

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

КИРЕЕВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
МАШИН И АГРЕГАТОВ МЕТОДАМИ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Алчевск – 2020

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Луганской Народной Республики «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»

Научный консультант: **Витренко Владимир Алексеевич**
доктор технических наук, профессор,
ГОУВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», проректор по научной работе и инновационной деятельности

Официальные оппоненты: **Сидоров Владимир Анатольевич**
доктор технических наук, доцент,
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», профессор кафедры механического оборудования заводов черной металлургии

Паламарчук Николай Владимирович
доктор технических наук, профессор,
ГООВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта», заведующий кафедрой подвижного состава железных дорог

Жижкина Наталья Александровна
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет», профессор кафедры тракторов и автомобилей

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «11» июня 2020 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ГОУВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» по адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться:
в научной библиотеке ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ» в читальном зале по адресу:
г. Алчевск, ул. Ленинградская, 45-а, библиотека.

Автореферат разослан «24» марта 2020 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Е.С. Смекалин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При использовании машин и агрегатов в различных отраслях народного хозяйства, будь то металлургия, угольная промышленность, транспортная инфраструктура, энергетика и другие возникает множество аварийных ситуаций. Количество таких ситуаций можно в значительной степени уменьшить или вовсе исключить, если с высокой степенью достоверности определять техническое состояние машин и агрегатов на разных стадиях их жизненного цикла.

При изготовлении и эксплуатации, детали и узлы машин и агрегатов подвергаются комплексу мероприятий технического диагностирования для определения их технического состояния. Определение технического состояния позволяет обеспечить качество при изготовлении, увеличить вероятность безотказной работы и коэффициент готовности в эксплуатации, а также повысить безопасность эксплуатации машин и агрегатов.

В комплекс мероприятий технического диагностирования входят операции ультразвукового неразрушающего контроля (ультразвукового диагностирования) деталей и узлов на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей. Однако низкая достоверность ультразвукового диагностирования из-за неучтенных факторов в процессах контроля технического состояния может допустить в эксплуатацию детали и узлы машин и агрегатов с внутренними недопустимыми несплошностями, что зачастую приводит к аварийным ситуациям. Так, например, в районе станции Носовка (Юго-Западная железная дорога) произошел сход грузового вагона перевозившего щебень, по причине излома обода колеса. Излом произошел вследствие наличия дефекта типа трещина в месте перехода от диска к ободу. В результате схода колесная пара провалилась левым колесом в середину пути и в таком состоянии прошла один километр. При сходе вагона было допущено повреждение одного километра второго главного пути и стрелочного перехода. Движение было остановлено на девять часов. Такого происшествия можно избежать, если с высокой степенью достоверности определить дефект колеса на стадии проведения ультразвукового диагностирования при техническом обслуживании и текущих осмотрах.

Повышение информативности результатов ультразвукового контроля за счет разработки новых методов дефектометрии позволяет с более высокой степенью достоверности определить техническое состояние деталей и узлов при диагностировании и повышает надежность технического прогнозирования работоспособности.

В связи с этим, создание научных основ технического диагностирования машин и агрегатов путем разработки новых методов ультразвуково-

вой дефектometрии является актуальной научно-прикладной проблемой, решение которой позволит обеспечить качество при изготовлении, увеличить надежность и ресурс, а также повысить безопасность работы машин и агрегатов.

Степень разработанности проблемы. Вопросами исследования процессов ультразвукового неразрушающего контроля и разработки методов ультразвуковой дефектometрии при техническом диагностировании различных объектов занимались ведущие отечественные и зарубежные ученые, такие как: И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, В.Г. Щербинский, Ю.В. Ланге, А.И. Потапов, А.Х. Вopilкин, В.Г. Бадалян, Е.Г. Базулин, Д.А. Кононов, Б.И. Капранов, Б.М. Коротков, В.А. Троицкий, Б.И. Выборнов, В.Ф. Криворудченко, J. Krautkremer, G. Krautkremer, V. Grabenderfer, R. Freelinghouse, L. Niklas, G. Seiger, K. Volkman и др.

В ранее выполненных исследованиях не ставились задачи разработки методов дефектometрии, позволяющих определить тип и ориентацию дефекта при диагностировании ручным ультразвуковым методом неразрушающего контроля одноканальными дефектоскопами, особенно при ограниченной контролепригодности объекта. Не разработаны методы безэталонной настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры с применением различных типов эталонных отражателей, не учитывалось ослабление ультразвуковой волны от различных отражающих поверхностей. Вышеперечисленное состояние исследуемой проблемы определяет актуальность выбранного направления исследований.

Объект исследования – процессы технического диагностирования различных деталей и узлов машин и агрегатов.

Предмет исследования – новые методы ультразвуковой дефектometрии, позволяющие повысить достоверность и информативность результатов технического диагностирования.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является создание научных основ технического диагностирования машин и агрегатов путем разработки новых методов ультразвуковой дефектometрии.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить **следующие задачи:**

- провести анализ дефектов в различных деталях и узлах, исследовать их влияние на конструкционную прочность материала;
- провести математическое моделирование процессов излучения, приема, прохождения и отражения ультразвуковой волны в объекте диагностирования, разработать математические модели амплитуды отражения ультразвуковой волны от различных типов отражателей и отражающих поверхностей;

- сформулировать и обосновать новые методы ультразвуковой дефектометрии: определения типа обнаруженной несплошности; определения угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны; определения эквивалентных размеров несплошностей различного типа; безэталоновой настройки функции временной регулировки чувствительности;

- составить алгоритм для автоматизации расчетов новых методов ультразвуковой дефектометрии при техническом диагностировании машин и агрегатов;

- разработать логическую диагностическую модель и усовершенствованную общую методику ультразвукового диагностирования, расширенную и дополненную новыми методами дефектометрии;

- провести экспериментальные исследования достоверности и технической эффективности разработанных методов дефектометрии.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели в отдельных разделах работы были использованы следующие методы исследований: методы макроструктурного и микроструктурного анализа при проведении анализа дефектов металла в различных деталях и узлах; теория акустических колебаний и волн, теоретические положения ультразвукового импульсного эхо-метода при разработке новых методов ультразвуковой дефектометрии; теория планирования эксперимента, методы теории вероятностей и математической статистики, методы экспертной оценки при проведении и обработке результатов экспериментальных исследований.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций подтверждена экспериментальными исследованиями, с применением современных средств измерительной техники.

Научная новизна полученных результатов. Созданы научные основы технического диагностирования машин и агрегатов путем разработки новых методов ультразвуковой дефектометрии, заключающиеся в следующем:

1. Впервые выявлены различия в соотношениях амплитуд эхосигналов от несплошностей различного типа (точечные и протяженные, плоскостные и объемные) на разных частотах ультразвуковой волны.

2. Впервые определены граничные значения ультразвуковых характеристик точечных и протяженных плоскостных и объемных несплошностей при применении двух частот ультразвуковых колебаний.

3. Предложены новые методы:

- определения типа обнаруженной при ультразвуковом диагностировании несплошности;

- ультразвукового определения угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвука при применении комбинированного преобразователя с двумя углами ввода ультразвуковой волны;
- безэталонного определения эквивалентных размеров несплошностей различного типа при проведении ультразвукового диагностирования;
- безэталонной настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры при применении эталонных отражателей различного типа с учетом ослабления ультразвуковой волны на различных отражающих поверхностях.

Теоретическое и практическое значение полученных результатов заключается в том, что на основании экспериментальных и теоретических исследований разработаны новые методы ультразвуковой дефектометрии для технического диагностирования машин и агрегатов.

Разработанные методы позволяют повысить достоверность результатов диагностирования, минимальное значение которой достигает: при определении типа точечной несплошности 94,3%; при определении типа протяженной несплошности 90,5%; при определении эквивалентного размера точечной несплошности 97,1%; при определении эквивалентного размера протяженной несплошности 98%; при определении угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны 98%.

Разработан алгоритм, реализованный в программе «Комплекс NDTRT» для автоматизации расчетов в разработанных методах ультразвуковой дефектометрии, что позволило ускорить процесс проведения дефектометрии и исключить неточности при проведении расчетов, а также визуализировать изображения несплошностей на контролируемом участке объекта диагностирования.

Дополнена и скорректирована общая методика ультразвукового диагностирования новыми методами дефектометрии, что позволило избавиться от недостатков классической методики, путем исключения из процессов настройки аппаратуры и оценки несплошностей стандартных образцов предприятия.

Положения, выносимые на защиту:

1. Амплитуды эхо-сигналов от плоскостной и объемной несплошностей на разных частотах ультразвуковой волны будут соотноситься между собой по-разному, то есть в случае, когда амплитуда эхо-сигнала от двух несплошностей (объемной и плоскостной) на одной частоте будет равной, то на другой частоте амплитуды эхо-сигналов от этих несплошностей будут отличаться, что позволило определить граничные значения ультразвуковых характеристик точечных и протяженных плоскостных и объемных несплошностей.

2. Для определения типа несплошности при ультразвуковом диагностировании ручным методом необходимо сравнить коэффициент формы несплошности с граничными значениями ультразвуковых характеристик плоскостных и объемных несплошностей.

3. Для определения угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны и учета уменьшения амплитуды эхо-сигнала от несплошности, вызванного уходом в сторону центрального луча ультразвуковой волны, необходимо измерение амплитуды эхо-сигнала от несплошности комбинированным пьезоэлектрическим преобразователем при нормальном вводе ультразвуковой волны и при вводе под углом 18° .

4. Для безэталонного определения эквивалентных размеров несплошностей различных типов при ультразвуковом диагностировании необходимо применение аналитических зависимостей, описывающих связь между геометрическими параметрами несплошностей и их ультразвуковыми характеристиками и ультразвуковыми характеристиками объекта диагностирования.

5. Для настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры без применения стандартных образцов предприятия необходимо применение аналитических зависимостей для расчета коэффициента усиления ультразвукового дефектоскопа и уровня временной регулировки чувствительности, учитывающих размеры разнотипных эталонных отражателей и ослабление ультразвуковой волны по различным отражающим поверхностям.

Степень достоверности и апробация результатов диссертации.

Достоверность результатов исследований подтверждается корректным применением современного математического аппарата теории акустических колебаний и волн при разработке методов ультразвуковой дефектометрии, использованием апробированных методов исследований и научных теорий, верификацией и проверкой на адекватность разработанных методов ультразвуковой дефектометрии при диагностировании деталей и узлов машин и агрегатов, применением поверенных средств измерительной техники при проведении экспериментальных исследований, достаточной достоверностью вероятностью экспериментальных данных и уровнем воспроизводимости проводимых экспериментов.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XVII, XVIII, XIX, XX, XXI, XXII международных научно-технических конференциях «Проблемы развития рельсового транспорта» (Ялта, Алушта, 2007 – 2012 г.г.); 10-й и 12-й международных конференциях-выставках «Неразрушающий контроль» (Киев, 2008, 2010 г.г.); II международной научно-практической конференции

«Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (Сочи, 2011 г.); международной научно-практической конференции в рамках Международного научного форума Донецкой Народной Республики (Донецк, 2015 г.); международной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых «Современные проблемы транспорта» (Луганск, 2018 г.); V международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта» (Донецк, 2019 г.); XXVI международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь, 2019 г.).

Реализация результатов исследований. Результаты диссертационной работы внедрены на следующих машиностроительных предприятиях: ПАО «Лугансктепловоз», ООО «Лугасталь», ЧАО «НПЦ «ТРАНС-МАШ». Внедрение позволило обеспечить безопасную эксплуатацию и техническую эффективность машин и агрегатов за счет повышения достоверности и информативности результатов их диагностирования.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс в ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Стандартизация и метрология» и «Управление качеством», специалистов по специальности «Подвижной состав железных дорог».

Публикации. Основные положения и результаты исследований диссертационной работы опубликованы в 33 научных работах, из них: 2 монографии; 1 патент на полезную модель; 3 статьи в научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ, входящих в РИНЦ и Web of Science, 14 статей в научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ и входящих в РИНЦ; 2 статьи в научных изданиях, входящих в РИНЦ; 2 статьи в научных изданиях, включенных в перечень ВАК ЛНР, входящих в РИНЦ; 2 статьи в международных изданиях; 2 статьи в научных изданиях, включенной в перечень ВАК Украины; 1 статья в российском федеральном аналитическом справочно-информационном издании, 4 публикации на научных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи разделов (21 подраздела), выводов к разделам, общих выводов, библиографического списка из 277 источников на 27 страницах и 10 приложений на 41 странице. Полный объем работы составляет 327 страниц, в том числе 224 страницы основного текста, 29 полных страниц с рисунками и таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные направления, цель и задачи исследований. Показаны основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическое и практическое значение полученных результатов. Представлены сведения о личном вкладе соискателя и апробации результатов диссертационной работы.

Раздел 1 «Состояние проблемы и постановка задач исследований» содержит 4 подраздела. В подразделе 1.1 **«Проблемы обеспечения надежной и безопасной эксплуатации машин и агрегатов»** показано, что наличие дефектов металла, типа нарушения сплошности может привести к разрушению ответственных деталей и узлов, и, соответственно, привести к аварийной ситуации при эксплуатации различных машин и агрегатов. **Подраздел 1.2 «Техническое диагностирование машин и агрегатов»** посвящен рассмотрению общих вопросов технического диагностирования машин и агрегатов, представлены основные цели диагностирования, дана классификация основных задач диагностирования, рассмотрены виды систем технического диагностирования.

В подразделе 1.3 **«Неразрушающий контроль в комплексе мероприятий технического диагностирования машин и агрегатов»** показано, что в системе тестового диагностирования машин и агрегатов для проведения сплошного контроля деталей и узлов на отсутствие недопустимых несплошностей целесообразно применение неразрушающих методов контроля. Проведен анализ видов, методов и средств неразрушающего контроля. Показано, что для выявления поверхностных и подповерхностных несплошностей целесообразно применение магнитного, радиоволнового, электромагнитного (вихретокового), визуально-оптического и капиллярного видов неразрушающего контроля. Для контроля деталей и узлов на отсутствие внутренних несплошностей металла применяются акустические и радиационные методы неразрушающего контроля, однако радиационные методы имеют ограничение по толщине просвечиваемого металла, по типам контролируемых металлоконструкций, а также по необходимости организации защиты оператора от вредного воздействия ионизирующих излучений. Более подробно проанализированы акустические методы неразрушающего контроля. Определено, что для выявления внутренних несплошностей металла в деталях и узлах при диагностировании машин и агрегатов оптимальным является ультразвуковой импульсный эхо-метод.

При ультразвуковом диагностировании деталей и узлов на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей необходимо не только

достоверно выявлять эти несплошности, но и определять их форму, размеры и ориентацию в объекте диагностирования. Для решения этих задач применяются методы ультразвуковой дефектометрии. Однако большинство этих методов разработаны для применения в автоматизированных и механизированных системах ультразвукового контроля с применением многоканальных ультразвуковых дефектоскопов с несколькими преобразователями или преобразователями с антенными решетками. Однако применение автоматизированных и механизированных систем ультразвукового контроля целесообразно при контроле однотипной продукции. Преобразователи с антенными решетками не могут быть минимизированы вследствие физических ограничений. При контроле большой номенклатуры деталей и узлов, имеющих различную форму, размеры и свойства материалов, применяются ручные ультразвуковые дефектоскопы. Из этого вытекает необходимость разработки новых методов ультразвуковой дефектометрии при диагностировании деталей и узлов ультразвуковым методом с применением ручных одноканальных ультразвуковых дефектоскопов.

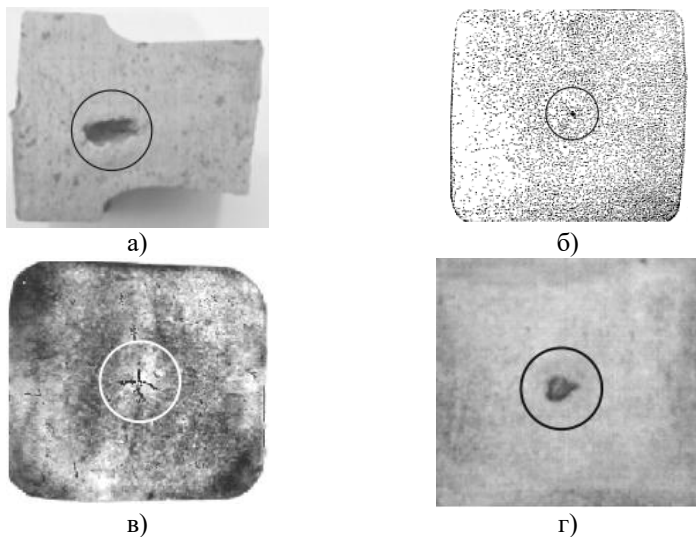
В подразделе 1.4 «Постановка цели и задач исследования» исходя из проведенного в первом разделе анализа сформулирована основная цель и задачи диссертационной работы.

Раздел 2 «Анализ дефектов металла деталей и узлов машин и агрегатов» состоит из пяти подразделов. В подразделе 2.1 «Классификация дефектов металла» представлена классификация дефектов металла по различным классификационным признакам: по степени выявления, по допустимости, по значительности и по происхождению.

В подразделе 2.2 «Производственно-технологические дефекты» проведен анализ дефектов литья (рисунок 1) и обработки металлов давлением (рисунок 2).

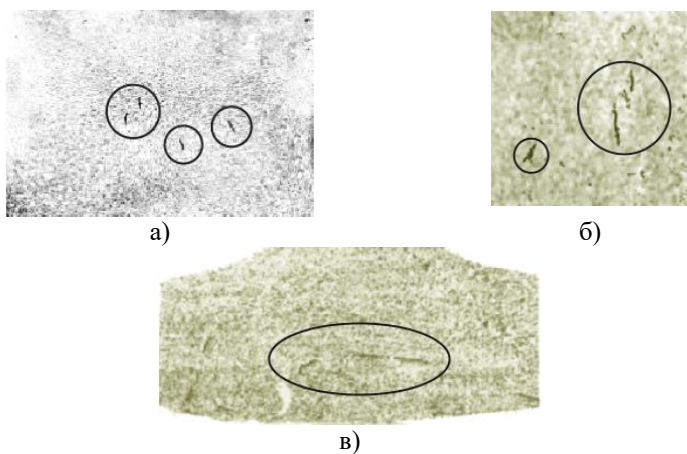
Показано, что производственно-технологические дефекты могут быть различного типа: плоскостные точечные (рисунок 2 а, б); объемные точечные (рисунок 1 а, г); плоскостные протяженные (рисунок 1 в, рисунок 2 в); объемные протяженные (рисунок 1 б). Также производственно-технологические дефекты могут иметь различную ориентацию в объекте диагностирования.

Подраздел 2.3 «Технологические дефекты» посвящен анализу дефектов металла образовавшихся в результате сварки и различных видов обработки материалов: термическая, химико-термическая и механическая обработка. Данные виды дефектов также имеют различную форму и ориентацию в объекте диагностирования.



а – усадочная раковина в стальной отливке; б – утяжина в центре стального слитка; в – внутренняя горячая осевая трещина в стальном слитке; г – сосредоточенная усадочная раковина в стальном слитке

Рисунок 1 – Примеры дефектов литья



а – флокены в ковальной стали; б – флокены в прокате;
в – ликвация в ступице цельнокатаного колеса

Рисунок 2 – Примеры дефектов обработки металлов давлением

В подразделе 2.4 «Эксплуатационные дефекты» исследованы дефекты металла появившиеся в процессе эксплуатации. Эксплуатационные дефекты могут возникать вследствие различных причин, таких как превышение допустимых нагрузок в эксплуатации, воздействие агрессивных сред, усталость металла, эрозия, коррозия и т.д.

Подраздел 2.5 «Анализ дефектов металла, в зависимости от их влияния на конструкционную прочность деталей и узлов машин и агрегатов» посвящен влиянию макроскопических дефектов металла на конструкционную прочность деталей и узлов.

Макроскопические дефекты металла деталей и узлов машин и агрегатов существенно влияют на их конструкционную прочность. Степень этого влияния зависит от множества факторов, таких как: условия в которых эксплуатируется изделие (температура, давление, влажность и другие), условия нагружения изделия (статические или динамические нагрузки, величина нагрузок и другое), а также тип и ориентация дефектов в изделии.

Объемные дефекты металла, такие как поры, раковины, объемные неметаллические включения и другие, уменьшают площадь поперечного сечения изделия, за счет чего уменьшаются механические свойства материала, так как величина напряжений зависит от площади, на которую действует нагрузка.

Плоскостные дефекты, такие как трещины разного происхождения, флокены, ликвации, приводящие к нарушению сплошности и другие, существенно влияют на конструкционную прочность материала за счет увеличения концентрации напряжений на краях плоскостного дефекта, и это влияние намного больше, чем влияние объемных дефектов. Концентрация напряжений на краях дефекта тем больше, чем ближе дефект к плоскостной форме.

Наибольшее влияние на долговечность оказывает плоскостной дефект, ориентированный таким образом, что направление растягивающих напряжений направлено к направлению дефекта под углом, близким к 90° . Гораздо меньшее влияние оказывает плоскостной дефект, направление которого совпадает с направлением растягивающих усилий или близко к нему.

Анализ дефектов металла показал, что определение формы, размеров и ориентации дефекта в объекте при ультразвуковом контроле является важной задачей технической диагностики, решение которой позволит судить о долговечности и ресурсе объекта диагностирования.

Раздел 3 «Анализ системы ультразвукового диагностирования деталей и узлов машин и агрегатов» состоит из двух подразделов. В подразделе 3.1 «Общие положения ультразвукового контроля в сис-

теме диагностирования деталей и узлов машин и агрегатов» рассматриваются основные взаимосвязи элементов системы ультразвукового диагностирования. Представлены основные методические операции технологического процесса ультразвукового контроля.

В подразделе 3.2 «Анализ технологии ультразвукового контроля при диагностировании деталей и узлов машин и агрегатов» проведен системный анализ основных методических операций технологии ультразвукового контроля деталей и узлов с выявлением основных недостатков.

Основным недостатком в технологии ультразвукового контроля относится применение стандартных образцов предприятия при настройке чувствительности (функции временной регулировки чувствительности) и определении эквивалентного размера несплошности. Это обусловлено тем, что при изготовлении эталонных отражателей в стандартных образцах предприятия вследствие влияния таких причин, как: неточность инструмента, технологического оборудования, ошибка изготовителя, возникают их несоответствия техническим требованиям, уменьшающим амплитуду эхо-сигнала от них. Также затухание ультразвуковой волны в стандартном образце предприятия может отличаться от затухания в объекте диагностирования. Данные факторы могут привести как к перебраковке объекта диагностирования, так к пропуску в эксплуатацию объекта с недопустимыми несплошностями.

Также к недостаткам относится отсутствие в технологии ручного ультразвукового контроля одноканальными дефектоскопами возможности определить тип обнаруженной несплошности.

Из выше сказанного вытекает необходимость разработки следующих методов ультразвуковой дефектотрии: метода безэталонной настройки функции временной регулировки чувствительности; метода определения типа обнаруженной несплошности; метода безэталонного определения эквивалентного размера несплошности.

Раздел 4 «Моделирование процессов излучения, приема, прохождения и отражения ультразвуковой волны при диагностировании деталей и узлов машин и агрегатов» состоит из двух подразделов. **Подраздел 4.1 «Акустическое поле пьезоэлектрического преобразователя»** посвящен математическому представлению поля излучения-приема дискообразного пьезоэлектрического преобразователя. Выведены основные аналитические зависимости для акустического тракта дискообразного пьезоэлектрического преобразователя, применяемые в дальнейшем моделировании амплитуды отражения ультразвуковой волны от эталонных отражателей различного типа.

Подраздел 4.2 «Моделирование акустического тракта при отражении ультразвуковой волны от моделей дефектов» посвящен моделированию процессов отражения продольной ультразвуковой волны от эталонных отражателей различного типа.

Для проведения моделирования применялись методы замены моделей дефектов искусственными отражателями, математическое моделирование с применением метода Кирхгоффа, метода лучевого (энергетического) приближения и метода мнимого источника.

На рисунке 3 представлены модели различных типов несплошностей: плоскостной цилиндрический отражатель (ПЦО) – модель плоскостной точечной несплошности (рисунок 3 а); полусферический отражатель (ПСО) – модель объемной точечной несплошности (рисунок 3 б); паз с плоским дном (ПсПД) – модель плоскостной протяженной несплошности (рисунок 3 в); боковой цилиндрический отражатель (БЦО) – модель объемной протяженной несплошности (рисунок 3 г).

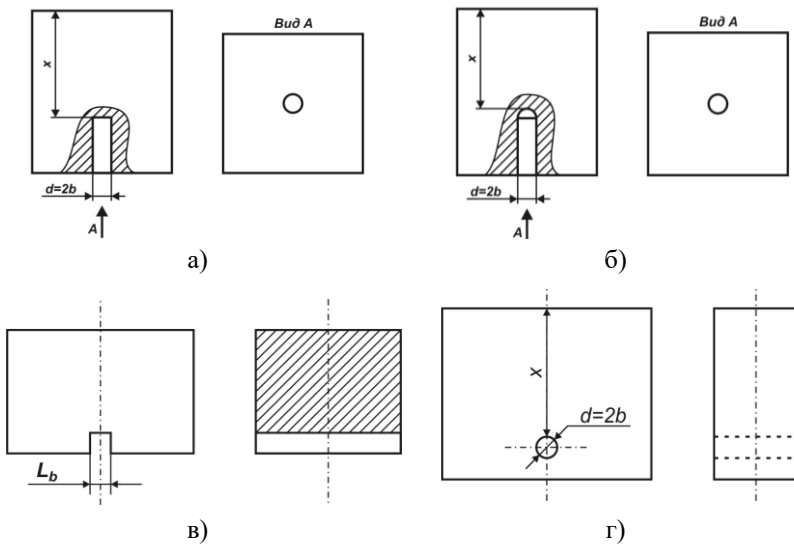


Рисунок 3 – Модели различных типов несплошностей

В результате проведенного моделирования систематизирована база математических моделей, описывающих амплитуду отражения продольной ультразвуковой волны от эталонных отражателей различного типа (таблица 1).

Таблица 1 – База математических моделей, описывающих амплитуду N (дБ) отражения ультразвуковой волны от отражателей различного типа

Тип отражателя	Математическая модель
бесконечная плоскость	$N = 20 \lg \left(\frac{S_a}{2\lambda x} \right) - Z_a.$
плоскостной цилиндрический	$N = 20 \lg \left(\frac{S_a S_b}{\lambda^2 x^2} \right) - Z_a.$
полусферический	$N = 20 \lg \left(\frac{S_a d_{nco}}{4\lambda x (1 + d_{nco}/(2x))} \right) - Z_a.$
паз с плоским дном	$N = 20 \lg \left(\frac{S_a L_b}{\sqrt{2}(\lambda x)^3} \right) - Z_a.$
боковой цилиндрический	$N = 20 \lg \left(\frac{S_a}{\lambda} \sqrt{\frac{d_{\sigma co}}{8x^3 (1 + d_{\sigma co}/(2x))}} \right) - Z_a.$

В таблице приняты следующие обозначения: $Z_a = 17,4\delta x$; δ – коэффициент затухания ультразвуковой волны, Нп/мм; S_a – площадь преобразователя, мм²; S_b – площадь отражателя, мм²; λ – длина ультразвуковой волны, мм; x – расстояние до отражателя, $x \geq S_a/(\pi\lambda)$, мм; d_{nco} – диаметр полусферического отражателя, мм; $d_{\sigma co}$ – диаметр бокового цилиндрического отражателя, мм; L_b – ширина паза с плоским дном, мм.

Из математической модели, описывающей амплитуду отражения от бесконечной плоскости, находим аналитическую зависимость для расчета коэффициента затухания ультразвуковой волны по измеренной в объекте диагностирования амплитуде донного сигнала N_δ (дБ):

$$\delta = - \frac{\ln \left(2\lambda x_\delta 10^{N_\delta/20} / S_a \right)}{2x_\delta}, \quad (1)$$

где: x_δ – расстояние до донной поверхности в объекте диагностирования, мм.

Представленная в разделе база математических моделей позволяет понять механизмы излучения, приема, прохождения и отражения ультразвуковой волны в объекте диагностирования и разработать новые методы ультразвуковой дефектометрии.

Раздел 5 «Разработка новых методов ультразвуковой дефектометрии в системе технического диагностирования машин и агрегатов» состоит из пяти подразделов. **Подраздел 5.1 «Двухчастотный метод дефектометрии определения типа несплошностей при ультразвуковом диагностировании»** посвящен разработке способа определения типа несплошностей различного типа (точечных и протяженных) при диагностировании ручным ультразвуковым методом.

Из анализа математических моделей представленных в разделе 4 впервые выявлены особенности соотношения амплитуд эхо-сигналов от несплошностей различного типа (точечные и протяженные, плоскостные и объемные) на разных частотах ультразвуковой волны. Данные особенности заключаются в том, что амплитуды отражения ультразвуковой волны от плоскостной и объемной несплошностей (как точечных, так и протяженных) на разных частотах будут соотноситься между собой по-разному, то есть в случае, когда амплитудная характеристика эхо-сигнала от двух несплошностей (объемной и плоскостной) на одной частоте будет равной, то на другой частоте амплитудные характеристики эхо-сигналов от этих несплошностей будут отличаться.

Предложен новый способ определения типа несплошности двухчастотным методом, который основан на сравнении коэффициента формы несплошности, обнаруженной при ультразвуковом диагностировании, с граничными значениями ультразвуковых характеристик точечных и протяженных плоскостных и объемных несплошностей, что позволит повысить информативность ультразвукового диагностирования.

Аналитические зависимости для расчета коэффициента формы несплошности v (дБ) (2) и граничных значений v_{gp} (дБ) (3):

$$v = N_{нec2,5} - N_{нec5,0} + N_{д5,0} - N_{д2,5}, \quad (2)$$

$$v_{gp} = 20 \lg \left[\left(\frac{\lambda_{5,0}}{\lambda_{2,5}} \right)^n \left(\frac{\lambda_{2,5} S_{a5,0}}{\lambda_{5,0} S_{a2,50}} \right)^{x/x_0} \right], \quad (3)$$

где: $N_{нec2,5}$, $N_{нec5,0}$ – амплитуды эхо-сигналов от несплошности на частоте ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц соответственно, дБ; $N_{д2,5}$, $N_{д5,0}$ – амплитуды донных эхо-сигналов на бездефектном участке объекта контроля на частоте 2,5 и 5,0 МГц соответственно, дБ; $\lambda_{2,5}$, $\lambda_{5,0}$ – длина ультразвуковой волны на частоте 2,5 и 5,0 МГц соответственно, мм; $S_{a2,5}$, $S_{a5,0}$ – площадь пьезоэлектрического преобразователя с частотой 2,5 и 5,0 МГц соответственно, мм²; $n=2$ для граничного значения плоскостной точечной несплошности $v_{пл.т.}$; $n=1$ для граничного значения объемной точечной $v_{об.т.}$ и объемной протяженной $v_{об.пр.}$ несплошностей,

$n=3/2$ для граничного значения плоскостной протяженной несплошности $v_{пл.пр.}$.

При реализации двухчастотного метода дефектометрии при обнаружении эхо-сигнала от несплошности осуществляются следующие действия: измеряются амплитуды эхо-сигналов от несплошности на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц; измеряются амплитуды донных сигналов на бездефектном участке на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц; далее осуществляется определение тапа несплошности по схеме, указанной в виде алгоритма на рисунке 4.

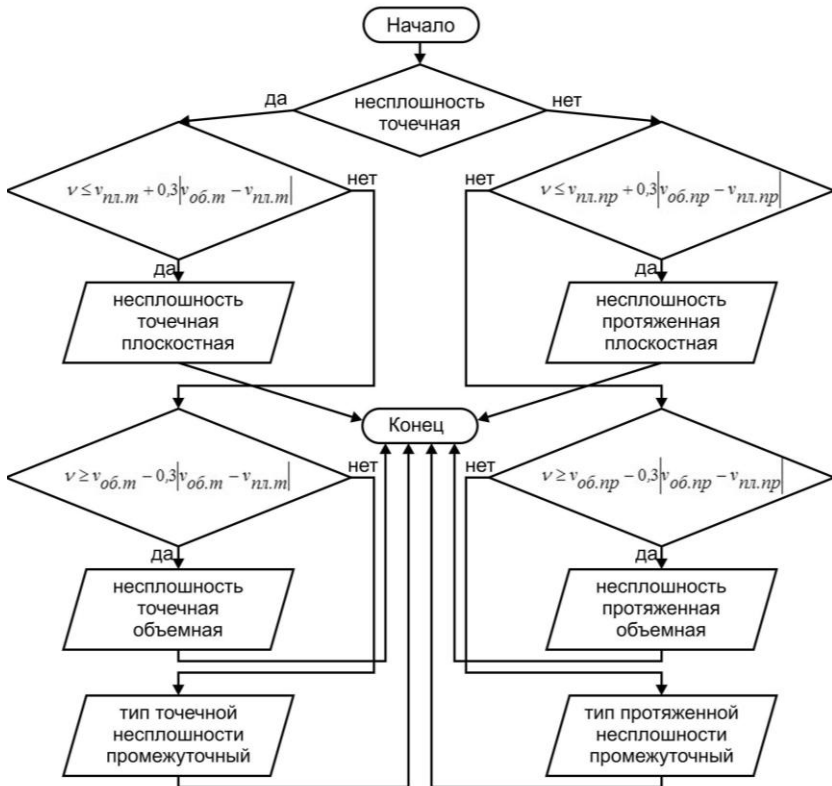


Рисунок 4 – Алгоритм определения типа несплошностей двухчастотным методом дефектометрии

Подраздел 5.2 «Определение угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны» посвящен проведению экспериментальных исследований и на их основе разработке метода определения угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвука.

Максимальное отражение ультразвуковой волны при контроле эхометодом наблюдается при расположении плоскостной точечной несплошности параллельно поверхности ввода ультразвуковой волны, то есть перпендикулярно акустической оси преобразователя. При расположении плоскостной точечной несплошности под небольшим углом к поверхности ввода, наблюдается уменьшение амплитуды эхо-сигнала, вследствие ухода в сторону ультразвуковой волны, которое может привести к недостоверной оценке несплошности и допуску в эксплуатацию дефектных изделий.

Для разработки метода дефектометрии были проведены экспериментальные исследования по оригинальной вновь разработанной методике. Для проведения эксперимента применялся ультразвуковой импульсный дефектоскоп УД 2-70 (рисунок 5, а); комбинированный преобразователь П131-2,5-0и18-ВО-04 (рисунок 5, б), содержащий в одном корпусе два преобразователя с углом ввода 0° и 18° , с частотой ультразвуковой волны 2,5 МГц. Для проведения эксперимента был изготовлен экспериментальный образец (рисунок 6), в котором было выполнено три плоскостных цилиндрических отражателя диаметром 3 мм, с расположением отражающей поверхности к поверхности ввода ультразвука под следующими углами: 0° (ЭО 2), 10° (ЭО 1), 18° (ЭО 3). В качестве контактной жидкости использовалось масло индустриальное И-40.

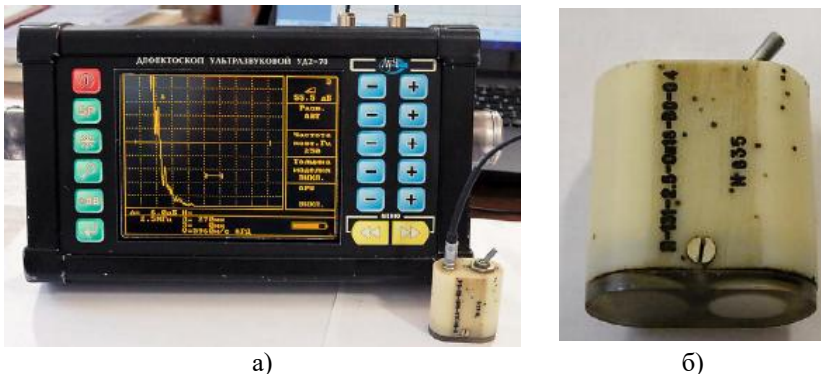


Рисунок 5 – Измерительная техника для проведения эксперимента

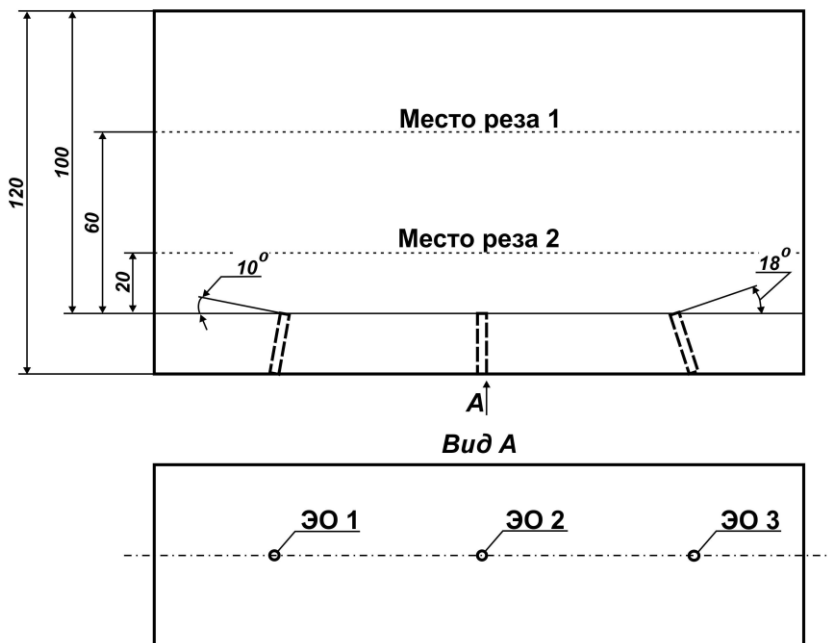


Рисунок 6 – Эскиз экспериментального образца

В образце измерялась амплитудная характеристика ультразвуковых эхо-сигналов от искусственных отражателей при вводе ультразвука под углом 0° и 18° , при разном расстоянии до отражателей x . Результаты измерения амплитуд эхо-сигналов от отражателей в экспериментальном образце представлены на рисунке 7.

По результатам эксперимента был рассчитан угловой коэффициент γ по аналитической зависимости:

$$\gamma = N_{118} - N_{110} \text{ (дБ)}, \quad (4)$$

где: N_{110} , N_{118} – амплитудные характеристики эхо-сигналов от отражателей при нормальном вводе ультразвука и вводе под углом 18° .

Экспериментальная зависимость угла наклона плоскостного точечного отражателя α от углового коэффициента γ представлена на рисунке 8, а.

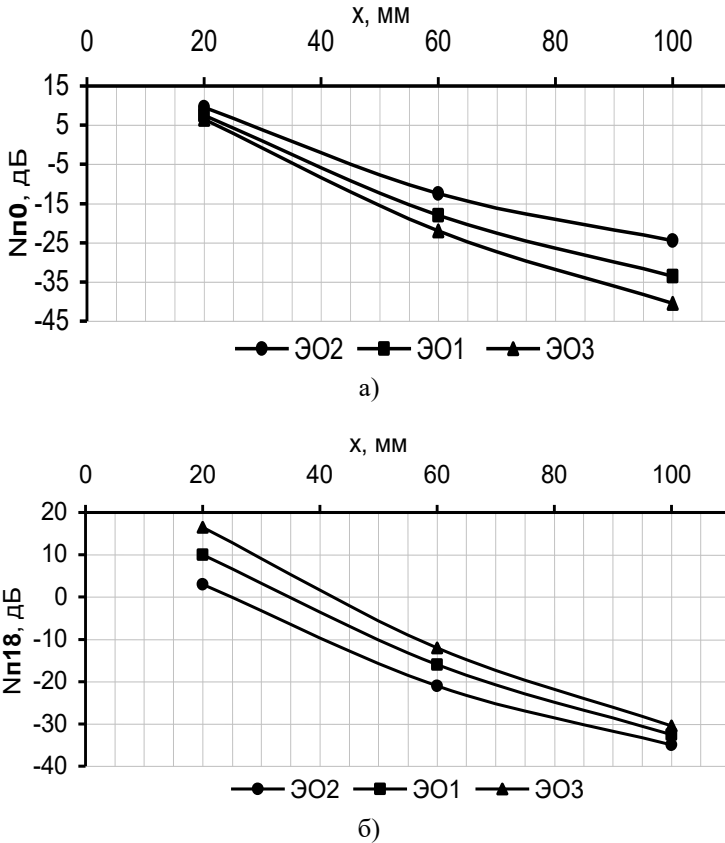


Рисунок 7 – Зависимость амплитудных характеристик эхо-сигналов от расстояния x до ЭО для углов ввода 0° (а) и 18° (б)

По графической зависимости (рисунок 8, а), с учетом погрешности измерений, путем аппроксимации методом наименьших квадратов, была получена эмпирическая зависимость угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны α от углового коэффициента γ , а также расстояния до отражателя от поверхности ввода ультразвуковой волны x , мм:

$$\alpha = (364\gamma + 2000 + 18x)/(314 + x). \quad (5)$$

На рисунке 8, б представлен график зависимости α от γ рассчитанный по выражению (2) для разных значений x .

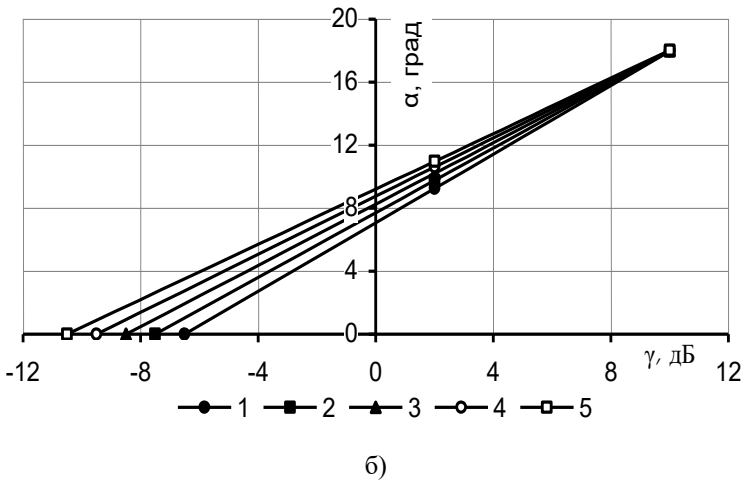
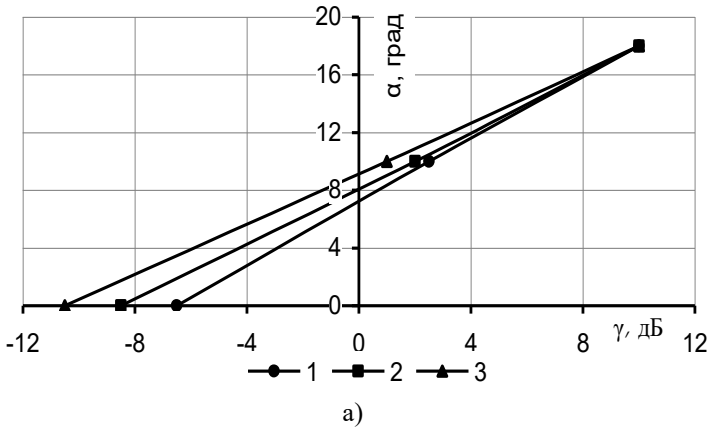


Рисунок 8 – Экспериментальная (а) и расчетная (б) зависимости угла наклона плоскостного точечного отражателя α от углового коэффициента γ при расстоянии $x=20$ (1), 40 (4), 60 (2), 80 (5) и 100 (3) мм

Далее воспользовавшись базой математических моделей, представленной в разделе 4, эмпирической зависимостью (5), основными положениями теории акустических колебаний и волн, были проведены теоретические исследования, в результате которых была получена зависимость для расчета разницы между амплитудной характеристикой эхосигнала от плоскостной точечной несплошности, расположенной под

углом к поверхности ввода ультразвуковой волны на угол α и плоскостной точечной несплошности, параллельной поверхности ввода ультразвуковой волны, которая является коэффициентом корректировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры K_α , дБ:

$$K_\alpha = (20(20\gamma + x + 110)Z_b)/(314 + x), \quad (6)$$

где $Z_b = -0,00782x$.

Процесс оценки плоскостных точечных несплошностей при ультразвуковом диагностировании по амплитудной характеристике с помощью разработанного метода дефектометрии представлен в виде алгоритма на рисунке 9.

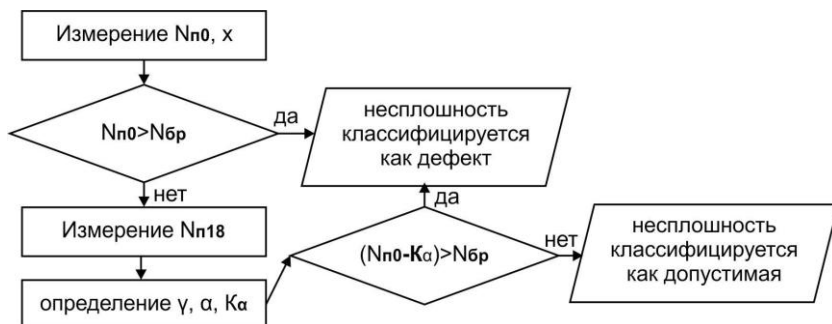


Рисунок 9 – Алгоритм оценки плоскостных точечных несплошностей при ультразвуковом диагностировании по амплитудной характеристике

В подразделе 5.3 «Решение вопросов неоднозначности при применении методов дефектометрии» рассматриваются вопросы неоднозначности при применении разработанных методов ультразвуковой дефектометрии. Критерии, подходящие к точечной объемной несплошности при применении двухчастотного метода дефектометрии, могут подойти к плоскостной точечной несплошности, расположенной под углом к поверхности ввода ультразвуковой волны. Предложен метод, заключающийся в определении амплитуды эхо-сигнала от несплошности при угле ввода продольной ультразвуковой волны 18^0 с двух противоположных сторон от несплошности. Разработаны признаки, того, что несплошность является либо плоскостной точечной, расположенной под углом к поверхности ввода ультразвуковой волны, либо объемная или плоскостная точечная, параллельная поверхности ввода ультразвуковой волны.

Подраздел 5.4 «Метод безэталоного определения эквивалентного размера несплошности при ультразвуковом диагностировании» посвящен разработке способа определения эквивалентного размера несплошностей различного типа без применения стандартных образцов предприятия при ультразвуковом диагностировании.

На основе проведенного математического моделирования, теоретических и экспериментальных исследований были получены аналитические зависимости для безэталоного определения эквивалентных размеров несплошностей различного типа (таблица 2).

Таблица 2 – Аналитические зависимости для безэталоного определения эквивалентного размера несплошностей

Тип несплошности	Аналитическая зависимость
плоскостная точечная	$d_{н.л.м.} = \frac{2\lambda x 10^{N/40}}{Z_c^{x/(2x_\delta)} \sqrt{S_a \pi}} \cdot$
объемная точечная	$d_{об.м.} = \frac{4\lambda x^2 10^{N/20}}{S_a Z_c^{x/x_\delta} - 2\lambda x 10^{N/20}} \cdot$
плоскостная протяженная	$L_{н.л.пр.} = \frac{10^{N/20} \sqrt{2(\lambda x)^3}}{S_a Z_c^{x/x_\delta}} \cdot$
объемная протяженная	$d_{об.пр.} = \frac{8\lambda^2 x^4 10^{N/10}}{S_a^2 Z_c^{2x/x_\delta} - 4\lambda^2 x^2 10^{N/10}} \cdot$
плоскостная точечная, расположенная под углом к поверхности ввода ультразвука	$d_{н.л.м.а.} = \frac{4\lambda x 10^{N_{н.л.м.а.}/40}}{\pi d_a Z_c^{x/(2x_\delta)}} \cdot$

В таблице приняты следующие обозначения:

$$Z_c = 2\lambda x_\delta 10^{N_\delta/20} / S_a,$$

$$N_{н.л.м.а.} = \frac{N_{П0}(314 + x + 404Z_b) - 20(20N_{П18} + x + 110)Z_b}{314 + x},$$

d_a – диаметр преобразователя, мм; $d_{н.л.м.}$ – диаметр плоскостной точечной несплошности, мм; $d_{об.м.}$ – диаметр объемной точечной несплошности, мм; $L_{н.л.пр.}$ – ширина плоскостной протяженной несплошности, мм; $d_{об.пр.}$ – диаметр объемной протяженной несплошности, мм; $d_{н.л.м.а.}$ – диаметр плоскостной точечной несплошности, расположенной под углом к поверхности ввода ультразвука, мм.

Сущность метода дефектометрии безэталонного определения эквивалентного размера несплошности при ультразвуковом диагностировании деталей и узлов машин и агрегатов заключается в следующем: в объекте диагностирования при обнаружении эхо-сигнала от несплошности измеряются амплитудные характеристики донного эхо-сигнала на бездефектном участке и эхо-сигнала от несплошности; с помощью аналитических зависимостей (таблица 2) определяется эквивалентный размер несплошности.

Подраздел 5.5 «Безэталонный метод настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвукового дефектоскопа при использовании эталонов различного типа и учете ослабления ультразвука по различным отражающим поверхностям» посвящен разработке способа настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры без применения стандартных образцов предприятия.

В результате проведенного математического моделирования и теоретических исследований впервые получены аналитические зависимости для безэталонной настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры (таблица 3).

Таблица 3 – Аналитические зависимости для безэталонной настройки функции временной регулировки чувствительности

Тип эталона	Тип объекта диагностирования	Коэффициент усиления ультразвукового дефектоскопа $k_{\text{ус}}$, дБ	Уровень временной регулировки чувствительности $k_{\text{ВРЧ}}$, дБ
1	2	3	4
ПЦО	объект с плоско-параллельными поверхностью ввода ультразвука и донной поверхностью	$20 \lg \left(AZ_c^{x_k/x_d} \right)$	$20 \lg \left(BZ_c^{(x_{\text{ВРЧ}} - x_k)/x_d} \right)$
ПСО		$20 \lg \left(CZ_c^{x_k/x_d} \right)$	$20 \lg \left(EZ_c^{(x_{\text{ВРЧ}} - x_k)/x_d} \right)$
ПЦО	цилиндрический объект	$20 \lg \left(AZ_d^{x_k/D} \right)$	$20 \lg \left(BZ_d^{(x_{\text{ВРЧ}} - x_k)/D} \right)$
ПСО		$20 \lg \left(CZ_d^{x_k/D} \right)$	$20 \lg \left(EZ_d^{(x_{\text{ВРЧ}} - x_k)/D} \right)$
ПЦО	цилиндрический объект с центральным цилиндрическим отверстием	$20 \lg \left(AZ_e^{x_k/x_{\text{цпо}}} \right)$	$20 \lg \left(BZ_e^{(x_{\text{ВРЧ}} - x_k)/x_{\text{цпо}}} \right)$

Таблица 3 – продолжение

1	2	3	4
ПСО	цилиндрический объект с центральным цилиндрическим отверстием	$20 \lg \left(CZ_e^{x_k/x_{ццо}} \right)$	$20 \lg \left(EZ_e^{(x_{БРЧ} - x_k)/x_{ццо}} \right)$

В таблице приняты следующие обозначения:

$$A = \frac{S_a S_b}{\lambda^2 x_k^2}; B = \frac{x_k^2}{x_{БРЧ}^2}; C = \frac{S_a d_{нсо}}{4\lambda x_k^2 \left(1 + \frac{d_{нсо}}{2x_k} \right)};$$

$$E = \frac{x_k(2x_k - d_{нсо})}{x_{БРЧ}(2x_{БРЧ} - d_{нсо})}; Z_d = 2\lambda D 10^{N_o/20} / S_a;$$

$$Z_e = \frac{8\lambda^2 x_{ццо}^2 10^{N_{ццо}/10} (1 + d_{ццо}/(2x_{ццо}))}{S_a^2 d_{ццо}};$$

x_k – конечная точка настройки функции временной регулировки чувствительности, мм; $x_{БРЧ}$ – координата маркера временной регулировки чувствительности (точка настройки функции временной регулировки чувствительности), мм; D – диаметр цилиндрического объекта диагностирования, мм; $x_{ццо}$ – расстояние от поверхности ввода ультразвука до центрального цилиндрического отверстия, мм; $d_{ццо}$ – диаметр центрального цилиндрического отверстия, мм; $N_{ццо}$ – амплитуда эхо-сигнала от центрального цилиндрического отверстия, дБ.

Разработанные в разделе 5 методы ультразвуковой дефектометрии позволяют повысить достоверность и информативность технического диагностирования машин и агрегатов, тем самым обеспечить их безопасную и надежную эксплуатацию, а также продление ресурса.

Раздел 6 «Алгоритмизация процессов ультразвуковой дефектометрии при техническом диагностировании машин и агрегатов» состоит из одного подраздела. В подразделе 6.1 «Программа «Комплекс NDTRT» для автоматизации расчетов при применении методов ультразвуковой дефектометрии» разработан алгоритм, реализованный в программе для операционной системы Windows, которая позволяет автоматизировать расчеты при применении разработанных в диссертационной работе методов ультразвуковой дефектометрии.

Программа «Комплекс NDTRT» состоит из четырех подпрограмм:

- «ПП1 ВРЧ» – для автоматизации расчетов в методе безэталоной настройки функции временной регулировки чувствительности;
- «ПП 2 двухчастотный метод» – для автоматизации расчетов при применении двухчастотного метода дефектометрии;
- «ПП 3 эквивалентный размер» – для автоматизации метода дефектометрии определения эквивалентного размера несплошности;
- «ПП4 визуализация» – для визуализации несплошностей в объекте диагностирования путем представления В- и С-сканов контролируемого участка.

Раздел 7 «Практическая реализация и экспериментальные исследования методов ультразвуковой дефектометрии при техническом диагностировании машин и агрегатов» состоит из двух подразделов. В подразделе 7.1 «Дополнение общей методики диагностирования деталей и узлов машин и агрегатов с применением новых методов ультразвуковой дефектометрии» дополнена и скорректирована общая методика диагностирования деталей и узлов машин и агрегатов новыми методами ультразвуковой дефектометрии.

Отличие от существующей методики заключается в следующем:

- настройка функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры осуществляется при помощи разработанного метода безэталоной настройки данной функции (подраздел 5.5) с применением программы «Комплекс NDTRT» (подпрограмма «ПП1 ВРЧ»);
- при выявлении в объекте диагностирования эхо-сигнала от несплошности, осуществляется определение ее типа при помощи разработанного двухчастотного метода дефектометрии (подраздел 5.1) с применением программы «Комплекс NDTRT» (подпрограмма «ПП 2 двухчастотный метод»);
- классификация несплошностей как допустимых или как дефектов осуществляется не оценкой по амплитудной характеристике, а путем сравнения эквивалентного размера несплошности, определенного при помощи разработанного метода дефектометрии (подраздел 5.4) с применением программы «Комплекс NDTRT» (подпрограмма «ПП3 эквивалентный размер»), со значением порогового эквивалентного размера, установленного в нормативной документации;
- при выявлении в объекте диагностирования несплошностей, к протоколу по результатам диагностирования прилагаются В- и С-сканы контролируемого участка изделия с изображениями несплошностей, полученными при помощи программы «Комплекс NDTRT» (подпрограммы «ПП4 визуализация»).

Была разработана логическая диагностическая модель процесса ультразвукового диагностирования деталей и узлов машин и агрегатов на базе дополненной общей методики.

Подраздел 7.2 «Экспериментальные исследования достоверности разработанных методов ультразвуковой дефектометрии при диагностировании деталей и узлов машин и агрегатов» посвящен проведению экспериментов с целью определения достоверности и технической эффективности разработанных в диссертационной работе методов ультразвуковой дефектометрии.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа.

Первый этап эксперимента посвящен исследованию достоверности двухчастотного метода дефектометрии определения типа точечных и протяженных несплошностей, а также метода безэталоного определения их эквивалентного размера.

Для проведения первого этапа эксперимента был изготовлен образец «Обр. №1» (рисунок 11 поз. 1) из стали 45 в котором были выполнены искусственные отражатели различного типа (точечные объемные и плоскостные, протяженные объемные и плоскостные), расположенные на разном расстоянии от поверхности ввода ультразвуковой волны. Эскиз экспериментального образца представлен на рисунке 10 (Т1 – Т5, П1, П2 – условные обозначения искусственных отражателей; ДП – донная поверхность).

Ультразвуковые измерения проводились ультразвуковым дефектоскопом УД 2-70 (рисунок 11 поз. 2), пьезоэлектрическими преобразователями П111-2,5-к12-003 (рисунок 11 поз. 3) и П111-5,0-к6-003 (рисунок 11 поз. 4) с частотой ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц соответственно. В качестве контактной жидкости применялось масло индустриальное И-40 (рисунок 11 поз. 5).

В экспериментальном образце измерялись следующие данные: амплитудные характеристики донных эхо-сигналов на частоте 2,5 и 5,0 МГц; расстояние от поверхности ввода ультразвука до донной поверхности; амплитудные характеристики эхо-сигналов от искусственных отражателей на частотах ультразвуковой волны 2,5 и 5,0 МГц (для протяженных отражателей амплитуда измерялась в шести точках); расстояния от поверхности ввода ультразвука до отражателей.

Измеренные данные обрабатывались программой «Комплекс NDTRT» (подпрограмма «ПП2 двухчастотный метод») при помощи которой определялись: типы отражателей, коэффициенты формы отражателей ν , граничные значения объемной несплошности и граничные значения плоскостной несплошности. Результаты определения типов отражателей в экспериментальном образце сведены в таблицу 4.

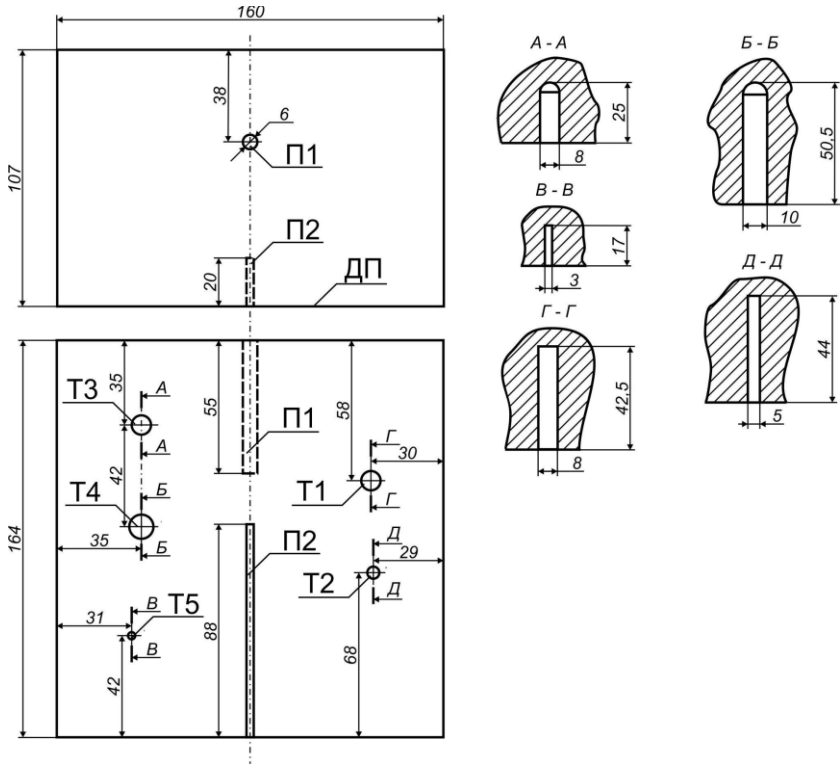


Рисунок 10 – Эскиз образца для проведения первого этапа эксперимента

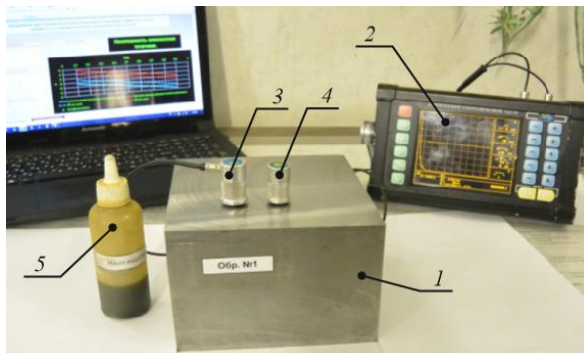


Рисунок 11 – Фото экспериментального стенда для проведения первого этапа эксперимента

Таблица 4 – Результаты определения типов отражателей в экспериментальном образце двухчастотным методом дефектометрии

Условное обозначение отражателя в экспериментальном образце	Тип искусственного отражателя в экспериментальном образце (рисунок 10)	Тип отражателя определенный двухчастотным методом дефектометрии
Точечные отражатели		
T1	плоскодонный цилиндрический	плоскостной
T2	плоскодонный цилиндрический	плоскостной
T3	полусферический	объемный
T4	полусферический	объемный
T5	плоскодонный цилиндрический	плоскостной
Протяженные отражатели		
П1	боковой цилиндрический	объемный
П2	паз с плоским дном	плоскостной

Относительная погрешность определения типа несплошности двухчастотным методом: если несплошность является плоскостной, рассчитывается по аналитической зависимости (7); если несплошность является объемной, рассчитывается по аналитической зависимости (8).

Достоверность определения типа несплошности двухчастотным методом дефектометрии определяется по аналитической зависимости (9).

Результаты определения относительных погрешностей и достоверностей определения типа несплошности двухчастотным методом в экспериментальном образце представлены в таблице 5.

$$\delta = \left(\left| \frac{ГПН - \nu}{ГОН - ГПН} \right| \right) \cdot 100\%. \quad (7)$$

где: $ГПН$ – граничное значение плоскостной несплошности, $ГОН$ – граничное значение объемной несплошности; ν – коэффициент формы несплошности

$$\delta = \left(\left| \frac{ГОН - \nu}{ГОН - ГПН} \right| \right) \cdot 100\%. \quad (8)$$

$$Д = 100\% - \delta. \quad (9)$$

Таблица 5 – Результаты определения относительных погрешностей и достоверностей определения типа несплошности двухчастотным методом

Тип несплошности	Значение	Относительная погрешность δ , %	Достоверность D , %
точечная	минимальное	0,7	94,3
	максимальное	5,7	99,3
	среднее	2,6	97,4
протяженная	минимальное	1,7	90,5
	максимальное	9,5	98,3
	среднее	6,4	93,6

Определение эквивалентного размера несплошности осуществлялось по данным измеренным пьезоэлектрическим преобразователем П111-2,5-к12-003 при помощи программы «Комплекс NDTRT» (подпрограмма «ППЗ эквивалентный размер», блоки «Эквивалентный размер ТН» и «Эквивалентный размер ПН»). Результаты определения эквивалентных размеров отражателей разработанным методом дефектометрии, а также определения абсолютных Δ (10) и относительных δ (11) погрешностей и достоверностей D (9) представлены в таблице 6.

$$\Delta = \mathcal{E}P_o - \mathcal{E}P_p \text{ (мм)}, \quad (10)$$

где: $\mathcal{E}P_o$ – определенный эквивалентный размер несплошности, мм;
 $\mathcal{E}P_p$ – реальный эквивалентный размер несплошности, мм

$$\delta = \left(\mathcal{E}P_o - \mathcal{E}P_p \right) / \left(\mathcal{E}P_p \right) \cdot 100\%. \quad (11)$$

Таблица 6 – Результаты определения эквивалентных размеров отражателей разработанным методом дефектометрии, абсолютных и относительных погрешностей, достоверностей

Условное обозначение отражателя	$\mathcal{E}P_p$, мм	$\mathcal{E}P_o$, мм	Δ , мм	δ , %	D , %
1	2	3	4	5	6
точечные отражатели					
T1	8	8,058	+0,58	0,7	99,3
T2	5	4,94	-0,06	1,2	98,8
T3	8	8,159	+0,159	2	98
T4	10	10,175	+0,175	1,8	98,2
T5	3	3,086	+0,086	2,9	97,1

Таблица 6 – продолжение

1	2	3	4	5	6
протяженные отражатели					
П1	6	6,117	+0,117	2	98
П2	3	2,98	+0,02	0,7	99,3

Второй этап эксперимента посвящен исследованию достоверности метода определения угла наклона точечной плоскостной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны и ее эквивалентного размера.

Для проведения эксперимента был изготовлен образец «Обр. №2» (рисунок 12, поз. 1) из стали 45 в котором были выполнены два плоскостных цилиндрических отражателя, расположенных под углом 4° (отражатель ТП4, диаметр отражателя 3 мм), и 8° (отражатель ТП8, диаметр отражателя 4 мм) к поверхности ввода ультразвуковой волны. Ультразвуковые измерения проводились ультразвуковым дефектоскопом УД 2-70 (рисунок 12, поз. 2) и комбинированным пьезоэлектрическим преобразователем П131-2,5-0и18-ВО-04 (рисунок 12, поз. 3). В качестве контактной жидкости применялось масло индустриальное И-40 (рисунок 12, поз 4).

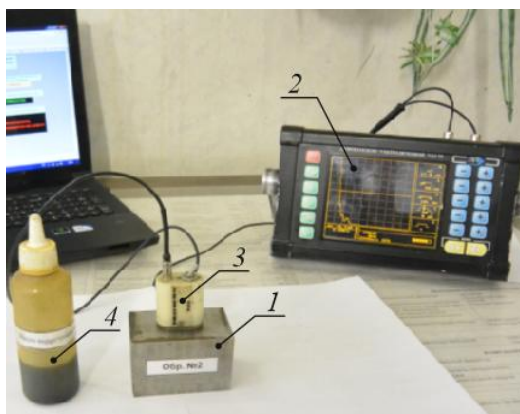


Рисунок 12 – Фото экспериментального стенда

В экспериментальном образце измерялись следующие данные: амплитудная характеристика донного эхо-сигнала при нормальном вводе ультразвуковой волны; расстояние от поверхности ввода ультразвука до донной поверхности; амплитудные характеристики эхо-сигналов от искусственных отражателей при нормальном вводе ультразвуковой волны; расстояние от поверхности ввода ультразвука до искусственных отражателей при нормальном вводе ультразвуковой волны; амплитуд-

ные характеристики эхо-сигналов от искусственных отражателей при вводе ультразвуковой волны в образец под углом 18° .

Измеренные данные обрабатывались программой «Комплекс NDTRT» (подпрограмма «ППЗ эквивалентный размер», блок «Эквивалентный размер НТН»), с помощью которой определялся угол наклона отражателя к поверхности ввода ультразвуковой волны, угловой коэффициент γ и эквивалентный размер отражателя. Результаты определения угла наклона плоскостного точечного отражателя к поверхности ввода ультразвуковой волны, абсолютной Δ (12) и относительной δ (13) погрешностей, а также достоверности D (9) определения угла наклона отражателя к поверхности ввода ультразвуковой волны представлены в таблице 7. Результаты определения эквивалентного размера плоскостного точечного отражателя, расположенного под углом к поверхности ввода ультразвуковой волны, абсолютной Δ (10) и относительной δ (11) погрешностей, а также достоверности D (9) определения эквивалентного размера данного типа отражателя представлены также в таблице 8.

$$\Delta = \alpha_o - \alpha_p , \quad (12)$$

где: α_o – определенный $^{\circ}$ угол наклона отражателя, $^{\circ}$; α_p – реальный угол наклона отражателя, $^{\circ}$.

$$\delta = \left(\alpha_o - \alpha_p / \alpha_p \right) \cdot 100\% . \quad (13)$$

Таблица 7 – Результаты определения угла наклона плоскостного точечного отражателя к поверхности ввода ультразвуковой волны, абсолютной и относительной погрешностей, достоверности

Условное обозначение отражателя	$\alpha_p, ^{\circ}$	$\alpha_o, ^{\circ}$	Δ , мм	δ , %	D , %
ТП4	4	4,08	0,08	2	98
ТП8	8	8,08	0,08	1	99

Таблица 8 – Результаты определения эквивалентного размера плоскостного точечного отражателя, расположенного под углом к поверхности ввода ультразвуковой волны, абсолютной и относительной погрешностей, достоверности

Условное обозначение отражателя	$\mathcal{E}P_p$, мм	$\mathcal{E}P_o$, мм	Δ , мм	δ , %	D , %
ТП4	3	3,01	0,01	0,3	99,7
ТП8	4	4,082	0,082	2	98

Экспериментальные исследования подтвердили высокую степень достоверности, техническую эффективность и обоснованность разработанных в диссертационной работе методов ультразвуковой дефектометрии в системе технического диагностирования машин и агрегатов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная проблема создания научных основ технического диагностирования машин и агрегатов путем разработки новых методов ультразвуковой дефектометрии.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. В процессе анализа дефектов в деталях и узлах машин и агрегатов дана классификация дефектов металла по различным классификационным признакам. Проведено исследование влияния формы, размеров и ориентации дефектов в деталях и узлах на конструкционную прочность материала. Показано и обосновано, что наибольшее влияние на конструкционную прочность и долговечность оказывает плоскостной дефект, ориентированный относительно растягивающих напряжений под углом близким 90^0 . Следовательно, определение формы, размеров и ориентации дефекта в объекте при ультразвуковом контроле является важной задачей технической диагностики, решение которой позволит судить о долговечности и ресурсе объекта диагностирования.

2. В результате проведения математического моделирования процессов излучения, приема, прохождения и отражения ультразвуковой волны в объекте диагностирования представлены математические модели, описывающие амплитуду отражения ультразвуковой волны от: бесконечной плоскости (модель донной поверхности); плоскодонного цилиндрического отражателя (модель плоскостной точечной несплошности); полусферического отражателя (модель объемной точечной несплошности); паза с плоским дном (модель плоскостной протяженной несплошности); бокового цилиндрического отражателя (модель объемной протяженной несплошности).

3. Предложены новые методы ультразвуковой дефектометрии в системе технического диагностирования машин и агрегатов:

- определения типа обнаруженной при ультразвуковом диагностировании несплошности;
- ультразвукового определения угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны;
- безэталонного определения эквивалентных размеров несплошностей различного типа при проведении ультразвукового диагностирования;
- безэталонной настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры при применении эталонных от-

ражателей различного типа с учетом ослабления ультразвуковой волны на различных отражающих поверхностях.

4. Составлен алгоритм, реализованный в программе «Комплекс NDTRT» для автоматизации расчетов методов ультразвуковой дефектометрии при техническом диагностировании машин и агрегатов. Применение программы ускоряет процесс проведения ультразвуковой дефектометрии, исключает неточности в расчетах, позволяет визуализировать изображения несплошностей на контролируемом участке объекта диагностирования.

5. На основе новых методов ультразвуковой дефектометрии разработана логическая диагностическая модель и дополнена общая методика ультразвукового диагностирования. Предложенная методика ультразвукового диагностирования обладает более высокой достоверностью и информативностью результатов, за счет исключения необходимости применения стандартных образцов предприятия, возможности определения типа несплошности при диагностировании и возможности визуализации изображений несплошности на контролируемом участке объекта диагностирования.

6. Экспериментальными исследованиями подтверждена высокая степень достоверности и технической эффективности разработанных методов ультразвуковой дефектометрии в системе технического диагностирования машин и агрегатов, а именно:

а) достоверность двухчастотного метода определения типа несплошности достигает $90,5 \div 99,3\%$;

б) достоверность определения эквивалентного размера несплошности достигает $97,1 \div 99,7\%$;

в) достоверность определения угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны достигает $98 \div 99\%$.

Основные научные публикации по теме диссертационного исследования

Монографии, брошюры, учебники и учебные пособия

1. Кіреєв, А.М. Наукові основи та практична реалізація вдосконалення ультразвукового контролю елементів та систем рухомого складу залізниць: Монографія / А.М. Кіреєв. – Луганськ: Вид-во „Ноулідж”, 2012. – 142с.

2. Киреев, А.Н. Дефектометрия при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог: Монография / А.Н. Киреев. – Луганск: Изд-во «Ноулідж», 2016. – 147с.

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Луганской Народной Республики

3. Киреев, А.Н. Дефектометрия при ручном контроле элементов и систем подвижного состава железных дорог ультразвуковым эхо-методом / А.Н. Киреев // Вестник Ростовского Государственного университета путей сообщения. – Ростов на Дону: Изд-во РГУПС, 2015. – №2 (58). – С. 24-30.

4. Киреев, А.Н. Метод определения эквивалентного размера несплошности при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев // Вестник Ростовского Государственного университета путей сообщения. – Ростов на Дону: Изд-во РГУПС, 2015. – №4 (60) – С. 14-21.

5. Киреев, А.Н. Новый способ эталонирования чувствительности ультразвуковой аппаратуры на стандартном образце СО-1 при диагностировании сварных соединений подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев // Контроль. Диагностика. – 2016. – №4 – С. 28-35.

6. Киреев, А.Н. Диагностирование стальных поковок ультразвуковым эхо-методом / А.Н. Киреев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Том. 82 – № 12 – С. 27-30.

7. Киреев, А.Н. Совершенствование ультразвукового контроля осей колесных пар подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев, В.А. Витренко // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Изд-во АО «ВНИИЖТ», 2016. – Том 75 – №2 – С. 116-122.

8. Киреев, А.Н. Настройка функции ВРЧ ультразвуковой аппаратуры при диагностировании элементов экипажной части подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2016. – №1 (29) – С. 23-29.

9. Киреев, А.Н. Усовершенствование ультразвукового диагностирования колесных центров электровозов серии ВЛ / А.Н. Киреев, Н.В. Пономарева // Вестник Ростовского Государственного университета путей сообщения. – Ростов на Дону: Изд-во РГУПС, 2016. – №2 (62) – С. 24-28.

10. Киреев, А.Н. Усовершенствование ультразвукового диагностирования литых элементов подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев, В.И. Додонов // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В.Даля, 2017. – №2(4) – ч. 2. – С. 85-91.

11. Киреев, А.Н. Визуализация изображений дефектов при ручном ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Изд-во АО «ВНИИЖТ», 2017. – Том 76 – №3 – С. 159-164.

12. Киреев, А.Н. Применение функции временной регулировки чувствительности при настройке условной чувствительности ультразвукового контроля деталей подвижного состава железных дорог эхо-импульсным методом / А.Н. Киреев, В.А. Витренко // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Изд-во АО «ВНИИЖТ», 2017. – Том 76 – №6 – С. 377-382.

13. Киреев, А.Н. Экспериментальные исследования безэталонных методов отстройки функции ВРЧ при ультразвуковом контроле деталей ПСЖД / А.Н. Киреев, В.А. Витренко // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2017. – №4 (36) – С. 56-66.

14. Киреев, А.Н. Усовершенствование методов дефектометрии при ультразвуковом диагностировании деталей и узлов подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев, В.А. Витренко // Вестник Ростовского Государственного университета путей сообщения. – Ростов на Дону: Изд-во РГУПС, 2017. – №4 (68) – С. 52-58.

15. Киреев, А.Н. Настройка функции ВРЧ с применением специфических АРД-диаграмм при ультразвуковом контроле катаных колесных центров подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2018. – №1 (57). – С. 140-147.

16. Киреев, А.Н. Анализ погрешностей применения условной чувствительности при ультразвуковом контроле деталей подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев, М.А. Киреева // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2018. – №2 (38) – С. 27-34.

17. Киреев, А.Н. Усовершенствование ультразвукового диагностирования цилиндрических элементов подвижного состава железных дорог с центральным отверстием / А.Н. Киреев, В.И. Додонов, Л.Н. Беспалова // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В.Даля, 2018. – №3(9) – С. 46-50.

18. Киреев, А.Н. Повышение информативности двухчастотного метода дефектометрии при ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Изд-во АО «ВНИИЖТ», 2018. – Том 77 – №3 – С. 182-187.

19. Киреев, А.Н. Безэталонные методы настройки функции временной регулировки чувствительности при ультразвуковом контроле деталей и узлов подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев // Вестник Ростовского Государственного университета путей сообщения. – Ростов на Дону: Изд-во РГУПС, 2018. – №2 (70) – С. 21-28.

20. Киреев, А.Н. Расширение области применения двухчастотного метода дефектометрии при ручном ультразвуковом контроле / А.Н. Киреев / Контроль. Диагностика. – 2018. – №4 – С. 58-63.

21. Киреев, А.Н. Комплексный метод оценки результатов ультразвукового контроля деталей и узлов подвижного состава при настройке чувствительности по разным отражателям / А.Н. Киреев, В.В. Быкадоров, М.А. Киреева // Вестник ВНИИЖТ. – М.: Изд-во АО «ВНИИЖТ», 2019. – Том 78 – №2 – С. 122-128.

Статьи в профессиональных журналах и научных сборниках

22. Andrey Kireev. Analysis of the ultrasonic control system at making of elements and knots of rolling stock of railways. / Andrey Kireev // ТЕКА Kom. Mot. i Energ. Rohn. – 2010 – Tom 10C. – Pages 110-115.

23. Киреев, А.Н. Совершенствование методов дефектометрии при ультразвуковом диагностировании элементов экипажной части подвижного состава железных дорог. / А.Н. Киреев // Локомотив-информ. – Харьков: Изд-во «Подвижной состав», 2011. – №12. – С. 12-13.

24. Andrey Kireev. Perfection of methods of determination of type of defect at the ultrasonic control of elements of rolling stock of railways. / Andrey Kireev. Irina Kirichenko // ТЕКА Kom. Mot. i Energ. Rohn. – 2012 – Vol. 12 – №3. – С. 58-61.

25. Киреев, А.Н. Настройка функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры при диагностировании катаных колесных центров ТПС. / Г.Г. Басов, А.Н. Киреев // Локомотив-информ. – Харьков: Изд-во «Подвижной состав», 2012. – №4. – С. 8-10.

26. Киреев, А.Н. Экспериментальные исследования метода дефектоскопии при ручном ультразвуковом контроле элементов подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев // В мире НК. – СПб: ООО «СВЕН», 2015. – Том 18 – №4 – С. 72-75.

27. Киреев, А.Н. Настройка эквивалентной чувствительности при ультразвуковом контроле стыковых сварных соединений из машиностроительных сталей / А.Н. Киреев // В мире НК. – СПб: ООО «СВЕН», 2016. – Том 19 – №3 – С. 79-81.

28. Киреев, А.Н. Двухчастотный метод дефектометрии при диагностировании деталей подвижного состава железных дорог ручным ультразвуковым методом / А.Н. Киреев, М.А. Киреева // РСП Эксперт. – Екатеринбург: ООО Издательский дом «РСП Эксперт», 2018. – №8-9 – С. 28-32.

*Доклады на научных конференциях
и другие научные публикации*

29. Киреев, А.Н. Развитие методов дефектометрии при ультразвуковом диагностировании элементов и систем подвижного состава железных дорог // «Международный научный форум Донецкой Народной Республики»: материалы международной научно-практической конференции, 21.05.2015. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 23-27.

30. Киреев, А.Н. Усовершенствование двухчастотного метода дефектометрии при ультразвуковом диагностировании деталей и узлов подвижного состава железных дорог // «Современные проблемы транспорта»: материалы международной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых, 29.03.2018. – Луганск: ЛНУ им.В.Даля, 2018. – С. 95-96.

31. Киреев, А.Н. Усовершенствование технологии ультразвукового контроля литых деталей подвижного состава железных дорог / А.Н. Киреев, Я.К. Склифус, М.А. Киреева // «Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта»: материалы V международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие» 23.05.2019. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 34-39.

32. Киреев, А.Н. Комплексный метод оценки результатов ультразвукового диагностирования литых деталей машин и агрегатов / В.А. Витренко, А.Н. Киреев, М.А. Киреева // «Машиностроение и техносфера XXI века»: сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции, г. Севастополь, 23-29.09.2019, Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 67-69.

Патенты

33. Пат. №81892 Україна, МПК (2006/01) G 01N 29/04. Спосіб настройки чутливості дефектоскопа при ультразвуковому контролі зварних з'єднань виробів зі сталі / Кіреєв А.М.; Заявник та патентовласник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – № U201301717; заявл. 13.02.13 ; опубл. 10.07.13, Бюл. № 13.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве

В работах опубликованных в соавторстве автору принадлежат следующие результаты: [7] – разработка математического аппарата и на его основе усовершенствованной методики ультразвукового диагностирования осей колесных пар; [9] – разработка математического аппарата и на его основе усовершенствованного метода диагностирования колес-

ных центров электровозов серии ВЛ; [10, 12, 13, 16, 17, 25] – проведение теоретических и экспериментальных исследований, разработка методов настройки функции временной регулировки чувствительности при ультразвуковом диагностировании различных объектов; [14, 21, 24, 28, 31, 32] – анализ, разработка и усовершенствование методов ультразвуковой дефектометрии при ультразвуковом диагностировании различных объектов, а также проведение экспериментальных исследований и разработка программных продуктов.

АННОТАЦИЯ

Киреев А.Н. Научные основы технического диагностирования машин и агрегатов методами ультразвуковой дефектометрии. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) – ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет». – Алчевск, 2020.

В диссертационной работе изложены результаты исследований по повышению достоверности и информативности результатов технического диагностирования машин и агрегатов путем разработки новых методов ультразвуковой дефектометрии, с целью обеспечения их надежной и безопасной эксплуатации, а также продления ресурса.

Проведены исследования влияния формы, размеров и ориентации дефектов металла на конструкционную прочность и долговечность материала изделия. Выявлены основные недостатки существующей методики диагностирования деталей и узлов машин и агрегатов, определены пути ее усовершенствования.

Представлена база математических моделей, описывающих амплитуду отражения продольной ультразвуковой волны от эталонных отражателей различного типа, а также от различных отражающих поверхностей, учитывающие следующие факторы: частота ультразвуковой волны, ослабление ультразвуковой волны за счет расхождения и затухания, размеры и форму отражателей, форму отражающих поверхностей.

Разработаны новые методы ультразвуковой дефектометрии: двухчастотный метод дефектометрии, позволяющий определить тип точечных и протяженных несплошностей выявленных в результате ультразвукового диагностирования; метод определения угла наклона плоскостной точечной несплошности к поверхности ввода ультразвуковой волны и коэффициента корректировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры; метод безэталонного определения эквивалентных раз-

меров несплошностей различного типа, обнаруженных в результате ультразвукового диагностирования; метод безэталонной настройки функции временной регулировки чувствительности ультразвуковой аппаратуры с применением различных эталонов и учета ослабления ультразвуковой волны по различным отражающим поверхностям.

Дополнена и скорректирована общая методика ультразвукового диагностирования новыми методами дефектометрии, что позволило избавиться от недостатков классической методики, путем исключения из процессов настройки аппаратуры и оценки несплошностей стандартных образцов предприятия.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили высокую степень достоверности и обоснованность разработанных в диссертационной работе методов ультразвуковой дефектометрии в системе технического диагностирования машин и агрегатов.

Результаты исследований опубликованы в 33 научных работах.

Ключевые слова: техническая диагностика, техническое диагностирование, ультразвуковое диагностирование, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, ультразвуковая дефектометрия, импульсный эхо-метод, достоверность диагностирования, информативность диагностирования, дефект, форма дефекта, ориентация дефекта, эталонный отражатель.

SUMMARY

Kireev A.N. Scientific fundamentals of machines and units technical diagnostics by methods of ultrasonic defect identification. – Manuscript.

Theses for a doctor of science degree (engineering) in specialty 05.02.13 – Machines, units and processes (by branches) – SEI HPE LPR «Donbass State Technical University». – Alchevsk, 2020.

The Theses presents the results of investigation on increase of validity and informativity of machines and units technical diagnostics results; development of new approaches and methods of ultrasonic defect identification aimed at provision of their reliable and safe operation as well as their overhaul-period renewal.

Investigation of form, size and orientation of defects in metal impact on the construction strength and durability of item material has been conducted. Major drawbacks of existing methods of machine parts and units diagnostics have been detected; ways of its perfection have been defined.

Scientific basis of mathematical models describing amplitude of reflection of longitudinal ultrasonic wave from standard reflectors of different

types as well as from different reflecting surfaces has been systemized taking into account the following factors: ultrasonic wave frequency, ultrasonic wave attenuation due to divergence and damping out; reflectors size and forms; shape of reflecting surfaces.

New methods of ultrasonic defect identification have been developed:

double-frequency method of defect identification allowing for defining the type of pointwise and extended discontinuities detected in the result of ultrasonic identification;

method of defining angle of surface pointwise discontinuities inclination to the surface of ultrasonic wave input and ultrasonic apparatus sensitivity correction index;

method of standard-less definition of equivalent sizes of different type discontinuities detected due to ultrasonic diagnostics;

method of standard-less adjustment of ultrasonic apparatus sensitivity temporary regulation function using different standards and taking into account ultrasonic wave attenuation on different reflecting surfaces.

General method and logical diagnostic model of different machine parts and units ultrasonic diagnostics has been developed using new methods of ultrasonic defect identification.

Conducted experimental investigations proved the high degree of validity and justification of ultrasonic defect identification methods in the system of machines and units technical diagnosis developed in the theses.

Results of the investigation have been published in 33 scientific papers.

Key words: technical diagnostics, technical diagnoses, ultrasonic diagnostics, non-destructive control, ultrasonic control, ultrasonic defect identification, impulse echo-method, diagnostics validity, diagnostics informativity, defect, form of defect, defect orientation, standard reflector.