees-Lloyd O., Charlton P., Mosey S.

Работа выполнялась в рамках Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 1.2405.2017/4.6), в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ) № 17-79-10143, в рамках программы стратегического развития «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на 2012 - 2016 гг. гранты:

ПСР/М2/Н2.5/МВВ; ГТ-4-12 конкурс грантов имени Г.А. Тихонова для аспирантов и молодых ученых. В экспериментальных исследованиях использованы образцы и аппаратура, изготовленные в рамках гранта РФФИ № 17-19-01047, гранта РФФИ № 15-19-00051, гранта РФФИ (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер 586308), Программы стратегического развития «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на 2012 - 2016 гг. гранты: ПСР/М2/Н2.5/МВВ; ГТ-4-12 конкурс грантов имени Г.А. Тихонова для аспирантов и молодых ученых.

Цель работы.

Исследование чувствительности акустических методов, основанных на многократном прохождении рэлеевской волны по цилиндрической поверхности, для структуроскопии и дефектоскопии металлоизделий пруткового и трубного сортамента с использованием электромагнитно-акустического и пьезоэлектрического способа возбуждения и приема волн.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1. Анализ методик структуроскопии и исследование изменений скорости и амплитуды рэлеевских волн, возбуждаемых электромагнитно-акустическим преобразователем, в прутках из сталей 40Х и 45 с разной термической обработкой.
2. Исследование чувствительности многократного теневого метода прохождения рэлеевских волн по цилиндрической поверхности и выявляемости дефектов труб и муфт нефтяного сортамента с использованием электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема рэлеевских волн.
3. Исследование чувствительности эхо-метода к дефектам на внутренней поверхности алюминиевых труб с использованием рэлеевских волн, разработка методики контроля.

Объект исследования: методы структуроскопии и дефектоскопии металлоизделий пруткового и трубного сортамента.

Предмет исследования: измеряемые параметры рэлеевских волн при структуроскопии и дефектоскопии металлоизделий пруткового и трубного сортамента.

Методология и методы исследования. В экспериментах использованы временной и амплитудный теневой и эхо методы многократных прохождений по цилиндрической поверхности прутков и труб с применением электромагнитно-акустического и пьезоэлектрического способа возбуждения и приема рэлеевских волн. Подтверждение обнаруженных дефектов и изменений в структуре металла проводилось с помощью макро- и микроанализа, других методов неразрушающего контроля. Результаты достоверности полученных результатов выполнены с использованием статистического анализа и методов теории вероятности.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов подтверждены корректным использованием методов теории акустики твердого тела; методов статистической обработки; использованием при экспериментальных исследованиях метрологически обеспеченных средств измерений, оценками погрешностей исследований, подтверждения результатов дефектоскопии и структуроскопии с помощью макро- и микроанализа, других методов неразрушающего контроля.

Научная новизна:

1. Исследованы зависимости скорости распространения рэлеевских волн по цилиндрической поверхности, возбуждаемых электромагнитно-акустическим преобразователем, от режимов термической обработки металлоизделий пруткового сортамента сталей 40Х и 45, характеризующихся увеличением скорости волн после отжига, в отличие от закаленного состояния, при котором скорости волн имеют наименьшее значение, а с ростом температуры отпуска скорости волн растут.
2. Впервые исследована чувствительность основных параметров рэлеевских волн и выявляемость дефектов стальных труб и муфт нефтяного сортамента с использованием электромагнитно-акустического преобразования и амплитудного теневого метода,

основанного на анализе ослабления многократно прошедших волн, показавшего возможность выявления и надежной локализации дефектов на цилиндрической поверхности.

3. Научно обоснована и реализована методика дефектоскопии алюминиевых труб на основе эхо-метода с использованием рэлеевских волн, распространяющихся по внутренней огибающей поверхности трубы, обеспечивающие выявление и надежную локализацию недопустимых дефектов.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретической значимостью обладают результаты измерений параметров рэлеевских волн, распространяющихся в цилиндрических объектах. Результаты исследований влияния видов и режимов термической обработки и дефектности стальных изделий на измеряемые характеристики рэлеевских волн показали возможность использования амплитудного теневого метода многократных прохождений волн при структуроскопии и дефектоскопии металлоизделий.

Практическая значимость. Результаты испытаний электромагнитно-акустического теневого метода многократных прохождений волн по цилиндрической поверхности при структуроскопии прутков-заготовок сталей 40Х и 45 показали возможность контроля качества термообработки, выявления недопустимых по ГОСТ 14959-79 дефектов стальных труб и муфт нефтяного сортамента из различных марок сталей с надежной локализацией поверхностных дефектов при использовании ЭМА-преобразования и амплитудного многократного теневого метода (акт об испытаниях ООО «ПКНМ-Урал»). Разработана методика по контролю дефектов эхо-методом с внутренней поверхности алюминиевой трубы для лейнеров со сканированием блока пьезопреобразователей рэлеевских волн вдоль образующей (акт об испытаниях ООО НПФ «Реал-шторм»).

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности изменения основных параметров рэлеевских волн, возбуждаемых электромагнитно-акустическим преобразователем, распространяющихся по огибающей поверхности прутков, заключающиеся в увеличении скорости с ростом температуры отпуска и отжига после закалки, позволяют оценить качество термической обработки изделий пруткового проката сталей марок 40Х и 45 (п. 1 паспорта).

2. Результаты исследования чувствительности амплитудного теневого метода с использованием рэлеевских волн, возбуждаемых электромагнитно-акустическим способом, и выявляемости дефектов труб и муфт нефтяного сортамента, основанные на анализе ослабления серии многократных прохождений по огибающей поверхности изделий, доказывают возможность выявления и надежной локализации внутренних и поверхностных дефектов (п. 1 паспорта).

3. Методика дефектоскопии алюминиевых труб на основе эхо-метода с использованием сканирования вдоль образующей внутренней поверхности и разработанного блока пьезопреобразователей рэлеевской волны, распространяющейся по огибающей поверхности трубы, обеспечивает повышение производительности, выявление и надежную локализацию недопустимых дефектов (п. 3 паспорта).

Личный вклад автора. Результаты экспериментальных исследований, их анализ и методика, изготовленные электромагнитно-акустические преобразователи и пьезопреобразователи рэлеевских волн, представленные в диссертации, получены автором лично. Экспериментальная установка, используемая при исследованиях, разработана коллективом кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики». Выбор приоритетов, направлений, методов исследования и форм представления результатов, формирование структуры и содержания работы, формулирование основных положений выполнено при участии научного руководителя.

Тематика работы соответствует 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. 3 «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды» паспорта специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в т. ч. 6 статей в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для публикации основных результатов диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата наук, из них 3 статьи опубликованы в изданиях, включенных в базы Scopus, Web of Science, 1 патент на полезную модель, 12 публикаций в сборниках трудов конференций.

Апробация результатов работы Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке» 2016 г.; XXXI Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)» 2018 г.; XII 2016, XIII 2017, XIV 2018, XV 2019, XVII 2021, XVIII 2022 гг. Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой главе и общими выводами, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований, 5 приложений. Материал диссертации изложен на 132 страницах, включая 48 рисунков и 19 таблиц, приложения на 25 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований распространения рэлеевских волн в элементах металлоконструкций и металлоизделий пруткового и трубного сортамента с использованием методик структуроскопии и дефектоскопии пьезоэлектрического и электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 «Ультразвуковая структуроскопия и дефектоскопия металлических изделий» содержатся обзорные сведения о существующих методах и средствах для оценки параметров ультразвуковых волн, используемых при определении качества термической обработки и деструктуризации, остаточных напряжений и структурной неоднородности металлоконструкций на стадии производства и в процессе эксплуатации металлоизделий. Рассмотрены вопросы технологии изготовления и механических свойств металлоизделий пруткового и трубного сортамента, муфт и лейнеров. Описаны методы неразрушающего контроля пруткового и трубного проката. На основании проведенного литературного обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В главе 2 «Методическое и аппаратное обеспечение акустического контроля изделий пруткового и трубного сортамента» приведены сведения о приборах, приспособлениях, преобразователях, методах и методиках для исследований образцов и изделий пруткового и трубного сортамента. Изложены преимущества использования рэлеевских волн для контроля поверхностных дефектов.

Для исследований образцов и изделий пруткового и трубного сортамента использованы следующие приборы:

- приборы акустической структуроскопии и дефектоскопии, входящие в состав уникальной научной установки УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий», структуроскоп СЭМА (внесен в реестр средств измерений № 61957-15 RU.C.36.003.A № 60174), дефектоскоп ДЭМА-П;

- приборы акустического контроля (Дефектоскоп ультразвуковой Пеленг УД2-102, Дефектоскоп УДЗ-307ВД).

Дефектоскоп ДЭМА оснащен проходным ЭМА-преобразователем сдвиговых волн и накладным для рэлеевских волн, обеспечивающими излучение волн по сечению и окружности прутка и получение серии многократных отражений и прохождений.

Для выполнения исследований изготовлены электромагнитно-акустические и пьезоэлектрические преобразователи для возбуждения и приема рэлеевских волн. При экспериментальных исследованиях использован амплитудный теневой метод многократных прохождений. Блок-схема и внешний вид установки с ЭМА-преобразователем рэлеевских волн представлены на рис. 1,а,б.

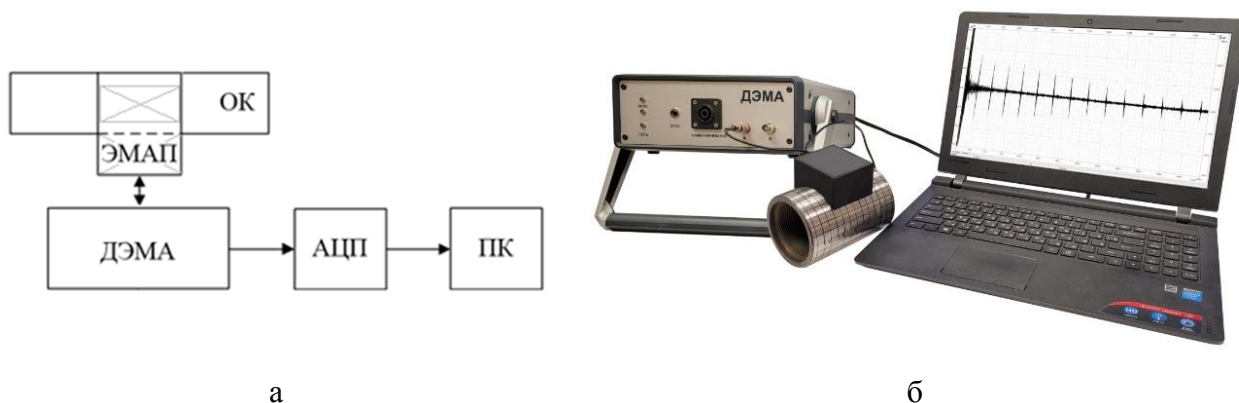


Рисунок 1. Блок-схема с проходным ЭМАП (а); внешний вид установки (б)

Рэлеевские волны, многократно проходящие по окружности прутка в прямом и обратном направлениях, формируют серию импульсов, время следования которых пропорционально окружности объекта (рис. 1,а). Система оснащена специализированными бесконтактными электромагнитно-акустическими (ЭМА) преобразователями рэлеевских волн, обеспечивающими возбуждение и прием рэлеевских волн по огибающей поверхности прутка.

В главе 3 «Акустическая структуроскопия пруткового проката с использованием рэлеевских волн» представлено исследование чувствительности рэлеевских волн к структурным изменениям образцов пруткового проката, подвергнутых термической обработке.

В разделе 3.1 исследованы скорости распространения ультразвуковых волн и коэффициенты Пуассона в прутковом прокате из стали 40Х после различных видов и режимов термической обработки. Для оценки влияния видов и режимов термической обработки, структурного состояния и твердости стали 40Х на скорость распространения рэлеевских волн использовали цилиндрические образцы пруткового проката диаметром 14 мм, длиной 220 мм. Виды и режимы термической обработки, микроструктура, скорости поперечных и рэлеевских волн и рассчитанные коэффициенты Пуассона в исследованных образцах представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Термическая обработка, структура, скорости акустических волн прутков из стали 40Х

№ обр.	Термообработка	Микроструктура	C_L , м/с	C_R , м/с	ν_{LR}
0	Состояние поставки, Нормализация	Перлит пластинчатый, сорбитообразный с полиэдрическим ферритом	3251	3062	0,2863

Продолжение таблицы 1

1	Отжиг 855°C, 35 мин, охлаждение с печью	Перлит пластинчатый, сорбитообразный с полиэдрическим ферритом	3257	3071	0,2922
2	Закалка 855°C, 35 мин, масло	Мартенсит	3193	3015	0,3000
3	Закалка 855°C, отпуск 220°C, 1 ч	Отпущенный мартенсит	3188	3016	0,3131
4	Закалка 855°C, отпуск 320°C, 1 ч	Троостит	3215	3029	0,2880
5	Закалка 855°C, отпуск 420°C, 1 ч	Мелкодисперсный зернистый сорбит	3218	3040	0,3044
6	Закалка 855°C, отпуск 570°C, 1 ч	Мелкодисперсный зернистый сорбит	3232	3049	0,2966

Информативным параметром при определении скоростей акустических волн является время прихода n , $n+m$ -го импульса $t_{n,n+m}$, поскольку скорость поперечной волны C_t и рэлеевской C_R находятся по формулам:

$$C_t = \frac{d \cdot m}{t_{n+m} - t_n}, \quad (1)$$

$$C_R = \frac{\pi \cdot d \cdot m}{t_{n+m} - t_n}, \quad (2)$$

где $(t_{n+m} - t_n)$ – время между $(n+m)$ и m импульсами, n – количество переотражений на диаметре прутка; d – диаметр прутка.

Как следует из анализа результатов измерений, после закалки (образец № 2) скорость распространения поперечных и рэлеевских волн имеет минимальное значение. Последующий отпуск, улучшение и особенно такие обработки, как отжиг и нормализация, приводят к увеличению скорости ультразвуковых волн на 56 м/с. Для наиболее равновесных ферритно-перлитных структур, полученных после отжига и нормализации (образцы № 0 и 1) скорости поперечных и рэлеевских волн принимают максимальное значение. В то же время в структурах троостита и сорбита (образцы № 3 – 6) скорость поперечных и рэлеевских волн имеет промежуточное значение между ферритно-перлитными структурами и мартенситом.

Полученные значения скоростей поперечной и рэлеевской волн позволили определить коэффициент Пуассона образцов по формуле:

$$\nu_{tR} = \frac{C_R - 0,87C_t}{1,12C_t - C_R}. \quad (3)$$

Линейная зависимость скорости поперечных и рэлеевских волн в исследованных образцах с высокой достоверностью аппроксимации свидетельствует об однозначной линейной связи между упругими модулями, характеризующими распространение различных типов волн.

На рис. 2 представлена связь между скоростью рэлеевской волны с твердостью НВ исследованных образцов с коэффициентом корреляции 0,92.

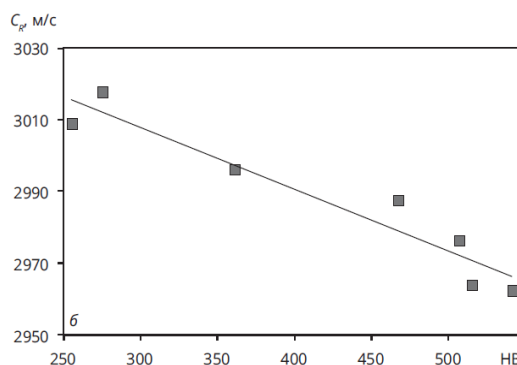


Рисунок 2. Связь скорости рэлеевской волны с твердостью образцов стали 40X

Корреляционные зависимости скоростей поперечных и рэлеевских волн в исследуемых образцах с твердостью HB представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Корреляционные зависимости скоростей объемных и рэлеевских волн в исследуемых образцах с твердостью HB

Вид корреляции	Уравнение зависимости	Достоверность аппроксимации R^2
C_t и C_R	$C_R = 0,82C_t + 399$	0,99
C_R и HB	$C_R = -0,17HB + 3060$	0,92

Вычисленный по значениям скоростей поперечной и рэлеевской волн коэффициент Пуассона ν_{IR} довольно нестабилен при изменении структурного состояния, особенно в области структур типа мартенсит и троостит (образцы № 1 и 4).

В результате исследования влияния режимов термообработки на скорости упругих волн установлено, что скорость рэлеевских волн растет более чем на 35 м/с, или на 1,1 %, от структур мартенсита до мелкозернистого сорбита и ферритно-перлитных структур, т. е. с ростом температуры отпуска до нормализации и отжига.

В разделе 3.2 исследовано влияние разных видов и режимов термической обработки прутков из стали 45 на результаты измерения скорости рэлеевской и поперечной волн с использованием метода многократной тени. Длина прутков – 300 мм, диаметр в области исследования – 14 мм. Полученные результаты скорости рэлеевских и поперечных волн и твердости для исследованных образцов представлены в таблице 3 и на рис. 3.

Таблица 3 - Термическая обработка, структура, твердость и скорости акустических волн прутков из стали 45

№ обр.	Термообработка	Микроструктура	Твердость, HRA	C_t , м/с	C_R , м/с
№1	Состояние поставки	Феррит+перлит	56	3229	3017
№2	Закалка 850°C, 20 мин, вода	Мартенсит	78	3176	2995
№3	отпуск 200°C	Мартенсит отпуска	78	3185	3003
№4	отпуск 400°C,	Троостит отпуска	64	3225	3034
№5	отпуск 450°C,	Троостит отпуска	61	3226	3042
№6	отпуск 500°C,	Сорбит отпуска	56	3249	3046
№7	отпуск 600°C,	Сорбит отпуска	53	3234	3052
№8	нормализация 850°C, 20 мин	Феррит+перлит	51	3232	3049
№9	отжиг 850°C, 20 мин, печь	Феррит+перлит	45	3240	3046

Скорость рэлеевской волны в прутках после высокотемпературного отпуска составила 3052 м/с, а после закалки 2995 м/с. Полученные экспериментальные данные показывают, что нормализация и высокотемпературный отпуск при 600°C имеют схожую структуру. Скорость распространения рэлеевской волны относительно закаленного состояния увеличилась на 57 м/с и достигла 3052 м/с при температуре отпуска 600°C.

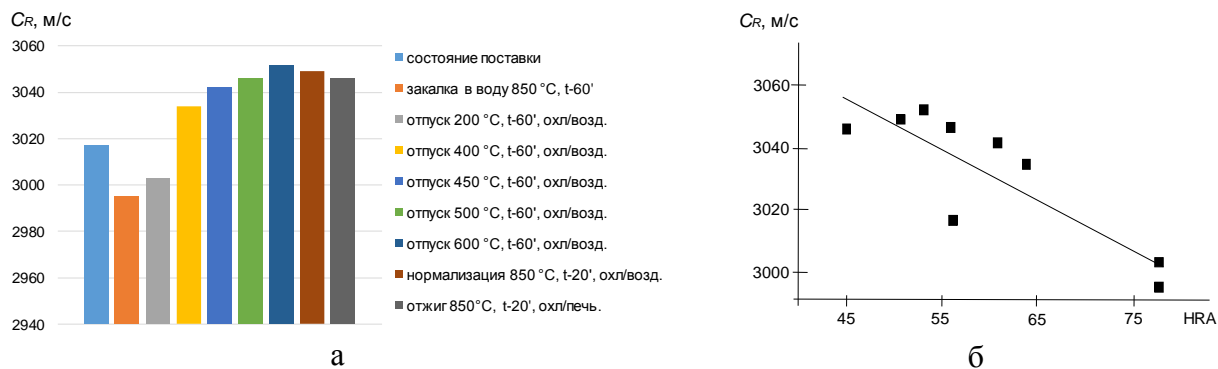


Рисунок 3. Изменение скорости рэлеевской волны в зависимости от видов и режимов термической обработки стали 45 (а), твердости (б)

По результатам, полученным при исследовании влияния термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках, выяснено, что:

1. Отжиг увеличивает скорость распространения упругих волн.
2. Закалка максимально снижает скорость распространения волн.
3. Увеличение температуры отпуска возвращает показатели скорости к показателям состояния поставки.

В главе 4 «Исследование связи информативных параметров ультразвуковых волн с дефектами труб» представлен анализ выявляемости дефектов в трубах и муфтах насосно-компрессорных труб различными методами неразрушающего контроля.

В разделе 4.1 исследована чувствительность ЭМА способа возбуждения и приема рэлеевских волн к искусственным и естественным поверхностным и приповерхностным дефектам заготовок для производства бурильных труб в двух частотных диапазонах. При исследованиях использован амплитудный метод многократной тени, реализованный с использованием структуроскопа СЭМА, который имеет два канала (А и В), работающие на частотах 1 МГц и 500 кГц, что позволило обнаруживать дефекты, расположенные соответственно на глубинах до 3 мм и 6 мм.

С целью исключения влияния на результаты контроля ориентации преобразователя относительно образующей и для повышения достоверности результатов прозвучивания разработана роботизированная подвижная платформа, обеспечивающая поступательное пошаговое сканирование ЭМА-преобразователем по образующей заготовки (рис. 4,а).

Благодаря отсутствию потерь на границе «преобразователь-объект контроля», а также меньшему расхождению волны вследствие формирования цилиндрического фронта, возможно наблюдение серии импульсов рэлеевских волн, многократно прошедших в прямом и обратном направлениях расстояния по огибающей объекта, равного длине окружности (рис. 4,б). Серии характеризуются увеличением затухания импульсов и соответственно сокращением времени реверберации для дефектных областей объекта, что объясняется многократными двухсторонними переотражениями от дефекта и дифракцией на нем. Следует отметить, что при распространении рэлеевская волна дополнительно ослабляется за счет расхождения, радиального переизлучения на выпуклой цилиндрической поверхности и рассеяния на шероховатостях поверхности.

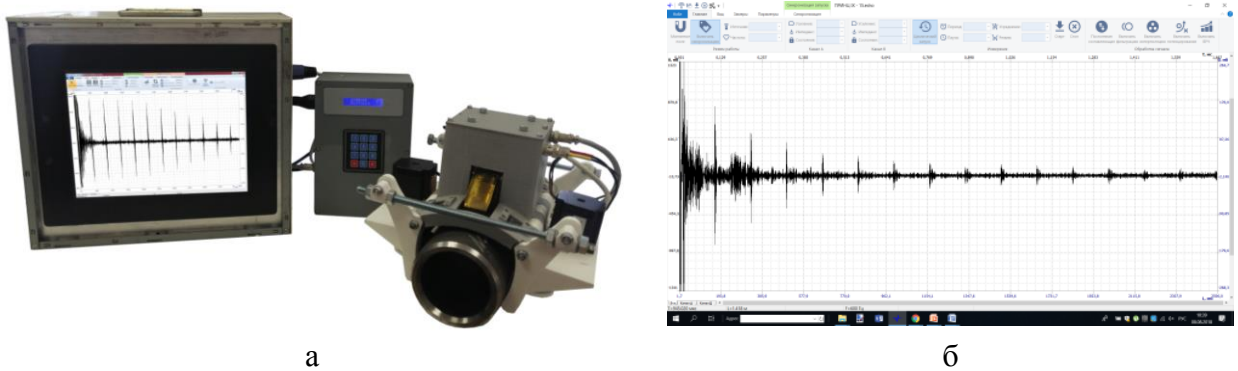


Рисунок 4. Роботизированная подвижная платформа (а), эхограмма рэлеевских волн в области с дефектом (б)

При реализации амплитудного теневого метода на многократных отражениях, предложено ввести понятие многократного коэффициента выявляемости K_{Nd} , основанного на сравнении относительных амплитуд импульсов, регистрируемых при каждом прохождении по огибающей заготовки, на стандартном образце предприятия в отсутствии дефекта (опорный сигнал) и исследуемом объекте (в том числе, при наличии дефекта). Многократный коэффициент выявляемости K_{Nd} определяется формулой:

$$K_{Nd} = \sum_{n=1}^N K_{nd} = \sum_{n=1}^N (U_n - U_{n0}) / U_{n0}, \quad (5)$$

где U_{n0} - среднее значение амплитуды импульса при каждом n-м прохождении для бездефектной области стандартного образца,

U_n - значение амплитуды импульса при каждом n-м прохождении для исследуемого объекта.

Разработанная методика, аппаратура и алгоритмы обработки сигналов апробированы на реальных объектах в виде заготовок диаметрами в диапазоне 102 - 114 мм из стали 40 ХГМА, используемых для производства бурильных труб (таблица 4).

Таблица 4 - Результаты иммерсионного контроля

№ обр.	Диаметр Внesh. (внутр.) / длина, мм	Заключение на предприятии
1	Ø102 / 8300	Продольные подповерхностные дефекты: Зона I (расстояние 2690 мм от торца), УЗД - 50% от уровня браковки Зона II (3350 мм от торца), УЗД - 75% от уровня браковки
2	Ø102 / 8300	Продольный подповерхностный дефект на расстоянии 990 мм от торца протяженностью 25 мм глубиной 9 мм
3	Ø114, (Ø51) / 8300	Продольные подповерхностные дефекты: Зона I (расстояние 470 мм от торца), УЗД - 10% от уровня браковки Зона II (расстояние 850 мм от торца, глубиной 5,2 мм и протяженностью 45 мм), УЗД - 25% от уровня браковки Зона III (расстояние 1410 мм глубиной 4,5 мм и протяженностью 30 мм), УЗД - 40% от уровня браковки Зона IV (расстояние 1520 мм от торца), УЗД - 10% от уровня браковки

Сканирование производилось вдоль образующей объекта с шагом 10 мм. С целью получения опорного сигнала и оценки влияния мешающих факторов на результаты контроля, сканировалась также бездефектная область заготовки.

Для обоснования критериев браковки использован стандартный образец предприятия (СОП) – пруток-заготовка бурильной трубы диаметром 105 мм и длиной 400 мм с искусственными поверхностными дефектами, имитирующими продольные и поперечные трещины, согласно ISO 10424-1:2004: перпендикулярно образующей цилиндра с размерами 30×1×2,3 мм и вдоль образующей цилиндра с размерами 53×1×2,3 мм. Результаты оценки чувствительности наиболее информативных характеристик сигналов на СОП с частотой 1 МГц представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Чувствительность информативных характеристик сигналов для СОП на частоте 1 МГц

Коэффициент выявляемости		Чувствительность параметра «дисперсия» S_D к дефекту		Чувствительность параметра «эксцесс» S_E к дефекту	
Поперечный дефект	Продольный дефект	Поперечный дефект	Продольный дефект	Поперечный дефект	Продольный дефект
4,5	8,9	0,61	0,78	0,49	0,97

Наблюдается более высокая чувствительность коэффициента выявляемости для продольных дефектов, ориентация которых перпендикулярна направлению распространения волны, что не противоречит известным положениям теории акустического контроля.

На рис. 5 приведены результаты контроля забракованного образца трубы №3 в зоне сканирования II на частотах 1 МГц и 500 кГц с использованием в качестве информативного параметра многократного коэффициента выявляемости K_{Nd} . Графики иллюстрируют изменение коэффициента выявляемости от координаты L преобразователя в процессе сканирования области объекта с дефектом. Среднее значение коэффициента выявляемости для бездефектной области соответствует нулевому значению. Отклонение в пределах бездефектной области, обусловленное изменением качества поверхности и отклонениями по зазору, отображается на графиках в виде доверительного интервала (среднеквадратического отклонения), выделенного сплошными линиями.

Маркерами на графиках показаны результаты сканирования зон с дефектами. При двукратном превышении коэффициентом выявляемости значения СКО для бездефектной области, возможно уверенное выявление дефектов на фоне мешающих факторов.

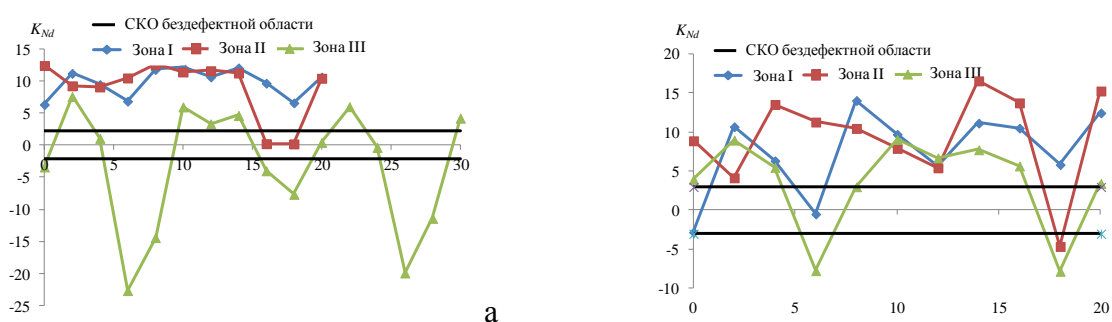


Рисунок 5. Графики значений коэффициента выявляемости K_{Nd} от координаты L в зонах сканирования образца №3 на частотах 500 кГц (а) и 1 МГц (б)

Максимальное значение коэффициента выявляемости имеет место для зоны II объекта и составляет 12,6 на частоте 500 кГц и 16,6 на частоте 1000 кГц. При этом СКО для бездефектной области соответствует $\pm 2,2$ и $\pm 3,0$ относительно нуля на соответствующих частотах. Последнее свидетельствует о наличии в исследуемых зонах дефектов с эквивалентными размерами, существенно больше, чем в СОП с искусственными дефектами. Несущественные различия в коэффициентах выявляемости на разных частотах дают основания предполагать, что дефект является

приповерхностным, расположенном по глубине в диапазоне 1,5 – 3 мм. Дефект с минимальными эквивалентными размерами (по глубине) соответствует зоне III объекта, что обусловлено большей глубиной его залегания.

В таблице 6 приведены обобщающие результаты расчета коэффициентов выявляемости, превышающих пороговый уровень СКО для бездефектной области в два и более раза, и соответствующие им координаты дефектов. Полученные значения коэффициента выявляемости удовлетворительно согласуются с результатами УЗК. Так в зоне II образца 3 методом УЗК обнаружен дефект на расстоянии 850 мм от торца глубиной 5,2 мм и протяженностью 45 мм. По используемой методике дефект уверенно выявляется, как на частоте 1 МГц, так и 500 кГц. При этом на частоте 500 кГц коэффициент выявляемости превышает уровень браковки практически на всём сканируемом участке, а на частоте 1 МГц - лишь на участках 0 см, 4 - 8 см, 14 - 16 см, 20 см, что говорит о неравномерности распределения дефекта по глубине в пределах длины рэлеевской волны (3 – 6 мм). Исключение составил образец № 2 прутка с продольным подповерхностным дефектом глубиной залегания 9 мм, невыявленный ввиду большой глубины залегания, для обнаружения которого следует использовать более низкочастотный канал.

Таблица 6 - Результаты контроля рэлеевскими волнами

№ образца, Зона		Результаты контроля рэлеевскими волнами			
		Координаты дефекта L, см		Коэфф. выявляемости K_{Nd}	
		1 МГц	500 кГц	1 МГц	500 кГц
1	Зона I	3	1-2	10,1	6,1
		9	9-10	8,6	5,5
16		14-15	9,3	6,1	
	Зона II	16-17	0	8,3	5,7
2	Дефект не выявляется, ввиду большой глубины залегания				
3	Зона I	2	1-20	10,7	12,2
		8-10		14,1	
		14-16		11,2	
		20		12,5	
	Зона II	0	0-14 20	8,9	12,6 10,5
		4-8		13,6	
14-16		16,6			
20		15,3			
3	Зоны III и IV	2	2	9	7,6
		10	10	9,1	6

Таким образом, амплитудный метод многократной тени с использованием технологии ЭМА-контроля на рэлеевских волнах обеспечивает возможность выявления дефектов заготовок труб нефтяного сортамента при использовании в качестве критериев браковки коэффициента выявляемости в процессе анализа серии многократных проходов. Метод обеспечивает выявление дефектов в поверхностной и приповерхностной зонах на глубине, не превышающей длины волны на заданной частоте.

В разделе 4.2 исследована выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб. С целью оценки выявляемости естественных трещин муфт насосно-компрессорных труб выполнен контроль ЭМА амплитудным методом многократной тени с использованием рэлеевских волн в сравнении с магнитными и вихретоковым методами контроля.

Сравнительный анализ выявляемости дефектов различными методами НК проведен на четырех образцах муфт для гладких насосно-компрессорных труб (НКТ согласно ГОСТ Р 53366-2009) с условным диаметром 73 мм, толщиной стенки 5,5 мм из стали 37Г2С.

Наружный диаметр муфты составляет 88,9 мм, длина 132 мм, профиль резьбы муфт соответствует ГОСТ 633-80. Муфты подвергнуты термической обработке закалкой и отпуском, в результате нарушения режимов которых на внешней поверхности двух муфт возникли протяженные трещины вдоль всей длины муфты, ориентированные под углом к образующей (образец №3 - под углом 20 градусов к образующей, образец №4 - под углом 30 градусов к образующей), две другие муфты (№1 и №2) не имеют видимых дефектов. Для визуального подтверждения дефектов три муфты (№2, №3, №4) были обточены, одна бездефектная (№1) – не подвергалась механической обработке.

Для исследований разработан специализированный накладной ЭМА-преобразователь с бесконтактным возбуждением и приемом рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях. Рабочая частота ЭМА-преобразователя - 1 МГц, что позволило обнаруживать дефекты на глубине в пределах длины рэлеевской волны (до 3 мм).

Благодаря отсутствию потерь на границе «преобразователь-объект контроля» и достаточно узкой диаграмме направленности ЭМА-преобразователя рэлеевских волн возможно наблюдение серии многократных проходов, насчитывающих десятки импульсов. При апертуре ЭМА-преобразователя 50 мм и угле раскрытия основного лепестка диаграммы направленности ± 100 градусов уже на первом проходе по периметру объекта вся трещина (по длине образующей муфты) оказывается в поле рэлеевской волны и кратно ослабляет волну на последующих отражениях.

Серии импульсов рэлеевских волн, многократно прошедших в прямом и обратном направлениях по огибающей прутка при отсутствии дефекта и при его наличии, характеризуются существенным сокращением количества импульсов и их амплитуд для дефектных областей объекта, что объясняется многократными двухсторонними переотражениями от дефекта.

Аналізу подлежали сигналы, полученные при установке ЭМА-преобразователя рэлеевских волн по центру образующей образца при изменении угла поворота относительно начальной образующей на 45 градусов с целью оценки влияния качества акустического контакта на исследуемые информативные параметры.

Введено понятие показателя выявляемости дефекта P , определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом (№3 и №4) и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец (№2). Чем больше указанное соотношение, тем выше выявляемость метода к дефекту данного типа с использованием данного информативного параметра.

Максимальный показатель выявляемости P_{EC} при ВТК для образца №4 составляет 35 дБ, для образца №3 - 47 дБ. Максимальный показатель выявляемости P_{FZ} при ФЗК для образца №4 составляет 35 дБ, для образца №3 – не превышает 15 дБ. Следует отметить, что для образца №1 без механической обработки показатель выявляемости дефекта остается на том же уровне.

Возможность выявления дефекта определяется различиями в величине информативного параметра, измеренного на образце с дефектом (№3 и №4) и величине аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец (№2). В случае параметра «коэффициент выявляемости» бездефектный образец характеризуется величиной отклонения при изменении положения ЭМА-преобразователя по углу относительно начальной образующей. В таблице 7 представлены рассчитанные значения чувствительности для исследованных информативных параметров амплитудного теневого метода контроля многократных проходов.

Таблица 7 Значения показателя выявляемости P_A при УЗК для различных информативных параметров

Информативный параметр	Коэффициент выявляемости		Дисперсия	
	Относительно образца №2	Относительно образца №1	Относительно образца №2	Относительно образца №1
P_A (обр. #3), раз/дБ	10,6 / 20	11,2 / 21	1,8 / 5	2,0 / 6
P_A (обр. #4), раз/дБ	19,0 / 26	20 / 26	5,4 / 15	6,1 / 16

Дополнительно к анализируемым параметрам определена скорость распространения рэлеевских волн в дефектных и бездефектном образце. Результаты оценки скоростей в исследованных образцах муфт представлены в таблице 8. С учетом погрешности определения диаметра и овальности муфт, погрешность определения скорости рэлеевских волн не более 1 м/с.

Таблица 8 - Скорость C_R распространения рэлеевских волн в исследуемых образцах

№ образца	2	3	4
Скорость C_R , м/с	3011±1	2980±1	2976±1

Видно, что скорость рэлеевских волн падает при наличии дефекта более, чем на 30 м/с и несущественно зависит от глубины залегания дефекта. Последнее не противоречит принципу временного теневого метода и является следствием явления дифракции (огибания волной Рэля протяженных дефектов). Следует отметить, что завышенное значение скорости в бездефектном образце (№2), равное 3010 м/с, в сравнении с типовым значением скорости рэлеевских волн в стали 37Г2С ($C_R=3000$ м/с) является следствием увеличения скорости при распространении по цилиндрической поверхности.

Сравнительная выявляемость методов: амплитудного (УЗК), вихретокового (ВТК) и феррозондового (ФЗК) может быть представлена в виде зависимости соотношения информативных параметров (градиент поля при ФЗК, фаза сигнала при ВТК, коэффициент выявляемости и дисперсия при УЗК) в области с дефектом и в области без дефекта вдоль траектории трещин (рис. 6).

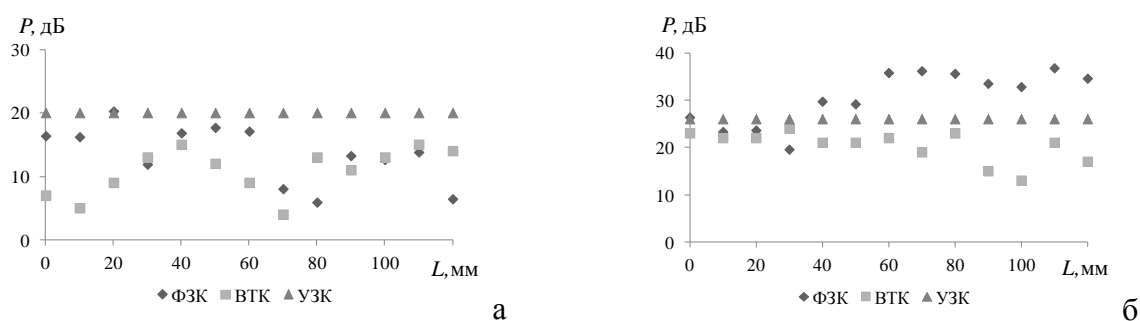


Рисунок 6. Сравнительные показатели выявляемости к дефектам информативных параметров методов ВТК, ФЗК и УЗК относительно бездефектной области, выраженные в дБ: образец №3 (а), образец №4 (б)

Для дефекта малого раскрытия и малой глубины (образец №3) наилучшую выявляемость имеет акустический метод, а выявляемость методов ФЗК и ВТК практически одинакова. При этом среднее значение показателя выявляемости при УЗК P_A превышает на 6 дБ значение показателя P_{FZ} при ФЗК и на 9 дБ значение P_{EC} при ВТК.

Так как информативные параметры ультразвукового метода характеризуются усредненными значениями по всей длине трещины, для сравнения в таблице 9 приведены усредненные показатели выявляемости для методов ФЗК и ВТК.

Таблица 9 - Значения усредненных показателей выявляемости при ФЗК, ВТК и УЗК

№ образца	P_{EC}	P_{FZ}	P_A , дБ
№ 3	11	14	20
№ 4	20	31	26

Для дефекта с большим раскрытием и большей глубиной (образец №4) выявляемость дефекта с использованием УЗК различными видами НК становится сопоставимой с методами ВТК и ФЗК. При этом наилучшую выявляемость характеризует метод ФЗК, а наихудшую – метод ВТК. Значение показателя P_{FZ} для образца №4 преобладает над значением P_A на 5 дБ и над значением P_{EC} на 11 дБ. Ухудшение выявляемости для более глубоких дефектов при УЗК в сравнении с ВТК и ФЗК обусловлено неравномерным распределением смещений в рэлеевской волне по глубине, когда с увеличением глубины трещины нет дополнительного прироста информативного параметра рэлеевской волны.

В разделе 4.3 исследована оценка чувствительности методик акустического контроля по выявлению недопустимых дефектов в алюминиевых трубах-заготовках лейнеров. Исследования чувствительности проведены с использованием методик, основанных на излучении - приеме рэлеевских волн, распространяющихся по периметру внутренней поверхности трубы-заготовки при сканировании вдоль образующей трубы. Методики реализованы с использованием специально-разработанных пьезоэлектрических преобразователей и ЭМА-преобразователей волн Рэлея.

Для оценки эффективности систем подмагничивания проведено моделирование магнитных полей и полей вихревых токов в алюминии для специально разработанной системы подмагничивания. По результатам моделирования выявлено, что магнитное поле практически не концентрируется в зоне действия вихревых токов высокочастотного индуктора, при этом значение нормальной компоненты индукции магнитного поля в зоне действия вихревых токов не превышает значения 0,5 Т. Низкая эффективность ЭМА-преобразователя не позволила получить сквозной сигнал по периметру трубы ввиду недостаточного отношения сигнал – шум.

С целью оценки чувствительности рэлеевской волны к искусственным дефектам на различных частотах, а также для оценки влияния частоты на стабильность акустического контакта в процессе сканирования были рассчитаны и изготовлены клиновые пьезопреобразователи на различные частотные диапазоны (1, 2,5 и 5 МГц).

Ширина диаграммы направленности составляет $\pm 2,7$ градуса по уровню -6 дБ, что приводит к расхождению волнового фронта на длине, равной периметру трубы (940 мм при диаметре трубы 300 мм), на ± 45 мм. Учитывая требование по перекрытию акустического луча (прозвучивание при перемещении на каждый 0,1 мм, методика может обеспечить максимальную скорость сканирования вдоль одной образующей ~ 10 мм/с или $\sim 0,6$ м/мин.

При выборе рабочей частоты следует учитывать появление в волноводе (стенке трубы) волн Лэмба. На выбранной рабочей частоте количество мод не превышает четырех, при этом нулевые моды симметричной и антисимметричной волн вырождаются в «квазирэлеевскую волну», а ненулевые моды не совпадают с ней по скорости и поэтому не будут возбуждаться с использованием данного клинового преобразователя. Таким образом, для обеспечения возможности выявления дефектов на глубине, равной половине толщины стенки трубы (2λ или 3 мм), с использованием «квазирэлеевской» волны требуется выбор частоты, соответствующей длине волны $\lambda=1,5$ мм или 2 МГц. Учитывая все вышеуказанные требования, рассчитан, спроектирован и изготовлен пьезопреобразователь рэлеевских волн с рабочей частотой 2 МГц, со специальной формой призмы и направляющей платформой, обеспечивающей стабильность акустического контакта.

Прозвучивание внутренней части стенки трубы проводилось по схеме, указанной на рис. 7,а с использованием блока пьезопреобразователей рэлеевских волн (рис. 7,г). Результат прозвучивания в виде дефектограмм от искусственного (рис. 7,б) и естественного (рис. 7,д) дефектов показан на рис. 7, в,е.

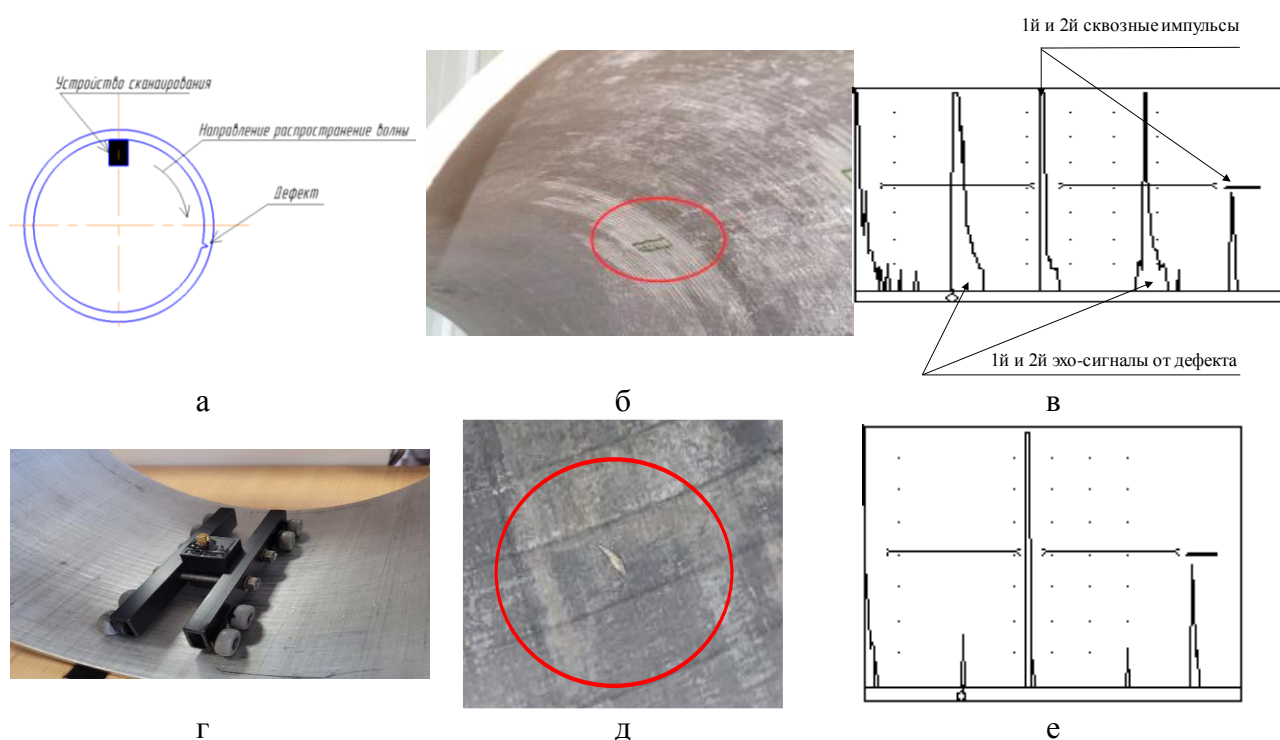


Рисунок 7. Схема прозвучивания (а), искусственный (б) и естественный (д) дефекты на внутренней стенке трубы, блок пьезопреобразователей (г), дефектограммы в зоне дефектов (в,е)

Наблюдается появление первого и второго сквозных импульсов, прошедших по внутреннему периметру трубы и принятых тем же пьезопреобразователем со стороны заднего лепестка диаграммы направленности. В зонах между зондирующим и первым сквозным импульсом и между первым сквозным и вторым сквозным импульсами, наблюдается появление импульсов от искусственного и естественного дефектов.

В Приложениях приведены акты внедрения на предприятиях и в учебном процессе, а также разработанная «Методика ультразвукового контроля внутренней поверхности трубы-заготовки лейнера эхо-методом с использованием рэлеевских волн».

Общие выводы

1. Полученные экспериментальные данные по исследованию чувствительности амплитудного теневого метода многократных проходов по огибающей цилиндрической поверхности с использованием рэлеевских волн, возбуждаемых электромагнитно-акустическим способом показывают, что отпуск и нормализация прутков из сталей 40Х и 45 увеличивают скорость распространения рэлеевской волны до 60 м/с относительно закалки без отпуска. По результатам измерений скоростей поперечной и рэлеевской волн рассчитаны коэффициенты Пуассона и их изменения в зависимости от режимов термической обработки.

2. Введено понятие показателя выявляемости дефекта данного типа, определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на объекте с дефектом и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Сравнительный анализ выявляемости дефектов показал, что амплитудный многократный теневой метод характеризуется наибольшим значением показателя выявляемости и

превышает показатели выявляемости феррозондового и вихретокового методов. Использование специализированного накладного ЭМА-преобразователя рэлеевских волн позволяет уменьшить влияние качества акустического контакта на результаты контроля, особенно для муфт с горячекатаной поверхностью.

3. Установлено, что акустический метод многократной тени с использованием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях обеспечивает контроль муфты за счет однократной установки преобразователя на образующую образца и может быть применим для выявления дефектов в поверхностной и подповерхностной зонах с ориентацией близкой к продольной не только в муфтах, но и насосно-компрессорных трубах, толщина стенки которых не менее двукратной длины волны на данной частоте. При этом обеспечивается более высокая производительность за счет сканирования вдоль образующей трубы.

4. Установлено, что наиболее высокой чувствительностью к внутренним продольным дефектам алюминиевых труб-заготовок для производства лайнеров обладает эхо-метод с использованием рэлеевской волны с рабочей частотой 2 МГц, обеспечивающий в двухканальном варианте скорость сканирования 0,5 м/мин, или 10 минут на одну трубу длиной 5 метров при сканировании по двум образующим. Исследования чувствительности к дефектам эхо-метода контроля с внутренней поверхности трубы с применением пьезопреобразователя рэлеевских волн показали, что запас по чувствительности между контрольным отражателем глубиной 0,3 мм составляет не менее 15 дБ, что обеспечило обнаружение дефектов типа вмятин, наклонных и продольных царапин.

Список публикаций

Публикации ВАК

1. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Волкова Л.В. Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым методами контроля /Дефектоскопия. 2022. № 4. С. 14-25. Muraveva O.V., Muraviev V.V., Sintsov M.A., Volkova L.V. Detecting flaws in pumping-compressor pipe couplings by magnetic, eddy current, and ultrasonic multiple-shadow testing methods /Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. Т. 58. № 4. С. 248-258. (Scopus, Web of Science)

2. Муравьева О.В., Муравьев В.В., Башарова А.Ф., Синцов М.А., Богдан О.П. Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона /Сталь. 2020. № 8. С. 63-68. Muraveva O.V., Murav'ev V.V., Basharova A.F., Sintsov M.A., Bogdan O.P. Thermal treatment effect and structural state of rod-shaped assortment 40X steel on the speed of ultrasound waves and Poisson coefficient /Steel in Translation. 2020. Т. 50. № 8. С. 579-584. (Scopus)

3. Муравьева О.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В., Синцов М.А., Мышкин Ю.В., Башарова А.Ф. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента /Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 48-57. Murav'eva O.V., Volkova L.V., Murav'ev V.V., Sintsov M.A., Myshkin Y.V., Basharova A.F. Sensitivity of electromagnetic-acoustic multiple shadow method using rayleigh waves in inspection of oil country tubular goods /Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. Т. 56. № 12. С. 995-1004. (Scopus, Web of Science)

4. Муравьев В.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн /Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 2. С. 37-43.

5. Муравьев В.В., Будрин А.Ю., Синцов М.А. Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки /Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 4. С. 4-10.

6. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Будрин А.Ю., **Синцов М.А.**, Зорин А.В. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость. /Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 37-44.

Патент

7. Мышкин Ю.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., **Синцов М.А.** Устройство акустического контроля прутков /Патент на полезную модель RU 173773 U1, 11.09.2017. Заявка № 2016143700 от 07.11.2016.

Статьи в сборниках материалов конференций

8. **Синцов М.А.** Исследование чувствительности эхо-метода с применением рэлеевских волн для контроля внутренней поверхности алюминиевых труб. В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2022. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XVIII Всероссийской научно-технической конференции. Ижевск, 2023. С. 273-278.

9. **Синцов М.А.** Сравнительный анализ чувствительности методов неразрушающего контроля к дефектам муфт НКТ. В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2021. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XVII Всероссийской научно-технической конференции. Ижевск, 2022. С. 219-226.

10. Муравьев В.В., Будрин А.Ю., **Синцов М.А.** Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн. В сборнике: 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. 2020. С. 192-196.

11. Волкова Л.В., Исмаилов Р.М., **Синцов М.А.** Оценка внутренних механических напряжений и упругих модулей в металле магистральных газопроводов. В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2019. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XV Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 111-118.

12. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Будрин А.Ю., **Синцов М.А.** Влияние уровня нагрузки при малоцикловой усталости на скорость поперечных и поверхностных волн в стальных прутках. В книге: XXXI Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)». Тезисы докладов. 2018. С. 15.

13. Муравьева О.В., Леньков С.В., Мышкин Ю.В., Зорин В.А., Петров К.В., **Синцов М.А.**, Брестер А.Ф. Коэффициент выявляемости при реализации зеркально-теневого метода на многократных отражениях. В книге: XXXI Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)». Тезисы докладов. 2018. С. 16-17.

14. Муравьева О.В., Зорин В.А., **Синцов М.А.** Выбор критериев браковки при акустическом контроле проката для производства бурильных труб с использованием рэлеевских волн. В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 163-170.

15. Муравьев В.В., **Синцов М.А.**, Будрин А.Ю., Зорин А.В. Акустическая структуроскопия усталости при циклическом нагружении стальных прутков. В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции. 2018. С. 253-260.

16. Муравьева О.В., Муравьев В.В., **Синцов М.А.**, Стрелков В.С., Шкляев А.Е. Влияние фактора разных плавок при производстве пруткового проката на скорости акустических волн. В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки,

образования и производства. Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции. 2018. С. 269-278.

17. Байтеряков А.В., Казаков Р.С., **Синцов М.А.** Скорость ультразвуковых волн в рельсах с наработкой. В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 142-151.

18. Булдакова И.В., Волкова Л.В., **Синцов М.А.**, Недзвецкая Е.В. Определение механических напряжений в рельсах акустоупругим способом. В сборнике: Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. Сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. 2016. С. 326-330.

19. Земсков Т.И., Злобин Д.В., Зверев Н.Н., **Синцов М.А.** Прибор для измерения скорости ультразвуковых колебаний методом автоциркуляции импульсов. В сборнике: Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. Сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. 2016. С. 341-344.