

На правах рукописи

НЕМЫТОВА Ольга Владимировна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ОТРАЖАТЕЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЭХО-СИГНАЛОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте физики металлов Уральского Отделения РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Ринкевич Анатолий Брониславович

Официальные оппоненты: Муравьев Виталий Васильевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», заведующий кафедрой «Приборы и методы контроля качества»

Бархатов Владимир Альбертович, кандидат физико-математических наук, ООО «ИЦ ФИЗПРИБОР», генеральный директор

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», «Физико-технологический институт».

Защита состоится 3 июня 2014 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 004.023.01 при Институте машиноведения УрО РАН по адресу: 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « » апреля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Коновалов А. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Непрерывное повышение требований к качеству продукции во всех отраслях промышленности и народного хозяйства предопределяет широкое применение и развитие приборов и методов неразрушающего контроля.

Одной из актуальных проблем в неразрушающем контроле, в том числе и ультразвуковом, является проблема оценки формы скрытого дефекта. Очень важно знать, к какому классу относится дефект, поскольку его потенциальная опасность во многом зависит от его формы. Так, дефекты с острыми краями, являющиеся концентраторами напряжений, как правило, недопустимы. Дефекты с округлой поверхностью допускаются, но с учетом ограничений на их размеры.

Для повышения информативности и достоверности ультразвукового контроля материалов и изделий, более точного определения типа скрытого дефекта и увеличения экономической выгоды наряду с уже существующими способами, необходима разработка новых.

Задача оценки типа скрытого дефекта может быть решена с использованием ультразвукового эхо-метода неразрушающего контроля на основе применения единственного совмещенного пьезоэлектрического преобразователя, при одностороннем доступе к объекту контроля. В такой постановке становится актуальным вопрос о нахождении соответствующих информативных признаков, позволяющих классифицировать эхо-сигналы. Один из возможных подходов к решению данной проблемы заключается в использовании информации об изменении во времени мгновенной частоты отраженного сигнала.

Настоящая работа выполнена в соответствии с плановой темой «Диагностика» ИФМ УрО РАН, рук. – чл.-корр. РАН В.Е. Щербинин, номер гос. регистрации 01201064334 «Разработка электромагнитных и акустических методов, технологий и систем неразрушающего контроля конструкционных объёмных и наноструктурированных материалов с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного характера». Актуальность темы подтверждается поддержкой гранта РФФИ № 12-08-33098 «Моделирование и экспериментальное исследование взаимосвязи инициированных деформацией изменений структуры, прочностных, магнитных и акустических свойств стальных объектов», поддержкой проекта Президиума РАН, руководитель чл.-корр. РАН Щербинин В.Е. «Восстановление образа дефекта путем решения обратных задач магнитостатики, электродинамики и акустики и применения современных методов анализа сигналов» и проекта Президиума РАН, руководитель чл.-корр. РАН Щербинин В.Е. «Анализ, моделирование и экспери-

ментальное исследование топологии магнитных и акустических полей в ферромагнитных объектах».

Степень разработанности темы исследования.

В работах А.К. Гурвича, И.Н. Ермолова, В.Г. Щербинского описан ряд методов ультразвукового контроля, которые в той или иной степени позволяют судить о форме скрытого дефекта.

При неразрушающем контроле о типе дефекта судят по косвенным характеристикам – информативным признакам. Эти информативные признаки формируют из абсолютных или относительных значений временных, амплитудных или спектральных характеристик принимаемых сигналов, которые измеряют, выбрав определенный тип волн, углы ввода, число преобразователей, частоты колебаний. Затем по конкретным значениям этих информативных признаков реальные дефекты относят к тому или иному классу. Известно несколько информативных признаков определения формы дефекта. К ним относятся, например, коэффициент формы, коэффициент ослабления донного сигнала, огибающая спектра принятого сигнала, индикатриса рассеяния и др.

Существующие на данный момент методы имеют ограничения, которые зачастую связаны с тем, что получаемые ими результаты коррелированы с амплитудой принятого сигнала. В этом случае на результат измерений будет в значительной степени влиять качество акустического контакта и качество контролируемой поверхности. Кроме того, многие из описанных методов реализуются с использованием нескольких преобразователей и требуют сканирования вдоль поверхности объекта контроля для получения информации о конкретном дефекте.

В последние годы получили развитие методы восстановления формы дефекта с использованием компьютерной томографии. Томографические методы, в частности, описаны в работах Е.Г. Базулина. Эти методы позволяют получать двумерное изображение сечения внутреннего объема материала – «томограмму», то есть визуальный образ дефекта, но при этом требуют дорогостоящей аппаратуры.

Учитывая вышесказанное, наряду с уже существующими методами, в том числе и томографическим, необходима разработка новых, в которых информативные признаки не будут коррелированы с амплитудой эхо-сигнала. В этом случае влияние качества контролируемой поверхности и качества акустического контакта на результаты измерений будет незначительным, повышая достоверность оценки типа дефекта. Кроме того, следует учитывать экономическую выгоду при решении поставленной задачи. Необходима разработка методов, которые могут быть реализованы посредством стандартной аппаратуры, используемой в практике ультразвуковой дефектоскопии, и на основе применения единственного совмещенного преобразователя.

Цель работы.

Цель работы состоит в том, чтобы ввести и обосновать новый информативный признак оценки типа скрытых дефектов – мгновенную частоту недетектированного радиочастотного эхо-сигнала; изучить зависимость этого параметра от типа дефекта; на основе полученных данных разработать новый способ оценки типа скрытых дефектов при реализации ультразвукового метода неразрушающего контроля.

Задачи исследования.

1. Разработать способ классификации формы скрытых дефектов с использованием критерия оценки мгновенной частоты. Провести необходимые для этого экспериментальные исследования зависимости мгновенной частоты от формы искусственных отражателей и естественных дефектов.

2. Разработать новый алгоритм оценки мгновенной частоты на основе вейвлетного преобразования и программу, реализующую выработанный критерий оценки. Построить аналитическую модель, объясняющую зависимость мгновенной частоты от формы отражателей.

3. Провести сравнительный анализ результатов оценки типа отражателей, полученных томографическим методом и методом, основанным на использовании критерия оценки мгновенной частоты.

4. Разработать методику ультразвукового контроля изделий из моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов. Выполнить оценку частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей в образцах из моно- и поликристаллов жаропрочных сплавов.

Научная новизна представляемой работы.

1. Предложено использовать мгновенную частоту недетектированного радиочастотного эхо-сигнала в качестве информативного признака оценки типа скрытых дефектов. Результаты оценки типа дефекта, полученные таким способом, не коррелированы с амплитудой, следовательно, влияние качества акустического контакта и качества контролируемой поверхности в этом случае незначительное.

2. Предложен алгоритм оценки мгновенной частоты на основе использования непрерывного вейвлетного преобразования, за счет чего обеспечивается высокая помехоустойчивость предлагаемого способа.

3. На основе экспериментальных исследований зависимости мгновенной частоты импульсного эхо-сигнала от типа отражателя, а так же на основе построенного аналитического алгоритма, описывающего зависимость мгновенной частоты от типа отражателя, разработан новый способ ультразвукового неразрушающего контроля, который позволяет судить о типе скрытого дефекта.

4. Научная новизна диссертационной работы подтверждается положительным решением о выдаче патента на изобретение «Способ определения

типа дефекта в металлургических изделиях» по заявке №2013101082 от 09.01.2013 г.

Теоретическая и практическая значимость работы.

На основе результатов экспериментальных исследований зависимости мгновенной частоты от типа искусственных отражателей и естественных дефектов в сварных швах и построенной аналитической модели, объясняющей, как мгновенная частота зависит от типа отражателя, предложен новый способ оценки типа скрытых дефектов при реализации ультразвукового эхо-метода неразрушающего контроля. Предложенный способ, в дополнение к уже существующим, позволит получать более точную информацию о типе скрытого дефекта. Кроме того, он может быть реализован посредством стандартной аппаратуры, используемой в современной ультразвуковой дефектоскопии, на основе применения единственного совмещенного преобразователя и при одностороннем доступе к объекту контроля. Это делает его экономически выгодным и простым в реализации.

Разработанный алгоритм оценки мгновенной частоты импульсного эхо-сигнала с использованием непрерывного вейвлетного преобразования, может быть использован в других методах ультразвукового контроля для анализа результатов и обработки полученных экспериментальных данных, с целью снижения влияния шума на результаты измерений.

В диссертационной работе получены результаты, связанные с разработкой методик ультразвукового контроля изделий из моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов. Ультразвуковой контроль жаропрочных сплавов имеет свою специфику и требует предварительных исследований, поскольку контролепригодность таких материалов ограничена высокой упругой анизотропией.

Совместно с ЗАО «НПО «Интротест» ведется разработка функциональной возможности использования критерия оценки мгновенной частоты эхо-сигнала для классификации дефектов по форме в виде дополнительной опции в существующем дефектоскопическом оборудовании.

Результаты данной работы используются в учебном процессе в рамках курса лекций по дисциплине «Физические методы контроля материалов» на кафедре «Физические методы и приборы контроля качества» Физико-технологического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Вынесено положительное решение о выдаче патента по заявке №2013101082 от 09.01.2013 г. на изобретение «Способ определения типа дефекта в металлургических изделиях».

Методология и методы исследования.

Дифракция ультразвуковых волн на отражателях различной формы приводит к изменению фазы принятого импульсного эхо-сигнала. Изменение

фазы удобно интерпретировать как изменение частоты. В качестве информативного параметра оценки типа скрытого дефекта предложено использовать мгновенную частоту недетектированного радиочастотного эхо-сигнала. Для того, чтобы снизить влияние шумов на результат измерений, предложен алгоритм оценки мгновенной частоты с использованием вейвлетного спектра аналитического сигнала.

Задача оценки типа скрытого дефекта решается на основе применения ультразвукового эхо-метода с использованием стандартной аппаратуры, которая широко используется в практике ультразвуковой дефектоскопии. Для генерации зондирующего импульса применяется серийно изготавливаемый микропроцессорный дефектоскоп PCUS-10. Излучение и прием ультразвуковых колебаний осуществляется с использованием прямых и наклонных пьезоэлектрических преобразователей с различными номинальными частотами. Для визуализации внутреннего сечения объема исследуемых образцов с искусственными и естественными отражателями используется универсальный портативный ультразвуковой дефектоскоп-томограф A1550 IntroVisor. Ультразвуковая томография реализуется на основе применения фазированных антенных решеток продольных и поперечных ультразвуковых волн. Обработка и анализ полученных экспериментальных результатов, с целью выработки информативного признака оценки типа отражателя, осуществляется в системе инженерных и научных расчетов MATLAB.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм оценки мгновенной частоты эхо-сигналов с использованием непрерывного вейвлетного преобразования.
2. Критерий оценки типа скрытых дефектов – соотношение между нормированными девиациями частоты.
3. Результаты экспериментальных исследований зависимости мгновенной частоты от типа искусственных отражателей и естественных дефектов в сварных швах.
4. Аналитическая модель, описывающая зависимость мгновенной частоты от типа отражателя.
5. Способ оценки типа скрытых дефектов с использованием мгновенной частоты эхо-сигналов.
6. Результаты сравнительного анализа оценки типа дефекта томографическим методом и с использованием критерия оценки мгновенной частоты.
7. Методики ультразвукового контроля изделий из моно- и поликристаллических жаропрочных никелевых сплавов, а также результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей в таких материалах.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается:

- воспроизводимостью и однозначностью результатов, полученных при различных параметрах измерительного оборудования. Использовались пьезоэлектрические преобразователи с различными номинальными частотами, различными диаметрами пьезопластины и различными углами ввода;
- использованием при разработке нового способа аттестованной дефектоскопической аппаратуры, применяемой в практике ультразвуковой дефектоскопии;
- использованием при анализе полученных результатов современных представлений физической акустики и ультразвукового контроля;
- сравнительным анализом результатов оценки типа отражателей, полученных предложенным способом и томографическим методом;
- сравнительным анализом результатов, полученных на искусственных отражателях и на естественных дефектах в сварных швах;
- аналитическими расчетами, объясняющими, как мгновенная частота зависит от типа отражателя, и подтверждающими возможность ее использования для классификации отражателей по форме.

Личный вклад.

Постановка задач проводилась Немытовой О.В. совместно с научным руководителем. Автором проведены все описанные в работе экспериментальные исследования на искусственных и естественных отражателях различной формы и размеров и обработка полученных экспериментальных данных. Анализ полученных результатов с целью разработки нового способа оценки типа скрытых дефектов был проведен автором совместно с Д.В. Перовым и А.Б. Ринкевичем. Результаты исследований неоднократно докладывались диссертантом на научных конференциях российского и международного уровня. Автор выполнил основной объем работы, связанный с написанием текстов публикаций и патентной заявки на изобретение.

Апробация работы.

Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, докладывались на XXIII Уральской конференции «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами» (Курган, 2006 г.), III Российской научно-технической конференции «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2007 г.), XXII Сессии Российского Акустического Общества (Москва, 2010 г.), V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011 г.), XXIV сессии Российского акустического общества (Саратов, 2011 г.), XXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля» (Екатеринбург, 2011 г.), XXV сессии Российского аку-

стического общества (Таганрог, 2012 г.), Международном конгрессе по ультразвуку 2013 «2013 International Congress on Ultrasonics» (Сингапур, 2013 г).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, практическая значимость и новизна, обозначена цель научного исследования и задачи, решаемые для достижения поставленной цели.

Первая глава представляет собой литературный обзор, в котором одним из пунктов описаны основные типы дефектов, наиболее часто встречающихся в классической дефектоскопии при контроле изделий из металлов. Приведены существующие на данный момент ультразвуковые методы оценки типа дефекта, которые с некоторой достоверностью позволяют сделать заключение о типе дефекта. Показано, что каждый из ранее описанных методов имеет ограничения, которые либо снижают его информативность, либо делают его сложным в реализации или дорогостоящим. Обоснована необходимость разработки новых способов оценки типа дефектов, результаты которых не будут коррелированы с амплитудой принятого эхо-сигнала, повышая информативность и достоверность контроля.

Во **второй главе** описаны методики проведенных экспериментальных исследований и технические характеристики средств измерений. Введен и обоснован новый информативный признак оценки типа скрытых дефектов – мгновенная частота недетектированного радиочастотного сигнала. Разработан алгоритм оценки мгновенной с использованием непрерывного вейвлетного преобразования. Описана обобщенная суть способа оценки типа скрытого дефекта и введен качественный критерий классификации отражателей по форме.

Для проведения экспериментальных исследований был выбран ультразвуковой контактный эхо-импульсный метод. Генерация зондирующего импульса осуществлялась цифровым дефектоскопом PCUS-10. Прием и излучение ультразвуковых колебаний проводились пьезоэлектрическими преобразователями с различными номинальными рабочими частотами, использующими как продольные, так и поперечные волны ультразвукового диапазона, с разными углами ввода и разными диаметрами пьезопластины. Использовались: прямой совмещенный пьезоэлектрический преобразователь с частотой 4 МГц производства фирмы «Krautkrämer» (Германия); прямой совмещенный пьезоэлектрический преобразователь с частотой 2,5 МГц отечественного производства; два наклонных совмещенных пьезоэлектрических преобразователя с частотой 5 МГц и углами ввода 40° и 65° отечественного производства. Исследования были проведены на образцах с наборами искусственных отражателей следующих типов: зарубки с разной площадью плоской перед-

ней грани; двугранные углы с различными углами раскрытия; плоская донная поверхность; вогнутая донная поверхность; «сквозные боковые цилиндрические отверстия»; «плоскодонные сверления». Для того, чтобы сравнить результаты, полученные на искусственных и естественных отражателях, экспериментальные исследования были проведены на сварном шве с заранее известным типом дефекта – «непроваром» в корне стыкового сварного шва, протяженным по всей длине шва.

Так как в работе в качестве информативного признака для классификации отражателей по форме предложено использовать мгновенную частоту недетектированного радиочастотного эхо-сигнала, необходимо ввести основные понятия и формулы, которые будут использоваться для реализации предлагаемого способа.

В литературе описан алгоритм оценки мгновенной частоты, который основан на использовании комплексного аналитического сигнала $z(t)$.

В этом случае мгновенная частота $\tilde{f}(t)$ сигнала $s(t)$ может быть найдена по формуле

$$\tilde{f}(t) = \text{Im} \left[\frac{1}{\dot{z}(t)} \frac{dz(t)}{dt} \right]. \quad (1)$$

Так как в формуле (1) присутствует оператор дифференцирования, то результат вычислений будет очень сильно зависеть от шума, присутствующего в анализируемом сигнале. Если провести модификацию формулы (1), используя непрерывное вейвлетное преобразование, можно получить более устойчивый результат. По известному вейвлетному спектру аналитического сигнала $W_z(\xi, \theta)$ можно получить выражение для мгновенной частоты:

$$\tilde{f}(\theta, \xi^*) = \frac{1}{2\pi} \text{Im} \left[\frac{1}{W_z(\xi^*, \theta)} \frac{dW_z(\xi^*, \theta)}{d\theta} \right], \quad (2)$$

где $\xi^* = \xi^*(\theta)$ – значение масштабного коэффициента ξ , соответствующее максимуму модуля вейвлетного спектра аналитического сигнала, то есть условию $|W_z(\xi^*, \theta)| = \max \{ |W_z(\xi, \theta)| \}$, θ – параметр сдвига вейвлетного преобразования, который аналогичен по смыслу переменной t в формуле (1).

Для того чтобы провести оценку частотных параметров эхо-сигналов, для каждого конкретного отражателя был получен А-скан, который впоследствии анализировался следующим образом. Из исходного сигнала, изображенного на рисунке 1а, получаем аналитический сигнал, используя преобразование Гильберта. Далее, вычисляя модуль аналитического сигнала, получаем огибающую исходного сигнала, которая на рисунке 1а показана вместе с исходным сигналом. По этой огибающей находим моменты времени, соответствующие максимуму амплитуды огибающей t_0 (красный цвет на рисунке 1а) и половине ее максимального значения слева и справа от максимума t_1, t_2 (синий и зеленый цвет на рисунке 1а, соответственно). Применяя непрерыв-

ное вейвлетное преобразование к аналитическому сигналу, строим график зависимости мгновенной частоты от времени. По этой кривой (рисунок 1б) находим три значения мгновенной частоты f_1 , f_2 и f_0 , которые соответствуют ранее выбранным моментам времени t_1 , t_2 и t_0 . Используем эти значения f_1 , f_2 и f_0 мгновенной частоты для дальнейшего анализа.

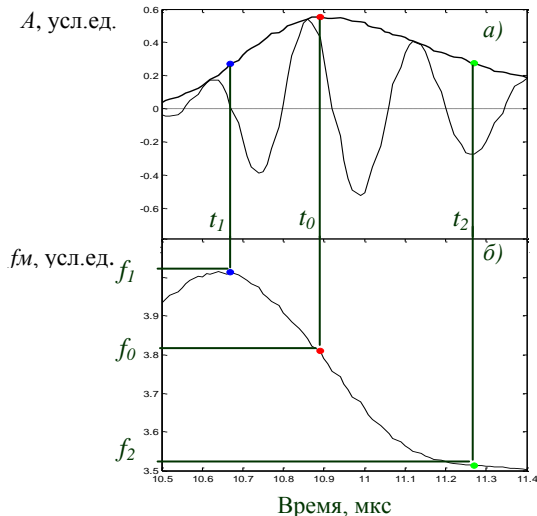


Рисунок 1 – Пример оценки мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от «сквозного бокового цилиндрического отверстия», с использованием прямого совмещенного пьезоэлектрического преобразователя с номинальной частотой 4 МГц: *a* – эхо-сигнал (А-скан) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени

Для практической реализации предлагаемого способа классификации отражателей по форме целесообразно было представить полученные результаты в виде безразмерных параметров – нормированных девиаций частоты f_{r1} и f_{r2} , определенных между точками в центре, на фронте и срезе импульса. Выражение для них записывается в виде:

$$f_{r1} = \frac{f_0 - f_1}{f_n}, f_{r2} = \frac{f_0 - f_2}{f_n}, \quad (3)$$

где f_n – номинальная частота ПЭП, f_1 , f_2 и f_0 – значения мгновенной частоты в трех точках, соответствующих моментам времени t_1 , t_2 и t_0 . Введение нормированных параметров позволяет нам на одной диаграмме сравнивать результаты, полученные преобразователями с различными номинальными частотами.

Результатом оценки частотных параметров эхо-сигналов является диаграмма на плоскости, по осям которой отложены значения нормированных девиаций частоты f_{r1} и f_{r2} . Для качественных результатов оценки типа дефекта важно знать, в какую область диаграммы попадут точки, соответствующие тому или иному типу отражателя.

Алгоритм оценки мгновенной частоты и качественный критерий оценки типа скрытых дефектов – соотношение между нормированными девиациями частоты, описанные второй главе, оформлены в виде патентной заявки на изобретение. Вынесено положительное решение о выдаче патента по заявке №2013101082 от 09.01.2013 г. на изобретение «Способ определения типа дефекта в металлургических изделиях».

В **третьей главе** одним из пунктов описан анализ частотных параметров эхо-сигнала на выходе приемного преобразователя с круговой апертурой при его взаимодействии с отраженной акустической волной с криволинейным волновым фронтом. Построенная аналитическая модель объясняет, как мгновенная частота зависит от формы отражателя, и подтверждает возможность использования мгновенной частоты в качестве информативного признака оценки типа отражателя.

Расчеты показали, что обусловленные кривизной волнового фронта фазовые сдвиги между значениями акустического поля в различных точках апертуры приемного преобразователя приводят, в общем случае, к изменению амплитуды каждой спектральной компоненты импульсного сигнала на выходе этого преобразователя по сравнению с ее исходным значением. Если при этом различным спектральным компонентам исходного импульсного сигнала соответствуют волновые фронты различной кривизны, что всегда имеет место при возбуждении волны источником конечных размеров, то это приводит к дополнительному изменению формы спектра импульсного сигнала на выходе приемного преобразователя. В частности, может происходить существенное смещение частоты спектра, соответствующей его максимальному значению.

В качестве одно из результатов проведенных аналитических расчетов можно привести график зависимости мгновенной частоты от времени (рисунок 2а) и полученный на его основе график зависимости мгновенной частоты от радиуса кривизны отраженного волнового фронта R (рисунок 2б).

Из графика (рисунок 2б) видно, что с уменьшением радиуса кривизны отраженного волнового фронта наблюдается значительное отклонение мгновенной частоты от номинальной частоты пьезоэлектрического преобразователя, которая в данном случае была выбрана равной 5 МГц.

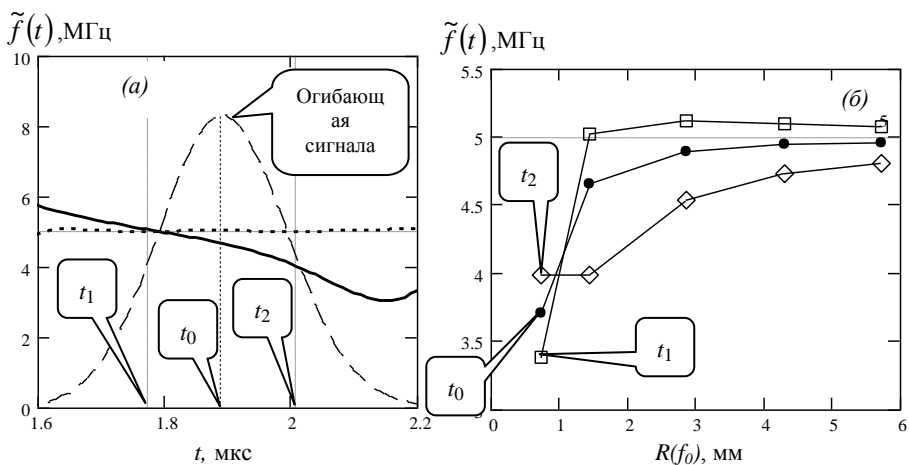


Рисунок 2 – Зависимость мгновенной частоты сигнала, полученного на выходе приемного преобразователя (сплошная линия): *a* – от времени; *б* – от радиуса кривизны волнового фронта, соответствующие моментам времени t_0 , t_1 , t_2

Также в **третьей главе** приведены полученные экспериментальным путем результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей и естественных дефектов в сварных швах. По результатам проведенных исследований предложен способ оценки типа дефекта, где в качестве информативного признака определения типа дефекта используется мгновенная частота ультразвукового импульсного эхо-сигнала.

Оценка частотных параметров эхо-сигналов была проведена для плоскостных отражателей, выходящих на поверхность. Такие отражатели относятся к наиболее опасным и должны обязательно выявляться при проведении ультразвукового контроля. Измерения были проведены на зарубках с различной площадью плоской передней грани и на двугранных углах с различными углами раскрытия. Для того чтобы сравнить результаты, полученные на искусственных и естественных плоскостных отражателях, выходящих на поверхность, и оценить информативность и достоверность предлагаемого способа, измерения были проведены на сварном шве с заранее известным типом дефекта – «непроваром» в корне шва, протяженным по всей длине шва.

Оценка частотных параметров эхо-сигналов была проведена для искусственных отражателей типа «плоскодонное сверление» – плоскостной отражатель, не выходящий на поверхность, и «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» – объемный протяженный отражатель. Кроме того, оценка частотных параметров эхо-сигналов была проведена для плоской донной поверхности и вогнутой донной поверхности, чьи линейные размеры в значительной

степени превышают как длину ультразвуковой волны, так и поперечный размер пучка.

Полученные в ходе экспериментальных исследований эхо-сигналы для всех типов отражателей анализировались с использованием алгоритма обработки, который был описан во второй главе. Как уже было сказано, результатом обработки каждого эхо-сигнала являются два значения нормированных девиаций частоты, значения которых откладываются на одной диаграмме. Чтобы продемонстрировать возможность классификации отражателей по форме с использованием мгновенной частоты эхо-сигнала и ввести критерий оценки типа скрытых дефектов, приведена обобщенная диаграмма нормированных девиаций частоты для всех типов отражателей (рисунок 3). Качественным результатом оценки типа отражателя в данном случае является то, в какую область диаграммы попадают точки, соответствующие определенному типу отражателя.

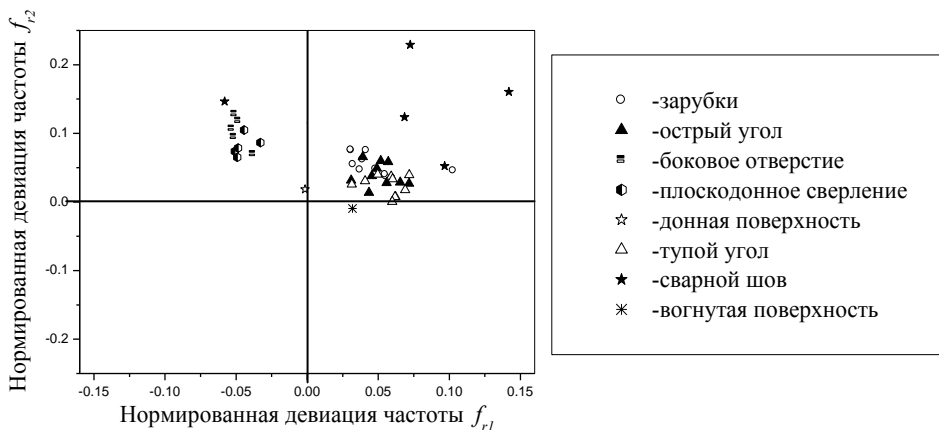


Рисунок 3 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от зарубок; тупых и острых двугранных углов; «сквозных боковых цилиндрических отверстий»; «плоскодонных сверлений»; донной поверхности; вогнутой поверхности и «неправара» в корне сварного шва

Из экспериментальных результатов (рисунок 3), видно, что для отражателей в виде зарубок с различной площадью плоской передней грани точки группируются в области диаграммы, соответствующей положительным значениям f_{r1} и f_{r2} . Для отражателей в виде острых и тупых двугранных углов точки графика группируются также в области диаграммы, ограниченной положительными значениями f_{r1} и f_{r2} . В эту же область попадают точки, соот-

ветствующие «непровару» в корне сварного шва, который также является плоскостным отражателем, выходящим на поверхность.

Для «сквозных боковых цилиндрических отверстий» и «плоскодонных сверлений» точки группируются в области диаграммы, где f_{r2} принимает положительные, а f_{r1} отрицательные значения.

Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от плоской и вогнутой донной поверхности, показывают, что точки для данного типа отражателей лежат в области, близкой к нулевым значениям нормированных девиаций частоты, то есть девиация частоты в данном случае минимальна.

На основе анализа представленных на рисунке 3 результатов можно отметить следующие закономерности:

- значения параметров f_{r1} и f_{r2} для эхо-сигналов, полученных от отражателей, линейные размеры которых значительно превышают длину ультразвуковой волны, а форма является достаточно простой, близки к нулю. Соответствующие им точки лежат на диаграмме вблизи от начала координат;

- при уменьшении линейных размеров отражателей до значений близких к длине ультразвуковой волны точки на диаграмме перемещаются в область диаграммы, где f_{r2} принимает положительные, а f_{r1} отрицательные значения, по направлению от начала координат. Это характерно для расположенных внутри образцов отражателей с простой геометрией поверхности: боковые и плоскодонные отверстия;

- если поверхности отражателя имеют существенно различную пространственную ориентацию, что приводит к многократному взаимодействию зондирующего сигнала с отражателем, то точки на диаграмме перемещаются в область положительных значений f_{r1} и f_{r2} , по направлению от начала координат. Данная ситуация соответствует выходящим на поверхность дефектам типа зарубок и двугранных углов.

Таким образом, используя в качестве критерия оценки типа отражателя соотношение между девиациями частоты f_{r1} и f_{r2} , можно уверенно отличить плоскостные отражатели, выходящие на поверхность (зарубки, двугранные углы, «непровар» в корне сварного шва), от плоскостных отражателей, не выходящих на поверхность («плоскодонные сверления») и от отражателей типа «сквозное боковое цилиндрическое отверстие».

Необходимо отметить, что такие плоскостные отражатели, как зарубки и двугранные углы, моделируют опасный тип плоскостного дефекта, который обязательно должен выявляться при проведении неразрушающего контроля, поскольку в большинстве случаев относится к недопустимым дефектам. Анализ законов изменения мгновенной частоты как раз позволяет отличить именно этот тип отражателей от всех других.

Новый способ оценки типа скрытых дефектов с использованием мгновенной частоты недетектированного радиочастотного эхо-сигнала, разрабо-

таннный на основе экспериментальных исследований, проведенных на искусственных отражателях различной формы и размера и на естественных дефектах в сварных швах, оформлен в виде патентной заявки на изобретение. Вынесено положительное решение о выдаче патента по заявке №2013101082 от 09.01.2013 г. на изобретение «Способ определения типа дефекта в металлургических изделиях».

В четвертой главе проведен сравнительный анализ результатов оценки типа отражателей, полученных с использованием метода ультразвуковой томографии и с использованием критерия оценки мгновенной частоты эхосигнала. В виде «томограмм» представлены результаты визуализации искусственных и естественных отражателей различной формы.

Результаты визуализации внутреннего сечения объема образцов с искусственными и естественными отражателями были получены с использованием ультразвукового цифрового дефектоскопа-томографа A1550 IntroVisor, на основе применения фазированных антенных решеток (ФАР) продольных и поперечных ультразвуковых волн с центральной рабочей частотой 4 МГц. Для проведения экспериментальных исследований были выбраны образцы с наборами тех же искусственных и естественных отражателей, на которых проводились измерения цифровым дефектоскопом PCUS-10.

По результатам визуализации, исходя из полученных «томограмм» (рисунок 4), можно сделать вывод о том, что ультразвуковая компьютерная томографии вполне достоверно восстанавливает форму «плоскодонного сверления» (рисунок 4б). В случае же со «сквозным цилиндрическим отверстием» форма отражателей, отображаемая дефектоскопом на томограммах (см., например, рисунок 4а) несколько отличается от реальной.

На рисунках 4в и 4г показаны результаты визуализации – «томограммы» – искусственных отражателей типа – ступенчатая донная поверхность и вогнутая донная поверхность, соответственно. В том и другом случае линейные размеры отражателей много больше длины ультразвуковой волны. В данном случае форма вогнутой и ступенчатой донной поверхности восстанавливается достаточно точно.

На рисунках 4д и 4е показаны результаты визуализации– «томограммы» искусственных отражателей типа зарубка и острый двугранный угол $29,5^{\circ}$. Полученные результаты свидетельствуют о том, что форма зарубки и двугранного угла, отображаемая дефектоскопом на томограммах существенно отличается от реальной. На рисунках 4ж и 4з показаны результаты визуализации естественного дефекта – «непровар» в корне сварного шва, протяженного по всей длине шва. Полученные результаты ультразвуковой компьютерной томографии свидетельствуют о том, что восстановление формы такого естественного дефекта, также как в случае с зарубкой и двугранным углом, неточное.

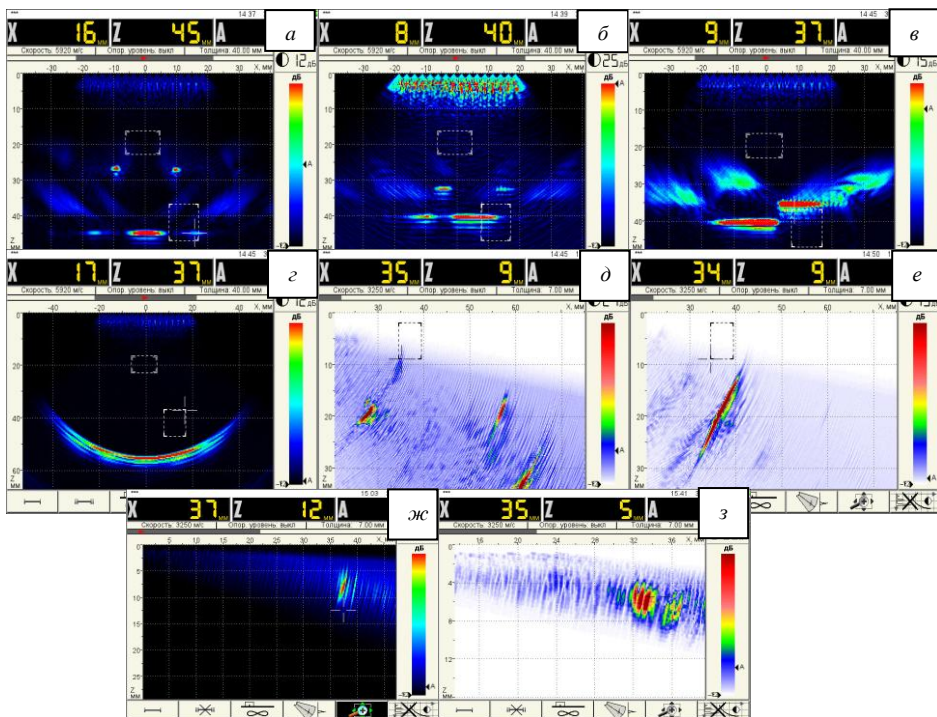


Рисунок 4 – Результаты визуализации отражателей: *а* – «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» (прямая ФАР 4 МГц); *б* – «плоскдонное сверление» (прямая ФАР 4 МГц); *в* – ступенчатая донная поверхность (прямая ФАР 4 МГц); *г* – вогнутая донная поверхность (прямая ФАР 4 МГц); *д* – зарубка и двугранный угол (наклонная ФАР 4 МГц); *е* – острый двугранный угол (наклонная ФАР 4 МГц); *ж, з* – сварной шов – в разных точках сварного шва (наклонная ФАР 4 МГц)

Таким образом, можно сделать вывод, что цифровой дефектоскоп A1550 Intro Visor в режиме «Томограф» вполне достоверно определяет форму поверхности отражателя в том случае, когда, во-первых, его характерные линейные размеры больше длины ультразвуковой волны и, во-вторых, если отсутствуют многократные отражения зондирующего сигнала от поверхностей отражателя, имеющих существенно различную пространственную ориентацию. В тех случаях, когда эти условия не выполняются (угловые отражатели: зарубки, двугранные углы), становится очевидным, что форма отражателей, отображаемая дефектоскопом на томограммах, отличается от реальной. При этом такие искусственные отражатели являются моделями трещин, входящих на поверхность, или непроваров в корне сварных швов, представ-

ляющих собой чрезвычайно опасный вид дефектов, которые должны обязательно выявляться при проведении неразрушающего контроля изделий. С другой стороны, анализ законов изменения мгновенной частоты как раз позволяет выделять эхо-сигналы от такого рода дефектов, хотя, разумеется, с его помощью невозможно точно восстановить форму отражателя.

В пятой главе приведены результаты разработки ультразвуковых методик контроля изделий из моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов. Приведены примеры выявления искусственных отражателей типа «плоскодонное сверление» и «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» в моно- и поликристаллических образцах, а также реального дефекта в лопатке из поликристаллического жаропрочного сплава. Для образцов из моно- и поликристаллических сплавов приведены результаты оценки мгновенной частоты эхо-сигналов от «плоскодонного сверления» и «сквозного бокового цилиндрического отверстия».

Одними из самых нагруженных деталей авиационных двигателей и стационарных газоперекачивающих и энергоустановок являются лопатки и диски. Качество этих деталей в значительной степени определяет характеристики, ресурс и надежность объектов. При эксплуатации такие детали подвергаются воздействию длительных растягивающих статических напряжений при суммарном влиянии термических напряжений и вибрационных нагрузок, что приводит к образованию усталостных трещин. Для того чтобы обеспечить высокие эксплуатационные качества таких деталей, их изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов, структура которых образована сложнелегированным твердым раствором на основе никеля и дисперсными частицами интерметаллидной упрочняющей фазы Ni_3Al (γ' -фаза). Присутствие в сплаве γ' -фазы повышает жаропрочность, однако увеличение ее содержания приводит к тому, что сплавы приобретают склонность к образованию горячих трещин при штамповке, сварке и термической обработке. Таким образом очень важным является вопрос разработки неразрушающих методов контроля таких материалов. Однако для того чтобы разрабатывать технологии ультразвукового контроля жаропрочных сплавов, необходимо проводить предварительные исследования, так как существует ряд причин, ограничивающих контролепригодность этих материалов. Одна из таких причин – высокая упругая анизотропия, которая приводит к высокому затуханию ультразвуковых волн в поликристаллических сплавах. При контроле монокристаллических материалов анизотропия приводит к возбуждению одновременно нескольких собственных ультразвуковых волн, распространяющихся в разных направлениях. В связи с этим методы УЗК монокристаллических жаропрочных сплавов имеют свою специфику.

В данной главе рассмотрены вопросы выявляемости искусственных отражателей в монокристаллических жаропрочных сплавах, разрешающей спо-

способности и соотношения сигнал/шум, как необходимые начальные этапы построения технологии контроля. Также приведен пример выявления реального дефекта в детали из поликристаллического сплава.

Исследования проводились на четырех образцах промышленных сплавов ЦНК-8МП и ВКНА-4У, а также на лопатке из сплава ЧС-70В, которая до этого эксплуатировалась в условиях Якутской ГРЭС. В одном монокристаллическом образце из сплава ВКНА-4У был изготовлен плоскодонный отражатель диаметром 2 мм – «плоскодонное сверление». Другой образец из сплава ВКНА-4У имел две плоскопараллельные грани. Отражателем служило «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» диаметром 2 мм. Два образца из сплава ЦНК-8МП имели одинаковую форму и размеры. Один был изготовлен из монокристалла, а второй – из поликристалла. В этих образцах искусственным отражателем было «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» диаметром 2 мм.

При разработке технологии ультразвукового контроля изделий из монокристаллических жаропрочных сплавов возможны два подхода. Первый состоит в детальном учете анизотропии кристалла и выработке условий, когда анизотропия помогает выбрать желаемые характеристики волны в материале. Второй подход состоит в выборе только нормального падения волн на границу монокристалла с дальнейшим распространением ультразвука вдоль кристаллографической оси достаточно высокого порядка. Разработка методик контроля поликристаллических жаропрочных никелевых сплавов заключается в выборе таких параметров контроля, которые с учетом высокого затухания позволят уверенно выделять сигналы от дефектов.

Экспериментальные исследования, проведенные на образцах из моно- и поликристаллических сплавов на никелевой основе, показали, что правильно выбирая параметры контроля и схему прозвучивания, можно добиться надежного выявления искусственных и естественных отражателей в образцах как из моно- так и из поликристаллов и обеспечить, хотя и не при любых параметрах контроля, хорошую лучевую разрешающую способность.

В рамках задачи определения типа скрытого дефекта в данной главе была проведена оценка частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей типа «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» и «плоскодонное сверление», которые расположены в образцах из моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов на никелевой основе. Результаты оценки частотных параметров приведены на рисунке 5.

Число измерений соответствует числу схем прозвучивания. Измерения проводились прямым совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем с номинальной частотой 15 МГц.

Из диаграммы (рисунок 5) видно, что для «сквозного бокового цилиндрического отверстия», расположенного в образцах из моно- и поликристал-

лического жаропрочного сплава, и для «плоскодонного сверления», расположенного в образце из монокристаллического жаропрочного сплава, точки группируются в одной области диаграммы, где f_{r2} принимает положительные, а f_{r1} отрицательные значения.

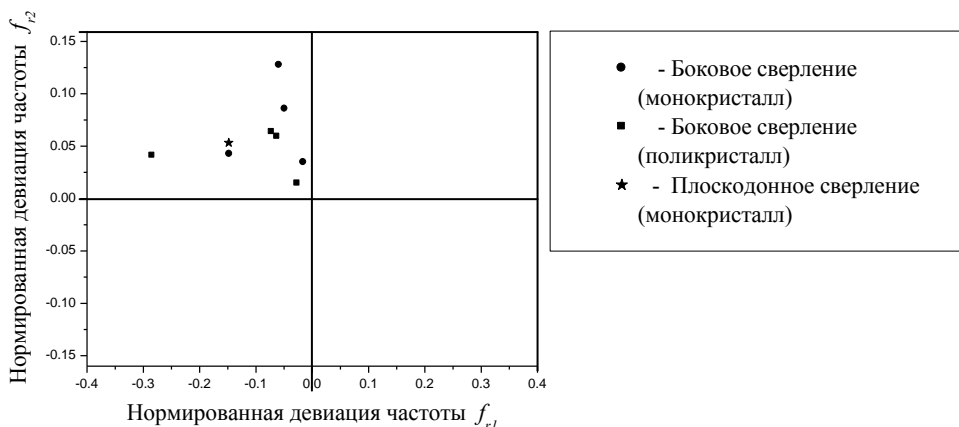


Рисунок 5 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от «сквозного бокового цилиндрического отверстия», расположенного в образцах из моно- и поликристаллического жаропрочного сплава при различных схемах сканирования, и от «плоскодонного сверления», расположенного в образце из монокристаллического жаропрочного сплава

Таким образом, данные результаты качественно подтверждают результаты, полученные для «сквозных боковых цилиндрических отверстий» и «плоскодонных сверлений» на сталях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен новый способ оценки типа дефекта при реализации ультразвукового эхо-метода неразрушающего контроля. В качестве информативного признака определения типа дефекта предложено использовать мгновенную частоту недетектированного радиочастотного сигнала.

2. Разработан алгоритм оценки мгновенной частоты, основанный на использовании непрерывного вейвлетного преобразования. На основе экспериментальных исследований и аналитических расчетов введен критерий оценки типа скрытого дефекта – соотношение между нормированными девиациями частоты, который позволяет уверенно отличать плоскостные отражатели, входящие на поверхность, от других отражателей. Данные, полученные на ис-

кусственных плоскостных отражателях, подтверждаются данными, полученными на естественных дефектах в сварных швах.

3. Результаты классификации, полученные с использованием критерия оценки мгновенной частоты, подтверждены томографическим методом. В отличие от томографии, предложенный способ позволяет определить тип дефекта с использованием стандартной аппаратуры, используемой в ультразвуковой дефектоскопии.

4. Разработана методика ультразвукового контроля изделий из жаропрочных сплавов. Показано, что при правильном выборе схемы прозвучивания и параметров контроля можно добиться хорошей выявляемости скрытых дефектов в изделиях из моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов. Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от отражателей в образцах из поли- и монокристаллических жаропрочных сплавов, подтверждающие результаты, полученные ранее для сталей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендуемых ВАК и индексируемых в Web of Science:

1. Перов, Д.В. Взаимодействие импульсных ультразвуковых сигналов с отражателями различного типа [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова // Дефектоскопия. – 2007. – № 6. – С. 25-35.

2. Немытова, О.В. Использование оценки мгновенной частоты для классификации эхо-сигналов от различных отражателей [Текст] / О.В. Немытова, А.Б. Ринкевич, Д.В. Перов // Дефектоскопия. – 2012. – № 11. – С. 46-61.

3. Немытова, О.В. Сравнительная классификация дефектов с использованием методов ультразвуковой томографии и оценки мгновенной частоты эхо-сигнала. [Текст] / О.В. Немытова, А.Б. Ринкевич, Д.В. Перов // Дефектоскопия. – 2013. – №6. – С. 3-12.

4. Rinkevich, A.B. Ultrasonic testing of objects made of heat-resistant nickel-based alloys, single and polycrystalline components [Текст] / A.B. Rinkevich, N.N. Stepanova, D.P. Rodionov, D.V. Perov, O.V. Nemytova // Insight. – 2011. – No53. – P. 598-602.

5. Положительное решение о выдаче патента по заявке №2013101082 от 09.01.2013 г. на изобретение «Способ определения типа дефекта в металлургических изделиях».

1. Перов, Д.В. Анализ частотных характеристик ультразвуковых сигналов от отражателей различного вида [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова // XXII Сессия Российского акустического общества. – М.: ГЕОС. – 2010. – Т. 2. – С. 87-91.
2. Перов, Д.В. Исследование процессов взаимодействия импульсных ультразвуковых сигналов с отражателями различного типа [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова // XXIV Сессия Российского акустического общества. – М.: ГЕОС. – 2011. – Т. 1. – С. 204-207.
3. Ринкевич, А.Б. Ультразвуковой контроль объектов изготовленных из поли- и монокристаллов на никелевой основе [Текст] / А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова, Д.В. Перов // XXIV Сессия Российского акустического общества. – М.: ГЕОС. – 2011. – Т. 2. – С. 45-48.
4. Перов, Д.В. Примеры визуализации дефектов с использованием многоэлементных преобразователей [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова // XXV сессия Российского акустического общества. – М.: ГЕОС. – 2012. – Т. 2. – С. 45-48.
5. Nemytova, O.V. A new ultrasonic method of determination of defect form [Текст] / O.V. Nemytova, A.B. Rinkevich, D.V. Perov // Международный конгресс по ультразвуку ICU 2013. – Сингапур. – 2013. – № P0435. – С. 586 – 590.
6. Перов, Д.В. Возможность классификации отражателей акустических волн по частотным характеристикам эхоимпульсов [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова // III Российская научно-техническая конференция «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург. – 2007. – С. 39.
7. Перов, Д.В. Приближенный анализ частотных параметров импульсного возбуждения приемного преобразователя с круговой апертурой волной с криволинейным волновым фронтом [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова // XXV сессия Российского акустического общества. – М.: ГЕОС. – 2012. – Т. 1. – С. 216-219.
8. Ринкевич, А.Б. Взаимодействие ультразвуковых импульсных сигналов с отражателями различного вида в упругой среде [Текст] / А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова, Д.В. Перов // XXIII Уральская конференция «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами». – Курган. – 2006. – С. 17.
9. Перов, Д.В. Влияние формы отражателей ультразвуковых волн на частотные характеристики эхо-импульсов [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова // V Российская научно-техническая конференция «Ре-

курс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург. – 2011. – С. 62-63.

10. Перов, Д.В. Сравнение частотных параметров ультразвуковых импульсов отраженных от различных дефектов [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немытова // XXV Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля». – Екатеринбург. – 2011. – С. 25.

11. Немытова, О.В. Оценка формы отражателей ультразвуковых волн в упругих средах [Текст] / О.В. Немытова, А.Б. Ринкевич, Д.В. Перов // Научная сессия Института физики металлов УрО РАН по итогам 2012 года. – Екатеринбург. – 2013г. – С. 102-103.