

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

(ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»)

УДК 620.179

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)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор, В.В. Муравьев

Ижевск – 2023 г.

Оглавление

Введение.....	5
ГЛАВА 1 УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ И ДЕФЕКТОСКОПИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ	11
1.1 Технология изготовления и механические свойства металлоизделий пруткового и трубного сортамента	11
1.1.1 Технология изготовления труб	11
1.1.2. Технология изготовления муфт	13
1.1.3. Технология изготовления лейнеров	15
1.1.4 Анализ технических решений по контролю алюминиевых труб.....	16
1.2. Методы неразрушающего контроля пруткового и трубного проката.....	18
1.2.1. Магнитный вид неразрушающего контроля	18
1.2.2. Вихретоковый вид неразрушающего контроля	19
1.2.3. Акустический вид неразрушающего контроля	21
1.3 Акустическая структуроскопия и дефектоскопия металлоконструкций	24
Выводы по главе 1.....	28
ГЛАВА 2 МЕТОДИЧЕСКОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ПРУТКОВОГО И ТРУБНОГО СОРТАМЕНТА.....	30
2.1 Приборы для исследований скорости ультразвуковых волн.....	30
2.2 Методы исследований скорости ультразвуковых волн	35
2.3 Рэлеевские волны. Особенности распространения	38
Выводы по главе 2.....	41
ГЛАВА 3 АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ ПРУТКОВОГО ПРОКАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЭЛЕЕВСКИХ ВОЛН.....	43
3.1 Влияние термической обработки стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн	43
3.1.1 Результаты и анализ акустических исследований стали 40Х.....	45

3.1.2 Структурно-чувствительные акустические характеристики.....	50
3.2 Структуроскопия термически обработанных прутков из стали 45 по скорости распространения рэлеевских волн.....	51
3.3.1 Образцы и методика измерений	52
3.3.2 Результаты исследований и анализ	53
3.3 Акустическая структуроскопия прутков из стали 40Х, нагруженных изгибом с вращением.....	57
3.3.1 Образцы и методика измерений	59
3.3.2 Результаты исследований и анализ	61
Выводы по главе 3.....	65
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН С ДЕФЕКТАМИ ТРУБ	67
4.1 Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени при контроле труб нефтяного сортамента.....	67
4.1.1 Оборудование, методика и объекты контроля.....	67
4.1.2 Результаты исследований и анализ	73
4.2 Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб ультразвуковым многократно-теневым методом	81
4.2.1 Объекты контроля, оборудование и методы	84
4.2.2 Результаты исследований и обсуждение	88
4.2.3 Акустический метод.....	91
4.3 Чувствительность методик акустического контроля алюминиевых труб-заготовок лейнеров.....	97
4.3.1 Использование волн Рэля при контроле цилиндрических объектов	98
4.3.2 Электромагнитно-акустические преобразователи рэлеевских волн. Разработка, изготовление, испытания.....	100
4.3.3 Пьезопреобразователи рэлеевских волн. Разработка, изготовление, испытания.....	107
Выводы по главе 4.....	115
Общие выводы	117

Заключение	119
Список сокращений и условных обозначений	121
Список использованной литературы.....	122
Приложение А Методика ультразвукового контроля поверхности трубы-заготовки лейнера рэлеевскими волнами эхо-методом	140
Приложение Б Акт об апробации на предприятии	159
Приложение В Акт об апробации на предприятии.....	160
Приложение Г Акт об использовании в учебном процессе.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патент на полезную модель	162

Введение

Повышение качества, надежности и долговечности пруткового и трубного проката нефтедобывающей промышленности, является одной из важнейших проблем, приобретающих особую актуальность в связи с ужесточением температурно-силовых режимов эксплуатации современной техники. Работоспособность и стабильность эксплуатационных характеристик большинства труб и муфт нефтяного сортамента ограничивается ресурсом их работы, это наиболее характерно для современных видов проката нефтедобывающего оборудования и теплоэнергетики. Рациональное использование неразрушающих методов контроля качества термической обработки прутков и дефектности труб-заготовок позволяет не только повысить надежность выпускаемых изделий, но и несет экономические выгоды производству благодаря сбережению времени и материальных затрат, которые неизбежны при контроле разрушающими методами, а также обеспечит безаварийность работы и безопасность функционирования газонефтегазотранспортной системы в целом.

Традиционно для контроля трубного и пруткового проката используют вихретоковый, магнитный и ультразвуковой эхо-метод контроля. При этом получаемая информация зависит от ряда мешающих факторов (качество контакта, зазор, магнитные и электрические характеристики объекта и др.), а также чувствительности методик и аппаратуры, что приводит к проблемам при идентификации дефектов. Одним из перспективных подходов к решению перечисленных проблем дефектоскопии проката является использование рэлеевских волн с электромагнитно-акустическим (ЭМА) способом возбуждения и регистрации ультразвуковых импульсов. Существенные преимущества рэлеевских волн в области акустической структуроскопии металлов позволяют с использованием ЭМА способа реализовать амплитудный теневой метод с многократным прохождением рэлеевской волны и повысить чувствительность к дефектам. Разработка новых методик для выявления нарушений сплошности

металла, отклонений в структуре и физико-механических характеристик стального проката является актуальной научной задачей неразрушающего контроля и повышения качества 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., 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 экспериментальных исследованиях использованы образцы и аппаратура, изготовленные в рамках гранта РНФ № 17-19-01047, гранта РНФ № 15-19-00051, гранта РНФ (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер 586308), Программы стратегического развития «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова» на 2012 - 2016 гг. гранты: ПСР/М2/Н2.5/МВВ; ГТ-4-12 конкурс грантов им. Г.А. Тихонова для аспирантов и молодых ученых.

Цель работы:

Исследование чувствительности амплитудного теневого метода при многократном прохождении рэлеевской волны 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 параметров рэлеевских волн, возбуждаемых электромагнитно-акустическим преобразователем, в прутках из сталей 40Х и 45 с разной термической обработкой.
2. Исследование чувствительности параметров рэлеевских волн и выявляемости дефектов труб и муфт нефтяного сортамента с использованием электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема рэлеевских волн.
3. Исследование чувствительности эхо-метода с использованием рэлеевских волн к дефектам в алюминиевых трубах, 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. При экспериментальных исследованиях использован амплитудный теневой метод многократных проходов с применением пьезоэлектрического и электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема рэлеевских волн. Подтверждение обнаруженных дефектов и изменений в структуре металла проводилось с помощью макро- и микроанализа, других методов неразрушающего контроля. Оценка достоверности результатов контроля выполнена с применением методов теории вероятности и статистического анализа.

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 параметров рэлеевских волн, 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 внутренних и поверхностных дефектов.
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 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 внутренних и 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 проходов 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 активном 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».

ГЛАВА 1 УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ И ДЕФЕКТОСКОПИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

1.1 Технология изготовления и механические свойства металлоизделий пруткового и трубного сортамента

Большинство изделий цилиндрической формы изготавливаются из специальных заготовок-прутков. Заготовки в основном изготавливаются методом пластической деформации и резки. С другой стороны, рабочие заготовки могут быть изготовлены различными способами, такими как прокатка, прессование или ковка. Сырьем для прокатного производства является заготовка квадратной или прямоугольной формы, а в некоторых случаях и круглые литые слитки.

Подготовка исходного материала к прокатке заключается в устранении различных дефектов поверхности. Устраняемые дефекты поверхности заготовок включают раковины, волосовины, трещины, неметаллические включения, закаты, царапины и многие другие, которые должны выявляться при контроле [27]. Если необходимо полностью устранить дефекты поверхности, рабочий материал предварительно протравливают. Это позволяет обнаруживать дефекты, которые не могут быть обнаружены простым осмотром, потому что они могут быть закрыты окалиной.

1.1.1 Технология изготовления труб

Для нефтяной и автомобильной промышленности используются гладкие бесшовные трубы, изготовленные методом горячей или холодной прокатки. Самым распространенным способом изготовления гладких бесшовных труб является горячая прокатка [124, 125].

На первом этапе ведутся подготовительные работы. Рабочий материал готовят к последующей обработке, который представляет собой полый элемент с определенной степенью поперечного сечения и длины. Для производства таких

заготовок используются специальные сорта стали. Перед прокаткой исходный элемент нагревают до высокой температуры (1180-1200).

На втором этапе осуществляется формирование гильз-заготовок. Гильза получается с помощью специального мощного сверла. Это сверло просверливает отверстия определенного размера в обрабатываемом материале. После завершения процесса его часть уже напоминает трубу, но не является конечным продуктом.

На последнем этапе происходит основной процесс – раскатка. Раскатка гильзы включает в себя несколько процессов: гильза помещается в специальную прокатную машину (Рисунок 1.1) [124], содержащую несколько валков, а затем втулка постепенно вытягивается в одном из направлений, расположенных между двумя валками. Контроль будущего диаметра трубы осуществляется специальными ограничивающими элементами.

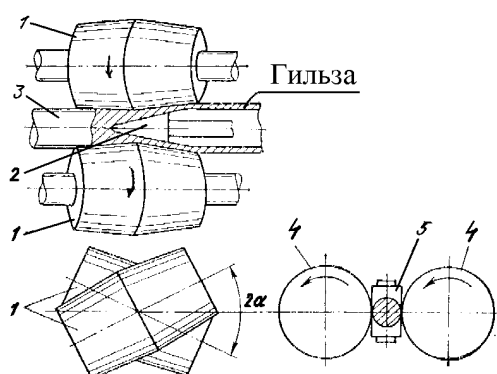


Рисунок 1.1 - Прокатка в косых валках

При нагревании заготовки в атмосфере нагревательной печи металл окисляется, происходит процесс химического взаимодействия окисляющего печного газа с железом, примесями и легирующими компонентами, образующими на поверхности слитка окалину. Во время прокатки окалина вдавливается в поверхность заготовки, что ухудшает качество поверхности, ускоряет износ роликов, а также способствует образованию дефектов. Поэтому рекомендуется удалять окалину с поверхности проката. На формирование окалины влияют температура нагрева, скорость нагрева, время, в течение которого металл

находится в атмосфере печи, атмосфера печи и ее окислительные свойства [46,101, 124, 125].

Процесс изготовления готового изделия является заключительным этапом производства проката. Основной задачей этого процесса является достижение заданного размера и геометрии с наименьшими затратами, а также необходимого качества, которое характеризуется не только структурой, физико-механическими свойствами, но и состоянием поверхности. Этого можно достичь только при соблюдении в производстве условий всех технологических процессов.

Высокие требования к качеству труб нефтяного сортамента продиктовано условиями их эксплуатации при бурении и обустройстве скважин нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. К ним относят действие высоких температур, наличие агрессивных сред с сероводородом и углекислым газом, а также рост нагрузок при эксплуатации скважин. При этом качество исходной заготовки в значительной степени определяет качество готовых труб. На этапах производственных процессов при изготовлении труб могут возникать различные типы поверхностных и приповерхностных дефектов. Согласно ГОСТ 21014-88 к ним относят дефекты поверхности, обусловленные качеством слитка и литой заготовки (раскатанное загрязнение, волосовина, раскатанный пузырь, расслоение, рванина, плена, раскатанная трещина и др.); дефекты поверхности, образовавшиеся в процессе пластической деформации (деформационная рванина, прокатная плена, трещина напряжения, скворечник, ус, подрез, морщины, закат, заков, риска, перегрев поверхности, рябизна, вкатанная окалина, раковины от окалины, вкатанные металлические частицы, заусенец, торцевая трещина); дефекты поверхности, образовавшиеся при отделочных операциях (недотрав, остатки окалины, шлифовочные трещины, вмятины, царапины и др.).

1.1.2. Технология изготовления муфт

Муфты для насосно-компрессорных труб изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 633-80 и используются для монтажа единой трубной

колонны, обеспечивая таким образом стабильное соединение, герметичность и минимизацию трения во время эксплуатации трубных колонн. Постоянное совершенствование конструкции муфт, материалов и компонентов незаменимо во многих областях строительства, добычи природных ресурсов и геологоразведки. Улучшение таких показателей как плотность соединения труб, коррозионная стойкость к агрессивной среде позволяют изготавливать колонны с трубами небольшой длины, более длительным сроком службы, значительно снижают их стоимость, обеспечивают удобную транспортировку и упрощают установку опор.

Муфты насосно-компрессорных труб предназначены для соединения отдельных труб. В процессе производства этих деталей используются высококачественные бесшовные заготовки, что позволяет создавать надежные и долговечные крепежные элементы, используемые при монтаже нефтяных скважин и других систем и инженерных сооружений. В процессе изготовления соединительных муфт, на них нарезается резьба, проводится дополнительная термообработка для упрочнения внутренней поверхности муфт [48].

Элементы нефтедобывающего оборудования (насосно-компрессорные трубы и соединительные муфты) относятся к опасным производственным объектам, эксплуатируемым в агрессивных средах и при высоких уровнях нагрузок. Технология изготовления трубных заготовок предусматривает получение их методом непрерывного литья, проката или прессования с последующим сверлением. На различных этапах производственных процессов при изготовлении труб могут возникать различные типы дефектов. Одним из наиболее частых дефектов при производстве труб и муфт являются трещины напряжений, обусловленные нарушением режимов термической обработки (после закалки с последующей нормализацией или отпуском).

В то же время качество исходного материала чаще всего определяет качество готового изделия. На этапе производственного процесса могут возникать различные типы поверхностных и приповерхностных дефектов. ГОСТ 21014-88 включает дефекты поверхности, вызванные литьем и качеством материала (загрязнение раскатанное, волосовины, расслоение, разрыв, плена, трещины и

т.д.). Поверхностные дефекты, образующиеся в процессе деформации (деформация разрыва, прокатная плена, трещина напряжения, ус, подрез, морщины, закат, перегрев поверхности, окалина при прокатке, частицы прокатанного металла, заусенец, раскатанная трещина); поверхностные дефекты, которые возникают во время отделочных операций (недостаточное травление остатков окалины, трещины от шлифовки, вмятины, царапины и т.д.) [52].

1.1.3. Технология изготовления лейнеров

В качестве материала лейнера используется сплав системы алюминий-магний-кремний (АД-33, 6061Т1), широко используемый при изготовлении баллонов для подводных дыхательных аппаратов, а также лейнеров автомобильных металлокомпозитных баллонов для сжатого природного газа при использовании его в качестве автотоплива [124].

Технология изготовления баллона лейнера включает в себя следующие операции:

1. Заготовка трубы диаметром до 300 мм и толщиной стенки до 6 мм подвергается внутренней раскатке с обжатием стенки.
2. Закатка на специальном станке с двух сторон заготовки днищ с горловинами.
3. Закалка полученной заготовки с температуры 525 ± 5 °С в воде.
4. Старение с выдержкой при температуре 165 ± 5 °С 10-12 часов.

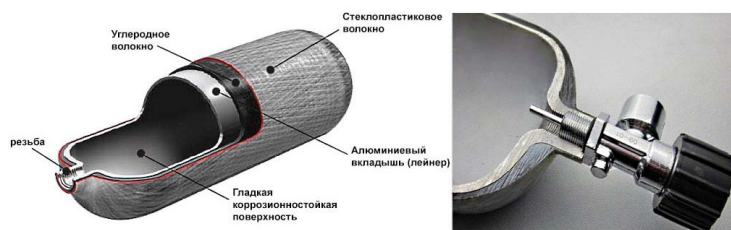


Рисунок 1.2 - Готовый баллон с алюминиевым лейнером

Формирование силовой оболочки производится методом «мокрой» намотки армирующего композитного материала на баллон лейнера. Намотка силовой

оболочки формируется последовательной укладкой нескольких спиральных и кольцевых слоёв пропитанного армирующего материала по заданной программе (Рисунок 1.2) [124].

Появление и разрастание дефектов может быть обусловлено как наличием неметаллических включений во время производства трубы-заготовки, так и закатами по время процесса внутренней раскатки трубы.

Согласно ГОСТ ISO 11439-2014 баллоны для природного сжатого газа, используемого в качестве топлива для различных транспортных средств, должны быть максимально легкими и в то же время должны соответствовать требованиям безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Это достигается посредством проведения сплошного неразрушающего контроля всех изготавливаемых баллонов. Ультразвуковой, капиллярный или эквивалентный им неразрушающий контроль каждого баллона должен обеспечивать отсутствие дефектов, которые превышают максимальный допустимый размер, и должен быть установлен методом, пригодным для данной конструкции баллона. Максимально допустимый размер дефекта в любом месте металлического баллона определяется так, чтобы баллон соответствовал требованиям циклических испытаний внутренним давлением до появления утечки или до разрушения.

1.1.4 Анализ технических решений по контролю алюминиевых труб

Для решения задач, связанных с контролем поверхности изделий, в условиях их промышленного производства, широко применяют электромагнитные методы [11, 27, 45, 52, 103, 132, 149, 151] и соответствующие средства неразрушающего контроля. Присущие им недостатки и ограничения — низкая чувствительность по отношению к некоторым типам дефектов, сравнительно невысокая помехозащищенность по отношению к электромагнитному фону металлургического предприятия, трудности применения на криволинейных участках профиля, необходимость размещать вихретоковые

датчики почти вплотную к движущемуся объекту контроля, что вызывает их быстрый износ и выход из строя при соприкосновении с поверхностью на высоких скоростях, а также малая глубина проникновения вихревых токов в металлы и сплавы, ограничения по максимальной глубине выявляемых дефектов.

В отличие от магнитного и вихретокового видов контроля, ультразвуковой вид обеспечивает выявление как поверхностных, так и внутренних дефектов. Установки многоканального ультразвукового контроля [40] с использованием объемных волн требуют сканирования по всему периметру, осуществляемого за счет поступательно-вращательного движения проката, что существенно ограничивает их производительность. Высокая скорость сканирования при использовании локально-иммерсионного способа осуществления акустического контакта может вести к снижению достоверности контроля, особенно в условиях плохого качества обработки или масляных загрязнений поверхности.

В связи с этим необходимы интенсивные поиски альтернативных методов и средств обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов трубных изделий. В последнее время в России и за рубежом наблюдается повышенный интерес к волноводным методам неразрушающего контроля труб, основанным на использовании нормальных волн (Лэмба, SH-, Похгаммера) [77, 57, 16, 148, 150], основным преимуществом которого является отсутствие необходимости сканирования, возможность контроля при локальном доступе к объекту, высокая производительность контроля.

Основные методики и схемы прозвучивания труб регламентирует ГОСТ 17410-2022 (Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные. Методы ультразвуковой дефектоскопии), согласно которому при контроле труб должны применяться продольные и/или поперечные волны, которые распространяются перпендикулярно либо под углом к поверхности контролируемого изделия. Допускается использовать другие типы волн, например волны Лэмба или волны Рэлея. Выбор типа волн и направления распространения зависит от геометрических характеристик объекта контроля, типа и ориентации выявляемых дефектов и устанавливается документацией на контроль.

При контроле могут быть применены следующие методы: теневой метод, в том числе зеркально-теневой (метод прохождения); эхо-импульсный метод (метод отражения); дифракционно-временной метод. При контроле могут применяться следующие преобразователи: пьезоэлектрические (ПЭП); электромагнитно-акустические (ЭМА).

1.2. Методы неразрушающего контроля пруткового и трубного проката

1.2.1. Магнитный вид неразрушающего контроля

Магнитный вид неразрушающего контроля в основном используются для контроля изделий, изготовленных из ферромагнитных магнитномягких или магнитотвердых материалов, с использованием способа приложенного поля или остаточной намагниченности под воздействием внешних магнитных полей. При этом используются различные способы намагничивания. Основными информативными параметрами контроля могут быть коэрцитивная сила, магнитная индукция (остаточная индукция), намагниченность, магнитная проницаемость, напряженность магнитного поля и эффект Баркгаузена [5, 35, 59].

В зависимости от способа получения основной информации различают следующие методы магнитного контроля: магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, эффект Холла, индукционный, пондеромоторный, магниторезистивный. С их помощью можно выявлять поверхностные и приповерхностные несплошности, толщину немагнитных слоев.

Магнитопорошковый и магнитографический методы обнаружения несплошностей требуют контакта, т.е. преобразователь (магнитный порошок или магнитная пленка) должен находиться в контакте с поверхностью объекта контроля, а при других методах контроля сбор информации осуществляется бесконтактно (даже если он находится достаточно близко к поверхности). С помощью технологии магнитнопорошкового контроля можно обнаружить поверхностные дефекты при раскрытии в несколько микрометров. Для

шероховатых поверхностей могут использоваться такие методы, как феррозондовый, эффект Холла, индукционное зондирование, а минимальная глубина обнаруживаемых дефектов в три раза превышает высоту шероховатости поверхности [5, 35, 102, 107, 117].

Контроль структуры и механических свойств изделий осуществляют путем установления корреляционных связей между контролируемым параметром (температурой закалки и отпуска, твердостью и т.д.) и какой-либо магнитной характеристикой или несколькими. Магнитными методами контролируется состояние поверхностных слоев (качество поверхностной закалки, азотирования и т.д.). Магнитные порошки служат для визуального определения магнитных полей рассеяния над дефектами.

Однако, необходимость намагничивания и последующего размагничивания объекта контроля, влияние электрических и магнитных свойств объекта контроля на результаты контроля, ограниченная выявляемость внутренних дефектов, худшая чувствительность к округлым дефектам ограничивают возможности применения магнитных методов.

1.2.2. Вихретоковый вид неразрушающего контроля

Физической основой вихретокового метода контроля является регистрация взаимодействия поля вихревого тока и электромагнитного поля, индуцируемого катушкой излучения. Чаще используются синусоидальные токи, реже импульсные, а для записи применяют индукционные датчики или преобразователи Холла. Плотность вихревых токов в объекте контроля определяется не только физическими свойствами материала, наличием дефектов и неровностей, но и расположением вихретокового преобразователя относительно объекта контроля [46, 54, 60].

Благодаря своему потенциалу автоматизации и использованию бесконтактных датчиков этот метод широко используется при контроле различных изделий в машиностроительной промышленности.

С помощью вихретокового метода обнаруживаются следующие типы дефектов: трещины, расслоения, закаты, плены, раковины, неметаллические включения и т.д. Данный метод позволяет контролировать размеры изделия (диаметр проволоки, стержня, трубы, толщину стенки трубы при одностороннем доступе к объекту, толщину электропроводящего диэлектрического покрытия и слоя многослойной структуры - при наличии проводящего слоя). Толщина измеряется от микрометров до десятков миллиметров. Для большинства устройств вихретокового контроля погрешность измерения составляет 2-5%.

Распределение в объекте контроля вихревых токов зависит от множества параметров: электрические и магнитные свойства материала, геометрические размеры, структурное состояние, взаимное расположение вихретокового преобразователя и объекта контроля. Поэтому при проверке одного параметра могут возникнуть трудности, так как остальные параметры объекта будут считаться мешающим фактором.

Технические ограничения метода - преобразователь должен располагаться рядом с поверхностью объекта контроля. Поэтому преобразователи обычно изготавливаются для каждого типа детали согласно её геометрическим параметрам. По расшифровке результатов контроля, неправильные значения возможны из-за смешанных переменных, граничных эффектов и эффектов обработки объектов контроля. Вторым ограничением является низкая глубина проникновения (ограниченная тонкими стенками или дефектами, расположенными близко к поверхности). В зависимости от чувствительности и/или разрешения - трещина длиной до 0,2 мм.

Основными преимуществами современных методов вихретокового контроля являются бесконтактность, автоматизация и возможности контроля дефектности и структурных параметров объектов контроля. Однако небольшая глубина контроля, сильная зависимость показаний от расстояния между датчиком и изделием, сложность расшифровки результатов контроля (амплитуда и фаза сигнала зависят сразу от нескольких физических свойств) не считаются достаточно универсальными.

1.2.3. Акустический вид неразрушающего контроля

Одной из альтернатив, потенциально снимающих большую часть ограничений, присущих вихретоковым и магнитным методам неразрушающего контроля, является применение ультразвуковых волн [24, 27].

Акустический вид неразрушающего контроля основан на регистрации упругих колебаний в объекте. При акустическом контроле чаще всего используют ультразвуковой диапазон частот от 16...20 кГц до 100 МГц, поэтому акустический контроль часто называют ультразвуковым.

Упругая волна представляет собой процесс распространения возмущений в среде в результате действия механических сил, благодаря упругому взаимодействию частиц среды. В газах и жидких средах могут распространяться только продольные волны. В безграничных твердых телах могут существовать продольные и поперечные (сдвиговые) волны. Направление колебательного движения частиц среды в продольных волнах совпадает с направлением распространения самой волны, а в поперечных волнах направление колебательного движения перпендикулярно этому направлению.

В ограниченных твердых телах могут распространяться также волны других типов, из которых основное значение имеют: поверхностные волны (волны Рэлея), изгибные волны, нормальные волны в слоях (волны Лэмба), нормальные стержневые волны (волны Похгаммера). Распространение поверхностных волн по свободным поверхностям твердых тел происходит в слое толщиной порядка длины волны. Частицы среды движутся по эллиптическим траекториям [25].

Скорости продольных, поперечных и поверхностных волн в большинстве объемных материалов не зависят от частоты. Скорости волн в пластинах и стержнях зависят от произведения толщины изделия на частоту. Это явление называют дисперсией скорости. Скорости распространения волн всех типов определяются плотностью ρ среды и ее упругими модулями.

Для получения упругих колебаний в объекте контроля чаще всего используют пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), реже используются

электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП) и лазеры. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи, выполненные из пьезоматериалов или монокристалла кварца [4, 1, 112, 115, 143, 145, 147, 9, 33, 42, 50, 104].

Параметры распространения волны зависят от акустических свойств материала и наличия различных дефектов. Амплитуда импульсов, прошедших через изделие или отраженных от поверхности изделия или дефекта, их фаза, частота и скорость распространения являются анализируемыми параметрами.

В соответствие с ГОСТ 18353-79 все методы НК классифицируются по следующим признакам:

1. По характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом. Под характером взаимодействия физического поля или вещества с объектом контроля подразумевается непосредственное взаимодействие поля или вещества с контролируемым объектом;
2. По первичному информативному параметру. Под первичным информативным параметром подразумевается одна из основных характеристик физического поля, регистрируемая после взаимодействия этого поля с объектом контроля;
3. По способу получения первичной информации. Под первичной информацией подразумевается совокупность характеристик физического поля, регистрируемая после взаимодействия этого поля с объектом контроля.

Согласно ГОСТ 18353-79 акустические методы подразделяются на две большие группы: активные и пассивные методы. Первая группа использует излучение и прием акустических колебаний и волн, вторая группа только прием колебаний и волн. Колебания в последнем случае возбуждаются под действием процессов, происходящих в самом объекте контроля при внешних энергетических воздействиях. В каждой из этих групп можно выделить методы, основанные на возникновении в объекте контроля бегущих и стоячих волн или колебаний.

Активные акустические методы, в которых применяют бегущие волны, делят на подгруппы: методы, использующие прохождение, отражение волн, и

комбинированные методы, в которых применяют как отражение, так и прохождение.

К пассивным методам относят акустико-эмиссионный метод, в котором используют бегущие волны. Явление акустической эмиссии состоит в излучении упругих волн материалом объекта контроля в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры.

Основные методики и схемы прозвучивания труб регламентирует ГОСТ 17410-2022 (Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные. Методы ультразвуковой дефектоскопии), согласно которому при контроле труб должны применяться продольные и/или поперечные волны, распространяющиеся перпендикулярно либо под углом к поверхности контролируемого изделия. Допускается использовать другие типы волн, например, волны Лэмба или рэлеевские волны. Выбор типа волн и направления распространения зависит от геометрических характеристик объекта контроля, типа и ориентации выявляемых дефектов и устанавливается документацией на контроль.

Рэлеевские волны относятся к поверхностным ультразвуковым волнам и находят широкое применение в задачах дефектоскопии. С практической точки зрения преимущества волн Рэлея, распространяющихся вдоль свободной поверхности твердого тела, связаны, прежде всего, с их локализацией в поверхностном слое и, вследствие этого, высокой чувствительностью к поверхностным дефектам и более медленным, чем для объемных волн, снижением амплитуды с расстоянием.

Поверхностные дефекты, возникающие как при изготовлении, так и при эксплуатации металлоизделий, (трещины, волосовины, пленки, закаты и др.) имеют различные формы и не только приводят к изменению амплитудных и временных параметров прошедшего сигнала, но и создают рассеянные рэлеевскую и объемные продольную и поперечную волны, что обуславливает возможность применения как эхо-импульсного, так и теневого методов ультразвукового контроля. Важно также, что волны рэлеевского типа могут распространяться вдоль криволинейных (выпуклой и вогнутой) поверхностей, что

позволяет выявлять неоднородности на поверхностях сложной формы [1, 129, 131, 4].

В то же время рэлеевские волны характеризуются высокой чувствительностью к контакту поверхности с другой средой, например, наличие на поверхности объекта контроля слоя жидкости или локальных загрязнений. В этом случае появляется рассеяние в зоне контакта (что вызывает появление помех), а также трансформация рэлеевской волны в зоне контакта в неоднородную волну, что приводит к уменьшению длины прозвучиваемого участка поверхности и её затуханию.

Указанный недостаток вызывает интерес к контролю в иммерсионном варианте, то есть при погружении ОК в жидкую среду, что, безусловно, уменьшит длину контролируемого участка, но в то же время исключит условия для рассеяния поверхностных волн на локальных загрязненных участках поверхности [43, 53].

В литературе широко освещаются вопросы практического использования рэлеевских волн для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов, в том числе труб, эхо-методом контроля [1, 128, 129, 131, 134, 136, 142, 144, 147, 153, 2, 28, 32, 49, 58, 66, 100, 104]. Использование рэлеевских волн эффективно как в задачах акустической структуроскопии, так и дефектоскопии поверхностных и приповерхностных слоев [19, 20, 24]. Использование рэлеевских волн эффективно как в задачах акустической структуроскопии, так и дефектоскопии поверхностных и приповерхностных слоев. Применение ЭМАП для возбуждения и приема рэлеевских и объемных волн позволяет устранить влияние качества контакта на результаты контроля, тем самым обеспечить повышение его достоверности.

1.3 Акустическая структуроскопия и дефектоскопия металлоконструкций

Основными видами неразрушающего контроля трубных заготовок, готовых труб и изделий из них являются вихретоковый и магнитный методы, имеющие

ограничения по максимальной глубине выявляемых дефектов [151, 11, 27, 45, 103].

При контроле прутков-заготовок для производства бурильных труб согласно ISO 10424-1:2004 и Spec API 5DP (ISO 11961: 2008) регламентируется использование ультразвукового контроля. Установки многоканального ультразвукового контроля с использованием объемных волн требуют сканирования по всему периметру, осуществляемого за счет поступательно-вращательного движения проката, что существенно ограничивает их производительность. Использование контактного или иммерсионного способа осуществления акустического контакта приводит к снижению достоверности контроля, особенно при плохом качестве обработки поверхности или при масляных загрязнениях поверхности.

Использование рэлеевских волн эффективно как в задачах акустической структуроскопии, так и дефектоскопии поверхностных и приповерхностных слоев [139, 140, 100, 122].

В работах [72, 41, 61, 65, 93] показана возможность реализации электромагнитно-акустического (ЭМА) метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле цилиндрических объектов малых диаметров для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов и оценке структурного состояния в пределах поверхностного слоя соизмеримого с длиной рэлеевской волны, при этом глубина выявляемых дефектов может варьироваться при изменении частоты колебаний. Применение ЭМА-преобразователей для возбуждения и приема рэлеевских волн позволяет устранить влияние качества контакта на результаты контроля, тем самым обеспечивая повышение его достоверности [131, 77, 142, 141, 116, 143, 1, 5, 68]. При реализации данной технологии требуется сканирование только вдоль образующей объекта, что позволяет существенно увеличить производительность контроля.

Детали машин и металлические конструкции при эксплуатации подвергаются переменным во времени механическим (циклическим) нагрузкам, которые могут стать причиной изменения структуры металла, накопления

микродефектов, зарождения трещин и в конечном итоге – разрушения изделия. Практика показывает, что такие циклически изменяющиеся во времени по величине и по знаку нагрузки приводят к разрушению конструкции при напряжениях, существенно меньших, чем предел текучести. Подобная ситуация возможна при наличии концентратора напряжений. Такое разрушение характерно для машиностроительных конструкций, таких как оси, валы, штоки, пружины, шатуны, и называется усталостным [130, 18, 66, 110, 35, 92].

Механизм усталостного разрушения во многом связан с неоднородностью реальной структуры материалов (наличие различных включений – шлаков, примесей, волосовин; дефекты поверхности материала – плены, царапины, коррозия и т. д.). В связи с указанной неоднородностью при переменных напряжениях на границах отдельных включений и вблизи микроскопических пустот и различных дефектов возникает концентрация напряжений, которая приводит:

- к микропластическим деформациям сдвига по плоскостям скольжения в некоторых зернах металла, сопровождающимся появлением экструзий и интрузий на поверхности образца;
- развитию микротрещин на поверхности и внутри образца, их росту и слиянию;
- появлению на последнем этапе одной или нескольких макротрещин, которые достаточно интенсивно развиваются.

Особенно быстро протекает процесс деструктуризации в условиях малоциклового усталости [51], т. е. при нагрузках, превышающих предел выносливости. Важно определить начало деструктуризации металла, чтобы не допустить разрушения изделия. Среди методов неразрушающего контроля представляют интерес ультразвуковые методы. Одним из основных информативных параметров ультразвукового контроля при определении структурных изменений является скорость распространения ультразвуковых волн [123, 37, 133, 110, 119, 120, 121].

Многоцикловая усталость металла, является причиной возникновения микропластической деформации. Пластическая деформация металла – это

процесс, при котором изменяется форма тела, но не возникает макродефектов, приводящих к разрушению материала [124]. Несплошности, превышающие по размерам межатомные расстояния, появляются после начала пластической деформации. Неравномерность пластической деформации создает внутренние напряжения, которые вызывают разрыв межатомных связей и образование несплошностей различных размеров.

Изменению структуры и физико-механических свойств металла при пластической деформации посвящено много работ, в частности, исследовано влияние циклического нагружения при разных амплитудах на прочность и пластичность, твердость, критерии хрупкой прочности, электропроводность, внутреннее трение, модули упругости, магнитные свойства [20, 32, 42, 55]. Анализ этих работ показывает, что перечисленные свойства «реагируют» на циклическое нагружение, однако основные их изменения происходят на самой начальной стадии нагружения и далее уже непосредственно перед разрушением.

Методы акустической структуроскопии являются наиболее успешно применяемыми среди методов оперативной оценки структуры, анизотропии, упругих и прочностных свойств материалов и изделий. Последнее обусловлено тем, что используемые при контроле акустические волны имеют поля одной природы с оцениваемыми упругими характеристиками [133, 62]. Ввиду того, что влияние структуры металла на скорость ультразвуковых волн, как правило, невелико, к методикам и средствам измерения скорости предъявляются высокие требования к точности измерений.

Методики оценки структурных изменений и накопления микродефектности по характеристикам акустических волн исследованы в работах [69, 111, 91, 46].

Одним из основных информативных параметров при определении структурных изменений является скорость распространения ультразвуковых волн [65, 104].

Контактные акустические (ультразвуковые) методы, представленные на рынке средств неразрушающего контроля, требуют специальной подготовки

поверхности объекта и реализуются, как правило, в иммерсионном варианте, а использование их для образцов малых диаметров довольно сложно.

Выводы по главе 1

1. Существующие технологии производства пруткового и трубного сортамента не свободны от появления дефектов, нарушающих сплошность металлопроката.
2. Не достаточно исследовано влияние термической обработки и структурного состояния прутков на основные параметры рэлеевских волн.
3. Отсутствуют методики неразрушающего контроля труб и муфт нефтяного сортамента с использованием электромагнитно-акустического способа с применением рэлеевских волн.
4. Отсутствуют методики неразрушающего акустического контроля внутренней поверхности алюминиевых труб для изготовления лейнеров.

Постановка задач

На основании проведенного литературного обзора сформулирована цель диссертационной работы:

Исследование чувствительности амплитудного теневого метода при многократном прохождении рэлеевской волны 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 параметров рэлеевских волн, возбуждаемых электромагнитно-акустическим

преобразователем, в прутках из сталей 40Х и 45 с разной термической обработкой.

2. Исследование чувствительности параметров рэлеевских волн и выявляемости дефектов труб и муфт нефтяного сортамента с использованием электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема рэлеевских волн.

3. Исследование чувствительности эхо-метода с использованием рэлеевских волн к дефектам в алюминиевых трубах, разработка методики контроля.

ГЛАВА 2 МЕТОДИЧЕСКОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ПРУТКОВОГО И ТРУБНОГО СОРТАМЕНТА

В данной главе приведены сведения о приборах, приспособлениях, преобразователях, методах и методиках для исследований образцов и изделий пруткового и трубного сортамента [78, 15, 47, 21, 78]. Изложены преимущества использования рэлеевских волн для контроля поверхностных дефектов.

2.1 Приборы для исследований скорости ультразвуковых волн

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 ДЮ 1000LF, Дефектоскоп Пеленг УД2-102, Дефектоскоп ультразвуковой УД 4Т, Дефектоскоп ультразвуковой УД 2-70, Дефектоскоп УДЗ-307ВД). Технические характеристики оборудования приведены в таблицах 1 - 5;

- программное обеспечение (Программный продукт COMSOL Multiphysics).

Таблица 1 - Технические характеристики структуроскопа СЭМА

Наименование характеристики	Значение
Погрешность измерения времен прихода импульсов, нс	0,5
Диапазон измерения временных интервалов, мкс	от 30 до 1000

Продолжение таблицы 1

Наименование характеристики	Значение
Материал контролируемых объектов	ферромагнитные стали
Толщина контролируемого объекта, мм	от 20 до 500
Амплитуда генератора зондирующих импульсов, кВ	2,0 кВ
Рабочая частота, МГц	2,5 МГц
Полоса пропускания усилителя, МГц	0,6-6,6 МГц
Коэффициент усиления, дБ	66 дБ
Разрешающая способность измерения временных интервалов, мкс	2
Время проведения одного измерения (без установки датчиков) не более, сек	10

Таблица 2 - Технические характеристики ультразвукового дефектоскопа DIO 1000LF.

Частота стробирования:	200 МГц, 12-бит
Вход В-скан	сигнал от энкодера А, В, старт, TTL 5 В, питание энкодера – переключаемое 5 В
Диапазон устанавливаемых скоростей ультразвука	От 100 до 15240 м/с в стали
Рабочие частоты	от 20кГц до 1МГц.
Фильтры:	широкополосный, узкополосный или переключаемые полосовые фильтры - 1 МГц, 2 МГц, 2.25 МГц, 4 МГц, 5 МГц, 10 МГц
ДАС (кривая амплитуда-расстояние (АРК))	построение по 20 точкам, регулируемая по высоте
Глубина (амплитуда) ВРЧ	111 дБ (71 дБ непрерывно)

Таблица 3 - Технические характеристики дефектоскопа Пеленг УД2-102

Диапазон рабочих частот, МГц:	частоты УЗК 1,25; 1,8; 2,5; 5,0;
Длительность А-развертки, мкс	минимальная 12 минимальная 3048
Диапазон перестройки усиления приемника, дБ:	ультразвукового канала от 0 до 80
Методы ультразвукового контроля реализуемые дефектоскопом:	Эхо, зеркальный, зеркально-теневой(ЗТМ)
Амплитуда электрических колебаний при возбуждении УЗК, В:	высокой амплитуды 160 низкой амплитуды 5
Частота следования зондирующих импульсов УЗК, Гц:	от 25 до 5000
Типы разверток в режиме ультразвукового контроля:	А-развертка, W-развертка В-развертка
Глубина (амплитуда) ВРЧ, дБ:	не более 40
Диапазон измерения глубины, мм.:	для изделий из стали от 3 до 500
Количество ультразвуковых каналов:	1

Таблица 4 - Технические характеристики ультразвукового дефектоскопа УД 2-70

Рабочие частоты	0,4; 1,25; 1,8; 2,5; 5,0; 10,0 МГц
Диапазон рабочих частот приёмного такта	от 0,2 до 12 МГц
Диапазон устанавливаемых скоростей УЗ колебаний	от 100 до 15000 м/с
Частота повторения зондирующих импульсов	30; 60; 120; 250; 500; 1000; 2000 Гц
Диапазон регулировки усиления	от 0 100 дБ с дискретностью 0,5; 1,0 дБ
Развёртка	тип А, В

Продолжение таблицы 4

Диапазон задержки развёртки	от -30 до 7500 мм
Погрешность измерения глубины залегания дефектов	$\pm(0,1 + 0,02N)$ мм
Дискретность измерения расстояний	0,1 мм
Погрешность измерения отношений амплитуд сигналов	$\pm(0,1 + 0,03 N)$ дБ
Диапазон регулировки ВРЧ	от 0 до 80 дБ

Таблица 5 - Технические характеристики дефектоскопа УДЗ-307ВД

Методы ультразвукового контроля, реализуемые дефектоскопом	эхо, зеркальный зеркально-теневой (ЗТМ)
Методы вихретокового контроля, реализуемые дефектоскопом	Фазовый, амплитудный
Режимы вихретокового контроля	Динамический, статический
Номинальное значение частоты УЗК, МГц	0,4; 0,62; 1,25; 1,8; 2,0; 2,5; 5,0; 10,0
Амплитуда электрических колебаний при возбуждении УЗК, В	высокой амплитуды - 120 низкой амплитуды - 4.5
Частота следования зондирующих импульсов УЗК, Гц	25 ... 5000
Типы разверток: в режиме ультразвукового контроля в режиме вихретокового контроля	А-развертка, W-развертка, В-развертка бегущая развертка, комплексная плоскость
Диапазон регулировки усиления ультразвукового канала, дБ	0 ... 80
Диапазон регулировки усиления вихретокового канала, отн. ед.	0 ... 80

Продолжение таблицы 5

Дискретность измерения толщины встроенным ультразвуковым толщиномером, мм	0,01
Глубина (амплитуда) ВРЧ, дБ	не более 80
Амплитуда сигнала задающего генератора вихретокового канала, В	0,8; 1,5; 3,4; 8,3
Длительность А-развертки, мкс: минимальная	1,33
максимальная	10992
Диапазон измерения глубины трещин в режиме вихретокового контроля, мм	0,1 ... 9,9
Диапазон измерения толщины (для изделий из стали), мм	3...5000

Дефектоскоп ДЭМА оснащен проходным ЭМА-преобразователем сдвиговых волн и накладным для измерения рэлеевских волн, обеспечивающими излучение волн по сечению прутка и получение серии многократных отражений [93, 86]. Для анализа скоростей сдвиговых и рэлеевских волн в прутках использовано программное обеспечение ПРИНЦ [113].

Шероховатость поверхности контролировалась в процессе испытаний с помощью профилометра Surface Roughness Tester Rz: диапазон 0,1...50 мкм с погрешностью $\pm 7\%$. Диаметры цилиндрических объектов измерялись цифровым штангенциркулем с погрешностью измерений 0,01 мм. Проверка состояния поверхности прутков оценивалась с помощью микроскопа Levenhuk 5ST при 40-кратном увеличении.

Для выполнения исследований разработаны, спроектированы и изготовлены электромагнитно-акустические (глава 3, подразделы 3.1-3.3) и

пьезоэлектрические (глава 4, подраздел 4.3) преобразователи для возбуждения и приема рэлеевских волн.

2.2 Методы исследований скорости ультразвуковых волн

Для исследований использовали зеркально-теневой метод многократных отражений, описанный в составе уникальной научной установки «Информационно-измерительный комплекс для исследования акустических свойств материалов и изделий», в которую входит дефектоскоп ДЭМА с возможностью возбуждения-приема объемных и поверхностных волн в цилиндрических объектах, реализованная на базе структуроскопа СЭМА (внесен в реестр средств измерений № 61957-15 RU.C.36.003.A № 60174). Структурная схема и фото установки для исследований представлены на Рисунке 2.1.

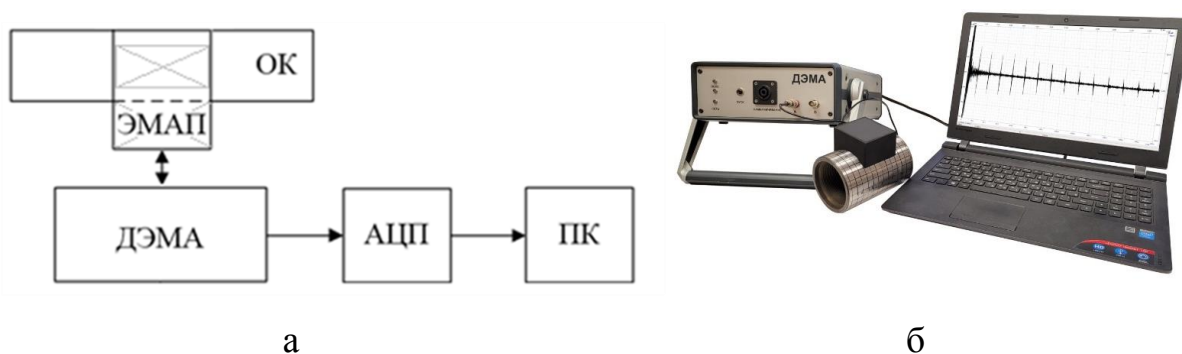


Рисунок 2.1 - Блок-схема с накладным ЭМАП (а); внешний вид установки (б)

Применяемый дефектоскоп ДЭМА работает следующим образом: электрический импульс с устройства подается на проходной или накладной совмещенный ЭМА преобразователь, излучающий акустическую волну определенного типа, после чего многократно переотраженная волна в объекте контроля ОК регистрируется тем же ЭМА преобразователем, с помощью которого сигнал преобразуется из акустического в электрический в виде импульсов и передается на персональный компьютер ПК через аналоговый – цифровой преобразователь АЦП [87]. Обработка сигналов осуществляется с помощью программного обеспечения Sensitive [112, 113, 114].

Объемные волны, многократно отраженные от поверхности по диаметру прутка, и рэлеевские волны, многократно проходящие по окружности прутка в прямом и обратном направлениях, формируют серию импульсов, время следования которых пропорционально диаметру объекта (для объемных волн) и периметру объекта (для рэлеевских волн) (Рисунок 2.2). Система оснащена специализированными бесконтактными электромагнитно-акустическими (ЭМА) преобразователями объемных и рэлеевских волн, обеспечивающими возбуждение и прием поперечных волн осевой поляризации и продольных волн радиальной поляризации по сечению прутка во всех радиальных направлениях [86], а также рэлеевских волн по огибающей поверхности прутка [74].

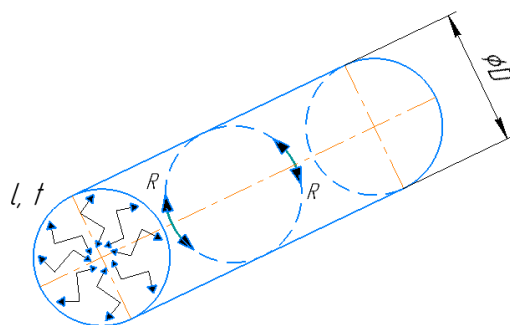


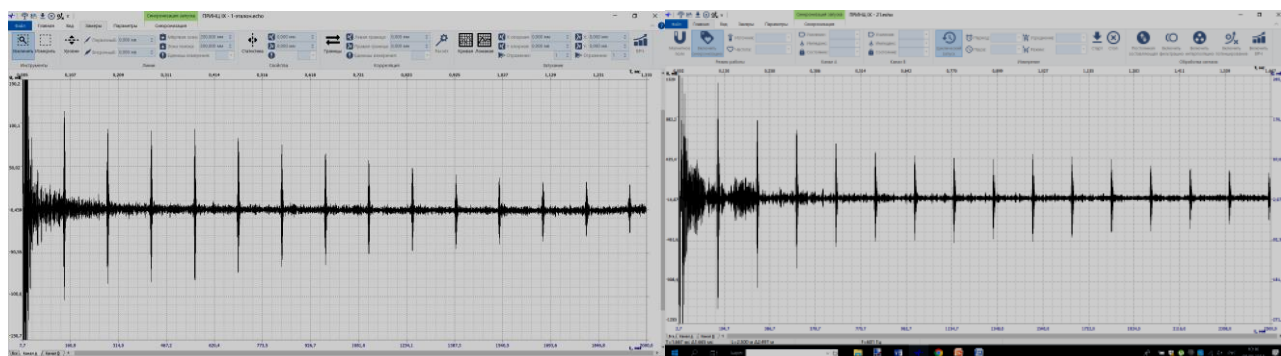
Рисунок 2.2 - Распространение сдвиговых и рэлеевских волн по сечению и окружности прутка

Информативным параметром при определении скоростей акустических волн по эхограммам (Рисунок 2.3) является время прихода n , $n+m$ -го импульса $t_{n,n+m}$, поскольку скорость сдвиговой волны C_t и рэлеевской C_R находятся по формулам [98]:

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

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

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



а

б

Рисунок 2.3 - Эхограммы сдвиговой волны C_t (а) и рэлеевской C_R волн (б)

Использование бесконтактных ЭМА-преобразователей позволяет отстроиться от качества акустического контакта и ввиду отсутствия потерь на границе «преобразователь – объект контроля» получить серию многократных отражений и, следовательно, повысить точность измерения скорости распространения акустических волн. Кроме того, ЭМА-преобразователи позволяют возбуждать и надежно регистрировать УЗ-импульсы разных типов волн, любой ориентации и поляризации при использовании требуемых систем намагничивания.

Обработка принятых сигналов проводится с использованием специализированного программного обеспечения «ПРИНЦ» [114]. При контроле цилиндрических объектов малых диаметров использование эхо-метода затруднено ввиду наличия существенной мертвой зоны и сложности установки пьезопреобразователей на цилиндрическую поверхность [97, 98].

При прозвучивании образца в одном сечении с использованием различных типов волн появляется возможность определения коэффициента Пуассона вне зависимости от диаметра образца. Согласно оценке, косвенная погрешность расчета значения коэффициента Пуассона не превышает 0,01 %, т. е. с точностью до пятого знака, при этом случайная погрешность не превышает 0,1 % [22].

Учитывая, что скорость рэлеевских волн при распространении по цилиндрической поверхности зависит от ее радиуса [13], при расчете коэффициента Пуассона ν_{tr} использовали поправочный коэффициент, определяемый соотношением радиуса объекта и длины волны, в предположении равенства коэффициентов Пуассона ν_{tl} и ν_{tr} для образца в состоянии поставки.

Методики структуроскопии прутков описаны в главе 3 (3.1-3.4).

Методики акустических исследований труб и муфт нефтяного сортамента описаны в главе 4 (4.1 и 4.2).

В разделе 4.3-4.5 подробно изложены методики ультразвукового контроля лейнеров.

2.3 Рэлеевские волны. Особенности распространения

Поверхностные волны Рэля это упругие волны, распространяющиеся вдоль поверхности твердого тела или вдоль границы твердого тела с другими средами и быстро затухающие с глубиной (Рисунок 2.4). В волне, распространяющейся вдоль границы твердого тела, частицы движутся по эллиптическим траекториям (Рисунок 2.4,а), а амплитуда поверхностной волны ослабляется с глубиной (Рисунок 2.4,б).

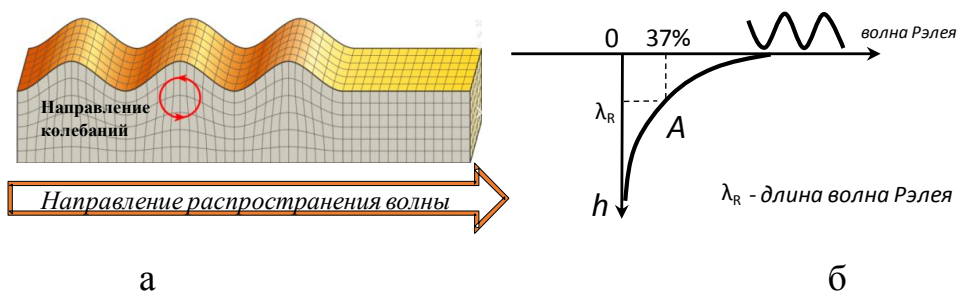


Рисунок 2.4 - Поверхностная волна (а), ослабление амплитуды A поверхностной волны с глубиной h (б)

Приближенная формула для вычисления скорости волны Рэля имеет вид

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \cdot Ct \quad (3)$$

где ν - коэффициент Пуассона, C_t - скорость поперечной волны.

Следует отметить следующие особенности распространения рэлеевских волн, выгодно отличающие их от традиционно используемых при контроле объемных (продольных и поперечных) волн [14].

1. Волна Рэлея существует только в тонком поверхностном слое глубиной $(1 \dots 1,5)\lambda_R$ (λ_R – длина рэлеевской волны) и с увеличением глубины данные волны быстро затухают (рисунок 2.4 б).
2. Волны Рэлея могут распространяться на большие расстояния (порядка 1—2 м) вдоль поверхности твердого тела.
3. Волна Рэлея способна распространяться не только по плоским, но и по искривленным поверхностям, в том числе, по цилиндрическим поверхностям (Рисунок 2.5). На вогнутых участках поверхности волна испытывает дополнительное затухание в результате излучения энергии вглубь изделия. Волны Рэлея используют при контроле деталей всевозможной формы (прутки, трубы, балки, пружины, листы, изделия со сложной поверхностью), а также при контроле труднодоступных мест (внутренние поверхности, технологически отверстия, кромки или канавки).
4. Рэлеевские волны ослабляются вследствие расхождения волнового фронта медленнее, чем объемные, так как в отличие от объемных, распространяются по поверхности материала, не проникая вглубь твердого тела, что является преимуществом при контроле протяжённых объектов, поскольку ультразвуковые рэлеевские волны могут распространяться на большие расстояния, чем продольные и поперечные волны при прочих равных условиях.
5. Благодаря распространению волн Рэлея на большие расстояния ввиду малого затухания возможно проводить дискретное сканирование протяжённых объектов с большим шагом, что минимизирует временные затраты, повышает производительность и позволяет получить ощутимый экономический эффект.
6. Рэлеевские волны чувствительны к микрорельефу поверхности. Такие волны быстро ослабляются при распространении по шероховатым поверхностям, поскольку испытывают многократное рассеяние, однако при хорошей обработке

поверхности могут оказаться очень чувствительными для выявления поверхностных трещин малой глубины и раскрытия. Следует отметить, что рэлеевская волна существенно ослабляется при наличии загрязнений, контактной жидкости, что требует применения специальных мер по удалению загрязнений и излишка контактной жидкости.

7. При резком изменении профиля поверхности волны Рэлея испытывают частичное отражение, частичное прохождение через препятствие и частичную трансформацию в объемные волны. Например, при падении волны на двугранный угол часть энергии волны расходуется на прохождение, часть — на отражение и на трансформацию (Рисунок 2.5,в).

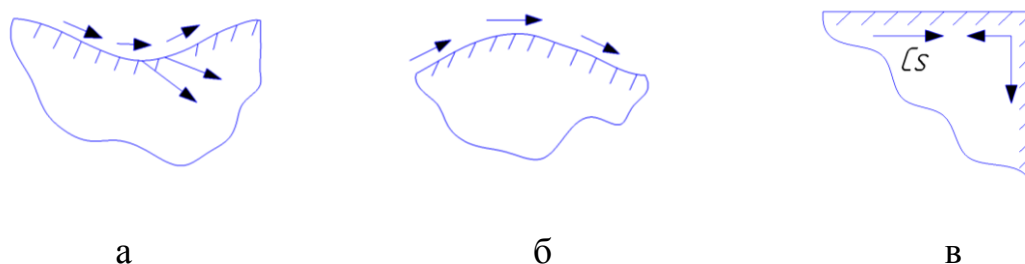


Рисунок 2.5 - Распространение поверхностной волны Рэлея: а — вдоль вогнутой поверхности; б — вдоль выпуклой поверхности; в – через двугранный угол

8. Волны Рэлея могут эффективно применяться для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов глубиной $(1...1,5) \lambda_R$, при этом дефекты, расположенные на поверхности, дают максимальное отражение, а на глубине, превышающей длину волны, практически не выявляются. Предельная глубина залегания выявляемых дефектов может варьироваться посредством изменения рабочей частоты преобразователя.

9. Отражение рэлеевских волн от поверхностных дефектов гораздо больше, чем отражение продольных и поперечных волн от объемных дефектов того же размера, что объясняется различием в формировании фронта для рэлеевских и

объемных волн. Пучок объемных волн в любом направлении всегда шире, поэтому отражается от дефекта такого же размера значительно слабее.

10. При помощи рэлеевских волн выявляются все виды дефектов поверхности изделия: трещины, в том числе, усталостные, царапины поверхности, неровности, пустотные полости, расслоения, инородные включения и т. д. При этом, по мере удаления дефекта от поверхности, их отражательная способность падает экспоненциально при увеличении расстояния от поверхности.

11. С использованием волн Рэлея могут быть реализованы следующие методы УЗ контроля: эхо-импульсный, зеркально-теневой, метод многократной тени.

12. Волны Рэлея могут быть использованы не только для поиска дефектов на поверхности объектов контроля, но и для контроля структуры материала (параметры поверхностно-упрочнённых слоёв, качество термической и химико-термической обработки, состояние поверхности в результате механической обработки, обнаружение остаточных механических напряжений, полученные при изготовлении или в процессе эксплуатации, упругие и прочностные свойства материалов), благодаря наличию связи скорости и затухания рэлеевской волны с механическими и структурными характеристиками поверхностного слоя.

Выводы по главе 2

1. Разработанные методики и специализированное оборудование для их реализации с использованием бесконтактных проходных и накладных электромагнитно-акустических преобразователей рэлеевских и объемных волн обеспечивают воспроизводимость и достоверность методов акустической структуроскопии. Предложенные методики обладают высокой точностью определения скоростей акустических волн, модулей упругости и коэффициента Пуассона.

2. Методика контроля пруткового проката с помощью рэлеевских волн, реализованная на многократной тени с использованием ЭМА-преобразователей,

позволила с высокой точностью определить скорости рэлеевских волн и повысить чувствительность к структурным изменениям.

ГЛАВА 3 АКУСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРОСКОПИЯ ПРУТКОВОГО ПРОКАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЭЛЕЕВСКИХ ВОЛН

Представлено исследование чувствительности методик электромагнитно-акустического (ЭМА) контроля к структурным изменениям образцов пруткового проката, подвергнутых термической обработке, статическому и циклическому воздействию механических напряжений. [20, 70].

Исследованы скорости распространения ультразвуковых волн и коэффициенты Пуассона в прутковом прокате из сталей 40Х, 45 после различных видов и режимов термической обработки. Найдена однозначная связь структурных состояний и твердости со скоростями ультразвуковых волн и коэффициентами Пуассона.

3.1 Влияние термической обработки стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн

Легированная конструкционная сталь 40Х широко используется для изготовления насосных штанг при добыче нефти. Использование неразрушающего контроля прутков-заготовок и насосных штанг дает гарантию эксплуатационной надежности, срока службы глубинно-насосного оборудования, эффективности эксплуатации скважин и снижения уровня технических рисков [40, 46, 56, 105, 106]. Контроль качества прутков-заготовок ведут преимущественно магнитоиндукционными и вихретоковыми методами. Для контроля насосных штанг используют магнитные методы неразрушающего контроля с использованием оборудования фирм-производителей: «Tuboscope Vetco» (США), «Nordson» (США), «Battenfeld» (Австрия), «НТС-Лидер», «Урал-НИТИ», «Инокар» (Россия) [48]. В последние десятилетия на рынке средств неразрушающего контроля насосных штанг и прутков-заготовок появились системы волноводного акустического контроля протяженных объектов – дефектоскопы АДНШ [10, 77, 69].

Металлургические предприятия поставляют на заводы – изготовители насосных штанг прутки, термически обработанные по разным технологиям. При горячей высадке головок насосных штанг в зоне термовлияния галтельного перехода возможно формирование различного структурного состояния. Следует отметить, что на зону вблизи галтельного перехода приходится около 63 % всех отказов насосных штанг в процессе эксплуатации, поэтому контроль структурного состояния является актуальной задачей. С целью предупреждения истирания насосно-компрессорных труб и штанговых муфт в процессе эксплуатации скважин и очистки труб и тела штанг от отложений парафина используются центраторы с посадкой на тело насосных штанг методом высокотемпературной наплавки [43]. Данный способ создает локальное напряженное состояние в данной области, что служит дополнительным источником концентрации напряжений.

В связи с вышеизложенным актуальность разработки методов неразрушающего контроля термической обработки и структурного состояния указанного класса сталей несомненна. Структуроскопия конструкционных материалов располагает большим арсеналом физических методов и средств неразрушающего контроля, основными из которых являются магнитные [26, 51, 89, 90, 91, 99] и акустические методы [130, 137, 138, 22, 59, 100].

Методы акустической структуроскопии успешно применяют для оперативной оценки структуры, анизотропии, упругих и прочностных свойств материалов и изделий благодаря наличию однозначных физических связей между характеристиками ультразвуковых волн (скорость, затухание, структурные шумы) и упругими свойствами материала.

В работах [94, 74] исследовано влияние термической обработки, структурного состояния и твердости прутков из стали 40Х на скорость ультразвуковых объемных и рэлеевских волн и коэффициент Пуассона.

2.1.1 Результаты и анализ акустических исследований стали 40X

Для оценки влияния видов и режимов термической обработки, структурного состояния и твердости стали 40X на скорость распространения акустических волн использовали цилиндрические образцы пруткового проката диаметром 14 мм, длиной 220 мм. Для каждого режима термической обработки подготовлено и испытано по три образца. Виды и режимы термической обработки, микроструктура, твердость исследованных образцов представлены в табл. 6.

Таблица 6 - Термическая обработка, твердость и микроструктура образцов из стали 40X

№ образца	Вид термической обработки	Режимы термической обработки	Твердость НВ	Микроструктура
0	Нормализация	Состояние поставки	275	Перлит пластинчатый, сорбитообразный с полиэдрическим ферритом
1	Отжиг	Нагрев до $855 \pm 5^\circ\text{C}$, 35 мин, охлаждение с печью	255	Перлит пластинчатый, сорбитообразный с полиэдрическим ферритом
2	Закалка	Нагрев до $855 \pm 5^\circ\text{C}$, 35 мин, закалка в масле	539	Мартенсит
3	Закалка, отпуск	Нагрев до $855 \pm 5^\circ\text{C}$, 35 мин, закалка в масле, отпуск $220 \pm 5^\circ\text{C}$, 1 час	516	Отпущенный мартенсит
4	Закалка, отпуск	Нагрев до $855 \pm 5^\circ\text{C}$, 35 мин, закалка в масле, отпуск $320 \pm 5^\circ\text{C}$, 1 час	506	Троостит

Продолжение таблицы 6

5	Закалка, отпуск	Нагрев до $855 \pm 5^\circ\text{C}$, 35 мин, закалка в масле, отпуск $420 \pm 5^\circ\text{C}$, 1 час	468	Мелкодисперсный зернистый сорбит
6	Закалка, отпуск	Нагрев до $855 \pm 5^\circ\text{C}$, 35 мин, закалка в масле, отпуск $570 \pm 5^\circ\text{C}$, 1 час	363	Мелкодисперсный зернистый сорбит

Испытания на твердость выполнены на торцевой и цилиндрической поверхностях образцов с использованием направляющей насадки прибором ТДМ-3.

Полученные значения скоростей объемных и рэлеевской волн по методике в разделе 2.2 позволили определить коэффициент Пуассона среды:

$$v_{II} = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2(C_l^2 - C_t^2)}. \quad (4)$$

$$v_{IR} = \frac{C_R - 0,87C_t}{1,12C_t - C_R}. \quad (5)$$

Необходимая точность определения скорости (0,5 м/с или 0,01%) обеспечивается высокой частотой дискретизации аналого-цифрового преобразования (100 МГц), получением серии многократных отражений и специальными методами обработки осциллограмм (метод корреляционного анализа, спектрального анализа).

Значения скоростей объемных и рэлеевских волн и рассчитанные коэффициенты Пуассона в исследуемых образцах представлены в табл. 7.

Таблица 7 - Скорость объемных и рэлеевских волн, коэффициент Пуассона в исследуемых образцах

№ образца	C_l , м/с	C_b , м/с	C_R , м/с	ν_{ll}	ν_{lR}
0	5941	3251	3062	0,2863	0,2863
1	5950	3257	3071	0,2860	0,2922
2	5882	3193	3015	0,2910	0,3000
3	5875	3188	3016	0,2913	0,3131
4	5909	3215	3029	0,2898	0,2880
5	5912	3218	3040	0,2894	0,3044
6	5919	3232	3049	0,2876	0,2966

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

Связь коэффициентов Пуассона ν_{ll} и ν_{lR} имеет слабую корреляцию ($R^2 = 0,46$), что может свидетельствовать о существенном различии структур на поверхности образца, о которой несет информацию рэлеевская волна, и структур внутри его, получаемых продольными и поперечными волнами (Рисунок 3.1).

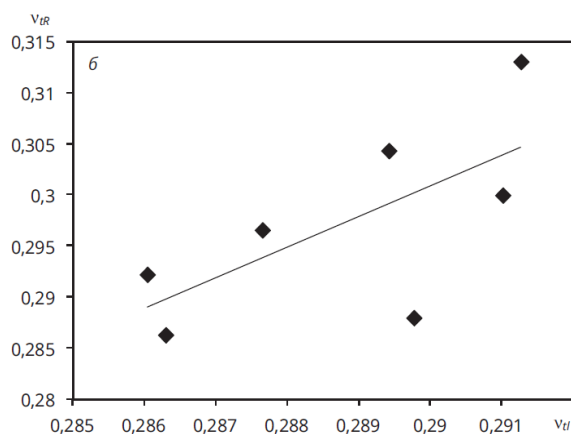


Рисунок 3.1 - Связь коэффициентов Пуассона ν_{tl} и ν_{tr}

На Рисунке 3.2 представлена связь рэлеевской волны с твердостью HB исследованных образцов с коэффициентом корреляции 0,92.

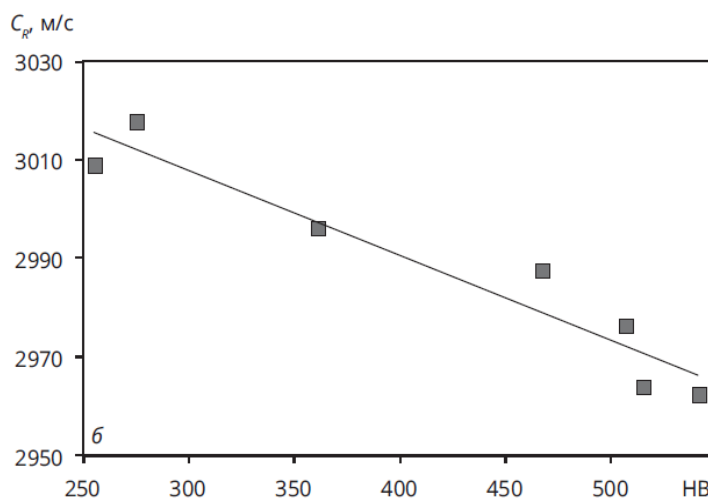


Рисунок 3.2 - Связь скорости рэлеевской волны с твердостью исследованных образцов HB

Корреляционные зависимости скоростей продольных, поперечных и рэлеевских волн и коэффициентов Пуассона с твердостью HB представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Корреляционные зависимости скоростей объемных и рэлеевских волн и коэффициентов Пуассона в исследуемых образцах с твердостью HB

Вид корреляции	Уравнение корреляционной зависимости	Достоверность аппроксимации R^2
C_t и C_l	$C_l = 1,04C_t + 2549$	0,99
C_t и C_R	$C_R = 0,82C_t + 399$	0,99
v_{tl} и v_{tR}	$v_{tR} = 3,0v_{tl} - 0,57$	0,46
C_l и HB	$C_l = -0,21HB + 6000$	0,84
C_t и HB	$C_t = -0,21HB + 3309$	0,90
C_R и HB	$C_R = -0,17HB + 3060$	0,92
$\Delta C_l / C_{lN\#1}$ и HB	$\Delta C_l / C_{lN\#1} = 0,0036HB - 0,858$	0,84
$\Delta C_t / C_{tN\#1}$ и HB	$\Delta C_t / C_{tN\#1} = 0,0064HB - 1,609$	0,90
$\Delta C_R / C_{RN\#1}$ и HB	$\Delta C_R / C_{RN\#1} = 0,0057HB - 1,383$	0,92
$\Delta v_{tl} / v_{tlN\#1}$ и HB	$\Delta v_{tl} / v_{tlN\#1} = -0,0061HB + 1,604$	0,96
$\Delta v_{tR} / v_{tRN\#1}$ и HB	$\Delta v_{tR} / v_{tRN\#1} = -0,0158HB + 4,897$	0,34

Зависимость изменений скоростей волн относительно минимального значения (образец № 1) от твердости показана на Рисунок 3.3, из которого следует, что наиболее чувствительны к изменениям твердости скорости поперечных и рэлеевских волн (коэффициенты аппроксимации 0,9 и 0,92 соответственно).

Относительное изменение коэффициента Пуассона ν_{tl} , рассчитанного по скоростям объемных волн, также имеет высокую степень корреляции, уменьшаясь на 2 % с ростом твердости. В то же время вычисленный по значениям скоростей поперечной и рэлеевской волн коэффициент Пуассона ν_{tR} довольно нестабилен при изменении структурного состояния в области нестабильных структур типа мартенсит и троостит (образцы № 1 и 4).

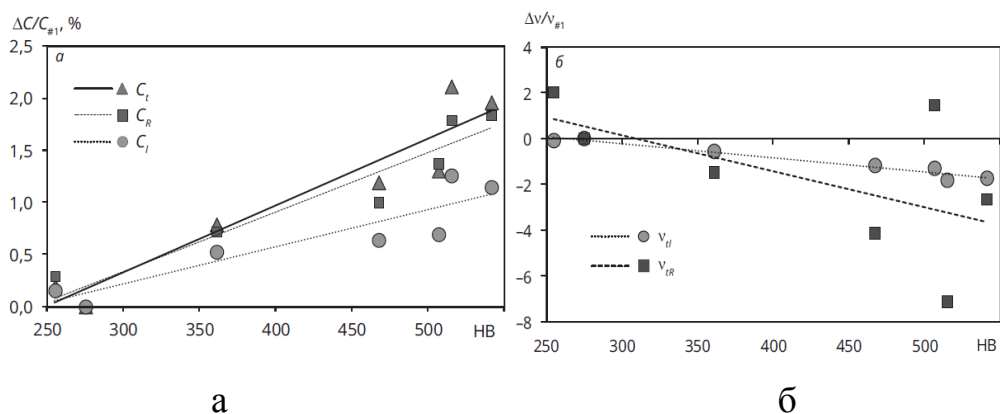


Рисунок 3.3 - Зависимость изменений скоростей продольной, поперечной и рэлеевской волн относительно минимального значения (образец № 1) (а) и относительных изменений коэффициентов Пуассона ν_{tL} и ν_{tR} (б) от твердости исследованных образцов *HB*

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.

По результатам проведенных измерений следует заключить, что рэлеевские волны достаточно информативны к структурному состоянию исследуемой стали. При этом коэффициент Пуассона, рассчитанный по результатам измерений скорости объемных волн, является наиболее структурно-чувствительным и не зависит от изменения диаметра образца.

2.1.2 Структурно-чувствительные акустические характеристики

Проведенные исследования цилиндрических образцов стали 40X акустическим методом показали возможность определения следующих структурно-чувствительных характеристик: абсолютных значений скоростей объемных и рэлеевской волн, коэффициента Пуассона и их изменения в

зависимости от режимов термической обработки, структурного состояния и твердости.

В структуре мартенсита, полученного закалкой, скорость распространения рэлеевской волны имеет минимальное значение 3014 м/с. Для ферритно-перлитных структур скорость рэлеевских волн принимает максимальное значение 3043 м/с.

Коэффициенты Пуассона, рассчитанные из значений скоростей продольной и поперечной волн, имеют высокую степень корреляции с твердостью и структурным состоянием. Слабая корреляция коэффициента Пуассона, рассчитанного по значениям поперечной и рэлеевской волн, может свидетельствовать о существенном различии структур на поверхности образца, о которой несет информацию рэлеевская волна, и структуры внутри его, характеризуемой поперечной волной.

3.2 Структуроскопия термически обработанных прутков из стали 45 по скорости распространения рэлеевских волн

Исследовано влияние разных видов и режимов термической обработки прутков из стали 45 на результаты измерения скорости рэлеевской волны с использованием метода многократной тени. Для обеспечения акустических измерений использован дефектоскоп ДЭМА и специальный накладной ЭМА преобразователь с системой подмагничивания. Преобразователь обеспечивает возбуждение и прием рэлеевских волн распространяющихся по окружности прутка [20].

Исследованы образцы прутков в состояниях поставки, отжига, нормализации, закалки и отпуска. Представлены результаты изменения скорости рэлеевской волны в прутках при всех видах и режимах термической обработки. Влияние режимов термической обработки прутков из стали 45 на скорость рэлеевской волны исследовано электромагнитно-акустическим способом ввода и приема волн.

3.2.1 Образцы и методика измерений

Исследованы образцы прутков в состояниях поставки, отжига, нормализации, закалки и отпуска. Длина прутков – 300 мм, диаметр в области исследования – 14 мм. Методика контроля пруткового проката с помощью рэлеевских волн реализована на многократной тени с использованием ЭМА-преобразователей со специальными системами подмагничивания, обеспечивающих возбуждение и прием волн в прямом и обратном направлениях по окружности сечения прутка (Рисунок 3.4) [23, 98, 112].

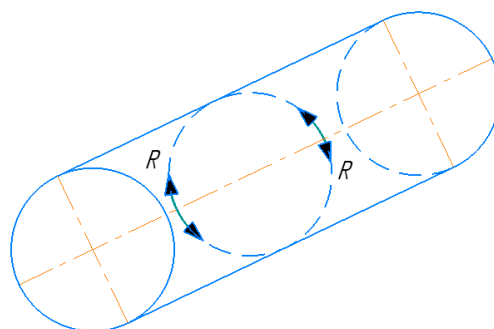


Рисунок 3.4 - Ход лучей рэлеевских волн по окружности сечения прутка

В данной методике использовался дефектоскоп «ДЭМА», который обладает высокой чувствительностью определения параметров для измерения скорости рэлеевской волны.

Скорости распространения рэлеевских волн рассчитываются с учетом времени распространения волн по сечению образцов и измеренных диаметров [20, 12]:

$$C_r = \frac{\pi \cdot d \cdot m}{t_{n+m} - t_n}, \quad (6)$$

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

Исследованию подверглись 9 образцов прутков из среднеуглеродистой стали 45 (Рисунок 3.5), которые прошли разные режимы термической обработки [20, 67, 69, 70].

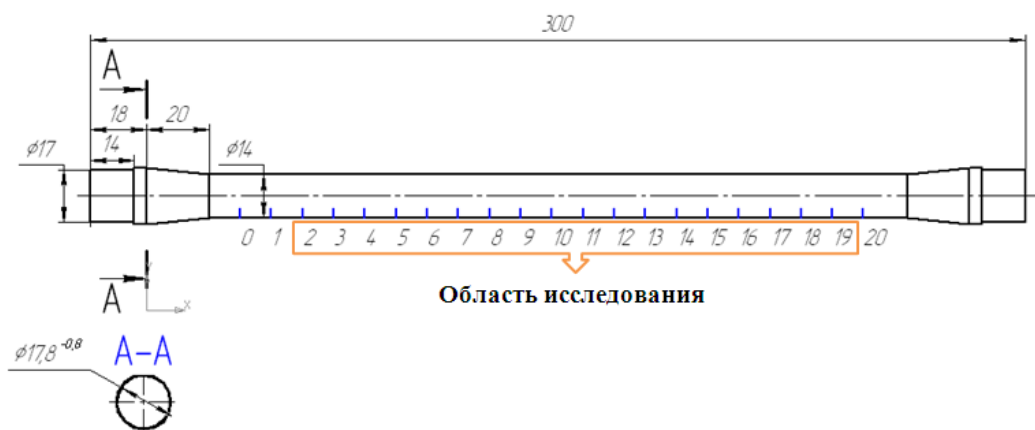


Рисунок 3.5 - Размеры и форма образцов для исследований

Следует отметить, что при распространении по цилиндрической поверхности рэлеевская волна ослабевает за счет радиального переизлучения на выпуклой поверхности и рассеивается из-за шероховатости поверхности [136].

3.2.2 Результаты исследований и анализ

Для качественного измерения скоростей рэлеевских волн, прутки после термической обработки тщательно зачищены от окалины, отполированы. При помощи микрометра с точностью 0,01 мм измерены диаметры образцов по длине рабочей части с шагом 1 см (Рисунок 3.6).

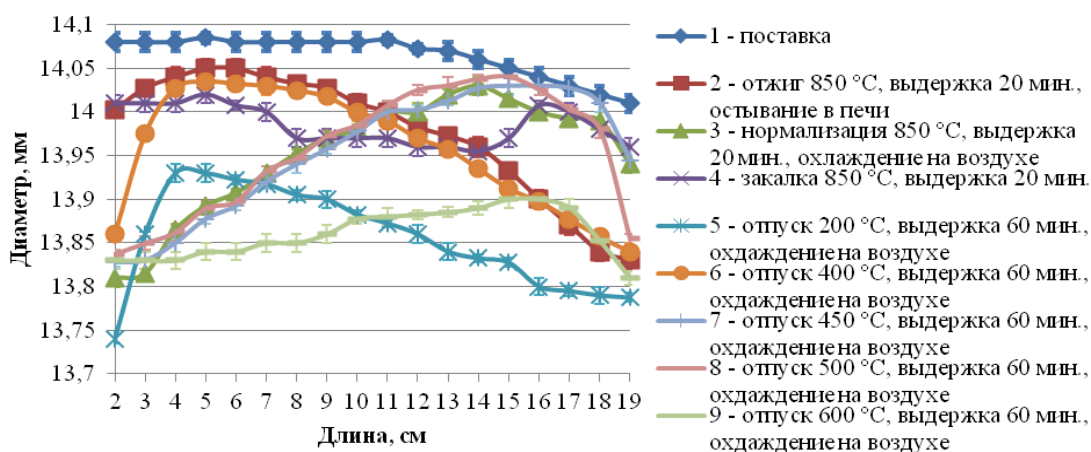


Рисунок 3.6 - Изменение диаметра рабочей части образцов по длине

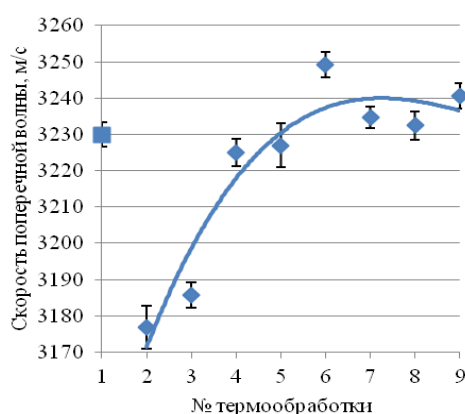
Как видно из графиков, диаметры прутков неравномерны по длине, что связано с неточностью токарной обработки. Колебания диаметров учтены при расчетах скоростей волн. Полученные результаты расчетов скорости волн для исследованных образцов представлены в таблице 9 и на гистограмме (Рисунок 3.7).

Таблица 9 - Термическая обработка, структура, твердость и скорости акустических волн прутков из стали 45

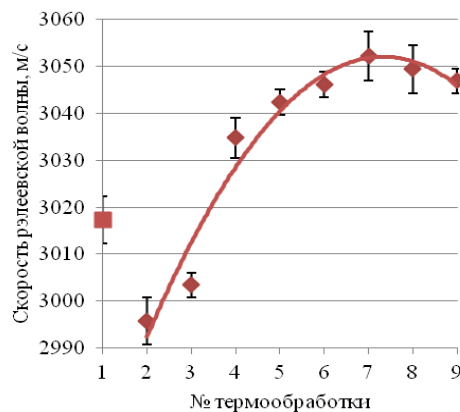
№ образца	Термообработка	Микроструктура	Твердость, HRA	C_L , м/с	C_R , м/с
№1	Состояние поставки	Феррит+перлит	56	3229	3017
№2	закалка в воду 850 °С, выдержка 20мин	Мартенсит	78	3176	2995
№3	отпуск 200 °С, выдержка 60 мин., охлаждение на воздухе	Мартенсит отпуска	78	3185	3003
№4	отпуск 400 °С, выдержка 60 мин., охлаждение на воздухе	Троостит отпуска	64	3225	3034
№5	отпуск 450 °С, выдержка 60 мин., охлаждение на воздухе	Троостит отпуска	61	3226	3042
№6	отпуск 500 °С, выдержка 60 мин., охлаждение на воздухе	Сорбит отпуска	56	3249	3046

Продолжение таблицы 9

№ образца	Термообработка	Микроструктура	Твердость, HRA	Ct, м/с	CR, м/с
№7	отпуск 600 °С, выдержка 60 мин., охлаждение на воздухе	Сорбит отпуска	53	3234	3052
№8	нормализация 850 °С, выдержка 20 мин., охлаждение на воздухе	Феррит+перлит	51	3232	3049
№9	отжиг 850°С, выдержка 20 мин, остывание в печи	Феррит+перлит	45	3240	3046

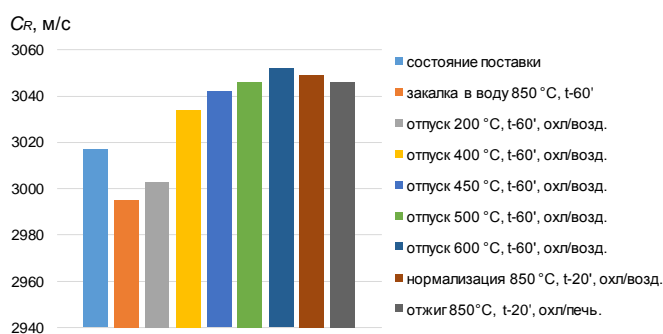


а

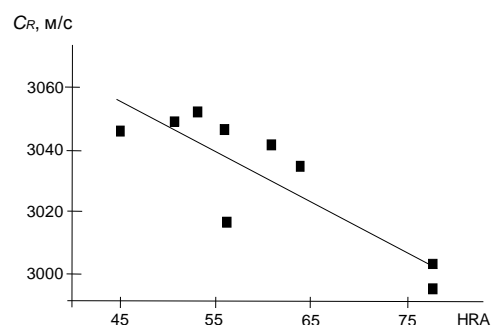


б

Рисунок 3.7 - Изменения скоростей поперечных (а), рэлеевских (б) волн в прутках в зоне максимальных напряжений в зависимости от вида термообработки



а



б

Рисунок 3.8 - Изменение скорости рэлеевской волны в зависимости от видов и режимов термической обработки стали 45 (а), твердости (б)

Полученные данные подтверждают результаты исследования влияния термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках [20]:

- 1) При нормализации скорость рэлеевской волны увеличивается;
- 2) Закалка максимально снижает скорость волны;
- 3) Увеличение температуры отпуска приводит также к росту скорости волны.

Отличием являются результаты измерений для образца с отжигом, в котором наблюдается снижение скорости рэлеевской волны. Причиной является присутствие остаточной окалины (Рисунок 3.9) на поверхности образца в результате длительного нахождения в атмосфере печи. Наличие окалины повлияло на измерения времени распространения рэлеевской волны, поскольку качество обработки поверхностей контролируемых объектов является мешающим фактором [87].



Рисунок 3.9 - Пруток с остаточной окалиной (а), пруток без остаточной окалины (б)

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 600°C имеют похожие результаты по скорости рэлеевских волн. Скорость распространения рэлеевской волны относительно закаленного состояния увеличилась на 57 м/с и достигла до 3052 м/с при температуре отпуска 600°C.

По результатам, полученным при исследовании влияния термической обработки на скорость распространения рэлеевских волн в стальных прутках [63, 64], 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.

Использование в качестве информативных параметров скорости распространения рэлеевских волн позволяет получать информацию о поверхностном слое объекта контроля.

В состоянии поставки скорость рэлеевской волны в прутке составила 3017 м/с. Скорость рэлеевской волны в прутке после закалки упала до 2995 м/с. После нормализации скорость рэлеевской волны увеличилась до 3049 м/с. Полученные экспериментальные данные показывают, что отпуск и нормализация увеличивают скорость распространения рэлеевской волны в прутке на 57 м/с относительно закалки без отпуска.

Методика контроля пруткового проката с помощью рэлеевских волн, реализованная на многократной тени с использованием ЭМА-преобразователей, позволила с высокой точностью определить скорости рэлеевских волн и повысить чувствительность к структурным изменениям.

3.3 Акустическая структуроскопия прутков из стали 40Х, нагруженных изгибом с вращением

С особой остротой стоит вопрос об обследовании металлических конструкций, транспортного и энергетического металла, деталей подвижного состава и машиностроения с целью диагностики усталостных повреждений и установления их ресурса. Используемые в настоящее время методы и приборы дефектоскопии имеют существенные ограничения для решения такого рода задач, поскольку не

позволяют выявлять стадию накопления дефектности - накопление микропор и микротрещин [34, 63].

Предлагаемый метод для исследований акустических характеристик и свойств материала прутков позволяет с высокой точностью измерять акустические параметры за счет использования различных типов волн [80, 82]. Информационно – измерительная система возбуждения, регистрации и измерения параметров акустических волн в высокочастотной области (0,5 – 10 МГц) с использованием бесконтактных электромагнитно–акустических (ЭМА) преобразователей позволяет учесть качество акустического контакта и за счет отсутствия потерь на границе «преобразователь – объект контроля» получить серию многократных отражений, и, следовательно, повысить точность измерения параметров скорости и затухания акустических волн. Кроме этого, ЭМА–преобразователи позволяют возбуждать и надежно регистрировать УЗ импульсы разных типов волн, ориентации и поляризации (продольных и сдвиговых радиальных направлений осевой и радиальной поляризации и поверхностных волн [73]), что позволяет реализовать многопараметровые методики оценки упругих модулей; методики оценки структурных изменений и накопления микродефектности в процессе нагружения по установленным зависимостям с измеряемыми характеристикам акустических волн [8, 133, 17, 91].

При контроле пруткового проката и изделий из него предлагается использовать проходные электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи, основное преимущество которых – бесконтактность, позволяющая получать серию многократных отражений по диаметру прутка, что позволяет с высокой точностью измерять скорость ультразвука [60, 62, 73, 75, 76].

С целью исследования влияния деструктуризации металла прутков на скорость сдвиговых и рэлеевских волн образцы из стали 40Х подвергли циклическому нагружению по схеме консольного изгиба с вращением.

3.3.1 Образцы и методика измерений

Для испытаний использованы 4 прутка из стали 40Х в состоянии поставки и после отжига при 700°С в течение 30 мин. Длина прутков – 250–270 мм, диаметры – 10 и 19 мм, измерены с помощью цифрового штангенциркуля, с погрешностью 0,01 мм. Плечо нагрузки – 120 мм. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ для прутков из этой стали в состоянии поставки 780 МПа, предел выносливости σ_{-1} – 380 МПа, шероховатость поверхности Rz 4 мкм, контроль которой в процессе испытаний велся профилометром Surface Roughness Tester Rz: диапазон 0.1–50 мкм, с погрешностью: $\pm 7\%$.

Циклические нагружения консольным изгибом с вращением прутков обеспечивались с помощью специально разработанной установки для испытаний на усталость, схема которой представлена на Рисунок 3.10 а. Образец 1, закрепленный в патроне 2 машины для испытаний, вращался со скоростью 500 оборотов в минуту. На другом конце образца установлен подшипник 3, через который передается поперечная сила P , изгибающая образец. При вращении образца в его поверхностных и подповерхностных слоях согласно эпюре напряжений (Рисунок 3.10 б) возникают попеременно растягивающие и сжимающие напряжения (симметричный цикл). Через определенное число циклов процесс испытаний останавливают и проводят измерения. При достижении необратимых изменений в структуре образца в зависимости от числа циклов и силы P циклическое нагружение приведет к разрушению образца, после чего фиксируется число циклов (число оборотов).

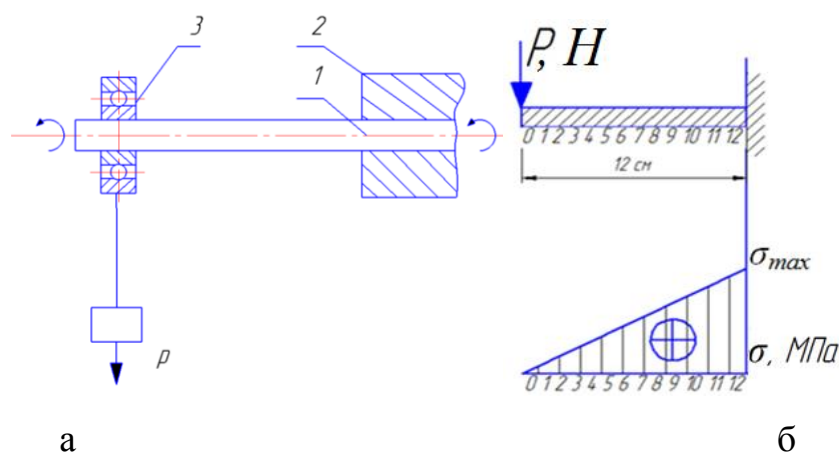


Рисунок 3.10 - Схема испытания образцов на усталость (а), эпюра напряжений (б)

Измерения проведены с помощью ЭМА зеркально–теневое метода многократных отражений сдвиговых волн, распространяющихся во всех радиальных направлениях поперечного сечения прутка, и рэлеевских волн, огибающих цилиндрическую поверхность. Метод осуществлен при помощи электромагнитно – акустического дефектоскопа (ДЭМА), обладающего высокой чувствительностью к внутренним и поверхностным дефектам (десятые доли от длины акустической волны), и дополнительными информативными параметрами для определения скорости, затухания, эффективности ЭМА преобразования.

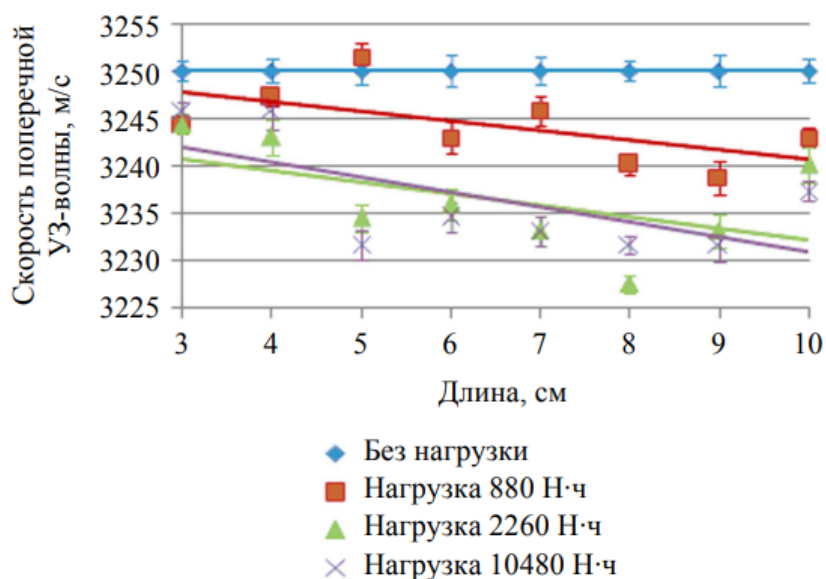
Дефектоскоп оснащен проходным ЭМА преобразователем сдвиговых волн и накладным для измерения рэлеевских волн, обеспечивающие излучение волн по сечению прутка и получение серии многократных отражений [87, 113]. Скорость ультразвуковых сдвиговых волн можно определить с погрешностью до 2 м/с, а рэлеевских до 5 м/с. В ходе циклических испытаний осуществлялась проверка состояния поверхности прутков с помощью микроскопа Levenhuk 5ST при 40 кратном увеличении. Для анализа скоростей сдвиговых и рэлеевских волн в прутках использовано программное обеспечение ПРИНЦ [112]

3.3.2 Результаты исследований и анализ

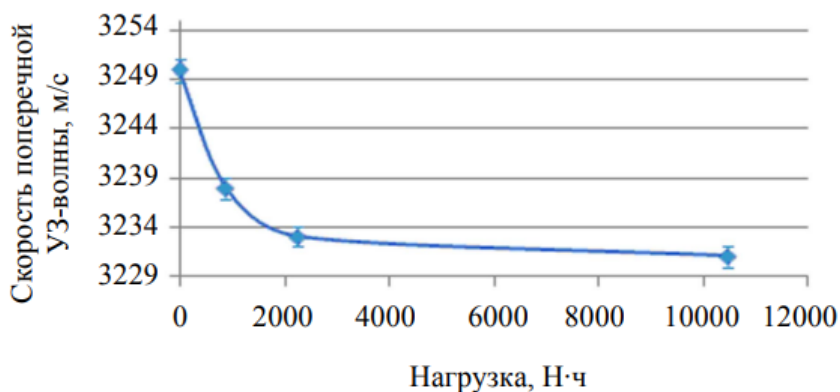
В эксперименте представлены результаты измерений скорости ультразвуковых волн с анализом времени прихода импульсов многократных отражений и с использованием корреляционной функции. [62, 71].

Применены 2 типа нагрузок: 1) с увеличением числа циклов и одновременным ростом нагрузки P ($H \times \text{час}$); 2) с увеличением числа циклов N при постоянной нагрузке P .

На Рисунок 3.11 показано распределение скорости сдвиговой волны в прутке из стали 40Х диаметром 19 мм при разных уровнях консольной нагрузки и разном числе циклов нагрузки. По распределению скорости сдвиговой волны в прутке видно, что наиболее значительное ее изменение происходит в зоне максимальных напряжений – в области консольного зажима прутка (в зоне 9...10 см графика). Уменьшение скорости сдвиговой волны более значительно с ростом нагрузки и числа циклов, а в диапазоне нагрузок 0...12000 ($H \cdot \text{ч}$) составило 20 м/с.



а



б

Рисунок 3.11 - Влияние числа циклов и нагрузок на скорость распространения сдвиговой волны: а – по длине прутка; б – в зоне максимальных напряжений

Оценку влияния числа циклических нагрузок (без изменения величины консольной силы) на скорость распространения сдвиговой волны в прутках диаметром 10 мм из стали марки 40Х провели при двух нагрузках (300 и 460 Н) в зоне максимальных напряжений на уровне $0,4$ и $0,6\sigma_{0,2}$, соответственно, 366 и 562 МПа. Скорость рэлеевских, сдвиговых волн измерялась периодически по мере возрастания числа наработанных циклов. При каждом уровне нагрузки испытывали по два прутка: в состоянии поставки и после отжига при температуре 700°C с выдержкой 30 мин. (Рисунок 3.12).

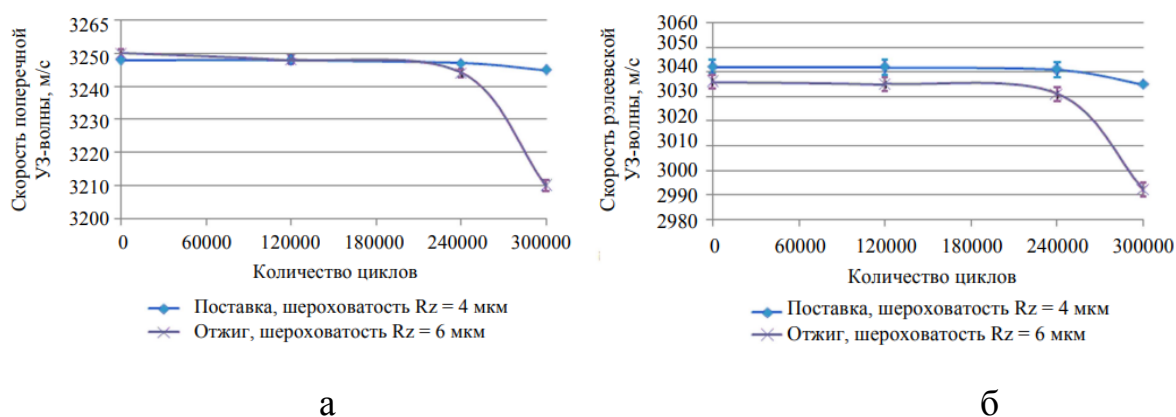


Рисунок 3.12 - Изменение скоростей упругих волн в прутках в зоне максимальных напряжений: а – сдвиговой; б – рэлеевской

По результатам циклических испытаний наблюдается падение скоростей волн после 240000 циклов наработки. Для отожженных прутков скорость сдвиговой волны падает на 40 м/с (Рисунок 3.12,а), а рэлеевской – на 45 м/с (Рисунок 3.12,б), что свидетельствует о значительных структурных изменениях в металле прутков. По распределению скорости сдвиговой волны в прутке видно, что наиболее значительное ее изменение происходит в зоне максимальных напряжений – в области консольного зажима прутка. Уменьшение скорости сдвиговой волны в диапазоне нагрузок до 13000 Н·ч составило 20 м/с. Очевидно, подобный характер зависимости очень привлекателен для диагностирования состояния материала в изделиях, эксплуатируемых в условиях циклического нагружения.

Коэффициент Пуассона является величиной отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению, характеризует упругие свойства материала, его способность к поперечным деформациям. Изменение коэффициента Пуассона в процессе циклических испытаний рассчитали по результатам измерений сдвиговой и рэлеевской волн по следующей формуле [114]:

$$\nu = \frac{0,87 \cdot C_t - C_r}{C_r - 1,12 \cdot C_t} \quad (7)$$

По построенным зависимостям (Рисунок 3.13) видно, что пруток в состоянии отжига более склонен к поперечным деформациям, при этом после 240000 циклов коэффициент Пуассона существенно уменьшается от 0,375 до 0,365 что свидетельствует о деструктуризации металла.

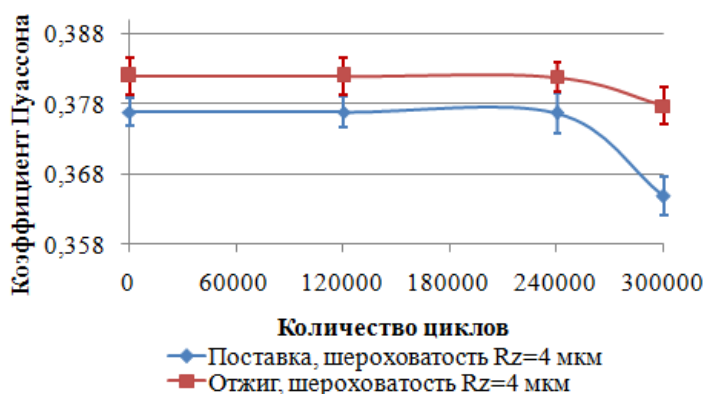


Рисунок 3.13 - Изменение коэффициента Пуассона под влиянием циклических нагрузок прутков в зонах максимальных напряжений

Следует отметить, что экспериментально измеренные значения скорости рэлеевской волны по огибающей прутка и рассчитанные коэффициенты Пуассона имеют завышенные значения в сравнении с табличными, что обусловлено известной зависимостью скорости рэлеевской волны от радиуса кривизны поверхности, по которой она распространяется [114]. При этом относительное изменение указанных величин будет иметь одинаковый характер для образцов любых диаметров.

Реализован электромагнитно–акустический метод контроля на многократных отражениях, позволяющий существенно повысить чувствительность к структурным изменениям при диагностировании момента зарождения усталостных трещин в цилиндрических деталях машин на основе

анализа сигнала на дальних отражениях и обеспечить высокую точность определения скорости волн.

Экспериментально показано влияние числа и уровня циклических нагрузок при консольном изгибе вращающихся прутков на скорость распространения сдвиговой и рэлеевской волн. Наиболее существенное уменьшение скорости волн наблюдается в зоне максимальных напряжений вблизи консольного зажима прутка. При росте нагрузок и числа циклов после 240000 циклов наработки уменьшается скорость распространения сдвиговой и рэлеевской волн, наиболее значительное снижение наблюдается для отожженных прутков соответственно на 40 м/с и 45 м/с.

Для прутка подвергнутого отжигу коэффициент Пуассона в процессе циклических испытаний уменьшается после 240000 циклов от 0,375 до 0,365, что свидетельствует о деструктуризации металла.

Выводы по главе 3

1. Проведенные исследования цилиндрических образцов стали 40X акустическим методом показали возможность определения следующих структурно-чувствительных характеристик: абсолютных значений скоростей продольной, поперечной и рэлеевской волн, коэффициента Пуассона и их изменения в зависимости от режимов термической обработки, структурного состояния и твердости.
2. Полученные экспериментальные данные показывают, что рост температуры отпуска и отжиг приводят к увеличению скорости поперечных и рэлеевских волн в стальных прутках 40X. В структуре мартенсита, полученного закалкой, скорость распространения рэлеевской волны имеет минимальное значение - 3014 м/с. Для ферритно-перлитных структур скорость рэлеевских волн принимает максимальные значения - 3043 м/с.
3. Экспериментально показано влияние числа и уровня циклических нагрузок при консольном изгибе вращающихся прутков из стали 40X на скорость

распространения сдвиговой и рэлеевской волн. Наиболее существенное уменьшение скорости волн наблюдается в зоне максимальных напряжений вблизи консольного зажима прутка. При росте нагрузок и числа циклов после 240000 циклов наработки уменьшается скорость распространения сдвиговой и рэлеевской волн, наиболее значительное снижение наблюдается для отожденных прутков, соответственно, на 40 и 45 м/с. Коэффициент Пуассона для прутка из стали 40Х, подверженного отжигу, в процессе циклических испытаний уменьшается после 240000 циклов от 0,375 до 0,365, что свидетельствует о деструктуризации металла.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН С ДЕФЕКТАМИ ТРУБ

Представлен анализ выявляемости дефектов в насосно-компрессорных трубах и муфтах различными методами неразрушающего контроля. Используются методы вихретокового, магнитного, феррозондового и ультразвукового контроля.

4.1 Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени при контроле труб нефтяного сортамента

Для уменьшения влияния качества акустического контакта на результаты контроля возбуждение и прием рэлеевских волн в многократно-теневом методе обеспечен электромагнитно-акустическим способом. Введен показатель выявляемости дефекта данного типа, определяемый соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Обоснованы информативные параметры акустического метода, обеспечивающие контроль всей муфты за счет однократной установки преобразователя в отличие от вихретокового, магнитного, феррозондовых методов контроля.

4.1.1 Оборудование, методика и объекты контроля

Исследование чувствительности ЭМА способа возбуждения и приема рэлеевских волн к искусственным и естественным поверхностным и приповерхностным дефектам заготовок для производства бурильных труб выполнено в двух частотных диапазонах. Обеспечен поиск чувствительных информативных параметров и обоснованы критерии браковки метода [31, 84, 76].

При исследованиях использован метод многократной тени, реализованный с использованием структуроскопа СЭМА, структурная схема и фото которого

представлено на Рисунок 4.1. Специализированный накладной ЭМА-преобразователь 1 обеспечивает бесконтактное возбуждение и прием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях (Рисунок 4.1,а). ЭМА-преобразователь имеет два канала (А и В), работающие на частотах 1 МГц и 500 кГц, что позволяет обнаруживать дефекты, расположенные в пределах длины рэлеевской волны - на глубинах до 3 мм и 6 мм соответственно.

С целью исключения на результаты контроля ориентации преобразователя относительно образующей для повышения достоверности результатов прозвучивания разработана роботизированная подвижная платформа, обеспечивающая поступательное пошаговое сканирование ЭМА-преобразователем по образующей заготовки. Для передвижения используется колесная платформа с регулируемым винтом и шарнирным захватным механизмом. Для обеспечения точности перемещения в качестве привода использованы два шаговых двигателя (по одному на каждое крыло механизма захвата), сообщающиеся с ведущими колесами посредством ременной зубчатой передачи с передаточным числом ведущей и ведомой шестерней 1:1. Точность шагового двигателя оставляет 200 шагов на оборот вала. Использование драйвера позволяет повысить точность за счет дробления шага 1/16.

Основные технические характеристики роботизированной подвижной платформы ЭМА-преобразователя рэлеевских волн сведены в таблицу 10.

Таблица 10 - Основные технические характеристики роботизированной подвижной платформы ЭМА-преобразователя

Параметр	Значение
Усилие на сдвиг системы ЭМА-преобразователя при действии магнитного поля, Н	50
Точность перемещения на заданное расстояние	± 1 мм

Продолжение таблицы 10

Параметр	Значение
Шаговый двигатель ST57-56: - типоразмер двигателя - крутящий момент - рабочий ток	Nema 23 1,3 Н·м 3А
Драйвер ТВ6404: - максимальный рабочий ток - количество шагов на 1 мм пути	5 А 19,6
Питание - ток - напряжение	6 А 24 В
Микроконтроллер Microchip Atmega-328P Функции: - вывод данных на дисплей - подача прямоугольных импульсов на драйвер шагового двигателя - постоянный опрос клавиатуры	
Язык программирования микроконтроллера	C++

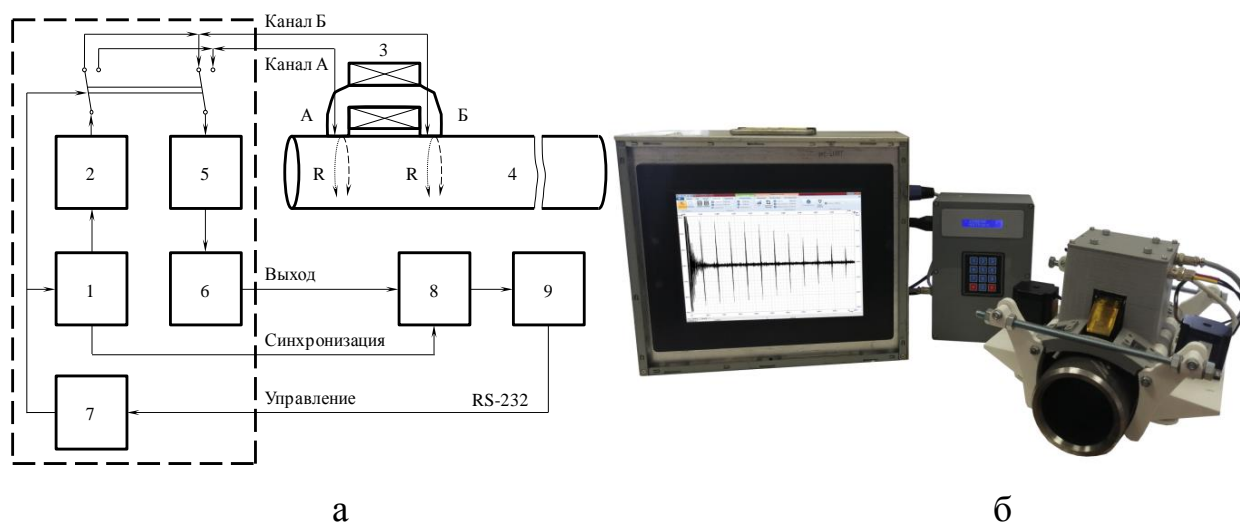
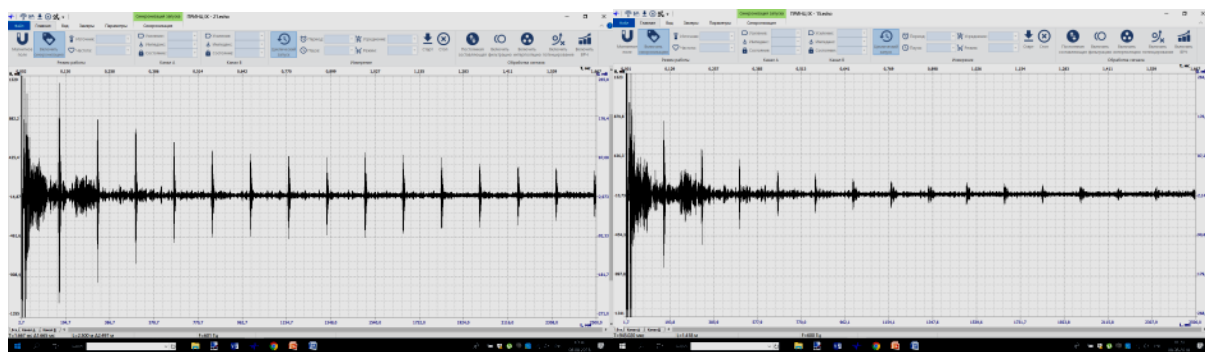


Рисунок 4.1 - Структурная схема (а), фото экспериментальной установки с роботизированной платформой ЭМА-преобразователя рэлеевских волн (в): 1 – генератор синхроимпульсов, 2 – генератор зондирующих импульсов, 3 – накладной двухканальный ЭМА-преобразователь с роботизированной подвижной платформой, 4 – исследуемый образец заготовки, 5 – полосовой фильтр, 6 – высокочастотный усилитель, 7 – плата управления генератором синхроимпульсов и каналами, 8 – аналого-цифровой преобразователь, 9 – персональный компьютер с программным обеспечением ПРИНЦ VIII

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 (Рисунок 4.2,а). Серии характеризуются увеличением затухания в серии импульсов и соответственно сокращением времени реверберации для дефектных областей объекта (Рисунок 4.2,б)., 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 [152] и рассеяния на шероховатостях поверхности.



а

б

Рисунок 4.2 - Эхограммы рэлеевских волн: а – бездефектная область, б – область с искусственным дефектом

Зеркально-теневой метод (ЗТМ), основанный на анализе уменьшения амплитуды донного сигнала, дважды прошедшего через объект контроля при наличии дефекта, принято описывать коэффициентом выявляемости:

$$K_d = U_d / U_0, \quad (8)$$

где U_d и U_0 - амплитуды донных импульсов соответственно при наличии дефекта и при его отсутствии.

При реализации теневого метода на многократных отражениях, предлагается ввести понятие многократного коэффициента выявляемости K_{Nd} , основанного на сравнении относительных амплитуд импульсов, регистрируемых при каждом прохождении по огибающей прутка, 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:

$$K_{Nd} = \sum_{n=1}^N K_{nd} = \sum_{n=1}^N (U_n - U_{n0}) / U_{n0}, \quad (9)$$

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

U_{n0} - значение амплитуды импульса при каждом n -м прохождении для исследуемого объекта.

Количество N анализируемых импульсов ограничивается слева (малые значения N) наличием мертвой зоны (особенно при прозвучивании малых диаметров), и справа (большие N), где отношение сигнал/шум невелико. Значение K_{Nd} не может превышать общее количество анализируемых эхо-импульсов; может принимать значение выше 0 для дефектных областей объекта (максимальное значение – соответствует наиболее дефектному участку); может принимать отрицательные значения, если в измеренном сигнале значения U_n превышают опорное U_{n0} .

Анализировались также вероятностно-статистические характеристики серии импульсов многократных отражений, представляемых в виде последовательности отсчетов $\{x_k, k=0, \dots, K-1\}$:

- математическое ожидание m

$$m = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} x_k, \quad (10)$$

- дисперсия D

$$D = \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} (x_k - m_x)^2, \quad (11)$$

- асимметрия S

$$S = \frac{1}{K \cdot \sigma^3} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} (x_k - m)^3, \quad (12)$$

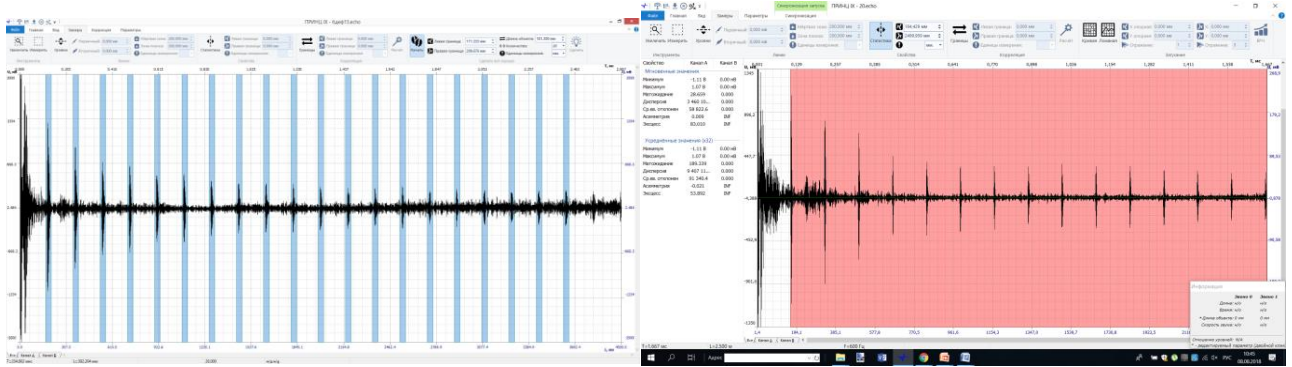
- эксцесс E

$$E = \frac{1}{N \cdot \sigma^4} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} (x_n - m)^4 - 3, \quad (13)$$

где K - количество данных в массиве x_n (определяется диаметром объекта и числом анализируемых отражений).

Вероятностно-статистические характеристики и многократный коэффициент выявляемости рассчитаны в специализированном программном обеспечении ПРИНЦ VIII [114] (Рисунок 4.3). Во избежание влияния на

результаты анализа зондирующего импульса, соответствующий ему интервал времени (0 – 0,1 мс) удалялся из анализируемого массива. Анализу подлежал интервал времени от 0,1 мс до 2,2 мс, соответствующий серии из 20 импульсов для объекта диаметром 102 мм.



а

б

Рисунок 4.3 - Расчет информативных параметров в специализированной программе ПРИНЦ: а – коэффициент выявляемости, б – вероятностно-статистические характеристики

С целью оценки чувствительности каждой из статистической характеристик к дефекту рассчитано ее относительное отклонение для зоны с дефектом C_d от среднего значения \bar{C}_0 для бездефектного участка образца, пронормированное на величину \bar{C}_0 :

$$S_c = \frac{C_d - \bar{C}_0}{\bar{C}_0}, \quad (14)$$

где S_c - нормированное значение отклонения вероятностно-статистической характеристики.

4.1.2 Результаты исследований и анализ

Разработанная аппаратура, методика и алгоритмы обработки сигналов апробированы на реальных объектах в виде труб диаметрами в диапазоне 102 -

114 мм, сталь 40 ХГМА, используемых в качестве заготовок для производства бурильных труб на ООО «ПКНМ-Урал». Исследования проводились на участках заготовок с естественными дефектами, забракованными по результатам иммерсионного ультразвукового контроля с использованием поперечных волн на предприятии (таблица 11).

Таблица 11 - Результаты иммерсионного УЗК

№ образца	Диаметр внешний, внутренний / длина, мм	Заключение УЗК на предприятии
1	Ø102 / 8300	<p>продольные подповерхностные дефекты:</p> <p>Зона I (расстояние 2690 мм от торца), УЗД - 50% от уровня браковки</p> <p>Зона II (3350 мм от торца), УЗД - 75% от уровня браковки</p>
2	Ø102 / 8300	<p>продольный подповерхностный дефект на расстоянии 990 мм от торца протяженностью 25 мм глубиной 9 мм</p>
3	Ø114, Ø51 / 8300	<p>продольные подповерхностные дефекты: Зона I (расстояние 470 мм от торца), УЗД - 10% от уровня браковки</p> <p>Зона II (расстояние 850 мм от торца, глубиной 5,2 мм и протяженностью 45 мм), УЗД - 25% от уровня браковки</p> <p>Зона III (расстояние 1410 мм глубиной 4,5 мм и протяженностью 30 мм), УЗД - 40% от уровня браковки</p> <p>Зона IV (расстояние 1520 мм от торца), УЗД - 10% от уровня браковки</p>

Сканирование производилось вдоль образующей объекта с шагом 10 мм (координата L) согласно разметке (Рисунок 4.4). С целью получения опорного сигнала и оценки влияния мешающих факторов на результаты контроля, сканировалась также бездефектная область объекта.



Рисунок 4.4 - Фото разметки, области сканирования и результатов УЗК дефектной зоны II образца №1 (а), дефектной зоны III образца №3 (б)

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 30x1x2,3 мм; вдоль образующей цилиндра с размерами 53x1x2,3 мм.

Результаты оценки чувствительности наиболее информативных характеристик сигналов на СОП с частотой 1 МГц представлены в таблице 12.

Таблица 12 - 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. Анализ вероятностно-статистических характеристик показывает, что математическое ожидание не коррелирует с наличием искусственных дефектов в СОП. Характеристики дисперсии (среднеквадратического отклонения) имеют тенденцию к уменьшению в сравнении с бездефектной областью. При этом наибольшее уменьшение наблюдается для искусственного дефекта, ориентированного перпендикулярно направлению распространения волны (по образующей прутка).

Наблюдается также резкое уменьшение характеристики асимметрии и эксцесса для продольного дефекта с уходом в отрицательную область. Для поперечного дефекта имеет место резкое уменьшение до нуля характеристики асимметрии, а параметр эксцесс несколько ниже среднего уровня бездефектной области. Совместное использование параметров дисперсии, асимметрии и эксцесса позволяет определить преимущественную ориентацию выявленного дефекта. На частоте 500 кГц чувствительность указанных характеристик ухудшается, что объясняется большей глубиной проникновения рэлеевской волны в сравнении с глубиной искусственных дефектов.

В качестве примера на Рисунок 4.5 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} . Рисунок 4.5 иллюстрирует 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, отклонениями по зазору отображается на графиках в виде доверительного интервала (среднеквадратического отклонения), выделенного сплошными линиями. Маркерами на графиках показаны результаты сканирования зон с дефектами. Полагается, что при двукратном превышении коэффициентом выявляемости значения СКО для бездефектной области, возможно уверенное выявление дефектов на фоне мешающих факторов.

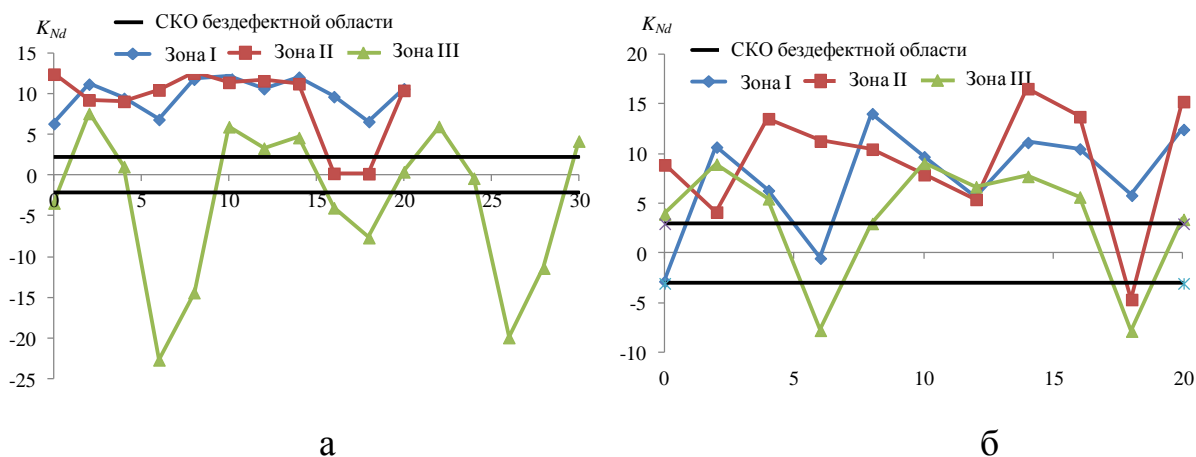


Рисунок 4.5 - Графики значений коэффициента выявляемости K_{Nd} от координаты L в зонах сканирования образца №3 на частотах 500 кГц (а) и 1000 кГц (б)

Как следует из Рисунок 4.5 максимальное значение коэффициента выявляемости имеет место для зоны II объекта и составляет 12,6 на частоте 500 кГц и 16,6 на частоте 1 МГц. 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.

Рисунок 4.6 иллюстрирует изменение параметра «дисперсия» в процессе сканирования бездефектной области и областей с дефектами для образца №3. Расчет показывает, что чувствительность параметра «дисперсия» S_D к дефекту находится в диапазоне 0,977 – 0,999, что также существенно превышает значения для СОП с искусственными дефектами.

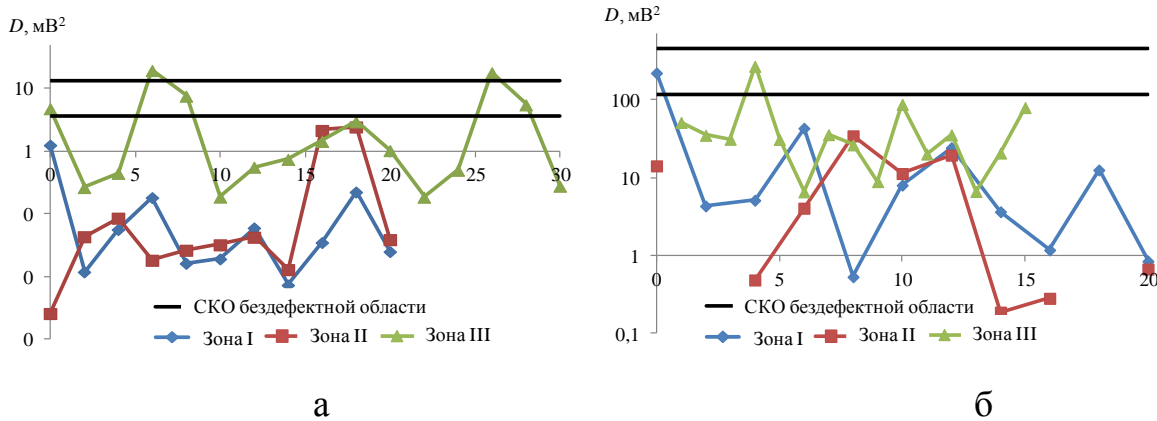


Рисунок 4.6 - Вероятностно-статистическая характеристика «дисперсия» в зонах сканирования образца №3 на частоте 500 кГц (а), 1000 кГц (б)

Сводные зависимости нормированных отклонений S_c вероятностно-статистических характеристик и коэффициента выявляемости от средних значений для бездефектной области зоны II образца №3 на частотах 500 кГц и 1 МГц представлены на Рисунок 4.7. Значение отклонения $S_c \leq 0$ соответствует бездефектной области. Очевидно, что наибольшее согласование между собой имеют параметры «коэффициент выявляемости» и «дисперсия», а также параметры «асимметрия» и «эксцесс». Значение параметра «асимметрия» на частоте 1 МГц выходит за пределы бездефектной области практически во всем диапазоне сканирования за исключением области 9 - 13 см. Похожая картина

наблюдается в поведении параметра «эксцесс». Статистические параметры S_x и E_x могут служить дополнительными информативными признаками при дефектоскопии с использованием рэлеевских волн.

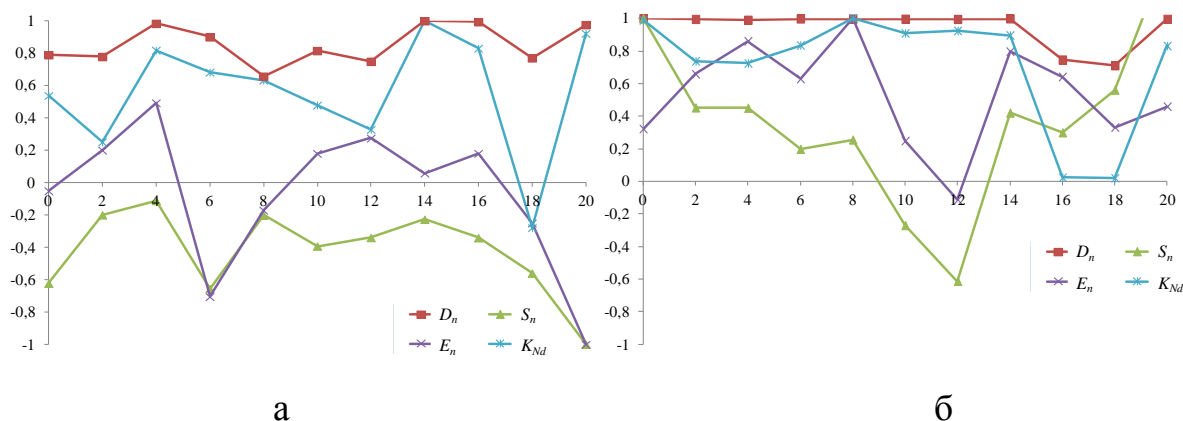


Рисунок 4.7 - Вероятностно-статистические характеристики и коэффициент выявляемости, пронормированные относительно максимального значения, в зоне II сканирования образца №3 на частотах 500 кГц (а), 1 МГц (б)

В таблице 13 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 13 - Результаты контроля рэлеевскими волнами

№ образца, Зона,		Результаты контроля рэлеевскими волнами			
		Координаты дефекта L, см		Коэффициент 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 уверенно 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	8,9	12,6
		4-8		13,6	
		14-16		16,6	
		20		15,3	
Зоны III и IV	2	2	9	7,6	
	10	10	9,1	6	

Таким образом, 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 и вероятностных характеристик дисперсии, асимметрии, эксцесса при анализе серии многократных отражений.

Метод обеспечивает выявление дефектов в поверхностной и приповерхностной зонах на глубине, не превышающей длины волны на заданной частоте.

К существенным достоинствам предлагаемой методики следует отнести:

- более высокая производительность контроля за счет необходимости сканирования только по образующей объекта в сравнении с ультразвуковым эхо-методом, требующим поступательно-вращательного сканирования.
- повышение достоверности и воспроизводимости результатов контроля за счет отстройки от качества акустического контакта благодаря использованию бесконтактного ЭМА-способа возбуждения – приема и роботизированной подвижной платформы, обеспечивающей поступательное пошаговое сканирование ЭМА-преобразователем по образующей заготовки;
- отсутствие мертвой зоны обеспечивает возможность выявления дефектов произвольной ориентации в отличие от контроля эхо-методом.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке автоматизированных установок и методик контроля труб.

4.2 Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб ультразвуковым многократно-теневым методом

Важной характеристикой любого метода неразрушающего контроля является его чувствительность или возможность выявления наименьшего по размерам дефекта. Чувствительность методов неразрушающего контроля и выявляемость одного и того же типа дефекта различна и зависит от особенностей метода неразрушающего контроля, условий проведения контроля, характеристик объекта контроля [81, 109].

Так, выявляемость дефектов при визуальном и измерительном контроле ограничивается условиями контроля (освещенность, оптический контраст и др.), а также субъективными факторами (острота зрения, усталость, опыт работы специалиста, выполняющего контроль).

На выявляемость дефектов при магнитном контроле оказывают влияние основные параметры технологии контроля: схема намагничивания, способ контроля, вид тока намагничивания, значения напряженности поля, тип используемых индикаторов и др., а также магнитные свойства материала, шероховатость поверхности, форма и габаритные размеры объекта контроля, наличие покрытий, глубина и раскрытие трещины. Удовлетворительная чувствительность для выявления одних дефектов может быть совершенно непригодной для выявления дефектов другого характера.

Выявляемость дефекта при вихретоковом контроле зависит от глубины и ориентации плоскости дефекта относительно поверхности и в меньшей степени от ширины раскрытия усталостных трещин. Следует отметить возможность ложных срабатываний вихретокового дефектоскопа при наличии зон структурной неоднородности, приводящих к изменению электропроводности, локальных магнитных полюсов (неоднородность магнитных свойств). Максимальная чувствительность вихретокового вида контроля может быть достигнута при контроле деталей с шероховатостью поверхности не более Rz 20.

Фактором, ограничивающим выявляемость дефектов акустическим методом, является состояние и шероховатость поверхности объекта контроля, а также глубина и раскрытие трещины.

Таким образом, при выборе методов неразрушающего контроля конкретных элементов конструкций необходимо учитывать следующие основные факторы: характер (вид) возможных дефектов и их расположение; возможности методов контроля; формы и размеры контролируемых элементов конструкций; материалы, из которых изготовлены контролируемые элементы; состояние и шероховатость контролируемых поверхностей конструкций.

Вопросам изучения сравнительной выявляемости дефектов методом рассеяния магнитного потока и акустическим методом в рельсовой дефектоскопии посвящены работы [3, 54]. В работе [135] исследованы вопросы сравнительной выявляемости локальных повреждений троса (обрыв проволоки) методом контроля рассеяния магнитного потока и с использованием датчика

Холла в условиях мешающих факторов: скорости сканирования датчика и вибраций троса. В работе [6] выявляемость дефектов и достоверность контроля предложено оценивать функцией PoD, описывающей зависимость вероятности обнаружения дефектов от их высоты, что дает дополнительную информацию для оптимизации методик УЗ-контроля.

Оценка предельной выявляемости плоскостных несплошностей толстолиствого проката методами отражения (эхо-метод) и методами прохождения представлена в работе [85].

Трубные заготовки и насосно-компрессорные трубы, как правило, подвергаются входному, операционному и приёмочному НК, основными видами которого являются вихретоковый и магнитный методы, реализуемые с использованием специализированных автоматизированных установок контроля и позволяющие выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты [132, 149, 52, 103]. Но магнитные методы неприменимы для коротких деталей (муфт насосно-компрессорных труб).

В последнее десятилетие популярными на рынке услуг НК стали волноводные методы [77], позволяющие осуществлять экспресс-диагностику прутков и труб при существенном увеличении производительности контроля за счет отсутствия сканирования и при локальном доступе к объекту.

В литературе широко освещаются вопросы использования рэлеевских волн для выявления поверхностных и приповерхностных дефектов, в том числе труб, эхо-методом контроля [2, 4, 136, 131, 100, 128, 134, 58, 67, 23, 147, 153, 1, 129, 144, 142]. С целью отстройки рэлеевских волн от качества акустического контакта в ряде исследований предлагается использование для возбуждения-приема электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей [87, 93, 112, 145, 146]. В работах [74, 79, 87] показана возможность реализации электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле цилиндрических объектов малых диаметров (прутки, заготовки для производства бурильных труб) для выявления поверхностных дефектов и оценки структурного состояния.

4.2.1 Объекты контроля, оборудование и методы

С целью оценки выявляемости естественных трещин муфт насосно-компрессорных труб выполнен контроль электромагнитно-акустическим методом многократной тени с использованием рэлеевских волн в сравнении с магнитными и вихретоковым методами контроля [109]

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.

При акустических исследованиях использован метод многократной тени, реализованный с использованием экспериментальной установки, структурная схема и фото которой представлены на Рисунок 4.8. Специализированный накладной ЭМА-преобразователь обеспечивает бесконтактное возбуждение и прием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях. Рабочая частота ЭМА-преобразователя - 1 МГц, что позволяет обнаруживать дефекты на глубине в пределах длины рэлеевской волны (до 3 мм).

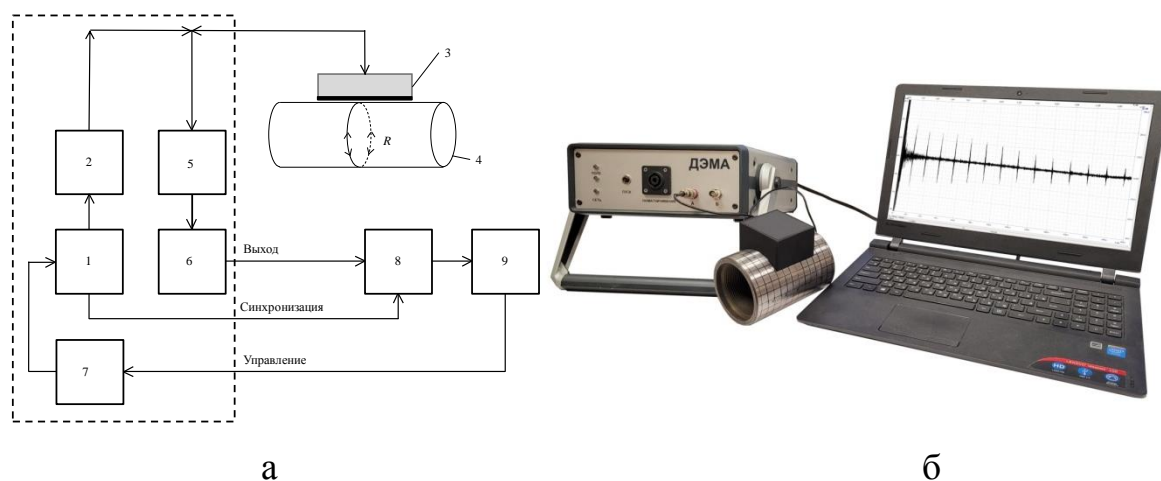


Рисунок 4.8 - Структурная схема (а), фото экспериментальной установки (б): 1 – генератор синхроимпульсов, 2 – генератор зондирующих импульсов, 3 – накладной двухканальный ЭМА-преобразователь, 4 – исследуемый образец заготовки, 5 – полосовой фильтр, 6 – высокочастотный усилитель, 7 – плата управления генератором синхроимпульсов и каналами, 8 – аналого-цифровой преобразователь, 9 – персональный компьютер с программным обеспечением

ПРИНЦ

Благодаря отсутствию потерь на границе «преобразователь-объект контроля» и достаточно узкой диаграмме направленности ЭМА-преобразователя рэлеевских волн возможно наблюдение серии многократных отражений, насчитывающих десятки импульсов. При апертуре ЭМА-преобразователя 50 мм и угле раскрытия основного лепестка диаграммы направленности ± 100 (Рисунок 4.9) уже на первом прохождении по периметру объекта вся трещина (по длине образующей муфты) оказывается в поле рэлеевской волны и кратно ослабляет волну на последующих отражениях.

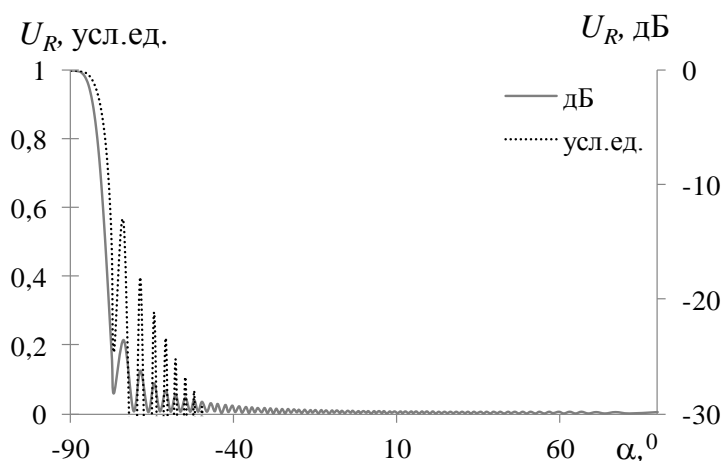
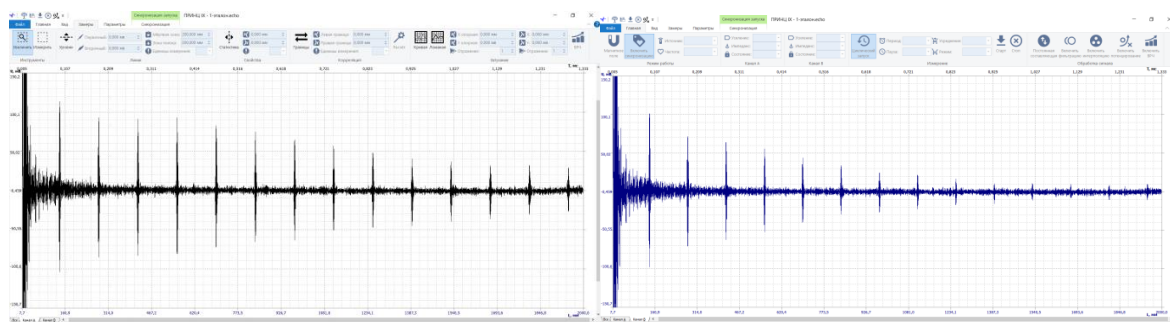


Рисунок 4.9 - Диаграмма направленности ЭМА-преобразователя рэлеевских волн

Серия импульсов рэлеевских волн, многократно прошедших в прямом и обратном направлениях по огибающей прутка при отсутствии дефекта и при его наличии представлены на Рисунок 4.10. Серии характеризуются существенным сокращением количества импульсов и их амплитуд для дефектных областей объекта, что объясняется многократными двухсторонними переотражениями от дефекта. Следует отметить, что в процессе распространения рэлеевская волна дополнительно ослабляется за счет расхождения, радиального переизлучения на выпуклой цилиндрической поверхности и рассеяния на шероховатостях поверхности [12].



а

б

Рисунок 4.10 - Эхограммы рэлеевских волн:

а – образец #2, б – образец #3

В качестве информативных параметров серии импульсов использованы вероятностные характеристики: математическое ожидание M , дисперсия D , среднеквадратическое отклонение σ , асимметрия S , эксцесс E [71].

Также рассчитывался коэффициент многократного ослабления K_{Nd} (аналог коэффициента выявляемости при ЗТМ), определяемый формулой:

$$K_{Nd} = \sum_{n=1}^N K_{nd} = \sum_{n=1}^N (U_{n0} - U_n) / U_{n0}, \quad (15)$$

где U_{n0} - среднее значение амплитуды импульса при каждом n -м прохождении для бездефектной образца муфты, U_n - значение амплитуды импульса при каждом n -м прохождении для муфты с дефектом.

Вероятностно-статистические характеристики и коэффициент выявляемости рассчитываются в специализированном программном обеспечении ПРИНЦ [86]. Во избежание влияния зондирующего импульса на результаты анализа информативных параметров, соответствующий ему интервал времени (от 0 до 89 мкс) удалялся из анализируемого массива. Количество анализируемых импульсов - 13.

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. Рассчитывались средние значения информативных параметров при изменении угла поворота и среднеквадратическое отклонение каждой из характеристик.

Вихретоковый контроль, выполнен с помощью комбинированного дефектоскопа УД2-102ВД. Для возбуждения и приема вихревых токов использован вихретоковый преобразователь ПН-7.5 диаметром 7,5 мм с рабочей частотой 70 кГц. Фазовый режим работы дефектоскопа использован для оценки глубины трещин, при этом в дефектоскопе имеется отстройка от влияния шероховатости поверхности и зазора. Первоначальная настройка

чувствительности дефектоскопа для оценки глубины дефекта проведена на СОП-НО-037 из марки стали 45 с шероховатостью Ra 1,25 с искусственным дефектом глубиной ИД-2 0,5 мм. Для дальнейшего уточнения изменения трещины по глубине настройка проводилась на искусственных дефектах ИД-1 глубиной 0,2 мм, ИД-2 - 0,5 мм, ИД-3 - 1 мм, ИД-4 - 2 мм в зависимости от того, к какому значению ближе была глубина трещины при первоначальной настройке. Проведена оценка распределения фазы сигнала в зоне трещины и вне ее с целью определения чувствительности к дефекту.

При реализации магнитного метода контроля использован дефектоскоп ПМД-70 и способ остаточной намагниченности СОН. Циркулярное намагничивание муфт проведено с использованием девяти витков тороидальной обмотки гибкого кабеля тремя импульсами с амплитудой тока в импульсе 1000 А.

Регистрация поля искажения над дефектом проведена феррозондовым методом с использованием градиентометра феррозондового комбинированного прибора Ф-205.30А, а также магнитопорошковым методом с использованием суспензии Диагма 1100 в концентрации 40 грамм на 1 л воды. С целью оценки абсолютной чувствительности методов магнитного и вихретокового контроля в сравнении с акустическим методом анализировался сигнал не только в зоне дефекта, но и вне его.

4.2.2 Результаты исследований и обсуждение

Вихретоковый метод контроля.

Результаты ВТК муфт в виде распределения глубины трещины и фазы сигнала ВТП вдоль траектории трещины представлены на Рисунки 4.11 и 4.12 соответственно. Видно, что глубина трещин в образцах меняется неравномерно и лежит в диапазоне 0,7 - 2,5 мм для образца #4 и 0,5 - 1,5 мм для образца #3. Характер изменения фазы сигнала ВТП (Рисунок 4.12) близок к характеру изменения глубины трещины.

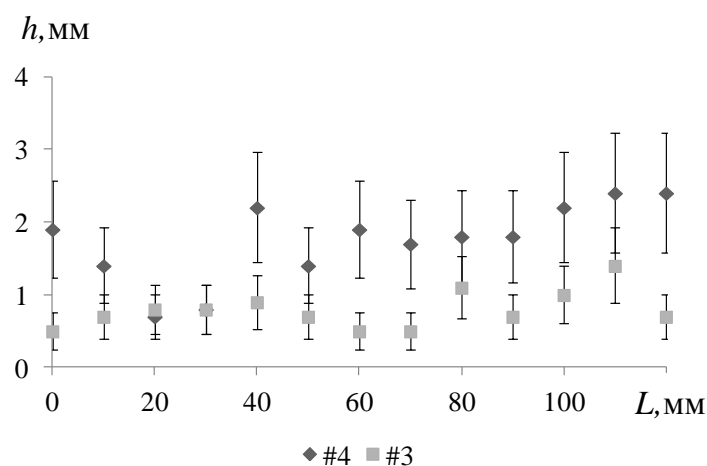


Рисунок 4.11 - Распределение глубины трещины вдоль ее траектории относительно проекции на образующую муфты L

Введем 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. При этом максимальный показатель выявляемости P_{EC} при ВТК для образца #4 составляет 35 дБ, для образца #3 - 47 дБ.

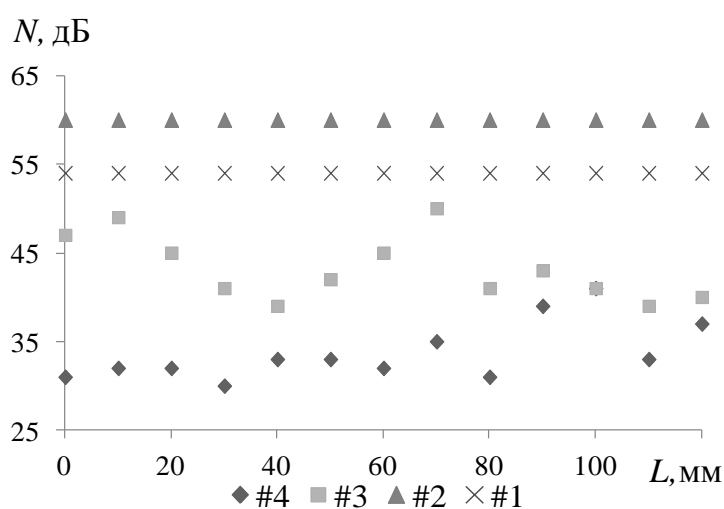


Рисунок 4.12 - Распределение фазы сигнала ВТК вдоль траектории трещины относительно проекции на образующую муфты L

Следует отметить, что отсутствие механической обработки (образец #1) ухудшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК.

Магнитный метод контроля.

Результаты магнитопорошкового контроля исследованных образцов муфт представлены на Рисунок 4.13. Отложения порошка имеют вид индикаций неравномерной толщины. Для образца #4 наблюдается отложение порошка в виде более широкой индикации, что может быть обусловлено большим раскрытием трещины в указанной области, что не противоречит результатам ВТК (большая глубина трещины сопровождается большим раскрытием). Визуализация дефекта в образце #3 несколько хуже ввиду недостаточной чувствительности.

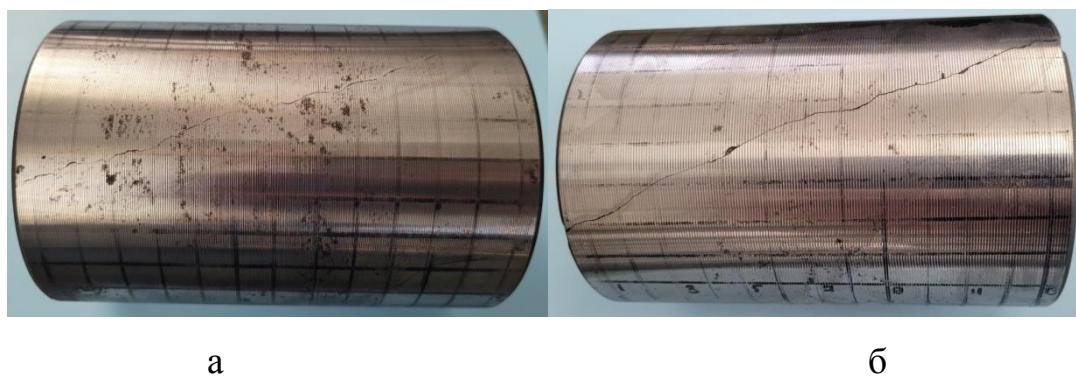


Рисунок 4.13 - Отложение магнитного порошка на муфтах #3 (а) и #4 (б)

Феррозондовый контроль осуществлялся вдоль траектории трещины с шагом 10 мм по образующей. Результаты феррозондового контроля в виде зависимости градиента магнитного поля вдоль трещины представлены на Рисунок 4.14. Видно, что чувствительность ФЗК к трещине образца #4 существенно превышает чувствительность к трещине образца #3 (значения градиента соизмеримы с уровнем градиента поля для бездефектных образцов).

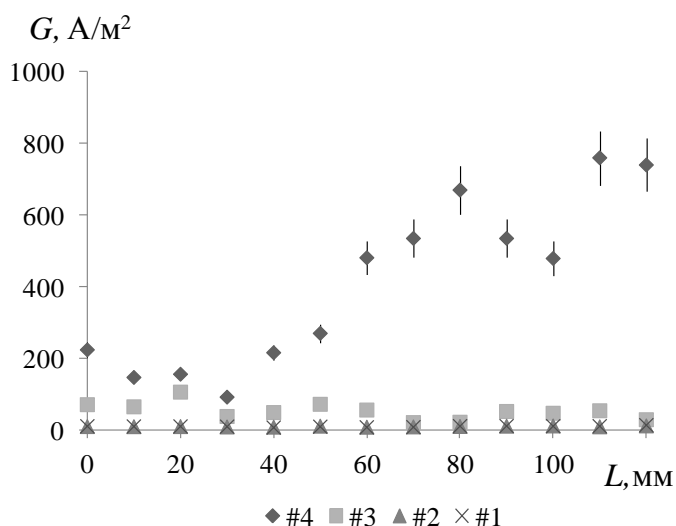


Рисунок 4.14 - Распределение градиента магнитного поля G вдоль траектории трещины относительно проекции на образующую муфты L

Согласно Рисунок 4.14 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.

4.2.3 Акустический метод

Результаты анализа вероятностных характеристик и коэффициента выявляемости для каждого из исследуемых образцов муфт представлены в таблице 14. Планки погрешностей на гистограммах указывают отклонение от среднего при перемещении ЭМА-преобразователя по углу относительно начальной образующей, т.е. образующей принятой за начало отсчета.

Таблица 14 - Средние значения вероятностных характеристик серии импульсов рэлеевских волн

# Обр- азца	Математическое ожидаение M , мВ	Дисперсия D , мВ ²	Среднеквад- ратическое отклонение σ , мВ	Асимметрия S	Эксцесс E
#1	-0,68±0,02	71,2±3,6	8,3±0,4	0,53±0,07	43,7±1,9
#2	-0,41±0,01	61,8±4,9	7,8±0,3	0,70±0,07	46,5±1,6
#3	-0,38±0,04	35,0±2,0	5,9±0,2	0,86±0,05	71,3±1,9
#4	-0,34±0,04	11,3±0,6	3,4±0,1	0,65±0,18	52,6±11,1

Из таблицы 14 следует, что параметры «математическое ожидание», «эксцесс» и «асимметрия» не являются информативными с точки зрения дефектности образца. При этом согласно гистограммам Рисунок 4.15 для параметра «дисперсия» (или «среднеквадратическое отклонение») имеет место уменьшение значений с ростом дефектности образца. Параметр «коэффициент выявляемости» напротив, имеет тенденцию к увеличению для образцов с дефектами #3 и #4.

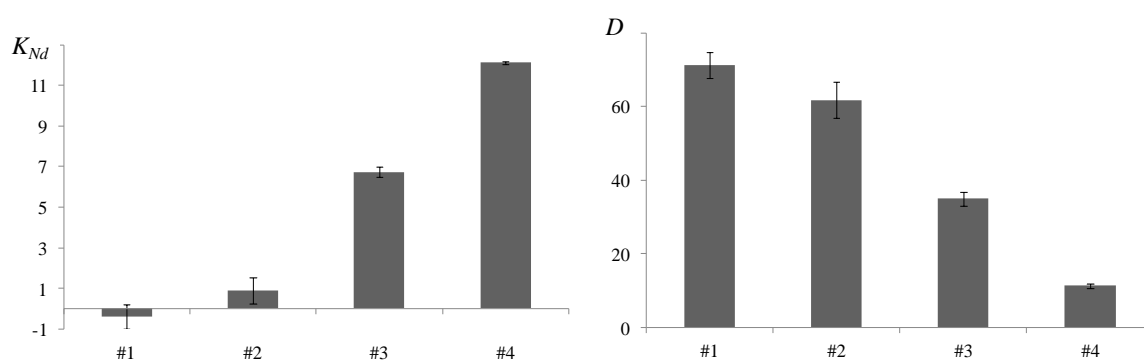


Рисунок 4.15 - Параметр «коэффициент выявляемости» (а) и параметр «дисперсия» (б) для исследуемых образцов муфт

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 15 представлены рассчитанные значения чувствительности для исследованных информативных параметров акустического метода контроля.

Таблица 15 - 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 (образец #3), раз/дБ	10,6 / 20	11,2 / 21	1,8 / 5	2,0 / 6
P_A (образец #4), раз/дБ	19,0 / 26	20 / 26	5,4 / 15	6,1 / 16

Следует отметить, что отсутствие механической обработки (образец #1) существенно (на 10 дБ) улучшает показатели выявляемости дефектов при акустическом методе с использованием параметра «дисперсия» и практически не влияет на показатель выявляемости при использовании параметра «коэффициент выявляемости» в отличие от анализируемых параметров ВТК и ФЗК.

Дополнительно к анализируемым параметрам определена скорость распространения рэлеевских волн в дефектных и бездефектном образце. Результаты оценки скоростей представлены в таблице 16. С учетом погрешности определения диаметра и овальности муфт, измеренных с использованием цифрового штангенциркуля ШЦЦ-II- 250-0,01 ГОСТ 166-89 GRIFF 031172 погрешность определения скорости рэлеевских волн не более 1 м/с.

Таблица 16 - 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 [12].

Сравнительная выявляемость методов УЗК, ВТК и 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 (Рисунок 4.16).

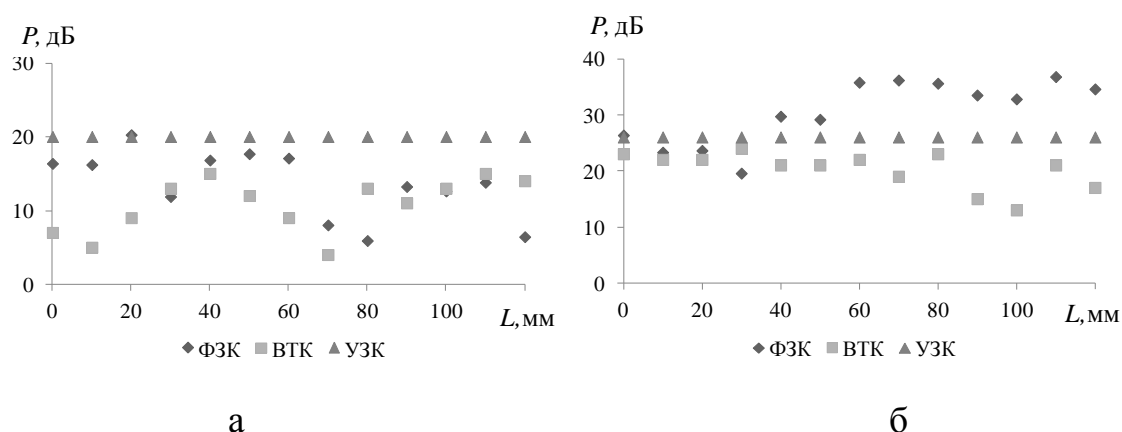


Рисунок 4.16 - Сравнительные показатели выявляемости к дефектам информативных параметров методов ВТК, ФЗК и УЗК относительно бездефектной области, выраженные в дБ: образец #3 (а), образец #4 (б)

Согласно Рисунок 4.16 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 (таблица 17).

Так как информативные параметры ультразвукового метода характеризуются усредненными значениями по всей длине трещины, для сравнения в таблице 17 также приведены усредненные вдоль траектории трещины показатели выявляемости для методов ФЗК и ВТК.

Таблица 17 - 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 наилучшая выявляемость характеризует метод ФЗК, а наихудшая – метод ВТК. Согласно таблице 4 значение показателя P_{FZ} 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 увеличением глубины трещины не дает дополнительного прироста информативного параметра рэлеевской волны.

По результатам анализа выполненных работ получены следующие выводы:

1. Использование специализированного накладного ЭМА-преобразователя рэлеевских волн позволяет уменьшить влияние качества акустического контакта на результаты контроля, особенно для муфт с горячекатаной поверхностью.

2. Предлагаемый акустический метод многократной тени с использованием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях, в отличие от традиционных методов контроля (ФЗК и ВТК), требующих сканирования всей поверхности, обеспечивает контроль всей муфты за счет однократной установки преобразователя на образующую образца.
3. Введено понятие показателя выявляемости дефекта данного типа, определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Наибольшую чувствительность к дефектам имеют следующие информативные параметры акустического метода: параметр «дисперсия», имеющий тенденцию к уменьшению, параметр «многократный коэффициент выявляемости», имеющий тенденцию к увеличению, а также скорость распространения рэлеевских волн, имеющая тенденцию к уменьшению в образцах с дефектами.
4. Сравнительный анализ выявляемости дефектов показал, что для дефекта малого раскрытия и малой глубины (образец #3) акустический метод характеризуется наибольшим значением показателя выявляемости и превышает в среднем на 6 дБ и 9 дБ показатели выявляемости ФЗК и ВТК методов контроля.
5. Отсутствие механической обработки (образец #1) улучшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК, ухудшает на 6 дБ показатели выявляемости дефектов при ВТК и не влияет на показатели выявляемости при ФЗК.
6. Предлагаемый метод многократной тени с использованием рэлеевских волн 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 которых не менее двукратной длины волны на данной частоте. При этом обеспечивается более высокая производительность за счет сканирования только вдоль образующей трубы.

4.3 Чувствительность методик акустического контроля алюминиевых труб-заготовок лейнеров

Исследование чувствительности различных методик акустического контроля по выявлению недопустимых дефектов проведено на алюминиевых трубах-заготовках лейнеров с целью увеличения производительности в сравнении с действующими на предприятии методиками контроля [108].

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.

Используемый в настоящее время на предприятии-изготовителе многоканальный эхо-импульсный ультразвуковой метод с использованием объемных волн позволяет обнаруживать на наружной поверхности регламентируемые ГОСТ ISO 11439-2014 дефекты в иммерсионном варианте контроля, при этом скорость сканирования составляет 1 м/мин, что при необходимости вращательно-поступательного движения, резко снижает производительность метода (1 объект за 1,5 - 2 часа) и не может обеспечить сплошной контроль выпускаемой продукции.

С целью отстройки возбуждения-приема акустических волн от качества акустического контакта в ряде исследований предлагается использование электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей. Исследование чувствительности проведено с использованием методик, основанных на излучении – приеме рэлеевских волн, распространяющихся по внутреннему периметру трубы – заготовки при сканировании вдоль образующей трубы. Методики реализованы с использованием специально-разработанных пьезоэлектрических преобразователей и ЭМА-преобразователей волн Рэлея.

Исследована чувствительность для внутренних продольных дефектов, глубиной, определяемой ГОСТ ISO 11439-2014, как наиболее опасных с точки зрения целостности объекта и не доступных к обнаружению методами визуально-измерительного контроля.

Для проведения экспертной оценки использовано следующее оборудование внесенное в реестр средств измерений:

- уникальная научная установка УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий»;
- приборы акустического контроля (Дефектоскоп ультразвуковой DIO 1000LF, Дефектоскоп Пеленг УД2-102, Дефектоскоп ультразвуковой УД 4Т, Дефектоскоп ультразвуковой УД 2-70, Дефектоскоп УД3-307ВД);
- программное обеспечение (Программный продукт COMSOL Multiphysics).

4.3.1 Использование волн Рэлея при контроле цилиндрических объектов

Одной из альтернатив, потенциально снимающих большую часть ограничений, присущих вихретоковому и магнитному контролю, является применение поверхностных ультразвуковых волн рэлеевского типа [88].

Поверхностные несовершенства, возникающие как при изготовлении, так и при эксплуатации металлоизделий, (трещины, волосовины, плены, отпечатки и др.) имеют разнообразную форму и не только приводят к изменению амплитудных и временных параметров прошедшего сигнала, но и создают рассеянные поверхностную и объемные волны, что обуславливает возможность применения как эхо-импульсного, так и теневого методов ультразвукового контроля [7, 39].

Поверхностные волны на плоской границе твердого полупространства с жидким слоем конечной и бесконечной толщины теоретически и экспериментально исследованы в работах И.А. Викторова [23, 24, 25, 19], где получены аналитические выражения и даны оценки дисперсии фазовой скорости волн и затухания. Закономерности и эффективность преобразования

поверхностных волн в цилиндрических стальных объектах, изучены в работах [74, 83].

Исследования закономерностей взаимодействия волн Рэлея с щелями прямоугольной формы и полуцилиндрическими канавками, а также распространения их по поверхности сложной геометрии (например, пилообразной или шероховатой) представлены, в частности, в экспериментальных работах [29, 30, 37, 4], в которых показано, что для прямоугольной канавки малой глубины коэффициенты отражения и прохождения в стали и дюралюминии отличаются незначительно; это позволяет сравнивать экспериментальные данные, полученные для границы воздух–сталь в лабораторных условиях, и данные, полученные в [38] для границы воздух–дюралюминий.

Применение ЭМА преобразователей для возбуждения и приема рэлеевских волн позволяет устранить влияние качества контакта на результаты контроля, тем самым обеспечивая повышение его достоверности [1, 5, 143, 131, 96, 70, 69, 68, 44, 87, 93, 145, 146].

Рэлеевские волны позволяют выявлять дефекты в пределах поверхностного слоя, равного половине длины рэлеевской волны, при этом глубина выявляемых дефектов может варьироваться изменением частоты колебаний [8, 85, 88]. Эхо-методы контроля с использованием рэлеевских волн успешно используются при контроле цилиндрических объектов больших диаметров, в частности, поверхности катания обода колеса согласно ПР НК В.2-2013 [36]. Метод основан на анализе эхо-сигналов от дефектов в зонах между первым и вторым сквозными импульсами, дважды огибающими поверхность катания колеса. При этом сквозные импульсы используются в качестве опорных при настройке АРУ.

В работе [95] исследована чувствительность ЭМА-метода многократной тени с использованием рэлеевских волн к искусственным и естественным поверхностным и приповерхностным дефектам заготовок для производства бурильных труб в двух частотных диапазонах и обоснованы чувствительные информативные параметры и критерии браковки.

В работах [43, 53] предложен способ контроля поверхности длинномерных изделий с применением поверхностных ультразвуковых волн в иммерсионном варианте. Теоретическими и экспериментальными исследованиями показано, что при протяженности зоны контроля от 20λ до 50λ комплексное применение эхо-импульсного совместно с амплитудным и временным вариантами теневого метода обеспечивает возможность выявления на плоских и криволинейных поверхностях как трещин, так и дефектов с гладким профилем глубиной от долей длины волны. Результаты исследований использованы при разработке установки автоматического контроля рельсов в потоке производства, испытания которой подтвердили высокую чувствительность и помехозащищенность иммерсионного контроля поверхностными волнами.

В работах [3, 116, 118, 57] представлена информация о разработке образца бесконтактного автоматизированного сканера-дефектоскопа “Автокон-ЭМА-МГТУ-2” для наружного контроля толстостенных стальных труб. Дефектоскоп позволяет за один проход вдоль трубы (по образующей линии цилиндрической поверхности) проконтролировать все сечение трубы на наличие дефектов и утонений стенки. В основу работы сканера заложено использование поверхностных волн Рэлея при достаточной толщине трубы ($d > 2\lambda$).

Для проведения исследований рассмотрены преобразователи на основе пьезоэффекта и ЭМА преобразования. Проведены этапы разработки, изготовления и испытаний такого рода преобразователей.

4.3.2 Электромагнитно-акустические преобразователи рэлеевских волн.

Разработка, изготовление, испытания

Использование бесконтактных ЭМА-преобразователей (ЭМАП) перспективно благодаря ряду преимуществ в сравнении с пьезопреобразователями:

- отсутствие непосредственного контакта ЭМАП с металлом (через воздушный зазор) существенно снижает требования к подготовке поверхности и не требует использования контактной жидкости;
- бесконтактный преобразователь не подвержен трению и как следствие не изнашивается
- наличие на поверхности объекта контроля ржавчины, краски, окалины и прочих загрязнений не влияет на результаты контроля;
- возможен контроль объектов в нагретом состоянии;
- ультразвуковые колебания, возбуждаемые электромагнитным полем, не чувствительны к перекосам при установке ЭМАП на изделие, устраняя ошибки измерения, вызванные преломлением ультразвука на границе «преобразователь – объект контроля»
- возможность возбуждения и приема любых типов волн, в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, которые в производстве практически невозможно возбудить и принять контактным способом;
- возможность реализации резонансных методов контроля для исследования свойств материалов.

К недостаткам ЭМАП относят их сравнительно низкую чувствительность и помехозащищенность. Следует отметить сложность возбуждения волн ЭМА методом в неферромагнитных материалах, где невозможно получить высокие значения индукции магнитного поля.

ЭМА способ излучения и приема упругих волн основывается на трех эффектах взаимодействия электромагнитного поля с материалом: магнитострикции, магнитного и электродинамического взаимодействия. Для неферромагнитных материалов единственным эффектом взаимодействия является электродинамическое взаимодействие, состоящее в возбуждении в электропроводном материале вихревых токов, которые, взаимодействуя с постоянным магнитным полем, вызывают колебания носителей электрического заряда в кристаллической решетке металла.

Электродинамический механизм определяется взаимодействием вихревых токов i_e длиной l с индукцией поля подмагничивания B_0 , что вызывает появление силы Ампера F_A в пределах тонкого приповерхностного слоя объекта δ

$$F_A = i_e [lB_0], \quad (16)$$

при этом глубина скин-слоя δ определяется как

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\mu\sigma}, \quad (17)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ - относительная магнитная проницаемость, σ - электропроводность, ω - круговая частота колебаний.

Приём акустических волн за счет электродинамического механизма обусловлен электромагнитными полями, порождаемыми вихревыми токами, возникающими в приповерхностном слое объекта, колеблющегося со скоростью V в поле подмагничивания с индукцией B_0 , что в свою очередь приводит к возникновению в индукторе ЭДС индукции ε_i :

$$\varepsilon_i = [VB_0]l. \quad (18)$$

Период меандра определяет длину волны возбуждаемого или принимаемого ультразвука. Чтобы возбудить поперечную волну под углом α к поверхности объекта, необходимо обеспечить сдвиг фаз между проводниками катушки (рисунок 4.17):

$$m \sin\alpha = \lambda_t, \quad (19)$$

где λ_t — длина поперечной волны, m — расстояние между витками, ток в которых находится в одинаковой фазе.

Для возбуждения волн Рэлея при $\alpha=90^\circ$ формула (19) преобразуется к виду:

$$m \sin\alpha = \lambda_R, \quad (20)$$

где λ_R — длина рэлеевской волны.

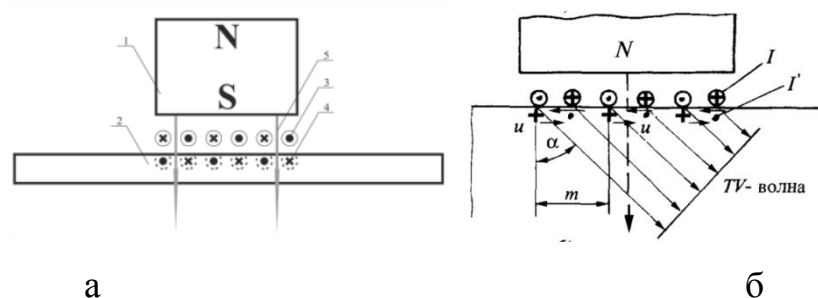


Рисунок 4.17 - Электродинамический механизм ЭМА преобразования для возбуждения поперечных TV-волн под углом к поверхности объекта (а), формирование волнового фронта (б): 1 – постоянный магнит; 2 – объект контроля; 3- катушка в форме меандра для возбуждения/приема ультразвуковых волн; 4 – контуры вихревых токов, вызываемых катушкой 3; 5 - направление поляризующего поля

Пример варианта исполнения ЭМА-преобразователя рэлеевских волн в отдельном режиме излучения-приема на рабочую частоту 500 кГц представлен на рисунке 4.18.

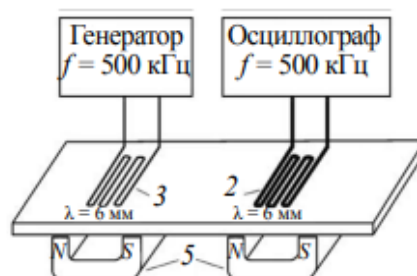


Рисунок 4.18 - Вариант исполнения ЭМА-преобразователя рэлеевских волн в отдельном режиме излучения-приема

Следует отметить, что чувствительность контактных УЗК по сравнению с ЭМА технологиями может превышать 10000 раз. Для увеличения чувствительности можно повышать ток в обмотке излучающего первичного ЭМА преобразователя, увеличивать число витков в обмотке приемных первичных преобразователей, а также повышать чувствительность с помощью усилителей, многократного «прозвучивания» одного и того же участка объекта контроля и

обработки принятого сигнала. Увеличение эффективности ЭМА преобразования возможно с увеличением подмагничивающего поля за счет применения современных сильных магнитных материалов.

Вышеописанное справедливо при построении систем ЭМА-преобразователей для ферромагнитных материалов, где возможно достижение высоких значений индукции магнитного поля, которое концентрируется в объекте контроля. Для неферромагнитных парамагнитных материалов (алюминий), магнитная проницаемость которых близка к 1, невозможно достижение больших значений магнитного поля, что резко ограничивает эффективность ЭМА-преобразователя рэлеевских волн в этих материалах.

С целью оценки эффективности систем подмагничивания проведено моделирование магнитных полей и полей вихревых токов в алюминии для специально разработанной системы подмагничивания (Рисунок 4.19).

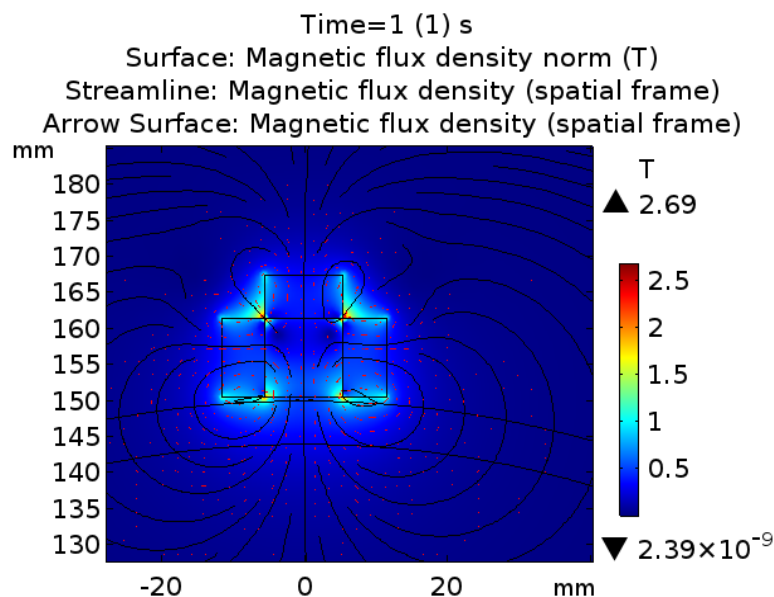


Рисунок 4.19 - Результаты моделирования магнитного поля специализированной системы подмагничивания в программной среде Comsol Multiphysics: пространственное распределение линий магнитного поля

Видно, 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 (Рисунок 4.20).

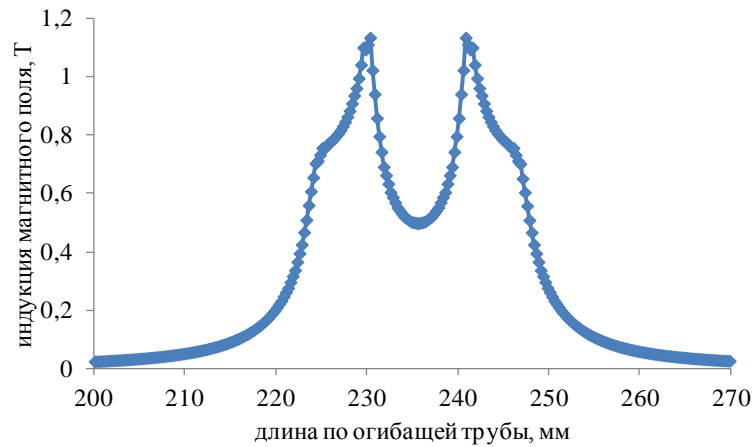


Рисунок 4.20 - Результаты моделирования магнитного поля специализированной системы подмагничивания в программной среде Comsol Multiphysics: распределение нормальной компоненты индукции магнитного поля в момент действия зондирующего импульса

Для проведения испытаний ЭМА-способом был изготовлен специализированный электромагнитно-акустический преобразователь рэлеевской волны на два частотных диапазона. Фото ЭМА-преобразователя рэлеевских волн с частотой (1 МГц и 500 кГц), используемого для возбуждения и приема рэлеевских волн представлено на рисунке 4.21,а. Низкая эффективность ЭМА-преобразователя не позволила получить сквозной сигнал по периметру трубы ввиду недостаточного отношения сигнал – шум. С целью повышения эффективности ЭМА-преобразователя была использована более мощная магнитная система на электромагните с использованием источника питания ТЕС15 (ток до 15 А, напряжение до 15 В). Использовался лабораторный стенд для испытаний ФТИ УдмФИЦ УрО РАН (рисунок 4.21,б).

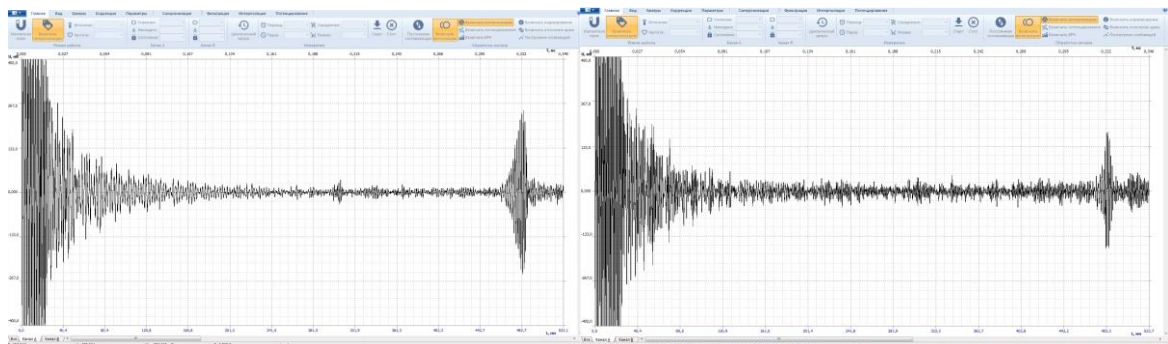


а

б

Рисунок 4.21 - Разработанный ЭМА-преобразователь рэлеевских волн на элементе алюминиевой трубы (а), лабораторный стенд системы подмагничивания (б)

Элемент лейнера помещался в магнитное поле различной мощности и структуроскопом СЭМА регистрировались получаемые эхограммы (рисунок 4.22). Датчик рэлеевской волны устанавливался в бездефектной области образца и области с дефектом.



а

б

Рисунок 4.22 - Дефектограммы для области с дефектом (а), для бездефектной области (б) (напряжение 15 В, ток 4 А)

Значения амплитуд сквозных сигналов при различных значениях тока и напряжения в обмотке электромагнита для дефектной и бездефектной областей представлены в таблице 18. В качестве дефектной области выступала зона с искусственным дефектом в виде пропила длиной 20 мм глубиной 2,5 мм с раскрытием 1,5 мм.

Из дефектограмм видно, что при данном уровне сигнала отчетливо выявляется лишь первый сквозной импульс, при этом недостаточное отношение сигнал-шум в зоне контроля (на участке между зондирующим и донным импульсами) не позволяет выявить эхо-сигнал от дефекта. Поэтому в указанном варианте возможно реализовать только теневой метод контроля. Рассчитанные коэффициенты выявляемости приведены в таблице 19.

Таблица 18 - Значения амплитуд сквозных сигналов при различных параметрах источника тока намагничивающей системы

Параметры источника тока	Амплитуда сквозного сигнала бездефектная область, мВ	Амплитуда сквозного сигнала дефектная область, мВ	Коэффициент выявляемости, раз	Коэффициент выявляемости, дБ
15В, 4А	496	348	0,70	-3,1

Видно, что максимальное значение коэффициента выявляемости для дефекта наружной поверхности составляет 3 дБ. Это говорит о том, что запас по чувствительности для дефектов малых размеров явно недостаточен и выявление их указанным ЭМА-методом невозможно.

4.3.3 Пьезопреобразователи рэлеевских волн. Разработка, изготовление, испытания

Наиболее распространенным методом возбуждения рэлеевских волн является так называемый метод клина, основанный на преобразовании продольных волн в рэлеевские. Поверхностную рэлеевскую волну возбуждают с помощью продольной волны, наклонно падающей на границу раздела сред (рисунок 4.23).

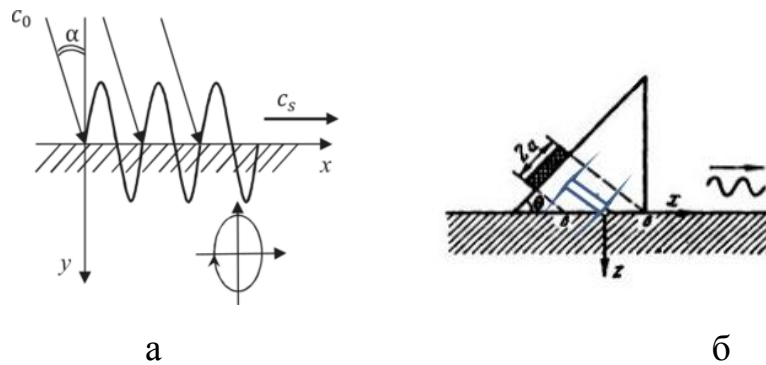


Рисунок 4.23 - Метод клина возбуждения рэлеевских волн

Угол падения продольной волны определяют из соотношения

$$\sin\beta = \frac{C_{oc}}{C_R}, \quad (21)$$

где C_{oc} - скорость волны в органическом стекле, C_R - скорость рэлеевской волны в алюминии, β - угол падения

Поскольку θ больше углов полного внутреннего отражения (критических углов) как для продольной, так и для поперечной волн, в методе клина возбуждается практически только одна рэлеевская волна, уровень возбуждаемых объемных волн лежит на 20–30 дБ ниже. Для расчёта материала и угла клина требуется точное значение скорости рэлеевской волны. Коэффициент Пуассона для алюминия и дюралевых сплавов составляет $\nu = 0,34$, скорость поперечной волны $C_t=3080$ м/с при этом скорость рэлеевской волны составила 2875 м/с.

Данные по скорости волн Рэля на реальном объекте следует уточнять в процессе настройки глубиномера.

Расчет угла наклона клина согласно формулы (21) дает значение $\beta = 67$ градуса.

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 преобразователи на различные частотные диапазоны

(таблица 19). При этом меняется предельная глубина залегания выявляемых дефектов, определяемых длиной волны $\lambda_R = 1.23 \cdot 10^{-3}$ м.

Таблица 19 - Параметры клиновых преобразователей рэлеевских волн на различные частотные диапазоны

Характеристики	Рабочая частота, МГц		
	1	2,5	5
Толщина пьезоэлемента, мм	1,75	0,7	0,35
Длина волны (глубина выявляемых дефектов), мм	3,1	1,2	0,6
Характеристика стабильности акустического контакта	лучшая	средняя	худшая
Характеристика чувствительности к дефектам	худшая	средняя	лучшая
Характеристика ослабления вследствие расхождения	высокое	среднее	низкое
Характеристика ослабления вследствие затухания	низкое	среднее	высокое
Влияние кривизны поверхности	низкое	среднее	высокое

Согласно таблице 19 следует искать компромисс между глубиной выявляемых дефектов, стабильностью акустического контакта, чувствительностью к дефектам, ослабления волны вследствие расхождения и затухания и влияния кривизны поверхности. В связи с этим в качестве основной была выбрана рабочая частота 2,5 МГц.

Расчет диаграммы направленности для клинового преобразователя рэлеевских волн проводился с использованием программы Super Sound (рисунок 4.24).

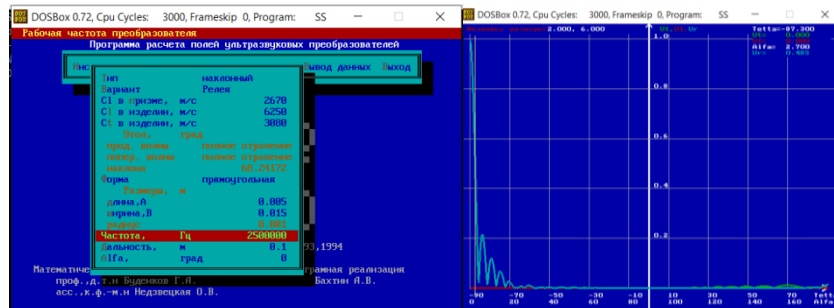


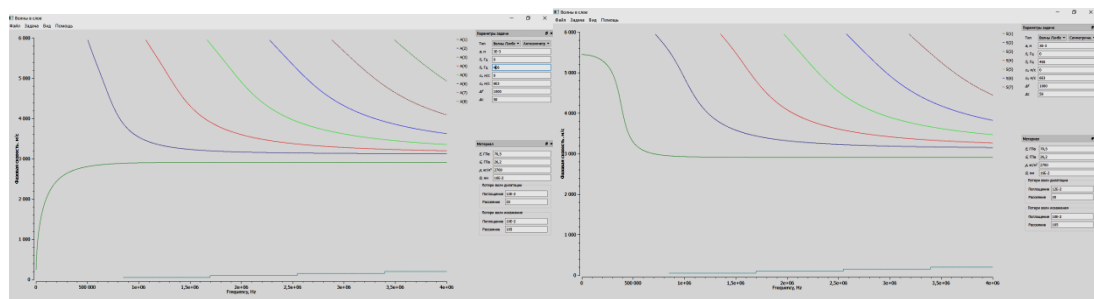
Рисунок 4.24 - Расчёт диаграммы направленности

Согласно рисунка 4.24 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. Расхождение следует учитывать при приближении преобразователя к краю объекта для исключения краевых эффектов.

Скорость сканирования может быть оценена на основании расчета времени прохождения рэлеевской волны по периметру объекта с учетом частоты прохождения рэлеевской волны по периметру объекта составляет 0,66 мс. При частоте следования зондирующих импульсов 100 Гц (период следования 10 мс), волна успевает тридцать раз пройти по объекту, что достаточно, чтобы импульсы последующих отражений не мешали проведению контроля в процессе сканирования.

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 этом следует иметь ввиду, что ухудшение качества обработки внутренней поверхности ведет к ограничению производительности контроля.

Волна Рэлея распространяется вблизи поверхности полупространства. Длинномерный объект (труба), обладающий конечной толщиной, сравнимой с длиной волны, полупространством не является, поэтому для корректного рассмотрения вопроса необходимо анализировать дисперсионные кривые (рисунок 4.25). При толщине слоя более 2λ , фазовая скорость (следовательно и условия возбуждения) волны Рэлея практически совпадают с фазовой скоростью нулевой симметричной (S_0) и нулевой антисимметричной (A_0) нормальных волн, которые излучаются с практически одинаковыми скоростями. При толщине слоя менее 2λ , чистая рэлеевская волна «распадается», главным образом, на те же нормальные волны, но скорости их заметно отличаются. При распространении волны S_0 и A_0 интерферируют одна с другой. Вблизи от излучателя, где разность фаз между ними близка к нулю, их суммарное акустическое поле подобно акустическому полю рэлеевской волны (R), поэтому описанную совокупность волн S_0 и A_0 можно назвать «квазирэлеевской» волной.



а

б

Рисунок 4.25 - Зависимости фазовых скоростей волн Лэмба от частоты (дисперсионные кривые) в алюминиевой пластине: симметричные моды (а), антисимметричные моды (б) от толщины пластины и частоты

При выборе рабочей частоты следует учитывать появление в волноводе (стенке трубы) волн Лэмба (рисунок 4.25), количество мод которых с увеличением частоты, может вносить искажения в многомодовый сигнал. Видно, что 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, был рассчитан, спроектирован и изготовлен пьезопреобразователь рэлеевских волн (рисунок 4.26,а) с рабочей частотой 2 МГц, со специальной формой призмы и направляющей платформой, обеспечивающей стабильность акустического контакта (рисунок 4.26,б).

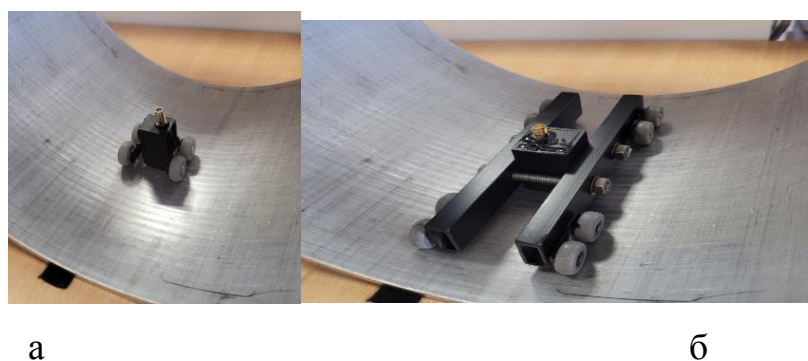


Рисунок 4.26 - Пьезопреобразователь рэлеевских волн (а), в сборке с направляющей платформой (б)

Прозвучивание внутренней части стенки трубы в зоне искусственного продольного дефекта (рисунок 4.27,а) с использованием пьезопреобразователя рэлеевских волн проводилось по схеме, указанной на рисунке 4.27,б.

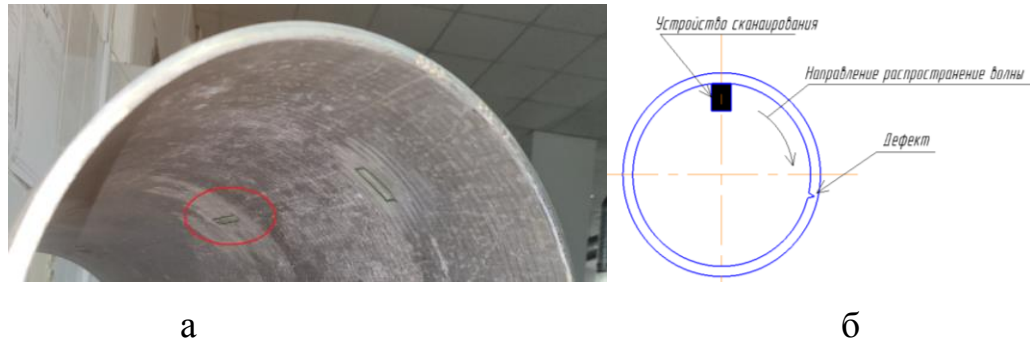


Рисунок 4.27 - Продольный дефект на внутренней стенке трубы (а), схема прозвучивания (б)

Прозвучивание внутренней части стенки трубы в зоне естественного дефекта (Рисунок 4.28,а) с использованием блока пьезопреобразователей рэлеевских волн (Рисунок 4.26,б) проводилось по схеме, указанной на Рисунок 4.27,б. Результат прозвучивания в виде дефектограмм от искусственного и естественного дефектов показан на Рисунок 4.28,б,в.

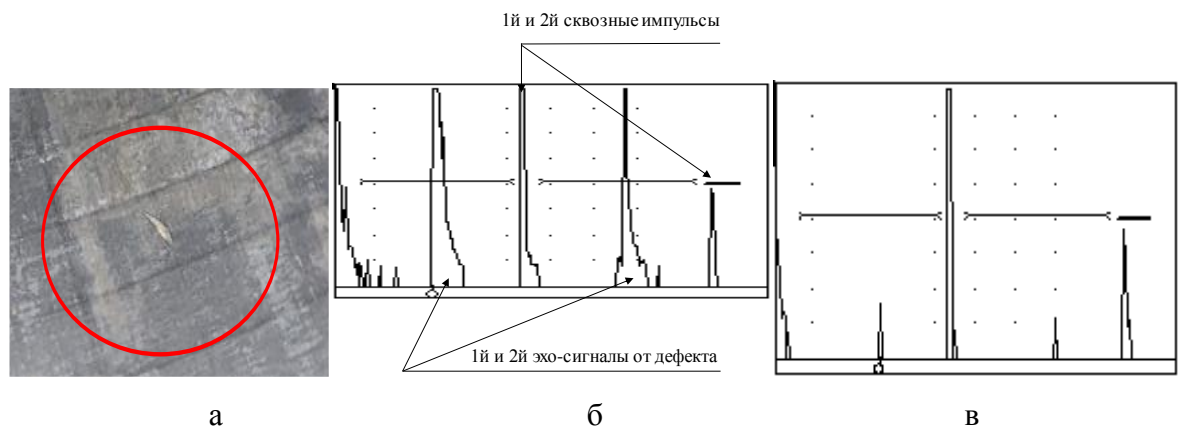


Рисунок 4.28 - Естественный дефект на внутренней стенке трубы (а), дефектограммы в зоне дефектов (б, в)

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 (зоны ВС), наблюдается появление

высокоамплитудных импульсов от дефекта, с уровнем выше второго сквозного импульса (находится в зоне автоматической регулировки усиления (АРУ)).

Таким образом, использование рэлеевских волн для контроля эхо-методом с применением специальных пьезопреобразователей показало высокую эффективность их использования и большой запас по чувствительности к продольно ориентированным дефектам.

Выводы по главе 4

1. 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 и вероятностных характеристик дисперсии, асимметрии, эксцесса при анализе серии многократных отражений. Метод обеспечивает выявление дефектов в поверхностной и приповерхностной зонах на глубине, не превышающей длины волны на заданной частоте.
2. Использование специализированного накладного ЭМА-преобразователя рэлеевских волн позволяет уменьшить влияние качества акустического контакта на результаты контроля, особенно для муфт с горячекатаной поверхностью. Введено понятие показателя выявляемости дефекта данного типа, определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Наибольшую чувствительность к дефектам имеют следующие информативные параметры акустического метода: параметр «дисперсия», имеющий тенденцию к уменьшению, параметр «многократный коэффициент выявляемости», имеющий тенденцию к увеличению, а также скорость распространения рэлеевских волн, имеющая тенденцию к уменьшению в образцах с дефектами. Сравнительный анализ выявляемости дефектов показал, что для дефекта малого раскрытия и малой глубины акустический метод характеризуется наибольшим значением показателя выявляемости и превышает показатели выявляемости ФЗК и ВТК методов.
3. Предлагаемый акустический метод многократной тени с использованием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях, в отличие от традиционных методов контроля (ФЗК и ВТК), требующих сканирования всей поверхности, обеспечивает контроль всей 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 которых не менее двукратной длины волны на данной частоте. При этом обеспечивается более высокая производительность за счет сканирования только вдоль образующей трубы.

4. В результате проведённой работы установлено, что наиболее высокой чувствительностью к внутренним продольным дефектам труб-заготовок для производства лейнеров обладает рэлеевская волна с рабочей частотой 2,5 МГц, обеспечивающая в двухканальном варианте скорость сканирования 0,5 м/мин, или 10 минут на одну трубу длиной 5 метров при сканировании по двум образующим.

5. 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 0,33 мм составляет не менее 15 дБ, что говорит о возможности использования в качестве контрольного отражателя дефекта существенно меньшей глубины. В ходе проведения контроля на лейнерах удалось обнаружить естественные дефекты - вмятина, совокупность наклонных царапин (на предельной чувствительности) продольная царапина, нанесенная канцелярским ножом (на среднем уровне чувствительности), визуально не подтвержденный естественный дефект протяженностью около 200 мм (на уровне контрольного отражателя).

Общие выводы

1. Полученные экспериментальные данные по исследованию чувствительности амплитудного теневого метода многократных прохождений 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 2,5 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 0,33 мм составляет не менее 15 дБ, что обеспечило обнаружение дефектов типа вмятин, наклонных и продольных царапин.

Заключение

Разработанные методики исследований и специализированное оборудование, реализующее зеркально-теневой метод многократных отражений с использованием бесконтактных проходных и накладных электромагнитно-акустических преобразователей, обеспечивают высокую точность, воспроизводимость и достоверность методов акустической структуроскопии. Предложенные методики обладают высокой точностью определения скоростей акустических волн и коэффициента Пуассона, обусловленной отсутствием необходимости прецизионного измерения диаметра объекта.

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 при анализе серии многократных отражений. Метод обеспечивает выявление дефектов в поверхностной и приповерхностной зонах на глубине, не превышающей длины волны на заданной частоте.

Введено понятие показателя выявляемости дефекта данного типа, определяемого соотношением величины информативного параметра, измеренного на образце с дефектом и величины аналогичного параметра, характеризующего бездефектный образец. Наибольшую чувствительность к дефектам имеют следующие информативные параметры: «многократный коэффициент выявляемости», имеющий тенденцию к увеличению, а также скорость распространения рэлеевских волн, имеющая тенденцию к уменьшению в образцах с дефектами. Сравнительный анализ выявляемости дефектов показал, что для дефекта малого раскрытия и малой глубины акустический метод характеризуется наибольшим значением показателя выявляемости и превышает показатели выявляемости ФЗК и ВТК методов.

Предлагаемый акустический метод многократной тени с использованием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях, в отличие от традиционных методов контроля (ФЗК и

ВТК), требующих сканирования всей поверхности, обеспечивает контроль всей 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 которых не менее двукратной длины волны на данной частоте. При этом обеспечивается более высокая производительность за счет сканирования только вдоль образующей трубы.

В результате проведённой работы установлено, что наиболее высокой чувствительностью к внутренним продольным дефектам труб-заготовок для производства лейнеров обладает рэлеевская волна с рабочей частотой 2 МГц, обеспечивающая в двухканальном варианте скорость сканирования 0,5 м/мин, или 10 минут на одну трубу длиной 5 метров при сканировании по двум образующим.

Рекомендации по продолжению работ:

- разработка системы контроля с внутренней поверхности трубы с применением пьезопреобразователя рэлеевских волн, включая специализированные преобразователи, подвижную платформу для сканирования, специализированную систему подачи контактной жидкости, механизацию процесса сканирования;
- обоснование критериев браковки по результатам контроля, в том числе, гидростатических испытаний;
- разработка и согласование технологической инструкции на контроль, верификация методики.

Список сокращений и условных обозначений

АЦП - аналого-цифровое преобразование

ГЗИ - генератор зондирующих импульсов

ГОСТ – государственный стандарт

ГПУ - генератор-предусилитель

НДС – напряжённо - деформированное состояние

НК – неразрушающий контроль

НТД - нормативно-техническая документация

ОК – объект контроля

ОСТ – отраслевой стандарт

ПК - персональный компьютер

ПУ - приемный усилитель

ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

СОП – стандартный образец предприятия

СКО - среднеквадратическое отклонение

ТУ – технические условия

УЗ – ультразвуковой

УЗК – ультразвуковой контроль

ЭАП - электроакустический преобразователь

ЭМА – электромагнитно - акустический

ЭМАП – электромагнитно - акустический преобразователь

Список использованной литературы

1. Абабков, Н. В. Диагностика, повреждаемость и ремонт барабанов котлов высокого давления / Н. В. Абабков, Н. И. Кашубский, В. В. Муравьев [и др.] ; под ред. А. Н. Смирнова // М. : Машиностроение, 2011. 256 с.
2. Аббакумов, К.Е. Моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков / К. Е. Аббакумов, Н. В. Степаненко // Известия СпбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 8. С. 67—72.
3. Алешин, Н. П. Автоматизированный ультразвуковой контроль труб большого диаметра / Н. П. Алешин, Ю. Л. Гобов, А. В. Михайлов [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – № 3. – С. 3-11.
4. Алешин, Н. П. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем / Н. П. Алешин // Дефектоскопия. 2021. №5. Р. 22–30.
5. Антипов, А. Г. Выявляемость дефектов в рельсах магнитным методом / А.Г. Антипов, А. А. Марков // Дефектоскопия. 2019. № 4. С. 21-29.
6. Артемов, В. Е. О максимально реализуемой чувствительности контроля методом «многократной тени» / В. Е. Артемов, С. К. Паврос // Дефектоскопия. – 1982. – №9. – С. 28–33.
7. Ахромеева, И. Д. Преобразование волн Рэлея в объемные на локальных дефектах поверхности / И. Д. Ахромеева, В. В. Крылов // Акустический журн. 1977. №4. С. 510–516.
8. Бабкин, С. Э. Определение коэффициента Пуассона ферромагнитных материалов ЭМА-способом / С. Э. Бабкин // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 51-55.
9. Бабкин, С. Э. // Измерение скорости поверхностных волн ферромагнитных материалов электромагнитно-акустическим способом / С. Э. Бабкин, М. Ю.

Лебедева, Ю. И. Савченко, О. Н. ВострокнUTOва // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 4(45). – С. 47-51.

10. Бабкин, С. Э. Измерение скорости звука с помощью меандрового электромагнитно-акустического преобразователя / С. Э. Бабкин // Инженерная физика. – 2017. – № 1. – С. 50-54.

11. Бабкин, С. Э. Определение скорости основных типов акустических волн в металлах приставным датчиком / С. Э. Бабкин // Дефектоскопия. 2020. № 4. С. 32—39.

12. Бабкин, С. Э. Измерение скорости поверхностных волн ферромагнитных материалов электромагнитно-акустическим способом / С. Э. Бабкин, М. Ю. Лебедева, Ю. И. Савченко, О. Н. ВострокнUTOва // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №4(45). С. 47-51.

13. Бадалян, В. Г. Выявление и достоверность контроля в ультразвуковой дефектоскопии и дефектометрии / В. Г. Бадалян// Контроль. Диагностика. 2020. № 7. С. 4-17.

14. Баев, А. Р. Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница акустического контакта / А. Р. Баев, Ф. И. Пантелеенко, В. В. Захаренко и др.// Приборы и методы измерений. 2018. – т. 9, № 1. – с. 18–39.

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

16. Баранникова, С. А. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации высокохромистой стали / С. А. Баранникова, А. В. Бочкарёва, А. Г. Лунёв, Г. В. Шляхова, Л. Б. Зуев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. №8. С.558-564.

17. Бехер, С. А. Использование эффекта акустоупругости при исследовании механических напряжений в рельсах / С. А. Бехер, А. Н. Курбатов, Л. Н.

Степанова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2(50). – С. 104-111.

18. Бобров, А. Л. Анализ эффективности методов неразрушающего контроля резьбовой части бурильных труб / А. Л. Бобров, С. А. Бехер, С. П. Шляхтенков // Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – № 3(43). – С. 10-15.

19. Буденков, Г. А. Новая прогрессивная технология дефектоскопии протяженных объектов металлургической и нефтедобывающей промышленности / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Т. Н. Лебедева// Тяжелое машиностроение. 2004. № 11. С. 18 – 23.

20. Будрин, А. Ю. Влияние термической обработки на скорость распространения поперечных волн в стальных прутках / А. Ю. Будрин // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17, № 4. С. 12 – 17.

21. Булдакова, И. В. Определение механических напряжений в рельсах акустоупругим способом / И. В. Булдакова, Л. В. Волкова, М. А. Синцов, Е. В. Недзвецкая // 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.

22. Булычев, О. А. Многоканальная магниторезистивная система магнитного контроля бесшовных толстостенных труб / О. А. Булычев, С. А. Шлеенков, А. С. Шлеенков // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 58—63.

23. Викторов, И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. - М.: Наука, 1981. 287 с.

24. Викторов, И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – М. : Наука, 1981. – 171 с.

25. Викторов, И. А. Волны типа рэлеевских на цилиндрических поверхностях / И. А. Викторов // Акустический журнал. 1958. №2. С. 131–136.

26. Викторов, И.А. К расчету фазовых скоростей поверхностных волн на границе твердого полупространства с жидким слоем / И. А. Викторов // Акустический журн. 1977. №6. С. 947–948.

27. Викторов, И. А. О влиянии несовершенств поверхности на распространение рэлеевских волн / И. А. Викторов // Докл. АН СССР. 1958. Т. 119. №3. С. 463–465.
28. Викторов, И. А. Исследование распространения ультразвуковых поверхностных волн на границе твердого тела с жидкостью / И. А. Викторов, Е. К. Грищенко, Т. М. Каёкина // Акустический журн. 1963. №2. С. 162–170.
29. Волкова, Л. В. Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, И. В. Булдакова // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 42 – 52.
30. Волкова, Л. В. Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Сталь. 2021. № 5. С. 36-41.
31. Волкова, Л. В. Оценка внутренних механических напряжений и упругих модулей в металле магистральных газопроводов / Л. В. Волкова, Р. М. Исмаилов, М. А. Синцов // В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2019. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XV Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 111-118
32. Ворончихин, С. Ю. Оценка технического состояния технологических трубопроводов компрессорных станций ПАО "Газпром" с применением роботизированных сканеров / С. Ю. Ворончихин, А. А. Самокрутов, Ю. А. Седелев // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2016. – № 3(27). – С. 120-130.
33. Гобов, Ю. Л. Намагничивающая система для ЭМА-сканера-дефектоскопа / Ю. Л. Гобов, А. В. Михайлов, Я. Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 48-56.
34. Гончар А. В. Изменение упругих характеристик метастабильной аустенитной стали при циклическом деформировании / А. В. Гончар, В. В. Мишакин, В. А. Ключников, К. В. Курашкин // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87, № 4. – С. 518-521.

35. Горкунов, Э. С. Сопоставление магнитных параметров закаленных трубных сталей с остаточными макро- и микронапряжениями, определенными рентгеновским методом / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, Л. С. Горулева // Дефектоскопия. 2019. № 5. С. 30 – 38.
36. Грабовский, А. В. Вихретоковый контроль бурильных труб / А. В. Грабовский // Территория «Нефтегаз». 2016. № 10. С. 42—46.
37. Давыдов В. В. Бесконтактный метод дефектоскопии внутренних стенок трубопровода /В. В. Давыдов, Н. С. Мязин, С. Э. Логунов, В. Б. Фадеев // Дефектоскопия. – 2018. – № 3. – С. 67-76.
38. Дамаскин, А. Л. Исследование акустического тракта при эхо-импульсном контроле поверхностными волнами / А. Л. Дамаскин, Г. Я. Дымкин, О. М. Костюк // Дефектоскопия. 1991. №2. С. 26–30.
39. Данилов, В. Н. К вопросу о рассеянии поверхностных волн Рэлея на пограничных дефектах / В. Н. Данилов, В. С. Ямщиков // Акустический журн. 1985. №3. С. 323–327.
40. Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации [электронный ресурс] <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/586308>.
41. Добровольский, В. И. Экспериментальное обоснование метода прогнозирования малоциклового долговечности элементов конструкций / В. И. Добровольский, С. В. Добровольский [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2014. № 1. С. 36–38.
42. Дымкин, Г. Я. Новые нормативные документы по неразрушающему контролю грузовых вагонов при ремонте / Г. Я. Дымкин, С. Р. Цомук // В мире неразрушающего контроля, 2014, №1, с. 78-80.
43. Дымкин, Г. Я. Иммерсионный контроль объектов криволинейного профиля поверхностными ультразвуковыми волнами / Г. Я. Дымкин, А. В. Кириков, К. А. Бондарчук // Дефектоскопия. – 2022. – № 8. – С. 25-35.
44. Жарылкапов, С. Ж. Рассеяние волн Рэлея на выемке произвольной глубины / С. Ж. Жарылкапов, В. В. Крылов // Акустический журн. 1987. №5. С. 878–883.

45. Жостков, Р.А. Восстановление неоднородностей среды при микросейсмическом зондировании вдоль криволинейной поверхности /Р. А. Жостков // Акустический журн. 2019. Т. 65. №5. С. 708–720.
46. Зайцев, А. И. Исследование типов и причин возникновения дефектов непрерывнолитых заготовок, сортового проката и готовых изделий из рессорно-пружинных сталей, в том числе, связанных с образованием неметаллических включений / А. И. Зайцев, А. Б. Степанов, Б. А. Сарычев, А. Ю. Дзюба // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 1. – С. 35-45.
47. Земсков, Т. И. Прибор для измерения скорости ультразвуковых колебаний методом автоциркуляции импульсов /Д. В. Злобин, Н. Н. Зверев, М. А. Синцов // 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.
48. Ибрагимов, Н. Г. Восстановление рабочих характеристик насосных штанг, выработавших первоначальный эксплуатационный ресурс / Н. Г. Ибрагимов, В. Г. Фадеев, А. В. Артюхов и др. // Нефтяное хозяйство. 2016. № 1. С. 78 – 80.
49. Иванов, А.Н. Методика ультразвукового контроля труб нефтяного сортамента на ОАО «Тагмет» / А. Н. Иванов, В. И. Тимошенко // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 9 (146). С. 214—220.
50. Иванов, А.Н. Проверка электроакустического тракта ультразвукового дефектоскопа "ДЭКОТ" при контроле бесшовных труб нефтяного сортамента на ПАО "ТАГМЕТ" / А. Н. Иванов, В. И. Тимошенко // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. №8. С.139—150.
51. Иванова, В. С. Усталостное разрушение металлов / В. С. Иванова. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по чёрной и цветной металлургии, 1963. – 272 с.
52. Исаев, А. А. Долговечность штанг при эксплуатации скважин установками штанговых винтовых насосов и разработка центраторов для насосных штанг / А. А. Исаев, В. И. Малыхин, А. А. Шарифуллин и др // Изв. Томского политехнического университета. 2018. Т. 329. № 4. С. 21 – 29.

53. Кириков, А. В. Устройство для иммерсионного ультразвукового контроля / А. В. Кириков, Г. Я. Дымкин // Патент на изобретение №2723913 от 21.02.2020 г.
54. Киселев, Е. К. Вихретоковая система контроля внутреннего диаметра труб / Е. К. Киселев, А. Е. Гольдштейн // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 25—30.
55. Климов, В. А. Об эффективности эксплуатации насосных штанг / В. А. Климов, В. М. Валовский // Нефтяное хозяйство. 2015. № 1. С. 94 – 97.
56. Климов, В. А., Валовский К. В., Результаты комплексных испытаний средств технической диагностики насосных штанг в ОАО «Татнефть» / В. А. Климов, В. М. Валовский, В. В. Гаврилов и др.// Нефтяное хозяйство. 2009. № 4. С. 94 – 98.
57. Кокорин, В. В. Пластическая деформация и физические процессы, протекающие в металле при деформации / В.В. Кокорин, С. В. Ромашенко, М. М. Михнёв // Решетневские чтения. 2013. Т. 1. С. 16-17.
58. Корнилова, А. В. Практические аспекты оценки повреждаемость в условиях многоциклового усталости /А. В. Корнилова, И. М. Идармачев, Чжо Заяр, Тет Паинг // - М.: Издательство "Перо", 2020. 115 с.
59. Костин, В. Н. Структурная чувствительность параметров несимметричного цикла "коэрцитивный возврат – намагничивание" термообработанных низкоуглеродистых сталей / В. Н. Костин, О. Н. Василенко, С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 36 – 42.
60. Крюков, А. С. Метод определения объема произвольно расположенных локальных дефектов при вихретоковом контроле цилиндрических изделий многоэлементным преобразователем / А. С. Крюков, В. В. Чегодаев, А. Г. Жданов, В. П. Лунин // Дефектоскопия. 2015. №12. С. 46-56.
61. Маликов, А. А. Применение метода микроиндентирования для определения механических характеристик поверхностного слоя / А. А. Маликов, Е. В. Маркова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2017, № 2(57). С. 24-28.
62. Марков, А. А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов / А. А. Марков, Е. А.

- Максимова // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 2. С. 22-32.
63. Мацевитый, В. М. О различиях механизмов разрушения металлов в условиях малоциклового и многоциклового усталости / В.М. Мацевитый, К.В. Вакуленко, И.Б. Казак // Проблемы машиностроения. - 2014. - Т. 17. № 1. - С. 60-67.
64. Миловзоров, Г. В. Методы диагностирования состояния глубинного насосного оборудования на основе результатов динамометрирования / Г. В. Миловзоров, А. П. Ильин, Т. А. Редькина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 159 – 166.
65. Михайлов, А. В. // Электромагнитно-акустический преобразователь с импульсным подмагничиванием / А. В. Михайлов, Ю. Л. Гобов, Я. Г. Смородинский, С. В. Щербинин // Дефектоскопия. – 2015. – № 8. – С. 14-23.
66. Мишакин, В. В. Связь энергии деформации с коэффициентом Пуассона при циклическом нагружении аустенитной стали / В. В. Мишакин, В. А. Клюшников, А. В. Гончар // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 5. – С. 32-36.
67. Муравьев, В. В. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн / В. В. Муравьев, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 2. С. 37-43.
68. Муравьев, В. В. Связь внутренних напряжений и механических свойств дифференцированно-упрочненных рельсов с параметрами акустических волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, Л. В. Гущина // Сталь. 2018. № 10. С. 64 – 67.
69. Муравьев, В. В. Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Е. Н. Кокорина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013 № 4 С. 66-70.
70. Муравьев, В. В. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость / В. В.

Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 37-44.

71. Муравьев, В. В. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак [и др.] // Дефектоскопия. 2014. Т. 50, № 8. С. 3–12.

72. Муравьев, В. В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки / В. В. Муравьев // Дефектоскопия. 1989. № 2. С. 66 – 68.

73. Муравьев, В. В. Влияние термической обработки на скорость ультразвука в алюминиевых сплавах / В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 1989. – № 11. – С. 65-72.

74. 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.

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

76. Муравьев, В. В. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова, Л. В. Гущина // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 11—23.

77. Муравьев, В. В. Оценка накопленной поврежденности шеек осей колесных пар вагонов ультразвуковым методом с использованием рэлеевских и головных волн / В. В. Муравьев, Л. В. Гущина, С. В. Казанцев // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 14—23,

78. Муравьев, В. В. Устройство акустического контроля прутков / В. В. Муравьев, Ю. В. Мышкин, О. В. Муравьева, Д. В. Злобин, М. А. Синцов // Патент на полезную модель RU 173773 U1, 11.09.2017.

79. Муравьев, В. В. Исследования акустоупругих характеристик стержневой волны в термически обработанных стальных проволоках электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Платунов, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. 2012. № 8. С. 3-15.
80. Муравьев, В. В. Влияние уровня нагрузки при малоциклового усталости на скорость поперечных и поверхностных волн в стальных прутках / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов // В книге: XXXI Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)». Тезисы докладов. 2018. С. 15.
81. Муравьева, О. В. Коэффициент выявляемости при реализации зеркально-теневого метода на многократных отражениях / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, Ю. В. Мышкин, В. А. Зорин, К. В. Петров, М. А. Синцов, А. Ф. Брестер // В книге: XXXI Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)». Тезисы докладов. 2018. С. 16-17.
82. Муравьев, В. В. Акустическая структуроскопия усталости при циклическом нагружении стальных прутков / В. В. Муравьев, М. А. Синцов, А. Ю. Будрин, А. В. Зорин // В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции. 2018. С. 253-260.
83. Муравьева, О. В. Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, А. Ф. Башарова, М. А. Синцов, О. П. Богдан // Сталь. – 2020. – № 8. – С. 63-68.
84. Муравьева, О. В. Выбор критериев браковки при акустическом контроле проката для производства бурильных труб с использованием рэлеевских волн / О. В. Муравьева, В. А. Зорин, М. А. Синцов // В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 163-170
85. Муравьева, О. В. Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым

методами контроля / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Синцов, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2022. – № 4. – С. 14-25.

86. Муравьева, О. В. Использование корреляционной функции при определении скорости ультразвуковой волны в цилиндрических объектах / О. В. Муравьева, И. В. Булдакова // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сб. тр. III Всерос. науч.техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2014. С. 217 – 222.

87. Муравьева, О. В. Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн / О. В. Муравьева, В. А. Зорин // Дефектоскопия. 2017. №. 5. С. 3—9.

88. Муравьева, О. В. Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова и др. // Автометрия. № 4. – 2016. С. 62–70.

89. Муравьева, О. В.. Электромагнитно-акустическая структуроскопия пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова и др. // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций – 2016. Сборник материалов X Международной конференции "Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций ". – Екатеринбург: Изд-во ИМАШ УрО РАН, 2016. С. 284–285.

90. Муравьева, О. В. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак и др.// – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. – 234 с.

91. Муравьева, О. В. Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. Т. 68, № 4. С. 46–50.

92. Муравьева, О. В. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин и др.// Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 110 – 115.

93. Муравьев, В. В. Оценка остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах акустическим методом / В. В. Муравьев, К. А. Тапков; Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова. – Ижевск: 2023. – 156 с. – ISBN 978-5-7526-1000-4.
94. Муравьева, О. В. Влияние фактора разных плавок при производстве пруткового проката на скорости акустических волн / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Синцов, В. С. Стрелков, А. Е. Шкляев // В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции. 2018. С. 269-278.
95. Муравьева, О. В. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента / О. В. Муравьева, Л. В. Волкова, В. В. Муравьев, М. А. Синцов, Ю. В. Мышкин, А. Ф. Башарова // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 48-57.
96. Муравьева, О. В. Анализ отражённых сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова, И. В. Булдакова, М. Ю. Соков // Автометрия. 2016. Т. 52. № 4. С. 62-70.
97. Муравьева, О. В. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин // Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2017. 234 с.
98. Муравьева, О. В. Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2016. – Т. 68. – № 4. – С. 46–50.
99. Муравьева, О. В. Акустический волноводный контроль элементов глубинно-насосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // Нефтяное хозяйство. 2016. № 9. С. 110—115.

100. Никифоров, Л. А. Возбуждение поверхностной волны ультразвуковым пучком на границе раздела жидкость-твердая среда / Л. А. Никифоров, А. В. Харитонов // Дефектоскопия. 1973. №3. С. 45–53.
101. Паврос, К. С. Сравнительная выявляемость плоскостных протяженных дефектов листового проката методами отражения и прохождения / К. С. Паврос, И. Г. Сидоренко, Б. Рокштро // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22. № 6. С. 75-83.
102. Петров, К. В. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, О. В. Муравьева, Ю. В. Мышкин, А. Ф. Башарова // Дефектоскопия. 2019. № 2. С. 16 – 24.
103. 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. №2. 2018. С.135-146.
104. Полупан, А. В. Ультразвуковой контроль поверхностными волнами / А. В. Полупан // Издательский дом «Спектр», 2014. 120 с.
105. Сандомирский, С. Г. Возможности контроля физико-механических свойств стали 40Х по параметрам предельной петли магнитного гистерезиса / С. Г. Сандомирский // Сталь. 2018. № 5. С. 46 – 50.
106. Сандомирский, С. Г. Зависимость коэффициента корреляции между результатами измерения параметра и его истинными значениями от приведенной погрешности измерения / С. Г. Сандомирский // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 90 – 98.
107. Сербин, Е. Д. О возможности оценки магнитострикционных характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам / Е. Д. Сербин, В. Н. Костин // Дефектоскопия. 2019. № 5. С. 31 – 36.
108. Синцов, М.А. Исследование чувствительности эхо-метода с применением рэлеевских волн для контроля внутренней поверхности алюминиевых труб / М. А. Синцов // В сборнике: Приборостроение в XXI веке – 2022. Интеграция науки,

образования и производства. Сборник материалов XVIII Всероссийской научно-технической конференции. Ижевск, 2023. С. 273-278.

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

110. Смирнов, А. Н. Оценка напряженно-деформированного состояния сварных соединений углеродистых сталей после различных режимов тепловложения акустическим методом / А. Н. Смирнов, В. Л. Князьков, Н. В. Абабков [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – № 1. – С. 40-46.

111. Смирнов, А. Н. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, В. В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 44–51.

112. Стрижак, В. А. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 159 – 166.

113. Стрижак, В. А. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 565–571.

114. Стрижак В.А. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1 (17). С. 243–250.

115. Сучков, Г. М. Генератор зондирующих импульсов для ЭМА – дефектоскопов / Г.М. Сучков, В.В. Федоров, А.В. Десятниченко, С.В. Хащина, М.С. Маслова // Дефектоскопия. – 2012. – №9. – С. 42–47,

116. Сучков, Г. М. Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий / Г. М. Сучков, Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, С. Ю. Плеснецов, З. В. Билык, Ю. Е. Хорошайло, С. А. Ефименко, С. Бусси // Дефектоскопия. 2020. №1. С. 14—21.
117. Сучков, Г. М. Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катаных ферромагнитных металлоизделий/ Г. М. Сучков, О. Н. Петрищев, С. В. Хащина, А. В. Десятниченко, Е. Л. Ноздрачева // - Контроль. Диагностика. 2013. № 4. С.31-35,
118. Толипов, Х. Б. Экспериментальная установка для бесконтактного измерения скорости и амплитуды смещений волны Рэлея с малого участка поверхности / Х. Б. Талипов // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 175-177
119. Углов, А. Л. О контроле напряженного состояния газопроводов из анизотропной стали методом акустоупругости / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов // Дефектоскопия. – 2015. – № 4. – С. 34-41.
120. Углов, А. Л. Об ультразвуковом контроле толщины плазменной наплавки из медно-никелевого сплава на стальную цилиндрическую поверхность / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов, М. В. Колесников и др. // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 3. С. 3 – 10
121. Углов, А. Л. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов, А. Л. Бычков, М. О. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 3-9.
122. Хлыбов, А. А. Определение механических напряжений с помощью поверхностных волн Рэлея, возбуждаемых магнитоакустическим преобразователем / А. А. Хлыбов, А. Л. Углов, В. М. Родюшкин, Ю.А. Катасонов, О. Ю. Катасонов // Дефектоскопия. 2014. № 12. С.3-10
123. Чертенков, М. В. Предпосылки для комплексного использования стандартного каротажа и акустических исследований с целью прогноза коэффициента Пуассона / М. В. Чертенков, Л. М. Рузин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 16-18.

124. Центральный металлический портал РФ. URL: http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stk/45 (дата обращения: 23.10.2020).
125. Ширяев А.Г. Технологии производства стальных бесшовных труб для добычи трудноизвлекаемых углеводородов / А. Г. Ширяев, С. Г. Четвериков, С. Г. Чикалов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 11. – С. 866-875.
126. Шлеенков А.С. Особенности и преимущества применения анизотропных магниторезистивных датчиков поля для дефектоскопии полного объема труб малого и среднего диаметров / А. С. Шлеенков, О. А. Булычев, С. А. Шлеенков, Д. В. Новгородов // Дефектоскопия. 2020. № 5. С. 12-19.
127. Ahmad M. Characterization of surface crack width in plates using Rayleigh wave electromagnetic acoustic transducers // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2021. V. 1043, No. 4. P. 042038.
128. Cheng L. Crack characterisation using invariable feature extraction in stainless steel specimen used for absorber tubes of CSP applications via EMAT // Renew. Energy. 2017. V. 101. P. 771–781.
129. Ducouso M., Reverdy F. Real-time imaging of microcracks on metallic surface using total focusing method and plane wave imaging with Rayleigh waves // NDT E Int. 2020. V. 116. P. 102311.
130. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel // International Journal of Fatigue. 2018. Vol. 106. P. 153 – 158.
131. He C., Deng P., Lu Y., Liu X., Liu Z., Jiao J., Wu B. Estimation of Surface Crack Depth using Rayleigh Waves by Electromagnetic Acoustic Transducers // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2017. V. 22(4) P. 541-548.
132. Hu B., Yu R. Magnetic testing for inter-granular crack defect of tubing coupling // Nondestruct. Test. Eval. 2018. V. 33, No. 2. P. 119–129.

133. Hyung M.K., Doo-Hyun C. Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 175-183.
134. Kim C. Evaluating rolling contact fatigue damage precursors with Rayleigh waves in 1060 steel // *J. Nondestruct. Eval.* 2021. V. 40, No. 4. P. 91.
135. Liu S. Sun Y., Jiang X., Kang Y. Comparison and analysis of multiple signal processing methods in steel wire rope defect detection by hall sensor // *Measurement*. 2021. V. 171. P. 108768.
136. Liu X. Surface crack identification on a cylinder using the signal enhancement of the scanning laser line source method // *Appl. Sci.* 2018. V. 8. No. 10. P. 1796.
137. Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Gonchar A. V., Kachanov M. On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring // *International Journal of Engineering Science*. 2018. № 135. P. 17 – 22.
138. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V., Kachanov M. Estimating fatigue damage of austenitic steel by combining the ultrasonic and with eddy current monitoring // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. Vol. 38. № 1.
139. Pei C., Zhao S., Liu T., Chen Zh. A new method for plastic strain measurement with Rayleigh wave polarization // *Ultrasonics*. 2018. V. 188. P. 168—173.
140. Pfeifer D., Kim J., Jacobs L.J. Nonlinear Rayleigh waves to evaluate plasticity damage in X52 pipeline material // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. V. 143. P. 143106794.
141. Rees-Lloyd O., Charlton P., Mosey S. Effects of relative motion on a Rayleigh wave electromagnetic acoustic transducer operating on aluminium // *Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2019. V. 61. № 2. P. 83—89.
142. Thring C.B. The effect of EMAT coil geometry on the Rayleigh wave frequency behaviour // *Ultrasonics*. 2019. V. 99. P. 105945.
143. Tkocz J., Dixon S. Electromagnetic acoustic transducer optimization for surface wave applications // *NDT & E International*. 2019. V. 107. P. 102142.
144. Trushkevych O., Edwards R.S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system // *NDT & E International*. 2019. V. 107 P. 102140.

145. Tu J. An external through type RA-EMAT for steel pipe inspection // *Sensors Actuators A: Phys.* 2021. V. 331. P. 113053.
146. Vakhguelt A., Kapayeva S. D., Bergander M.J. Combination non-destructive test (NDT) method for early damage detection and condition assessment of boiler tubes // *Procedia Engineering.* 2017. V. 188. P. 125-132.
147. Vakhguelt A., Syswoio Jo R., Bergander M.J. Electromagnetic acoustic boiler tubes inspection with robotic device // *Vibroengineering PROCEDIA.* 2017. V. 15. P. 115–118.
148. Wan X., Zhang X., Fan H., Tse P.W., Dong M., Ma H. Numerical study on ultrasonic guided waves for the inspection of polygonal drill pipes // *Sensors.* 2019. V. 19 (9), pp. 2128.
149. Wang S., Zhao P., Qu Zh., Wang K., A new system for defects inspection of boiler water wall tubes using a combination of EMAT and MFL // *2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT).* IEEE. 2018. P. 65–69.
150. Zhang Y., Huang S., Zhao W., Wang Sh., Wang Q. Electromagnetic ultrasonic guided wave long-term monitoring and data difference adaptive extraction method for buried oil-gas pipelines // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics.* 2017. V. 54 (3) P. 329—339.
151. Yuan X., Li W., Yin X., Chen G. In-service detection of longitudinal cracks on drill pipes using induced circumferential current // *Insight.* 2016. V. 58. P. 13-17.
152. Zhang Sh., Qin L., Li X., Kube C. Propagation of Rayleigh waves on curved surfaces // *Wave Motion.* 2020. V. 94. P. 105945.
153. Zhang Z., Zhao J., Pan Y. Surface circular-arc defects interacted by laser-generated Rayleigh wave // *Ultrasonics.* 2020. V. 103. P. 106085.

Приложение А



Утверждаю
Генеральный директор
ФЦСИ и МЖГТУ
Ис. № М.К. Калашникова»
_____ А.В. Губерт
«__» _____ 2023 г.



Согласовано
Генеральный директор
ООО «Реал-шторм»
_____ В.М. Фрум
_____ 2023 г.

**Методика
ультразвукового контроля поверхности трубы-
заготовки лейнера рэлеевскими волнами эхо-методом**

Ижевск, 2023

Содержание

- 1 Стандартный образец предприятия
- 2 Основное оборудование
- 3 Процедура контроля
- 4 Подготовка дефектоскопа
- 5 Подготовка объекта контроля
- 6 Проведение контроля
- 7 Оценка качества
- 8 Результаты контроля
- 9 Заключение по методике

Методика ультразвукового контроля поверхности трубы-заготовки лейнера рэлеевскими волнами эхо-методом

Анализ возможных вариантов реализации методик волноводного контроля с использованием рэлеевских волн и нормальных волн горизонтальной поляризации, а также преобразователей различного типа (ПЭП и ЭМА), показали, что наиболее оптимальным с позиций достижения максимальной чувствительности и достоверности контроля, является эхо-метод контроля с внутренней поверхности трубы с применением пьезопреобразователя рэлеевских волн. Далее приводятся основные методические рекомендации по контролю этим методом.

1 Стандартный образец предприятия

В качестве контрольного образца (стандартного образца предприятия - СОП), используемого для настройки чувствительности и проверки работоспособности дефектоскопа используется алюминиевая труба-заготовка с нанесенными искусственными дефектами, эскиз которой представлен на рисунке 1.

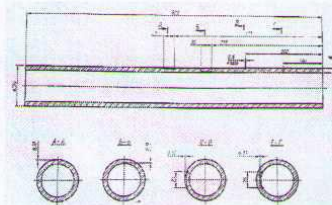


Рисунок 1. Эскиз контрольного образца с искусственными дефектами

Согласно ГОСТ ISO 11439-2014 размер допустимого дефекта для неразрушающего контроля должен определяться при циклических нагрузках

баллона. Контрольный образец подходящей длины изготавливают из баллона с такими же диаметром и толщиной стенки, из материала с такими же акустическими характеристиками и качеством обработки поверхности, как у баллона, подлежащего испытанию. Контрольный образец не должен иметь дефектов, которые могут препятствовать обнаружению контрольных надрезов. Контрольные надрезы, продольные и поперечные, обрабатывают на наружной и внутренней поверхностях образца. Надрезы должны быть расположены на таком расстоянии друг от друга, чтобы каждый надрез можно было четко идентифицировать. Размеры и форма надрезов: длина должна быть не более 50 мм; ширина - не более двух номинальных глубин T . Там, где это условие не может быть выполнено, ширина надрезов должна быть не более 1 мм; глубина надрезов T должна составлять $(5 \pm 0,75) \%$ от номинальной толщины стенки S , но не менее 0,2 мм и не более 1 мм по всей длине надреза.

Отклонения на концах допускаются; надрез должен иметь острые края на линии пересечения с поверхностью стенки баллона; поперечное сечение надреза должно быть прямоугольным, за исключением случая использования электроэрозионного метода обработки, при котором дно надреза округляется; форму и размеры надреза контролируют соответствующим методом.

2 Основное оборудование

Согласно ГОСТ ISO 11439-2014 оборудование для ультразвукового контроля должно быть способно выявлять надрезы контрольного образца. Оборудование должно обслуживаться регулярно в соответствии с инструкциями изготовителя для обеспечения точности контроля. Записи об аттестации и проверках оборудования должны быть в наличии. Обслуживать испытательное оборудование должен обученный персонал под контролем квалифицированных специалистов, аттестованных на 2-й уровень по ISO 9712. Наружная и внутренняя поверхности баллона, подлежащего ультразвуковому контролю, должны соответствовать условиям, требуемым

для точного и воспроизводимого контроля. Для выявления дефектов используют эхо-импульсный метод. Используют также контактные или иммерсионные методы испытаний. Должен быть использован метод соединения, который гарантирует адекватную передачу ультразвуковых волн от поисковой головки к баллону.

В качестве основного оборудования, удовлетворяющего указанным требованиям, выбран дефектоскоп УД2-102 (рисунок 2) «Пеленг».



Рисунок 2 Дефектоскоп УД2-102 «Пеленг»

Ультразвуковой дефектоскоп Пеленг УД2-102 используется для обнаружения дефектов основного металла, сварных швов, труб, котлов и других металлических изделий при помощи ультразвука. Пеленг УД2-102 производится в нескольких версиях, в том числе в специальном исполнении для отдельных отраслей.

Существенно, что дефектоскоп УД2-102 ПЕЛЕНГ внесен в Государственный реестр средств измерений РФ, имеет сертификат Госстандарта Республики Беларусь и Республики Казахстан

Сертификат об утверждении типа средств измерений Российской Федерации. Ультразвуковой дефектоскоп УД2-102 ПЕЛЕНГ внесен в Государственный реестр средств измерений РФ. Ультразвуковой

дефектоскоп УД2-102 PELENG принят ОАО "ГАЗПРОМ" и МПС России в эксплуатацию.

Возможно использование других ультразвуковых дефектоскопов с характеристиками, удовлетворяющими требованиям методики контроля.

3 Процедура контроля

Ультразвуковому контролю трубы-заготовки подвергаются 100% внутренней поверхности объекта контроля. Выявлению подлежат поверхностные нарушения сплошности трубы: трещины, раскатные пузыри, рванины, риски, заусеницы, забоины, риски.

Выполнение контроля регламентируется с использованием следующего оборудования:

Основные средства:

- Дефектоскоп одноканальный ультразвуковой УД2-102;
- ПЭП П121-2,5-90-15х6.
- Стандартный образец предприятия СОП № У.1-2022.

Вспомогательные средства и материалы:

- контактная жидкость: вода водопроводная;
- оснастка для перемещения ПЭП;
- оснастка для подачи контактной жидкости;
- рулетка металлическая;
- мел, маркер;
- интерфейс для подключения дефектоскопа к персональному компьютеру;
- средства очистки: ветошь, шлифовальная бумага различной зернистости;
- лупа увеличительная кратностью не менее 4х.

К проведению контроля допускаются работники не младше 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, изучившие руководства по эксплуатации (паспорта) на используемые средства контроля (приборы, СОП). Специалист, выполняющий оценку качества трубы-заготовки по результатам УЗК должен быть сертифицирован на квалификационный

уровень не ниже II по ГОСТ Р ИСО 9712 по акустическому (ультразвуковому) виду неразрушающего контроля в промышленном секторе «Машиностроение и металлопроизводство». Специалист обязательно должен быть обучен и проинструктирован по технике безопасности и охране труда.

УЗК трубы-заготовки выполняют по технологическим картам контроля. С целью метрологического обеспечения контроля дефектоскоп УД2-102 в комплекте с ПЭП П121-2,5-90-15х6 должен проходить периодическую поверку в установленном порядке по методике, содержащейся в эксплуатационной документации, в соответствии с утвержденным на ООО «Научно-производственная фирма «Реал-Шторм» графиком поверки не реже одного раза в год.

СОП № У.1-2022 должен проходить аттестацию не реже одного раза в два год.

4 Подготовка дефектоскопа

Произвести внешний осмотр корпуса дефектоскопа, соединительных кабелей и разъёмов, ПЭП на наличие механических повреждений. Запрещается использовать оборудование при наличии видимых повреждений, влияющих на работоспособность оборудования и безопасность его эксплуатации.

Для УЗК трубы-заготовки волнами Рэлея используют готовые настройки в памяти дефектоскопа УД2-102 (порядок создания настройки рассмотрен на примере настроечной карты). Параметры контроля трубы-заготовки должны соответствовать таблице 1.

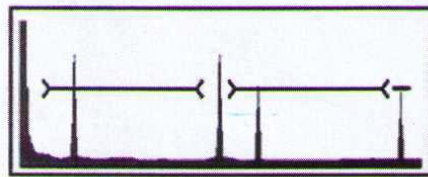
Таблица 1. Параметры УЗК трубы-заготовки.

Параметр	Значение	Параметр	Значение
«ЧАСТОТА»	2,5 МГц	«РАЗВЕРТКА»	РУЧН.
«ВКЛ. ПЭП»	СОВМЕЩ	«ДЛ. РАЗВ»	1020 ММ
«АМПЛ. ЗОНД.»	ВЫС	«ВС1:НАЧ.»	78,5 ММ

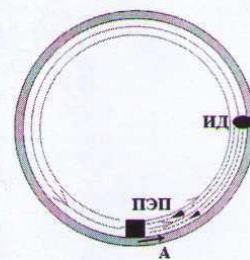
«УГОЛ ВВОДА»	90°	«ВС1:КОН.»	440 ММ
«СКОР-ТЬ»	2930 М/С	«ВС1:МЕТОД»	ЭХО
«ТОЛЩ.»	0000.0 ММ	«ВС2:НАЧ.»	517 ММ
«ОТСЕЧКА»	5%	«ВС2:КОН.»	850 ММ
«ДОП.УСИЛ.»	0 ДБ	«ВС2:МЕТОД»	ЭХО
«ВКЛ. АРУ»	+	«АРУ:НАЧ»	883 ММ
«РЕЖИМ ВРЧ»	ОТКЛ	«АРУ:КОН»	966 ММ
«ВР. ПЭП»	16,25 МКС*	«АСД»	+

* может быть изменено при неудовлетворительной проверке глубиномера

Используя СОП У.1-2022, проверить мертвую зону вблизи ПЭП и точность глубиномера дефектоскопа, для чего установить ПЭП (контактную жидкость нанести непосредственно под ПЭП) на внутреннюю поверхность СОП в точке I, направление А (Рисунок 3), таким образом, чтобы ПЭП находился на расстоянии 150 мм от искусственного дефекта (ИД). Убедится, что на экране дефектоскопа присутствуют первый и сквозной сигналы, причем второй сквозной сигнал достигает середины экрана, а также эхо-сигналы от ИД в первом и втором строках, при этом показания глубиномера дефектоскопа находятся в пределах 145 - 155 мм. При неудовлетворительной проверке произвести корректировку времени задержки в призме. В случае отсутствия эхо-сигнала в первом строке ПЭП необходимо заменить.



а)



б)

Рисунок 3 – Проверка глубиномера и мертвой зоны вблизи ПЭП

Используя СОП У.1-2022, проверить мертвую зону ПЭП в диаметрально противоположной точке, для чего установить ПЭП (контактную жидкость нанести непосредственно под ПЭП) на внутреннюю поверхность СОП в точке II, направление Б (Рисунок 4), таким образом, чтобы ПЭП находился на расстоянии 790 мм от ИД. Убедиться, что на экране дефектоскопа присутствуют эхо-сигналы от ИД в конце второго строба, в противном случае заменить ПЭП.

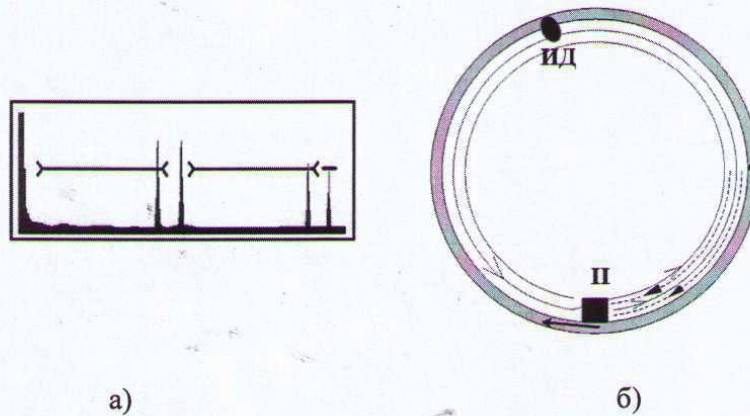


Рисунок 4 – Проверка мертвой зоны в точке, диаметрально противоположной месту установки ПЭП

5 Подготовка объекта контроля

Проверить качество очистки контролируемой поверхности, убедиться, что шероховатость поверхности не хуже Rz40, в противном случае труба-заготовка контролю не подлежит. Отдельные неровности, выступы, кромки зачищают шлифовальной бумагой. Поверхность также должна быть очищена от любых загрязнений до металлического блеска и высушена.

Осмотреть поверхность ОК наличие дефектов, видимых глазом, при необходимости используя лупу увеличительную. На поверхности не допускаются: трещины, раскатные пузыри, рванины, риски, заусеницы, забоины, риски, задиры, усы и кромки любой протяженности; УЗК такой

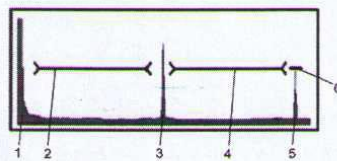
трубы-заготовки не проводится. При наличии механических повреждений отправить трубу-заготовку на зачистку для устранения выявленных дефектов.

6 Проведение контроля

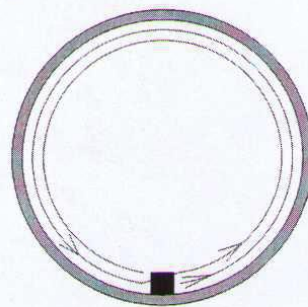
Подключить ПЭП соединительным кабелем к дефектоскопу. Вызвать настройку дефектоскопа, соответствующую проведению УЗК трубы-заготовки. Выполнить проверку готовой настройки дефектоскопа, при отклонении параметров провести программирование прибора заново согласно технологической карты настройки. По окончании проверки дефектоскопа убедиться, что режим АРУ и АСД включены.

Расположить трубу-заготовку на стенде УЗК горизонтально. Установить устройство подачи контактной жидкости с одно из торцов трубы-заготовки. Включить подачу контактной жидкости на контролируемую поверхность.

Установить ПЭП в БА. Установить БА на контролируемую поверхность трубы-заготовки на участок, смоченный контактной жидкостью, на расстоянии от 100 мм от торца, направление излучения волны при этом должно быть по окружности, плоскость излучения перпендикулярна образующей трубы-заготовки. Убедиться, что на экране дефектоскопа присутствуют сквозные сигналы. Вид А-развертки дефектоскопа при отсутствии дефектов и при наличии дефекта в дальней или ближней полуокружности колеса приведены на рисунке 5.



а)



б)

Рисунок 5 – Дефектограмма и ход луча при отсутствии дефектов:

*1 – зондирующий импульс; 2 – зона ВС1; 3 – первый сквозной сигнал;
4 – зона ВС2; 5 – второй сквозной сигнал; 6 – зона АРУ.*

Провести сканирование внутренней поверхности трубы-заготовки по образующей со скоростью не более 1 см/с, остановить перемещение БА у противоположного торца трубы-заготовки на расстоянии 100 мм от торца.

В случае, если при сканировании в зоне контроля (первой или второй зонах ВС) возникают эхо-сигналы, амплитуда которых равна или превышает пороговый уровень, при этом звучит звуковая и световая сигнализация АСД, сканирование прекратить.

Определить местоположение дефекта, для чего считать с экрана дефектоскопа показание глубиномера, соответствующее значению расстояния от передней грани ПЭП до дефекта; отмерить это расстояние от передней грани ПЭП по поверхности катания в направлении прозвучивания с помощью рулетки; отметить местоположение дефекта мелом или маркером. Подтвердить наличие дефекта, для чего: установить БА на расстоянии 145-155 мм от местоположения предполагаемого дефекта (целесообразно повернуть трубу-заготовку так, чтобы место установки БА оказалось внизу, где обеспечивается доступ контактной жидкости, остальной участок трубы-заготовки протереть насухо ветошью); небольшими движениями БА добиться максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта; считать с экрана дефектоскопа значение превышения амплитудой эхо-сигнала от дефекта порогового уровня зоны ВС (середины вертикальной шкалы экрана).

За превышение браковочного уровня амплитудой эхо-сигнала принимают достижение или превышение порогового уровня при включенном режиме АРУ.

Установить БА на ту же траекторию, но ориентировать ПЭП так, чтобы излучение происходило в противоположном направлении. Повторить вышеуказанные пункты.

Повернуть трубу-заготовку вокруг своей оси на $\frac{1}{4}$, затем повторить УЗК.

7 Оценка качества

Оценку качества ОК и оформление результатов контроля выполняет дефектоскопист не ниже второго уровня квалификации по акустическому (ультразвуковому) виду контроля по ГОСТ Р ИСО 9712 в промышленном секторе «Машиностроение и металлопроизводство».

Труба-заготовка бракуется, если в зонах ВС фиксируются эхо-сигналы, амплитуда которых превышает браковочный уровень.

При наличии признака дефекта необходимо сохранить протокол контроля в память дефектоскопа, а в дальнейшем, до конца рабочей смены, передать протокол на персональный компьютер через интерфейс связи для его хранения в цифровом или распечатанном виде.

По результатам контроля оформляется запись в журнале результатов УЗК труб-заготовок лейнеров.

Требования к сканированию

Трубы, подлежащие контролю, и поисковое устройство должны иметь относительно друг друга поступательное перемещение таким образом, чтобы можно было произвести сканирование всей поверхности трубы. Скорость вращения и поступательного движения должна быть постоянной в пределах $\pm 10\%$. Шаг сканирования вдоль образующей должен быть меньше, чем ширина, охватываемая поисковой головкой (должно быть гарантировано не менее 10 % перекрытия), и соотноситься с рабочей шириной луча так, чтобы гарантировать 100 %-ный охват поверхности баллона. Для обнаружения поперечных дефектов может быть использован альтернативный метод сканирования, где перемещения измерительной головки относительно баллона являются продольными. При этом колебательное движение должно гарантировать 100 %-ный охват поверхности с перекрытием не менее 10 %.

С целью устранения мертвой зоны со стороны зондирующего импульса и в зоне первого сквозного импульса требуется провести сканирование вдоль образующей с поворотом объекта на $\frac{1}{4}$ периметра трубы.

Ввиду того, что естественные дефекты могут иметь различную отражательную способность со стороны двух берегов трещины, рекомендуется сканировать объект в двух направлениях, либо использовать двухканальный режим с преобразователями, излучающими в противоположных направлениях.

8 Результаты контроля

С целью оценки чувствительности метода к искусственным и естественным дефектам проведено полное сканирование СОП и труб и рассчитаны коэффициенты выявляемости для выявленных дефектов. Виды дефектограмм и соответствующих им искусственных и естественных дефектов приведены на рисунках 7–10. Результаты расчета коэффициентов выявляемости для соответствующих типов дефектов сведены в таблицу 1. Коэффициент выявляемости эхо-метода $K_{ЭХО}$ определен, как отношение максимальной амплитуды эхо-сигнала от дефекта и амплитуды второго сквозного импульса, находящегося в зоне «АРУ». Коэффициент выявляемости зеркально-теневого метода $K_{ЗТМ}$ определен, как отношение амплитуд первого и второго сквозных импульсов.

Согласно таблице 2 продольный искусственный дефект выявляется с большим запасом по чувствительности (на 9 дБ выше амплитуды второго сквозного импульса). При этом на предельной чувствительности выявляются следующие дефекты: искусственный поперечный дефект, естественный дефект «вмятина», естественный дефект «совокупность наклонных царапин», коэффициент выявляемости которых составляет 8 – 9 отр. дБ. Таким образом, между контрольным отражателем и выявляемыми на предельной чувствительности дефектами имеется 18 дБ, что говорит о возможности существенного повышения чувствительности к продольным дефектам при

настройке браковочной чувствительности. О высокой чувствительности метода говорит надежно обнаруживаемый дефект типа продольной «царапины», нанесенной канцелярским ножом, коэффициент выявляемости которого на 1 дБ выше амплитуды второго сквозного импульса.

Существенно, что по предложенной методике в контролируемой трубе обнаружен визуально не подтвержденный естественный дефект протяженностью около 200 мм, коэффициент выявляемости которого составляет 5 дБ, то есть сравним по амплитуде с эхо-сигналом от контрольного отражателя.

Таблица 2 Коэффициенты выявляемости для различных типов дефектов

Тип дефекта	$A_{1с}$, дБ	$A_{2с}$, дБ	$A_{1д}$, дБ	$A_{2д}$, дБ	$K_{\text{ЭХО}}$, отр.дБ	$K_{\text{ЭТМ}}$, отр. дБ	Y , мм	Номер протокола
Бездефектный	15	33	-	-	-	18	-	№034
Искусственный продольный дефект (первый строб) – рис. 8	19	28	19	25	-9	9	268	№039
Искусственный продольный дефект (второй строб)– рис. 8	28	34	43	35	9	6	278	№095
Искусственный поперечный дефект (первый строб) – рис. 9	8	16	41	42	25	8	312	№095
естественный дефект (вмятина) – рис.4.10	38	45	55	-	10	7	281	№096
естественный дефект	14	22	42	48	20	8	327	№099

(совокупность наклонных царапин) –рис. 11								
естественный дефект внутренний (визуально не подтвержден) – 200 мм протяженность	33	48	43	48	-5	15	314	№098
Естественный дефект (царапина), нанесенный канцелярским ножом	27	37	36	49	-1	10		№10 08

Условные обозначения в таблице:

$A_{1с}$ – амплитуда первого сквозного импульса; $A_{2с}$ – амплитуда второго сквозного импульса; $A_{1д}$ – амплитуда эхо-импульса от дефекта в первом стробе, $A_{2д}$ – амплитуда эхо-импульса от дефекта во втором стробе; $K_{зтм}$ – коэффициент выявляемости при зеркально теневом методе; $K_{эхо}$ – коэффициент выявляемости при эхо-методе; Y – координата дефекта по периметру трубы в первом стробе.

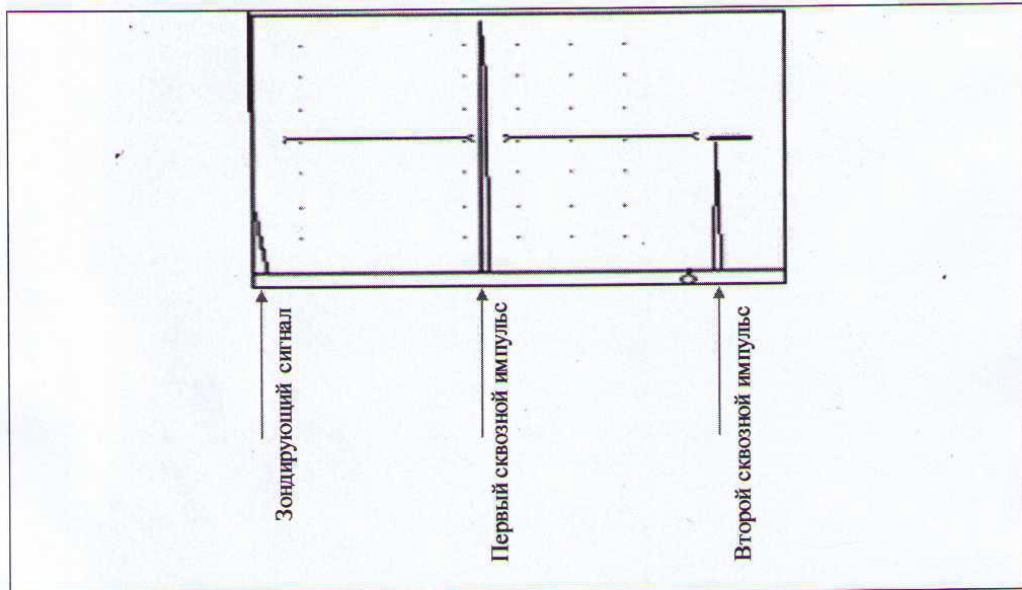


Рисунок 6 Дефектограмма бездефектной области

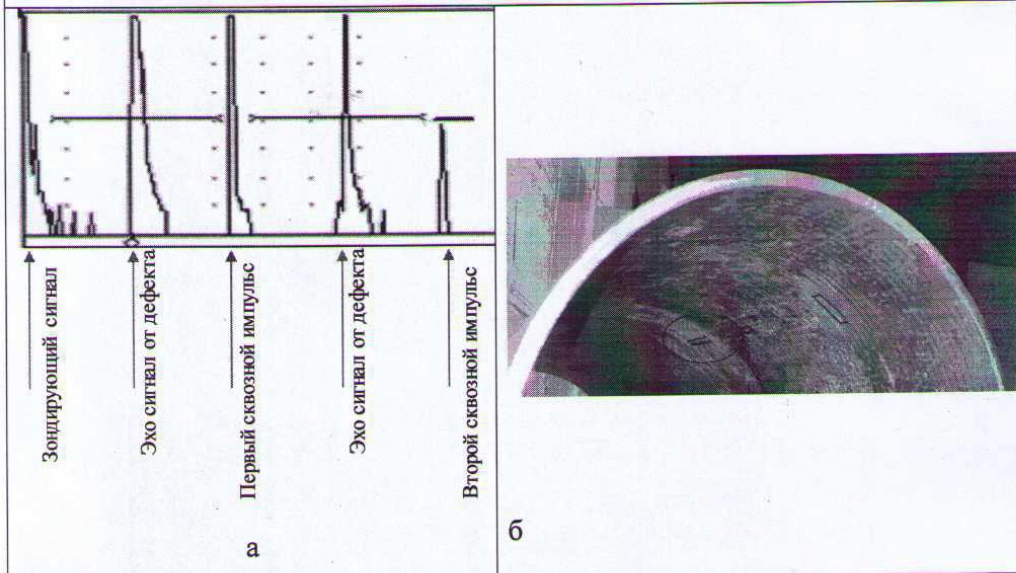


Рисунок 7 Дефектограмма в области искусственного продольного дефекта (а), фото дефекта (б)

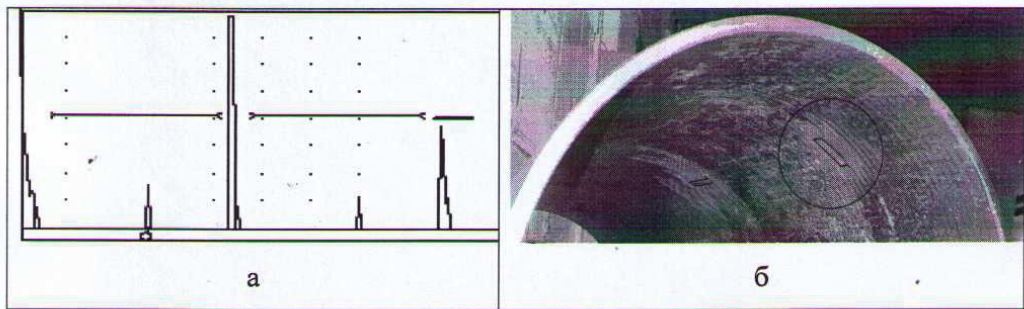


Рисунок 8 Дефектограмма в области искусственного поперечного дефекта (а), фото дефекта (б)

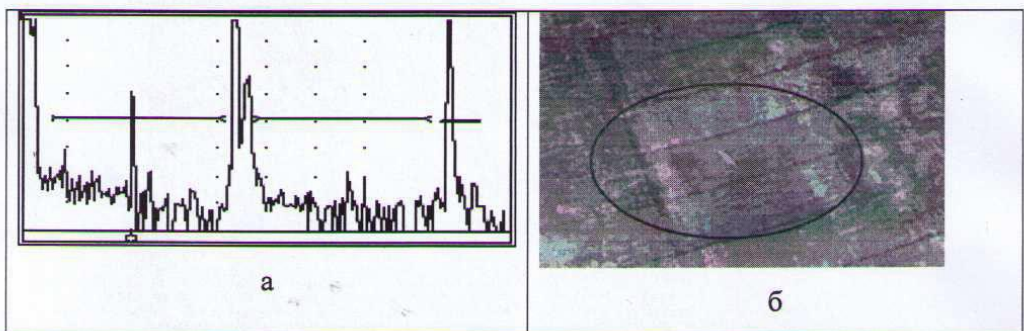


Рисунок 9 Дефектограмма в области естественного дефекта (вмятина) (а), фото дефекта (б)

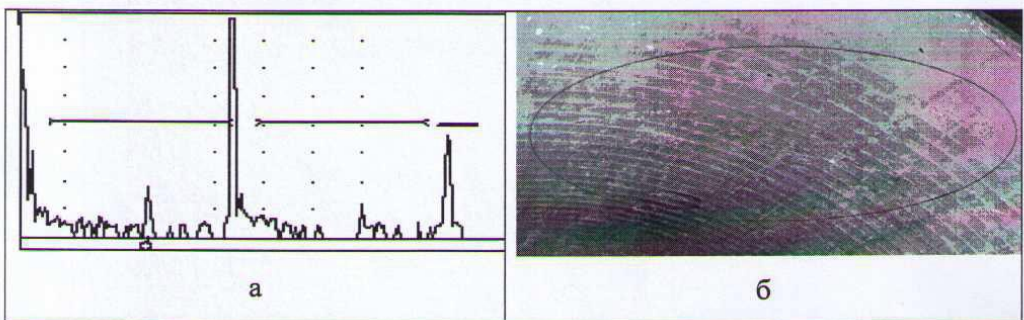
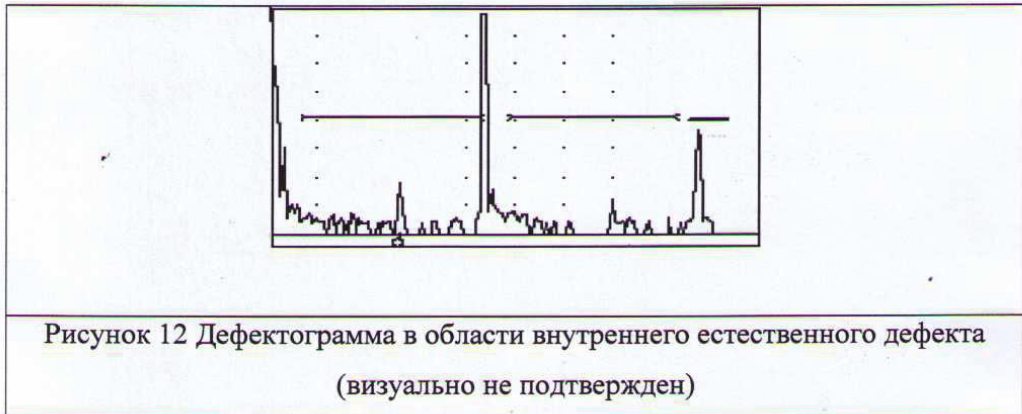


Рисунок 10 Дефектограмма в области естественного дефекта (царапины) (а), фото дефекта (б)



9 Заключение по методике

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 (или 5 раз), что говорит о возможности использования в качестве контрольного отражателя дефекта существенно меньшей глубины. При этом следует иметь в виду, что чувствительность к дефектам будет ограничена акустическим шумом внутренней поверхности трубы, обусловленным отражением от мелких царапин, неровностей поверхности и т.д. Чем выше чистота обработки поверхности, тем более мелкий дефект возможно выявить на фоне акустических шумов. В ходе проведения контроля на имеющихся объектах удалось обнаружить естественные дефекты - вмятина, совокупность наклонных царапин (на предельной чувствительности) продольная царапина, нанесенная канцелярским ножом (на среднем уровне чувствительности), визуально не подтвержденный естественный дефект протяженностью около 200 мм (на уровне контрольного отражателя).

Разработаны следующие основные методические рекомендации по контролю эхо-методом с внутренней поверхности трубы с применением пьезопреобразователя рэлеевских волн:

- a. с целью устранения мертвой зоны со стороны зондирующего импульса и в зоне первого сквозного импульса требуется провести сканирование вдоль образующей с поворотом объекта на $\frac{1}{4}$ периметра трубы;
- b. ввиду того, что естественные дефекты могут иметь различную отражательную способность со стороны двух берегов трещины, рекомендуется прозвучивать объект в двух направлениях по периметру трубы, разворачивая преобразователь;
- c. для повышения скорости сканирования возможно использовать двухканальный режим с преобразователями, излучающими в противоположных направлениях;
- d. при средней скорости сканирования 0,5 м/мин в двухканальном режиме возможно обеспечение производительности 1 метр за 2 минуты или 10 минут на контроль одной трубы длиной 5 метров;
- e. при необходимости увеличения толщины стенки контролируемой трубы и требования выявления дефектов во внутренней половине стенки трубы, требуется снижение рабочей частоты контроля, при этом чувствительность к дефектам будет ухудшаться;
- f. возможна разработка технологии контроля трубы с наружной поверхности для выявления поверхностных дефектов внешней поверхности;
- g. при контроле требуется обеспечить специальные меры по устранению излишков жидкости и загрязнений с внутренней поверхности трубы;
- h. предлагаемая технология использует стандартные ультразвуковые дефектоскопы и специально разработанные высокочувствительные пьезопреобразователи рэлеевских волн, с конструкцией, адаптированной под геометрию внутренней поверхности трубы, подвижную платформу для сканирования преобразователей и специализированную систему подачи контактной жидкости во избежание скопления излишков по пути следования волны.

Приложение Б Акт об апробации на предприятии

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «ПКНМ-Урал»
А. Н. Озорнин



_____» _____ 2023 г.

АКТ

**об апробации результатов диссертационной работы
Синцова Максима Анатольевича**

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Синцова М.А. «Чувствительность амплитудного теневого метода с использованием рэлеевских волн при структуроскопии и дефектоскопии металлоизделий пруткового и трубного сортамента» были рассмотрены и апробированы в ООО «ПКНМ-Урал».

Подтверждена возможность применения предложенного электромагнитно-акустического способа контроля заготовок для контроля в процессе производства бурильных труб. Применение метода позволяет повысить качество неразрушающего контроля и скорость проведения контроля заготовок бурильных труб, диагностировать раннюю стадию развития дефектов, что оказывает положительный эффект на надежность выпускаемой продукции.

Начальник лаборатории НК ООО «ПКНМ-Урал» Ершов С.В.
(подпись, Ф.И.О.)

Приложение В Акт об апробации на предприятии



РЕАЛ
ШТОРМ
РОСАТОМ

Общество с ограниченной ответственностью
"Научно-Производственная Фирма
"Реал-Шторм"
(ООО «НПФ «Реал-Шторм»)
426039, Россия, УР, г. Ижевск,
ул. Новосмирновская, д. 21
Тел. +7 (3412) 65-40-17, 48-37-06
E-mail: realstorm@udm.ru
ИНН 1840001474, КПП 184001001

№ _____
На № _____ от _____

АКТ

об апробации результатов диссертационной работы Синцова Максима Анатольевича

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Синцова М.А. «Чувствительность амплитудного теневого метода с использованием рэлеевских волн при структуроскопии и дефектоскопии металлоизделий пруткового и трубного сортамента» были рассмотрены и апробированы в ООО «НПФ «Реал-Шторм».

Подтверждена возможность применения предложенной методики акустического контроля по выявлению недопустимых дефектов в алюминиевых трубах-заготовках лейнеров. Предложенная методика, основанная на излучении - приеме рэлеевских волн, распространяющихся по периметру внутренней поверхности трубы-заготовки при сканировании вдоль образующей трубы показала высокую эффективность при проведении неразрушающего контроля алюминиевых труб заготовок.

Применение данной методики позволяет значительно повысить качество и скорость проведения контроля алюминиевых труб заготовок.

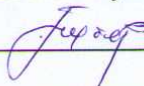
Начальник производства

Д.Н.Епишев

Приложение Г Акт об использовании в учебном процессе

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. ректора ФГБОУ ВО «Ижевский
государственный технический
университет имени М.Т. Калашникова»
к.т.н. доцент А.В. Губерт

_____ 
« _____ » _____ 2023 г.

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы
Синцова Максима Анатольевича**

Комиссия в составе: председатель – декан «Приборостроительного факультета» к.т.н. А.Е. Кайсин, члены комиссии – доцент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» к.т.н., доцент Л.В. Волкова, доцент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» к.т.н., доцент В.А. Стрижак составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Синцова М.А. «Чувствительность амплитудного теневого метода с использованием рэлеевских волн при структуроскопии и дефектоскопии металлоизделий пруткового и трубного сортамента» внедрены в учебный процесс подготовки магистров по программе 12.04.01 «Приборы и методы контроля окружающей среды, веществ, материалов и изделий» в виде практических и курсовых работ по дисциплине «Методы и средства структуроскопии», а так же используются при выполнении выпускных квалификационных и научно-исследовательских работах.

Председатель комиссии

Члены комиссии





А.Е. Кайсин

Л.В. Волкова

В.А. Стрижак

Приложение Д Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**173 773** (13) **U1**(51) МПК
G01N 29/04 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2016143700, 07.11.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.11.2016Дата регистрации:
11.09.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 07.11.2016

(45) Опубликовано: 11.09.2017 Бюл. № 26

Адрес для переписки:
426069, Удмуртская Респ., г. Ижевск, ул.
Студенческая, 7, федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Ижевский
государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова"

(72) Автор(ы):

**Мышкин Юрий Владимирович (RU),
Муравьева Ольга Владимировна (RU),
Муравьев Виталий Васильевич (RU),
Злобин Денис Владимирович (RU),
Синцов Максим Анатольевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Ижевский государственный
технический университет имени М.Т.
Калашникова" (RU)**(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: О.В. Муравьева, В.В. Муравьев,
В.А. Стрижак, Е.Н. Кокорина, М.А.
Лойферман, Реальная чувствительность
входного акустического контроля прутков-
заготовок при производстве пружин, В мире
неразрушающего контроля, N 1 (59), 2013,
с. 62-70. RU 2406083C1, 10.12.2010. RU
2245543C2, 27.01.2005. SU 855492A1,
15.08.1981. JP 2008122090A, 29.05.2008. JPH
(см. прод.)

RU 173773 U1

RU 173773 U1

(54) УСТРОЙСТВО АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРУТКОВ

(57) Реферат:

Использование: для выявления дефектов типа нарушения сплошности и неоднородности металла прутков. Сущность полезной модели заключается в том, что устройство акустического контроля прутков содержит блоки электроакустических преобразователей, установленные у торцов прутка, блоки генератора и предусилителя, блок программируемого усилителя, коммутации и источника питания,

персональный компьютер с аналого-цифровым преобразователем. Согласно предлагаемой полезной модели электроакустические преобразователи расположены на цилиндрической поверхности прутка и выполнены с возможностью создания в нем касательных напряжений. Технический результат: повышение чувствительности и достоверности результатов контроля прутков. 4 з.п. ф-лы, 12 ил.