

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

НЕМЫТОВА Ольга Владимировна

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических  
наук,  
А. Б. Ринкевич

Екатеринбург – 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТИПА СКРЫТЫ ДЕФЕКТОВ.....	8
1.1. Дефект, его характеристики. Типы дефектов.....	18
1.2. Радиационные методы контроля.....	20
1.3. Ультразвуковые методы распознавания типа дефекта.....	23
1.3.1 Метод, основанный на измерении условных размеров дефектов.....	24
1.3.2 Метод на основе зеркального эхо-метода (ЗЭМ).....	26
1.3.3 Метод с использованием коэффициента трансформации.....	28
1.3.4 Метод, основанный на ослаблении донного сигнала.....	29
1.3.5 Методы основанные на дельта-методиках.....	30
1.3.6 Амплитудно-временной метод распознавания.....	31
1.3.7 Ультразвуковой спектральный метод.....	33
1.3.8 Метод компьютерной томографии.....	34
1.4 Выводы к главе 1.....	36
2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	38
2.1 Аппаратура для проведения экспериментальных исследований.....	38
2.1.1 Ультразвуковой дефектоскоп PCUS-10.....	38
2.1.2 Совмещенные пьезоэлектрические преобразователи.....	41
2.2 Исследуемые образцы.....	43
2.3 Получение и обработка акустических сигналов.....	47
2.3.1 Физический смысл понятия мгновенная частота.....	47
2.3.2 Вейвлетный анализ акустических сигналов.....	50
2.3.3 Оценка мгновенной частоты на основе представлений об аналитическом сигнале и с использованием непрерывного вейвлетного преобразования.....	52
2.3.4 Постановка эксперимента и последующий анализ эхо-сигналов....	57
2.4 Выводы к главе 2.....	60

3. АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭХО-СИГНАЛОВ ОТ ИСКУССТВЕННЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ.....	62
3.1 Оценка частотных параметров эхо-сигналов от искусственных и естественных плоскостных отражателей, выходящих на поверхность.....	62
3.2 Оценка частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей типа «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» и «плоскодонное сверление».....	69
3.3 Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от плоской донной поверхности и вогнутой донной поверхности.....	76
3.4 Критерий оценки типа скрытого дефекта.....	78
3.5 Приближенный анализ частотных параметров импульсного возбуждения приемного преобразователя с круговой апертурой волной с криволинейным волновым фронтом.....	81
3.6 Выводы к главе 3.....	87
4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ТИПА ОТРАЖАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ И МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЭХО-СИГНАЛОВ.....	89
4.1 Возможности ультразвуковой компьютерной томографии.....	89
4.1.1 Ультразвуковой дефектоскоп A1550 IntroVisor.....	89
4.1.2 Фазированные антенные решетки.....	93
4.2 Исследуемые образцы.....	94
4.3 Результаты визуализации искусственных и естественных отражателей....	95
4.4. Выводы к главе 4.....	101
5. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ....	102
5.1 Жаропрочные сплавы на никелевой основе. Особенности эксплуатации и контроля изделий из жаропрочных сплавов.....	102
5.2 Приготовление образцов и выполнение экспериментов.....	105
5.3 Поглощение и скорость ультразвука.....	111

5.4 Выявление дефектов.....	114
5.5 Оценка частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей, расположенных в образцах из жаропрочных сплавов на никелевой основе.....	126
5.6 Выводы к главе 5.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Непрерывное повышение требований к качеству продукции во всех отраслях промышленности и народного хозяйства предопределяет широкое применение и развитие физических методов и приборов контроля качества [1]. Надежность эксплуатации и долговечность систем и конструкций, таких как: космические системы (космические аппараты, стартовые и ракетные комплексы); летательные аппараты (самолеты различных типов и назначений); энергетические системы (ядерные энергетические установки АЭС и системы их энергообеспечения, ТЭС); предприятия нефтегазовой промышленности (системы магистральных трубопроводов, системы перекачки нефти и газа); крупные военные объекты и др., является в настоящее время одной из наиболее актуальных проблем, которая должна решаться в современной дефектоскопии [2]. Для предотвращения техногенных катастроф и аварий, а также для успешного, бесперебойного функционирования дорогостоящих и жизненно важных объектов промышленности, строительства и энергоснабжения необходима своевременная оценка технического состояния материалов, функциональных блоков и систем, находящихся в эксплуатации. Поэтому одним из приоритетных направлений дефектоскопии для обеспечения промышленной и технологической безопасности является неразрушающий контроль и диагностика материалов и изделий физическими методами.

Одним из эффективных методов выявления существующих повреждений материалов, получения информации о дефектах в среде является ультразвуковой метод неразрушающего контроля [3]. Ультразвуковой контроль занимает центральное место среди методов неразрушающего контроля материалов и изделий. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля ультразвуковой контроль обладает важными преимуществами: высокой разрешающей способностью и чувствительностью к наиболее опасным дефектам типа трещин и непроваров, высокой достоверностью контроля, большой производительностью, возможностью вести контроль непосредственно на

рабочих местах без нарушения технологического процесса, низкой стоимостью контроля. Ультразвуковые методы контроля позволяют получить информацию о дефектах, расположенных в различных материалах, изделиях и сварных соединениях [4]. Выгодной отличительной особенностью ультразвуковых методов является возможность обнаружения дефектов, расположенных внутри изделия, на значительной глубине [5]. Используя ультразвуковые методы можно не только обнаружить дефект, но и определить его местоположение в изделии, указать, хотя бы приближенно, его размеры, сделать заключение о форме дефекта [6].

Ультразвуковая дефектоскопия, как самостоятельная область науки, зародилась в нашей стране. В 1928 г. чл.-корр. АН СССР С.Я. Соколов сформулировал основные принципы ультразвуковой дефектоскопии, а в середине 50-х годов этот прогрессивный метод стали применять в промышленности для оценки качества продукции [4]. К настоящему времени во многих развитых и развивающихся странах, и в большинстве отраслей нашей страны ультразвуковой контроль является одним из основных, наиболее распространенных и эффективных методов неразрушающего контроля.

В настоящий момент одной из актуальных проблем в неразрушающем контроле, в том числе ультразвуковом, является проблема определения формы скрытого дефекта [5]. Очень важно знать, к какому классу относится скрытый дефект, поскольку потенциальная опасность этого дефекта 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 [7].

Для повышения информативности и достоверности ультразвукового контроля материалов и изделий, более точного определения типа скрытого дефекта и увеличения экономической выгоды, наряду с уже существующими методами, необходима разработка новых. Эти методы по возможности должны быть лишены основных ограничений и недостатков, таких как: многоэлементность систем контроля, высокая стоимость используемой

аппаратуры и зависимость полученных результатов от амплитуды принятого сигнала.

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.

Процедуры определения несущей частоты ультразвуковых импульсных сигналов, создаваемых и принимаемых пьезоэлектрическими преобразователями, определены нормативными документами [8, 9]. Однако следует отметить, что это сделано недостаточно четко. Согласно п. 2.9.1 ГОСТ 14782-86, частота колебаний, излучаемых пьезоэлектрическим преобразователем, может быть определена следующим образом: «Частоту ультразвуковых колебаний следует измерять радиотехническими методами путем анализа спектра эхо-сигнала на преобразователе от вогнутой цилиндрической поверхности стандартного образца СО-3 или измерением длительности периода колебаний в эхо-импульсе посредством широкополосного осциллографа». В соответствии с ГОСТ 23702-90 определение эффективной частоты эхо-импульса преобразователя  $f_{eff}$  выполняется по формуле

$$f_{eff} = \frac{n}{2\tau},$$

где  $n$  – число полупериодов эхо-импульса (положительной и отрицательной полярности),  $\tau$  – суммарная длительность этих полупериодов. По подобному принципу предложено определять эффективную частоту эхо-импульса по ГОСТ 26266-90. При этом ГОСТ 23702-90 допускает использование способа определения эффективной частоты по спектру эхо-импульса, причем ей соответствует максимум спектра. Заметим, что в ряде опубликованных ранее работ, например – [10,11], указывается на то обстоятельство, что

вышеперечисленные процедуры определения частоты не всегда адекватны реально встречающимся на практике ситуациям, а результаты, получаемые с их помощью, могут отличаться друг от друга.

Таким образом, используемые в настоящее время методы определения частоты колебаний при ультразвуковом неразрушающем контроле не в полной мере учитывают особенности реальных эхо-импульсов, отраженных от дефектов различного вида. Поскольку такого рода сигналы часто имеют существенно нестационарные характеристики: их частота изменяется во времени, а огибающая имеет сложную форму, то для их описания необходимо использовать такие методы анализа, которые позволяют оценивать частотные параметры сигналов в различные моменты времени. В качестве одного из таких методов можно рассматривать определение мгновенной частоты сигнала на основе представлений об *аналитическом сигнале* [12]. Однако практическое использование такого подхода ограничено его очень слабой помехоустойчивостью.

Также для восстановления мгновенной частоты может быть использовано Фурье преобразование [13]. Однако использование обычного преобразования Фурье для анализа нестационарных процессов не позволяет получить информацию об изменениях во времени спектрального состава сигналов, поскольку интегрирование производится по всей длине временной реализации. Невозможность отследить изменения спектра во времени, очевидно, обусловлена использованием базисных функций, которые не ограничены во времени. Самый простой способ локализовать область, в которой выполняется спектральный анализ, заключается в использовании так называемого оконного преобразования Фурье [14]. Простейшим и наиболее часто применяемым на практике является прямоугольное окно. Однако оконное преобразование Фурье обладает следующим существенным недостатком. Его использование, например, для выявления нестационарных изменений сигнала на фоне широкополосных шумов крайне затруднительно. Так как в подобной ситуации практически невозможно выбрать параметры окна оптимальные как с точки зрения минимизации искажений спектра анализируемого сигнала, так и достижения хорошей



разрешающей способности преобразования по времени. Эта проблема тем более трудноразрешима при анализе сигналов в реальном масштабе времени. Переход к обобщенному преобразованию Фурье с использованием в преобразовании базисных функций, заданных на конечном временном интервале – например, полиномов Лежандра и Чебышева [15], также не дает удовлетворительного решения вышеуказанной задачи, поскольку вопрос о выборе длины базисных функций остается открытым.

Таким образом, проблема заключается в нахождении такого функционального преобразования, которое обладало бы преимуществом оконного Фурье-анализа – способностью к локализации конечных интервалов исследуемой реализации – в сочетании с возможностью масштабирования базисных функций. Причем особое значение имеет сохранение самоподобия базиса во всем интервале изменений масштаба, поскольку только в этом случае можно корректно сопоставлять между собой результаты, полученные при использовании базисных функций различных масштабов. Всем этим требованиям в полной мере удовлетворяет вейвлетный анализ [16].

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 мол\_а\_вед. «Моделирование и экспериментальное исследование взаимосвязи инициированных деформацией изменений структуры, прочностных, магнитных и акустических свойств стальных объектов», поддержкой проекта Президиума РАН, рук. 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, рук. чл.-корр. РАН Щербинин В.Е. «Анализ, моделирование и

экспериментальное 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 [17-22].

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 [17], коэффициент ослабления донного сигнала [20], огибающая спектра принятого сигнала [20], индикатриса рассеяния [19] и др. [21, 22].

Существующие на данный момент методы имеют ограничения [17, 18, 19], 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 [23-25]. Приборы, которые позволяют получать визуальный образ внутренней структуры твердого материала, находят все большее развитие в практике неразрушающего контроля. Такие приборы позволяют получать двумерное изображение сечения внутреннего

объема материала – «томограмму», что является более информативным результатом в сравнении с результатами, получаемыми классическими ультразвуковыми дефектоскопами. Анализ двумерных изображений дефектов, а не отдельных А-сканов, позволяет на качественно новом уровне решать задачи по выявлению дефектов, измерению их размеров, определению их типов и реальной конфигурации сварного соединения. Основным ограничением ультразвуковой компьютерной томографии, несмотря на возможность получать визуальный образ дефекта, является то, что для реализации метода требуется свободный доступ к большой площади контролируемого объекта, достаточной для размещения многоэлементного преобразователя [25]. Возникают ограничения связанные с контролепригодностью изделий сложной формы либо малого размера. Кроме того, данный метод является достаточно дорогостоящим.

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 типа 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 типа отражателей.

3. Провести сравнительный анализ результатов оценки типа отражателей, полученных томографическим методом и способом, основанном 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 дефектов, 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, объясняющего 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, позволяет 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. Название изобретения «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 [27]. Плата разработана в Институте неразрушающего контроля общества Фраунгофера (Германия). 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 с цифровой фокусировкой антенной решетки и томографической обработкой данных [28]. Ультразвуковая томография реализуется на основе применения фазированных антенных решеток *M9060 4.0V0R40X10CL* продольных ультразвуковых волн и *M9065 4.0V60R40X10CS* поперечных ультразвуковых волн с управляемыми фазами или разностями фаз волн, излучаемых и принимаемых их элементами [28]. Обработка и анализ полученных экспериментальных результатов, с целью выработки информативного параметра определения 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, широко используемой 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 лично 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, 2011г.), XXIV сессии Российского акустического общества (Саратов, 2011 г.), XXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля» (Екатеринбург, 2011 г.), XXV сессии Российского акустического общества (Таганрог, 2012 г.), Международном конгрессе по ультразвуку 2013 «2013 International Congress on Ultrasonics» (Сингапур, 2013 г.).

### **Публикации.**

Результаты исследований, представленных в диссертации, опубликованы в 17 научных работах, в том числе 5 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах [75, 76, 80, 100, 101], 6 статьях в сборниках и трудах конференций [29, 30, 31, 32, 33, 34], 5 тезисах докладов [35, 36, 37, 38, 39], 1 патенте РФ [26].

## 1. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТИПА СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ

В данной главе будут описаны основные типы дефектов, которые наиболее часто встречаются при контроле изделий из металлов. Будут приведены, существующие на данный момент, ультразвуковые и радиационные методы неразрушающего контроля, которые в той или иной степени позволяют решить одну из основных задач неразрушающего контроля – определение типа скрытого дефекта. Будет показано, что каждый из ранее описанных методов имеет свои ограничения, которые либо снижают его информативность, либо делают метод сложным в реализации и дорогостоящим. Будет обоснована необходимость разработки новых методов – амплитуднонезависимых, с целью увеличения информативности контроля в дополнение к уже существующим.

### 1.1 Дефект, его характеристики. Типы дефектов

Дефект типа нарушения сплошности – это одна несплошность или группа сосредоточенных несплошностей, непредусмотренная конструкторско-технологической документацией [5]. Дефекты типа нарушения сплошности характеризуются скачкообразным изменением акустических свойств материалов изделия; они уменьшают механическую прочность. Способам и методам определения местоположения и размеров дефектов уделяется основное внимание в ультразвуковой дефектоскопии. Важно и то, какое влияние оказывает наличие тех или иных дефектов на работоспособность изделия. Поэтому одна из ключевых задач ультразвуковой дефектоскопии заключается в выявлении некоторых видов наиболее опасных дефектов, например трещин, которые считаются недопустимыми даже при малых размерах.

Дефекты типа нарушения сплошности, в зависимости от размеров, разделяют на субмикроскопические, микроскопические и макроскопические [6].

Те трещины, размер которых не превышает предела разрешения оптического микроскопа  $\sim 0,2$  мкм, называются *субмикроскопическими*. Трещины

такого типа могут образовываться по границам зерен металла, а также могут появиться в результате действия механических напряжений. Встречаются в металлах и более грубые дефекты, например микроскопические трещины размерами от 0,2 до единиц микрон, и образуются они, как правило, на поверхности стальных изделий в процессе механической обработки и эксплуатации.

К наиболее опасным макроскопическим дефектам относятся различные нарушения сплошности или однородности металла. Такие дефекты могут стать причиной резкого снижения прочности детали и ее разрушения. Вероятность наличия дефектов возрастает с увеличением размера детали, поэтому на крупногабаритных деталях реальное снижение прочности проявляется более резко.

Дефекты, выявляемые при контроле изделий, подразделяют на явные и скрытые, исправимые и неисправимые. Визуально при внешнем осмотре можно обнаружить некоторые явные дефекты, такие как риски, подрезы, забоины, вмятины. Скрытые дефекты, к которым относятся раковины в литых заготовках, непровары и трещины в сварных швах, шлифованные трещины на поверхности, можно обнаружить только с помощью инструмента или прибора, предусмотренного нормативной документацией. К исправимым дефектам относятся те дефекты, устранение которого технически возможно и экономически целесообразно; если же устранение технически невозможно или связано с большими затратами, то его называют неисправимым.

Все дефекты, в зависимости от влияния на работоспособность и безопасность использования продукции, подразделяют на критические, значительные и малозначительные:

- критическим называют дефект, при наличии которого использование продукции по назначению практически невозможно или недопустимо, поскольку это не отвечает требованиям безопасности и надежности;

- значительный – это дефект, который в значительной степени влияет на использование продукции по назначению или ее долговечность, но не является критическим;
- малозначительным считается дефект, который несущественно влияет на долговечность продукции и на использование ее по назначению.

По форме дефекты делят на плоскостные – отношение длины к ширине  $r > 5$ ; объемно-плоскостные – отношение длины к ширине  $r \approx 3-4$ ; объемные дефекты – отношение длины к ширине  $r \approx 1-2$ . К объемным дефектам относятся, например, поры, шлаковые включения. Плоскостные дефекты являются наиболее опасными. К последним относятся непровары и трещины.

Дефекты изделий также классифицируют по их происхождению. Выделяют конструктивные дефекты, являющиеся следствием несовершенства конструкции; производственно-технологические, возникающие в процессе изготовления изделия при выполнении различных операций, например, сварке, пайке, склеивании, отливке, прокатке, механической, термической и других видах обработки; эксплуатационные, возникающие в результате усталости металла, коррозии, изнашивания, неправильного технического обслуживания и эксплуатации после некоторой наработки изделия.

По месту расположения несплошности можно условно разделить на поверхностные, подповерхностные с глубиной залегания 0,5-1 мм и внутренние, глубина залегания которых более 1 мм [6].

## **1.2 Радиационные методы контроля**

Радиационные методы контроля являются одними из основных методов неразрушающего контроля, позволяющих судить о форме скрытого дефекта [40]. В основе радиационных методов лежит регистрация и анализ ионизирующего излучения при его взаимодействии с контролируемым изделием. Наиболее широкое применение имеют методы контроля прошедшим излучением. Они основаны на различном поглощении ионизирующих излучений при прохождении

через дефект и бездефектный участок сварного соединения. На участках меньшей толщины или меньшей плотности интенсивность прошедшего излучения будет больше. В частности интенсивность прошедшего излучения больше в местах дефектов – несплошностей или неметаллических включений [40].

Классификация методов радиационного контроля производится прежде всего по виду (и источнику) ионизирующего излучения и по виду детектора ионизирующего излучения.

По типу детектирования (обнаружения и регистрации) ионизирующего излучения радиационный контроль делят на три типа: *радиографию* – фиксирование изображения внутренней структуры изделия происходит на пленке или бумаге; *радиоскопию* – изображение наблюдается на экране; *радиометрию* – регистрируются электрические сигналы. Основными преимуществами радиографии являются простота, наглядность и возможность документального подтверждения результатов контроля. К достоинствам радиоскопии можно отнести возможность наблюдения и детального рассмотрения внутренней структуры объекта непосредственно в момент просвечивания, а так же возможность определения типа, характера и формы дефекта, как и в случае радиографии. Высокую вероятность выявления скрытых дефектов обеспечивает малая инерционность преобразования радиационного изображения, которая позволяет за короткое время исследовать объект под различными углами. При большей производительности радиоскопия обладает меньшей чувствительностью по сравнению с радиографией. В установках для радиоскопии может быть предусмотрена последующая радиография выявленных дефектных участков. Основной принцип радиометрии заключается в просвечивании изделия ионизирующим излучением и преобразовании плотности потока или спектрального состава прошедшего излучения в электрический сигнал. К преимуществам радиометрии можно отнести высокую чувствительность (выше, чем у радиографического метода); высокую производительность; возможность бесконтактного контроля качества движущегося изделия, что особенно удобно при поточном производстве (возможно осуществление обратной связи с

технологическим процессом). Основным недостатком радиометрии является одновременная регистрация сигнала от дефекта и от изменения толщины изделия. Это, в свою очередь, ограничивает возможность определения формы, размеров и глубины залегания дефекта. Иногда оказывается необходимым снимать или зачищать усиление сварного шва [41].

Радиационная вычислительная томография является дальнейшей ступенью развития радиографии [42]. В отличие от обычной радиографии, при томографии наглядность результатов обеспечивается тем, что объект просвечивается большим количеством источников излучения. Прошедшее излучение фиксируется большим количеством детекторов. Само изделие перемещается по определенной программе, а результаты контроля запоминаются и анализируются с помощью ЭВМ. Затем на основе созданной модели внутренней структуры объекта формируется ее изображение на экране.

В целом радиационные методы контроля позволяют выявлять такие дефекты, как трещины, непровары, непропаи, включения, поры, подрезы и др. Благодаря наглядности результатов контроля (за исключением радиометрии), по сравнению с другими методами неразрушающего контроля, при радиационном контроле легче определить вид дефекта. Нет высоких требований к качеству поверхности сварных швов и изделий, можно контролировать сравнительно большие толщины.

Радиационные методы имеют свои ограничения и недостатки. К ним необходимо, прежде всего, отнести вредность для человека. В связи с этим при проведении радиационного контроля требуются специальные меры радиационной безопасности: экранирование, увеличение расстояния от источника излучения и ограничение времени пребывания оператора в опасной зоне. К ограничениям радиационных методов можно отнести и то, что несплошности малого раскрытия (трещины, непровары), расположенные под углом более  $7... 12^\circ$  к направлению просвечивания выявляются плохо, так же метод малоэффективен для угловых швов [43]. Кроме того, эти методы являются достаточно дорогостоящими.

### 1.3 Ультразвуковые методы распознавания типа дефекта

Ультразвуковые методы неразрушающего контроля являются наиболее перспективными методами, и в ряде случаев постепенно вытесняют радиационные методы. К преимуществам ультразвуковых методов контроля следует отнести возможность контроля большой толщины (для толщины свыше 80 мм это наиболее надежный способ), возможность измерения координат дефекта, меньшие затраты по сравнению с радиографией, безопасность, возможность выявления дефектов малого раскрытия. Однако, как и любой другой, ультразвуковой метод имеет и ряд недостатков. Среди них можно подчеркнуть следующие: объемные дефекты выявляются хуже, чем плоскостные; плохо выявляются дефекты, имеющие в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны, размер меньше длины волны; сложнее по сравнению с радиационными методами определить вид дефекта; из-за большого уровня структурных помех некоторые материалы нельзя контролировать. Субъективность является одним из основных недостатков ультразвукового контроля. Результаты, полученные таким методом, будут сильно зависеть от квалификации и внимательности оператора. В целях устранения этого недостатка перемещение пьезопреобразователя относительно изделия механизуют. Создают приборы, которые позволяют запоминать сигналы в процессе сканирования с помощью ЭВМ. После чего сигналы анализируются и результаты выдаются в наглядной форме [41].

Как правило, при ультразвуковом неразрушающем контроле о типе дефекта судят по информативным признакам, которые являются не прямыми, а косвенными характеристиками типа дефекта. В общем виде такие методы реализуются следующим образом. Измеряют абсолютные или относительные значения временных, амплитудных или спектральных характеристик принимаемых сигналов, предварительно выбрав тип волн, углы ввода, число преобразователей и частоты колебаний. Затем из этих абсолютных и относительных характеристик формируют информативные признаки, которые

наиболее полно характеризуют дефекты. По конкретным значениям этих информативных признаков реальные дефекты относят к тому или иному типу. В свою очередь существующие методы распознавания можно условно разделить на группы [4]. Рассмотрим каждую из них отдельно.

### **1.3.1 Метод, основанный на измерении условных размеров дефектов**

В основе данной группы методов лежит измерение условных размеров дефектов. Измеряется условная протяженность, ширина, высота, а так же углы индикации дефектов. Затем эти условные значения сравниваются с аналогичными параметрами, измеренными на эталонных отражателях [17, 19].

Для того чтобы вычислить условную ширину и протяженность дефекта, определяют расстояние между положениями преобразователя, в которых амплитуда эхо-сигнала уменьшается до определенного уровня. Условная высота дефекта определяется глубиномером, как разность показаний в положениях преобразователя, расстояние между которыми равно условной ширине дефекта. За угол индикации дефекта принимается угол поворота преобразователя в сторону от положения, соответствующего максимальной амплитуде эхо-сигнала от дефекта в данном сечении, до положения, при котором амплитуда эхо-сигнала уменьшается в заданное число раз [44-47].

В статье [48] рассмотрены два способа измерения условной высоты дефекта. Показано, что наибольший объем дополнительной информации о выявленном дефекте может быть получен, если измерение ведется по ослаблению амплитуды эхо-сигнала в определенное число раз. В случае, если измерение ведется при постоянной условной чувствительности дефектоскопа, то условную высоту целесообразно использовать как основную измеряемую характеристику вместо амплитуды эхо-сигнала. Также обоснована целесообразность введения АВРД и ВРД-II диаграмм для оценки характера выявленных дефектов.

В статье [49] рассмотрены два способа измерения условной протяженности дефектов с круговой индикатрисой рассеяния: при постоянной условной



чувствительности и переменном относительном уровне отсечки и, наоборот, при постоянном относительном уровне отсечки и переменной условной чувствительности. Показано, что при измерении первым способом условная протяженность дефекта линейно возрастает с увеличением глубины его залегания и не зависит от затухания ультразвука в контролируемом материале. При измерении вторым способом условная протяженность дефекта нелинейно изменяется с глубиной и зависит от затухания в контролируемом материале. В обоих случаях значение измеренной величины условной протяженности зависит от абсолютного относительного уровня отсечки.

Для того чтобы классифицировать дефекты по типу, используя условные размеры, вводятся параметры – признаки дефектов, сформированные из полученных значений условных размеров. По численным значениям этих параметров и судят о типе дефекта.

К достоинствам данного метода можно отнести то, что для распознавания дефектов на основе этих признаков не требуется разработки специальной аппаратуры. Метод реализуется с использованием стандартных преобразователей и дефектоскопов, которые применяются в практике ультразвуковой дефектоскопии. Единственным дополнительным требованием к аппаратуре является использование специальных приспособлений для удобства отсчета измеряемых параметров [50].

Рассматриваемые информативные признаки следует применять при контроле сварных швов толщиной 20 – 60 мм.

Недостатки такого метода оценки типа дефекта: размеры и ориентация дефектов существенно влияют на достоверность их распознавания; в подповерхностной зоне (примерно 1/3 толщины) дефекты, как правило, не могут быть распознаны; при обнаружении дефектов с зеркальной поверхностью эти признаки являются малоинформативными; протяженные объемные дефекты с помощью некоторых из таких информативных признаков могут быть распознаны как плоскостные; для реализации этого метода и получения информации о

конкретном дефекте требуется перемещать преобразователь по поверхности объекта контроля.

Достоверность распознавания типа дефекта повышают, измеряя одновременно несколько информативных признаков. Решение же об отнесении дефекта к плоскостному типу принимают в том случае, когда значение хотя бы одного признака соответствует плоскостному [48].

### **1.3.2 Метод на основе зеркального эхо-метода (ЗЭМ)**

Эта группа методов реализуется с использованием зеркального эхо-метода (ЗЭМ) контроля. За счет возможности наблюдения и измерения амплитуды не одного, как при эхо-методе, а, по крайней мере, двух отраженных сигналов – обратного и зеркального, такие методы позволяют частично решить задачу распознавания плоскостных и объемных дефектов [45, 46].

В основе метода лежит использование схемы тандем. Полученные с использованием схемы тандем зеркальный и эхо-сигнал сравниваются по амплитуде. Это позволяет определить направление главного вектора индикатрисы рассеяния дефекта. В пределах одного класса отражателей индикатрисы рассеяния отличаются мало. Тогда как индикатрисы плоскостных и объемных дефектов, относящихся к разным классам, отличаются существенно. Данный факт позволяет ввести новый критерий для количественной оценки класса дефекта – акустический коэффициент формы дефекта. В случае применения зеркального эхо-метода коэффициент формы определяют как отношение (или разности в дБ) амплитуды сигнала, отраженного от дефекта обратно переднему преобразователю, к амплитуде сигнала, прошедшего от одного преобразователя к другому и отраженного от дефекта внутренней поверхности изделия.

Установлено, что для объемных дефектов коэффициент формы не зависит от угла озвучивания и их поперечных размеров, в то время как эти параметры оказывают заметное влияние на коэффициент формы для плоскостных дефектов.

С увеличением размера плоскостных дефектов увеличивается точность классификации дефектов.

В статье В.Г. Щербинского и В.Е. Белого «Новый информативный признак характера дефектов при ультразвуковом контроле» [17] предлагается новый информативный признак, который с определенной доверительной вероятностью несет информацию о характере дефекта. Этот информативный признак назван коэффициентом формы и измеряется при прозвучивании дефекта акустической схемой «тандем». Коэффициент формы определяется, как отношение амплитуды сигнала, обратно отраженного от дефекта к одному из искателей, к амплитуде сигнала, испытавшего двойное зеркальное отражение от дефекта и от внутренней поверхности изделия и принятого другим искателем. По конкретному значению этого информативного признака можно отличить плоскостные и объемные дефекты. Разница между численными значениями коэффициента формы для плоскостных и объемных дефектов гарантирует достоверность оценки.

В статье А. К. Гурвича и Л.И. Кузьминой «Индикатрисы рассеяния как источник дополнительной информации о дефекте» [19] установлена принципиальная возможность оценки конфигурации и ориентации дефекта по его индикатрисе рассеяния. Показано, что косвенной характеристикой индикатрисы рассеяния при известной диаграмме направленности искателя является огибающая последовательности эхо-сигналов от дефектов, определены числовые характеристики огибающих, даны некоторые предварительные рекомендации по использованию индикатрис дефектов для оценки их конфигурации и ориентации.

К преимуществам данного метода распознавания класса дефекта по коэффициенту формы следует отнести высокую вероятность распознавания типа дефекта и высокую разрешающую способность; наглядность отображения результатов распознавания в виде числового выражения коэффициента формы, позволяющая использовать коэффициент формы в качестве браковочного критерия; возможность использования аппаратуры без аттенюаторов, поскольку исключается измерение амплитуд эхо- и зеркального сигналов; независимость результатов распознавания от параметров аппаратуры и от уровня

чувствительности, на котором проводится сравнение сигналов, что, в свою очередь, исключает необходимость эталонирования чувствительности и обеспечивает надежную воспроизводимость результатов; возможность объективного наблюдения за выявлением и развитием дефектов в процессе эксплуатации, поскольку появление или развитие трещины всегда связано с существенным уменьшением коэффициента формы.

Одним из существенных недостатков этого метода является то что, он не информативен для плоскостных дефектов с диффузно отражающей поверхностью, паукообразных трещин и дефектов с поперечным размером менее 3мм. Достоверность результатов распознавания таким методом резко падает при уменьшении глубины залегания дефекта менее чем на 40мм и при отклонении ориентации дефекта от вертикального направления. Чтобы устранить хотя бы частично эти недостатки используется метод на основе схемы тандем, где в качестве второго приемного преобразователя применяется преобразователь продольных волн, которые образуются в результате трансформации на дефекте. К числу недостатков данного метода можно также отнести то, что для его реализации и получения информации о конкретном дефекте требуется не один, а несколько преобразователей [4, 51]. К тому же, получаемые результаты коррелированы с амплитудой принятых сигналов, следовательно, зависят от качества контролируемой поверхности и стабильности акустического контакта.

### **1.3.3 Метод с использованием коэффициента трансформации**

В данном методе в качестве критерия оценки формы скрытого дефекта предложен коэффициент трансформации  $K^*_{il}$  [4, 21]. Метод основан на следующем физическом явлении. Падающая на дефект поперечная волна, помимо того, что она отражается, трансформируется в продольную волну. Вычисляемый коэффициент трансформации существенно зависит от ряда параметров дефекта, в том числе от размера, профиля его поверхности, ориентации и др. В данном случае интенсивность трансформации определяется типом дефекта и наличием у

него острых кромок. Метод реализуется с использованием наклонного раздельно-совмещенного преобразователя. Одна пьезопластина принимает отраженную поперечную волну, другая пьезопластина принимает отраженную продольную волну. Затем вычисляют соотношение амплитуд поперечной и продольной волн, и из него получают информацию о типе дефекта.

С целью повышения точности и воспроизводимости результатов измерений соотношение амплитуд поперечной и продольной волн, измеренное на дефекте, рекомендуется соотносить с соответствующим значением для эталонного отражателя.

### **1.3.4 Метод, основанный на ослаблении донного сигнала**

Метод основан на таком физическом явлении, как ослабление донного сигнала трещиной, расположенной вдоль акустической оси преобразователя. За счет образования по берегам трещины головных и боковых волн, уносящих энергию донного сигнала, амплитуда сигнала уменьшается [4, 52].

В случае автоматизированной реализации контроля метод заключается в следующем. Ультразвуковые колебания излучаются прямым пьезоэлектрическим преобразователем, который перемещают по поверхности контролируемого изделия. Тем же преобразователем принимаются эхо-сигналы, отраженные от дефекта, и донные сигналы. Энергия донного сигнала теряется за счет того, что при излучении продольных волн вдоль берегов трещины образуется головная волна, которая излучает по обе стороны от трещины под определенным углом поперечные боковые волны. Вследствие этого амплитуда донного сигнала уменьшается на величину, приблизительно равную высоте трещины. Ослабление донного сигнала может быть следствием наличия не только трещины, но и объемных дефектов. Для того чтобы их разделить, выделяют во времени донные сигналы и эхо-сигналы от дефектов. Затем определяют изменение амплитуды донного сигнала, после чего выделяют высокочастотную составляющую принятого сигнала. Эта операцию проводят для того, чтобы разделить влияние

ослабления донного сигнала, обусловленного дефектом, и ослабления донного сигнала, как результат некачественного акустического контакта. В дальнейшем импульсы уменьшения донного сигнала и импульсы от дефекта преобразуют в медленно меняющееся напряжение и сравнивают между собой по амплитуде и знаку.

Для классификации дефектов по типу вводят новый информативный параметр – коэффициент ослабления донного сигнала. Он определяется, как отношение изменения амплитуды донного сигнала к амплитуде эхо-сигнала. В зависимости от конкретного значения коэффициента ослабления дефект относят к тому или иному классу.

В более общем виде алгоритм определения формы дефектов предложенным способом состоит в следующем:

- измеряется амплитуда донного сигнала в бездефектном месте контролируемого изделия, все сигналы нормируются относительно этого значения;
- измеряется суммарное значение амплитуд донного и эхо-сигналов;
- исходя из критериев измерения суммарных амплитуд, дефект относят к тому или иному классу;
- если дефект отнесен к классу объемных дефектов, то амплитуда эхо-сигнала дает информацию о размере дефекта;
- если к классу плоскостных дефектов, то эту информацию несет уменьшение амплитуды донного сигнала;
- для объемно-плоскостных дефектов надо учитывать изменение обоих параметров.

### **1.3.5 Методы, основанные на дельта-методиках**

В основе дельта-метода лежит дифракция волн на дефекте [4, 6]. Падающая на дефект поперечная волна возбуждается наклонным излучателем. Часть ее трансформируется в энергию продольной волны. Другая часть дифрагирует и,

частично, излучается во все стороны на краях дефекта. Приемник продольных волн располагается над дефектом. Он воспринимает два сигнала. Один сигнал излучается верхним краем дефекта. Второй, пришедший позже, приходит от нижнего края дефекта, отражается от донной поверхности и попадает на приемник [6].

В качестве примера использования дельта-методик для определения типа дефекта можно привести метод, использующий формирование индикатрис рассеяния (ИР) продольных и поперечных волн. Суть метода заключается в следующем. В контролируемое изделие прямым преобразователем излучают импульсы продольных волн, а наклонным преобразователем принимают два импульса трансформированных поперечных волн. Первый импульс – это импульс отраженный от ближней к преобразователям точки дефекта, второй импульс – это импульс дифракции донного сигнала на удаленной от преобразователя точке дефекта. Для классификации дефектов по типу вводится коэффициент, который определяется отношением амплитуды эхо-сигнала, отраженного от ближней к преобразователям точке дефекта, к амплитуде сигнала, полученного за счет дифракции донного сигнала на удаленной от преобразователя точке дефекта. И уже по этому значению этого коэффициента относят дефект к тому или иному классу (плоскостной или объемный).

Существенным недостатком этого метода является сложная схема реализации. При сканировании сначала устанавливается излучатель и проводится сканирование приемником, затем излучатель перемещается и сканирование проводится вновь.

### 1.3.6 Амплитудно-временной метод распознавания

В данном методе для классификации дефектов по форме используется коэффициент  $K_{\xi}$ , определяемый отношением:

$$K_{\xi} = \frac{R(U_{ij} / U_{11}, \alpha_1^m, \alpha_2^m)}{\Delta t f},$$

где  $U_{ij}$  – амплитуда сигнала от  $j$  – ой вершины класса  $i$ ;  $U_{11}$  – нормировочная амплитуда сигнала;  $\alpha_1^m, \alpha_2^m$  – углы падения волны на вершины дефекта;  $\Delta t$  – временной интервал между принимаемыми сигналами от верхней и нижней вершины дефекта;  $f$  – частота сигнала [4].

В соответствии с теорией прочности дефекты в сварных конструкциях, моделируемые эллиптическими цилиндрами, можно характеризовать следующим образом. Это либо отношение радиуса  $r$  закругления в вершинах дефекта к его высоте  $h$ , либо коэффициент формы  $Q$ , равный половине отношения величины малой полуоси цилиндра к величине большой полуоси цилиндра. Основная задача заключается в измерении параметров дифрагированных сигналов, с целью получения количественных характеристик дефектов, которые будут приведены к эллипсоидам вращения или эллиптическим цилиндрам. Затем по ним определяется степень опасности дефектов, запас прочности, продолжительность работы и другие характеристики конструкции.

Суть метода заключается в следующем. В основе метода лежит использование дифрагированных волн обегания-соскальзывания. Два преобразователя излучающий и приемный располагают по обе стороны от обнаруженного дефекта на поверхности объекта контроля. Преобразователи начинают сближать, измеряя при этом амплитуду и время распространения сигнала, дифрагированного на верхнем кончике трещины, или сигнала отраженного от округлого дефекта. Затем их раздвигают, измеряя эти же параметры сигнала, дифрагированного на нижнем кончике трещины, или сигнала, оббежавшего часть округлого дефекта. Для того чтобы определить а какому классу принадлежит дефект, используют некий информативный признак, зависящий от амплитуды сигнала, временного интервала между принимаемыми сигналами от верхней и нижней вершин дефекта, частоты сигнала и углов падения волн на вершины дефекта [4].



### 1.3.7 Ультразвуковой спектральный метод

Ультразвуковой спектральный (УЗСП) метод является наиболее общим методом оценки типа дефекта [53, 54]. Он объединяет временные методы, учитывающие фазовую модуляцию дифрагированных импульсов, и амплитудные методы, учитывающие амплитудную модуляцию этих импульсов. Этот метод имеет достаточно сложную аппаратную реализацию. Сущность спектрального метода дефектоскопии состоит в следующем. В объект контроля, содержащий дефекты, вводят ультразвуковые колебания в широкой полосе частот. Дифрагированные на дефектах волны принимают, затем анализируют частотные параметры их спектров. Кроме того, что спектры принимаемых сигналов зависят от отношения его размеров к длине волны, угла озвучивания дефекта, они также в значительной степени зависят от формы дефекта. Благодаря использованию широкой полосы частот озвучивания данный метод позволяет получить значительно больше сведений о дефекте по сравнению с обычными моночастотными.

После проведения анализа результатов расчетов теоретических спектров моделей дефектов были получены следующие закономерности. Для объемных дефектов типа сферы и цилиндра характерны огибающие спектра без осцилляций. Тогда как в случае плоскостных дефектов, ориентированных перпендикулярно оси преобразователя, наблюдается некоторая немонотонность огибающей. Резкая немонотонность наблюдается в случае обнаружения плоскостных дефектов, которые ориентированы под углом к оси преобразователя. В случае таких дефектов основное влияние на результирующий сигнал оказывают дифракционные краевые волны. Они, интерферируя между собой, дают периодически следующие минимумы, период которых зависит от размера и угла наклона дефекта.

При реализации ультразвукового спектрального метода существует ряд требований. Эти требования относятся как к преобразователям, так и к электронной аппаратуре. Преобразователь электрического сигнала в акустический

и обратно и приемный тракт должны быть широкополосными. Для качественного распознавания типа дефекта предъявляются требования не только к качеству аппаратуры, но и к информативности признаков, характеризующих тот или иной дефект. Они должны быть физически обоснованы, просты для наблюдения и измерения. К качественным информативным признакам относятся степень монотонности или изрезанности спектра, периодичность осцилляций и др. Количественными информативными признаками являются период и глубина осцилляций, частота максимальной амплитуды спектра. После измерения и последующего анализа в совокупности эти признаки позволяют отнести дефект к тому или иному классу.

Наиболее простым и информативным в реализации является информативный признак, равный отношению нормированной амплитуды видеоимпульса отраженного сигнала на экране спектроскопа к амплитуде спектральной составляющей этого сигнала, имеющей максимальное значение. По его конкретному численному значению дефект относят к тому или иному типу.

Однако спектральные характеристики дефектов в общем случае определяются не только природой дефекта. Они также зависят от параметров дефектов и преобразователей, параметров контролируемой среды, глубины залегания дефектов и т.д. Это, в свою очередь, снижает информативность оценки типа дефекта, при этом вероятность правильной классификации плоскостных и объемных дефектов приблизительно одинакова [4, 55].

### **1.3.8 Метод компьютерной томографии**

В последние годы получили развитие методы восстановления формы дефекта с использованием компьютерной томографии [56]. При ультразвуковой компьютерной томографии неразрушающий контроль осуществляется на основе применения фазированных антенных решеток. С развитием технологий ультразвукового неразрушающего контроля происходит постепенный переход от антенных решеток к антенным матрицам. Совершенствуются технологии

изготовления ультразвуковых антенных решеток, матриц и многоканальных систем для излучения и приема ультразвука. Создаются новые ручные относительно дешевые дефектоскопы, в которых используются технологии фазированных антенных решеток (ФАР – дефектоскопы). У более поздних моделей количество каналов уменьшилось до 32 или 16 по сравнению с ранними моделями, где количество каналов достигало 64 или 32. ФАР – дефектоскопы представляют большой интерес для специалистов по ручному неразрушающему ультразвуковому контролю (РУЗК), так как их применение позволяет получать с частотой не менее 20 Гц [56] изображения дефектов в виде секторных сканов. Благодаря тому, что ультразвуковая компьютерная томография позволяет получать двумерные изображения дефектов, а не отдельные А-сканы, задачи по выявлению дефектов, измерению их размеров, определению их типов и реальной конфигурации сварного соединения могут быть решены на качественно новом уровне.

К существенным недостаткам ФАР – дефектоскопов можно отнести смещение изображения дефектов от их реального места залегания при удалении от линии фокусировки. С одной стороны увеличение апертуры антенной решетки или матрицы приводит к повышению качества изображения в зоне фокусировки, но в то же время сами размеры этой области уменьшаются. Эта проблема наиболее актуальна при контроле толстостенных изделий антенной решеткой с количеством элементов более чем 32 [57]. Один из наиболее эффективных способов повышения качества изображения – это регистрация эхо-сигналов в режиме двойного сканирования [58]. Обработка полученных в режиме двойного сканирования эхо-сигналов осуществляется с использованием метода комбинированного SAFT [59, 60]. С его помощью можно восстановить изображения, на которых блики, соответствующие дефектам, не смещены по осям и лучше сфокусированы по всей области восстановления изображения.

В алгоритме SAFT используются данные об амплитуде эхо-сигналов и времени их прихода в каждую точку приемной апертуры [61, 62, 63]. Сам алгоритм реализуется следующим образом. По поверхности объекта контроля

перемещают акустический преобразователь с широкой диаграммой направленности. Излучение и прием акустических импульсов осуществляется в каждой точке апертуры сканирования. Для каждой точки апертуры определяют время прохождения отраженного от рассеивателя импульса. Учитывая это время, строят сферические поверхности радиусом равным половине произведения скорости акустических импульсов в материале объекта на время прохождения импульса [64]. Геометрическое место пересечения этих сфер, по сути, является местом расположения дефекта. В более общем смысле производится регистрация эхо-сигналов (А-сканов) для каждой точки приемной апертуры, после чего выполняется их фазовая компенсация и суммирование.

Основные ограничения компьютерной томографии – проблема контролепригодности деталей малого размера либо сложной формы, высокая стоимость аппаратуры [65, 66].

#### **1.4 Выводы к главе 1**

1. Показано, что радиационные методы неразрушающего контроля, позволяющие сделать заключение о типе дефекта, при высокой информативности и достоверности определения характера дефекта являются дорогостоящими, сложными в реализации и потенциально опасными для специалиста, проводящего контроль.

2. Показано, что большинство описанных в литературе методов оценки формы скрытых дефектов при реализации ультразвукового метода неразрушающего контроля являются косвенными. Тип дефекта оценивают по косвенным характеристикам – информативным признакам, которые формируют, определяя абсолютные или относительные значения амплитудных, временных или спектральных параметров сигнала.

3. Показано, что существующие ультразвуковые методы оценки формы скрытых дефектов обладают ограничениями – как правило, результаты, получаемые данными методами, коррелированы с амплитудой, а сами методы

реализуются посредством нескольких преобразователей и требуют сканирования вдоль поверхности объекта контроля для получения информации о конкретном дефекте. Амплитуда принятого эхо-сигнала сильно зависит от качества контролируемой поверхности и от стабильности акустического контакта. Необходимое качество поверхности объекта контроля возможно обеспечить с учетом требуемых пределов шероховатости. Качество акустического контакта во многом зависит от специалиста, проводящего контроль (зависимость от силы нажатия), и контакт зачастую оказывается нестабильным, что отражается на величине амплитуды, а, следовательно, и на конечных результатах оценки типа дефекта.

4. Показано, что основным ограничением ультразвуковой компьютерной томографии, несмотря на возможность получать визуальный образ дефекта, является то, что для реализации метода требуется свободный доступ к большой площади контролируемого объекта, достаточной для размещения многоэлементного преобразователя. Возникают ограничения связанные с контролепригодностью изделий сложной формы либо малого размера. Кроме того, данный метод является достаточно дорогостоящим.

5. Показано, что требуется разработка новых методов ультразвукового неразрушающего контроля с выработкой информативного признака, который исключит влияние качества акустического контакта и качества поверхности контролируемого изделия на результаты оценки типа скрытых дефектов. Такой метод может использоваться наряду с уже существующими методами, для увеличения информативности и достоверности контроля.

## **2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

В данной главе будут описаны методики экспериментов, выполненных в данной работе, описаны технические характеристики средств измерений. В качестве информативного признака определения типа дефекта будет предложен информативный параметр – мгновенная частота недетектированного радиочастотного сигнала, показана его физическая суть. Будет подробно описан алгоритм оценки мгновенной частоты на основе применения непрерывного вейвлетного преобразования, показана его эффективность по сравнению с алгоритмом оценки мгновенной частоты на основе представлений об аналитическом сигнале. Будет описана последовательность проведения эксперимента с последующим анализом отраженных сигналов. Для практической реализации предложенного алгоритма будут введены безразмерные параметры – нормированные девиации частоты, которые позволяют сопоставлять результаты, получаемые пьезоэлектрическими преобразователями с различными номинальными частотами. Будет предложен способ представления полученных результатов, представляющий собой диаграмму на плоскости, по осям которой отложены значения нормированных девиаций частоты. Будет показано, что для получения качественной информации о типе дефекта на основе этой диаграммы важно знать, в какую область диаграммы попадает точка, соответствующая тому или иному виду отражателя. Результаты данной главы опубликованы в работах [33, 34, 37, 39, 75, 76, 80].

### **2.1 Аппаратура для проведения экспериментальных исследований**

#### **2.1.1 Ультразвуковой дефектоскоп PCUS-10**

Развитие современных технологий неразрушающего контроля требует усовершенствования существующей аппаратной базы. В области

ультразвуковой дефектоскопии важнейшей тенденцией такого развития является компьютеризация не только процесса обработки получаемой информации, но и самой процедуры УЗ-измерений. Современные ультразвуковые дефектоскопы представляют собой электронную микропроцессорную систему, позволяющую осуществлять акустические измерения, накопление и последующую обработку результатов.

Ультразвуковая система PCUS-10 [67] представляет собой электронное устройство, предназначенное для формирования лабораторного исследовательского комплекса для акустических измерений. Плата разработана в Институте неразрушающего контроля общества Фраунгофера (Германия). Достоинства таких комплексов состоят в возможности представления информации в цифровом виде, большом объёме памяти, высокой скорости обработки данных, хранении нескольких подпрограмм одновременно и трансляции полученных результатов в другие исследовательские подпрограммы и технические или аналитические пакеты. Перечисленные возможности делают возможным более эффективное применение ультразвуковых систем для исследования свойств материалов.

Основная функция такой системы – обнаружение скрытых дефектов. Помимо этого, используя данную систему, можно получать детальную информацию о скорости звука, коэффициенте затухания, акустическом импедансе материала при использовании УЗ-колебаний различного вида. Знание акустических характеристик исследуемых образцов позволяет получить важные сведения о структуре и физико-механических свойствах вещества, из которого они состоят. Как показывает опыт, возможно изучение параметров акустических шумов в зависимости от плотности, микроструктуры (размера зерна), пористости и других свойств материала. Ультразвуковые системы типа PCUS-10 и PCUS-11 получили достаточно широкое распространение в исследовательской практике [67].

### ***Технические характеристики платы PCUS-10***

Плата устанавливается как устройство в персональный компьютер. В состав платы входит аналоговая часть УЗД, то есть генератор зондирующих импульсов и приёмное устройство. Кроме того, она содержит аналогово-цифровой преобразователь, сигнальный процессор, блок памяти и другие устройства.

Технические характеристики системы PCUS-10:

- интервал частот от 0,5 до 20 МГц, причём могут быть использованы как широкая полоса, так и три полосовых фильтра;
- генератор зондирующих импульсов с двумя значениями амплитуды обеспечивает время нарастания импульса менее 20 нс;
- коэффициент усиления изменяется от -20 до 90 дБ с шагом 0,1 дБ;
- встроенная система ВРЧ с настройкой по 256 точкам имеет диапазон 40 дБ;
- диапазон контроля «по стали» до 2,45 м.

Аналогово-цифровое преобразование ведётся с частотой 80 МГц. В системе предусмотрена возможность усреднения изображения развертки по 2, 4, 8, 16, 32 периодам.

Частота повторения от 4 Гц до 4 кГц, причём используется как внутренний, так и внешний запуск. Пьезоэлектрический преобразователь подключается снаружи через разъём типа Lemo.

### ***Интерфейс программы***

Для работы с программой необходимо запустить файл PCUSWARE.EXE.

После запуска файла вы увидите рабочее окно программы (рисунок 2.1). В верхней части рабочего окна располагается меню программы. Меню содержит следующие пункты: Файл, Параметры, Настройки, Контроль, Отчеты, Окно, Экран.



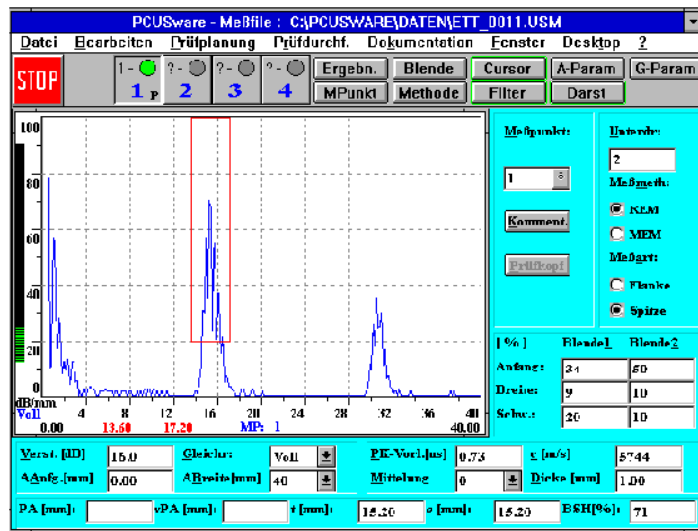


Рисунок 2.1 – Интерфейс цифрового дефектоскопа PCUS-10

## 2.1.2 Совмещенные пьезоэлектрические преобразователи

В неразрушающем ультразвуковом контроле с использованием УЗ дефектоскопов применяются пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), выступающие в качестве излучателя и приемника ультразвукового импульса. По способу излучения и приема ультразвукового сигнала различают совмещенные ПЭП, у которых один и тот же пьезоэлемент работает как в режиме излучения, так и в режиме приема, и отдельно-совмещенные преобразователи, имеющие две зоны контакта с контролируемым объектом (излучающую и приемную). От параметров контролируемого объекта зависит выбор ультразвукового преобразователя. К таким параметрам относятся материал объекта контроля, форма, толщина, температура и др.

Наиболее часто в процессе ультразвукового контроля применяются прямые и наклонные совмещенные преобразователи, а так же прямые и наклонные отдельно-совмещенные преобразователи. Для решения поставленных в работе задач были выбраны прямые и наклонные совмещенные пьезоэлектрические преобразователи. Как правило, прямые совмещенные преобразователи используются для дефектоскопии и толщинометрии изделий продольными волнами. Они применяются для поиска утончений и горизонтально

ориентированных дефектов, таких как непровары, расслоения, трещины и др. Наклонные совмещённые преобразователи позволяют определить характеристики вертикально ориентированных дефектов. Отличительными особенностями данного типа ультразвуковых преобразователей являются малые габариты, малая стрела преобразователя, высокое соотношение сигнал/шум и высокая износостойкость [68].

Как уже было сказано, для проведения экспериментальных исследований с использованием цифрового дефектоскопа PCUS-10 для решения задачи оценки типа отражателей ультразвуковых волн в упругих средах нами были выбраны совмещённые ПЭП с пьезопластиной плоской формы. Использовались пьезоэлектрические преобразователи с различными номинальными рабочими частотами, использующими как продольные, так и поперечные волны ультразвукового диапазона, с разными углами ввода и разными диаметрами пьезопластины:

– контактный наклонный совмещённый плоский преобразователь, работающий на частоте 5 МГц, угол ввода  $40^{\circ}$ , диаметр пьезопластины 8мм – П121-5- $40^{\circ}$ -8;

– контактный наклонный совмещённый плоский преобразователь, работающий на частоте 5 МГц, угол ввода  $65^{\circ}$ , диаметр пьезопластины 8мм – П121-5- $65^{\circ}$ -8;

– контактный прямой совмещённый плоский преобразователь, работающий на частоте 4 МГц – П111-4;

– контактный прямой совмещённый плоский преобразователь, работающий на частоте 2,5 МГц – П111-2,5.

Большое число пьезоэлектрических преобразователей необходимо для того, чтобы оценить воспроизводимость результатов, полученных при различных параметрах измерительного оборудования.

Для проведения исследований был выбран ультразвуковой контактный эхо-импульсный метод. Эхо-импульсный метод является наиболее распространённым методом ультразвуковой дефектоскопии. Он применяется для контроля кованных,

штампованных изделий, проката пластмасс, термообработанного литья, для измерения толщины изделий, изучения структуры материалов. Метод основан на регистрации эхо-сигналов от дефектов. Регистрируемыми параметрами обычно являются амплитуда и время задержки. К преимуществам данного метода следует отнести высокую чувствительность, возможность одностороннего доступа к зоне шва, так как достаточно только одного преобразователя и для излучения и для приема УЗ – сигналов. Эхо-метод удобен для решения задач оценки типа дефекта, поскольку для отражателей различной формы интерференционные процессы происходят по-разному. Сигналы, отраженные от реальных дефектов различной формы, имеют различные параметры. Как правило, такого рода сигналы имеют существенно нестационарные характеристики: их частота изменяется во времени, в пределах импульса, а огибающая имеет сложную форму. Это изменение частоты в пределах импульса можно использовать для формирования информативных признаков оценки типа дефектов.

## **2.2 Исследуемые образцы**

В диссертационной работе для отработки предлагаемого способа оценки типа дефектов при проведении экспериментальных исследований были использованы образцы с наборами искусственных отражателей, моделирующих наиболее часто встречающиеся типы естественных дефектов.

Такие образцы изготавливаются из материала предполагаемого контролируемого изделия. Внутри их объема механическим либо электроискровым способом изготавливаются модели наиболее часто встречающихся в практике ультразвуковой дефектоскопии реальных дефектов – искусственные отражатели.

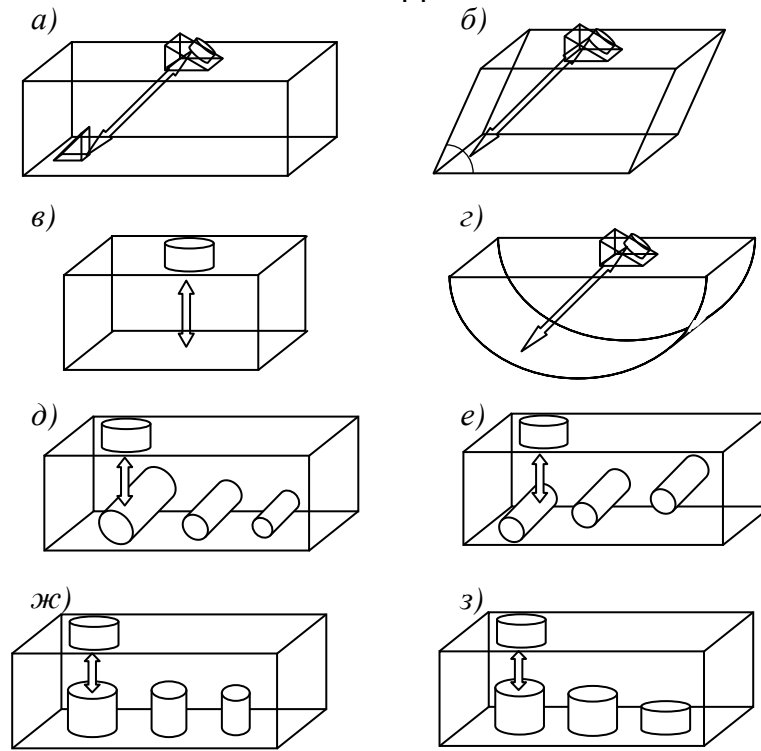


Рисунок 2.2 – Схематическое изображение образцов с наборами искусственных отражателей и ход лучей в них: *а* – зарубки; *б* – двугранные углы; *в* – плоская донная поверхность; *г* – вогнутая донная поверхность; *д*, *е* – «сквозные боковые цилиндрические отверстия»; *ж*, *з* – «плоскодонные сверления»

Задача состоит в изучении взаимодействия ультразвуковых волн с отражателями разной формы и размеров и определении изменений мгновенной частоты, которые происходят при этом взаимодействии. Поэтому для проведения экспериментальных исследований были использованы стальные образцы с наборами искусственных отражателей нескольких типов:

- зарубки с разной площадью плоской передней грани от  $1 \text{ мм}^2$  до  $8,75 \text{ мм}^2$  (рисунок 2.2*а*);
- двугранные углы с различными углами раскрытия от  $56^\circ$  до  $90^\circ$  для острых углов и от  $90^\circ$  до  $125^\circ$  для тупых углов (рисунок 2.2*б*);
- донная поверхность на стандартном образце СО2 (толщина образца в направлении прозвучивания 30 мм) (рисунок 2.2*в*). Образец СО2 изготавливают из малоуглеродистой стали с мелкозернистой структурой [8];
- вогнутая донная поверхность СО3. Образец СО3 также изготавливают из малоуглеродистой стали с мелкозернистой структурой (рисунок 2.2*г*);

– «сквозные боковые цилиндрические отверстия» либо разного диаметра от 2 мм до 6 мм, находящиеся на одной глубине 30 мм (рисунок 2.2д), либо равного диаметра 2 мм, находящиеся на разной глубине от 25мм до 45мм (рисунок 2.2е);

– «плоскодонные сверления» либо разного диаметра от 2 мм до 6 мм, находящиеся на одной глубине 32 мм (рисунок 2.2ж), либо равного диаметра 2 мм, находящиеся на разной глубине от 27 мм до 52 мм (рисунок 2.2з).

Для сравнительного анализа частотных параметров эхо-сигналов, отраженных от искусственных и естественных плоскостных отражателей, выходящих на поверхность, измерения были проведены на сварном шве с заранее известным типом дефекта – «непроваром» в корне стыкового сварного шва, протяженным по всей длине шва (рисунок 2.3) [69]. Образец выполнен из стали Ст 10, его толщина составляет 7 мм, ширина усиления сварного шва 11 мм. Тип дефекта был заранее известен из рентгеновской дефектограммы.



Рисунок 2.3 – Стыковой сварной шов с дефектом типа «непровар» в корне шва, протяженным по всей длине шва

В таблице 2.1 приведены параметры отражателей и преобразователей, которые были использованы для проведения экспериментальных исследований. Измерения проводились как в дальней, так и в ближней зоне. Длина волны  $\lambda$ , в случае использования некоторых преобразователей, превышала линейный размер отражателя.

Таблица 2.1 – Параметры отражателей и преобразователей, использованных для проведения экспериментальных исследований

№	Тип отражателя	Размер отражателя	Преобразователь	Параметры преобразователя
1	Зарубка	Размер плоской передней грани (мм): 3,5/2,5; 3,0/2,5; 5/2,5; 2,5/2,0; 2,0/2,0; 2,5/1,5; 2,0/1,5; 2,0/1,0; 1,5/1,0; 1,0/1,0; 1,0/0,8.	Наклонный совмещенный П121-5,0-40 <sup>0</sup> -Ø8 П121-5,0-65 <sup>0</sup> -Ø8	$\lambda = 0,64$ мм
2	Двугранный угол	Углы раскрытия острых двугранных углов (град): 56; 60,5; 65; 69; 75; 72; 78,5; 80,5; 83,5; 86,5; 90.	Наклонный совмещенный П121-5,0-40 <sup>0</sup> -Ø8 П121-5,0-65 <sup>0</sup> -Ø8	$\lambda = 0,64$ мм
3	«Сквозное боковое цилиндрическое отверстие»	Радиус отверстия при равной глубине залегания (мм): при $h=30$ ; $R_1=1$ ; $R_2=1,5$ ; $R_3=2$ ; $R_4=2,5$ ; $R_5=3$ . Глубина залегания отверстия при равном радиусе (мм): при $R=1$ ; $h_1=45$ ; $h_2=40$ ; $h_3=35$ ; $h_4=30$ ; $h_5=25$ .	Прямой совмещенный	$f_n = 4$ МГц; $d_{nn} = 11$ мм; $\lambda = 1,475$ мм; $x_b = 20,5$ мм.  $f_n = 2,5$ МГц; $d_{nn} = 17$ мм; $\lambda = 2,95$ мм; $x_b = 40$ мм.
4	«Плоскодонное сверление»	Радиус отверстия при равной глубине залегания (мм): при $h=32$ ; $R_1=1$ ; $R_2=1,5$ ; $R_3=2$ ; $R_4=2,5$ ; $R_5=3$ . Глубина залегания отверстия при равном радиусе (мм): при $R=1$ ; $h_1=52$ ; $h_2=47$ ; $h_3=42$ ; $h_4=37$ ; $h_5=32$ ; $h_6=27$ .	Прямой совмещенный	$f_n = 4$ МГц; $d_{nn} = 11$ мм; $\lambda = 1,475$ мм; $x_b = 20,5$ мм.  $f_n = 2,5$ МГц; $d_{nn} = 17$ мм; $\lambda = 2,95$ мм; $x_b = 40$ мм.

где  $h_n$  – глубина залегания искусственного отражателя,  $R_n$  – радиусы отверстий,  $\lambda$  – длина волны ультразвука,  $f_n$  – номинальная частота ПЭП,  $d_{nn}$  – диаметр пьезопластины,  $x_b$  – граница ближней зоны ПЭП.

## 2.3 Получение и обработка акустических сигналов

Так как в работе в качестве информативного параметра для классификации отражателей по форме предложено использовать мгновенную частоту недетектированного радиочастотного сигнала, необходимо ввести основные понятия, которые будут использоваться для реализации данного способа оценки типа дефектов.

### 2.3.1 Физический смысл понятия мгновенная частота

Покажем, каким образом можно ввести понятие мгновенной частоты на примере произвольного радиоимпульса, форма которого близка к реальному эхо-сигналу, принимаемому ультразвуковым дефектоскопом [70]. Предположим, что у нас имеется некоторый произвольный радиоимпульс с частотной модуляцией (рисунок 2.4). В этом случае спектр Фурье можно записать в следующем виде:

$$A[\omega] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) \cdot e^{i\omega t} dt . \quad (2.3.1)$$

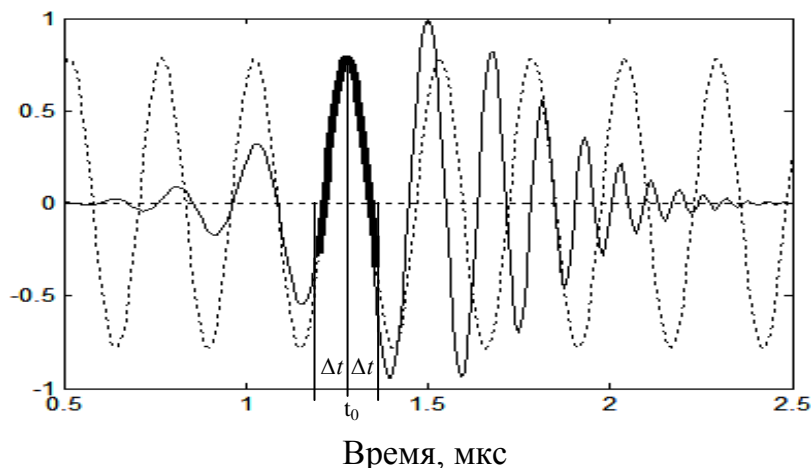


Рисунок 2.4 – Радиоимпульс с частотной модуляцией: сплошная линия – радиоимпульс, прерывистая линия – гармонический сигнал (синусоида)

Выберем окно, в котором будет находиться часть сигнала от  $t_0 - \Delta t$  до  $t_0 + \Delta t$  по оси времени. Для того чтобы получить правильную оценку частоты в

пределах этого окна, ширина окна  $2\Delta t$  должна быть меньше длительности импульса, но может быть сравнима с периодом несущей частоты. Конечно, ширина окна не должна быть много меньше периода анализируемых колебаний. В противном случае мы получим сигнал, близкий к  $\delta$  функции, спектр которой является постоянным во всем диапазоне частот.

Оконная спектральная функция для интервала от  $t_0 - \Delta t$  до  $t_0 + \Delta t$  будет иметь следующий вид:

$$\tilde{A}[\omega] = \frac{1}{2\pi} \int_{t_0 - \Delta t}^{t_0 + \Delta t} a(t) \cdot e^{i\omega t} dt \quad . \quad (2.3.2)$$

Если выделить из этой спектральной функции максимальную компоненту, то у нас получится гармоническая функция. Ее частота и является мгновенной частотой исследуемого сигнала в момент времени  $t_0$ . Из рисунка 2.4 видно, что частота анализируемого сигнала в различные моменты времени может существенно отличаться от частоты в момент времени  $t_0$ .

Введенная таким образом частота в литературе называется мгновенной [12]. В действительности, для определения этой мгновенной частоты нужен конечный промежуток времени. Как будет показано ниже, в используемом нами способе расчета мгновенной частоты для достаточно точного ее определения требуется промежуток, приблизительно равный половине периода радиочастотного сигнала.

Для того чтобы объяснить, с чем связано это изменение мгновенной частоты отраженного сигнала, рассмотрим несколько вариантов взаимодействия падающего на дефект волнового фронта с отражающими поверхностями различной формы (рисунок 2.5). Данный рисунок дает качественное описание того, как меняется кривизна отраженного волнового фронта при изменении соотношения между падающим на дефект волновым фронтом и радиусом кривизны отражающей поверхности дефекта. Данные результаты были получены путем компьютерного моделирования.



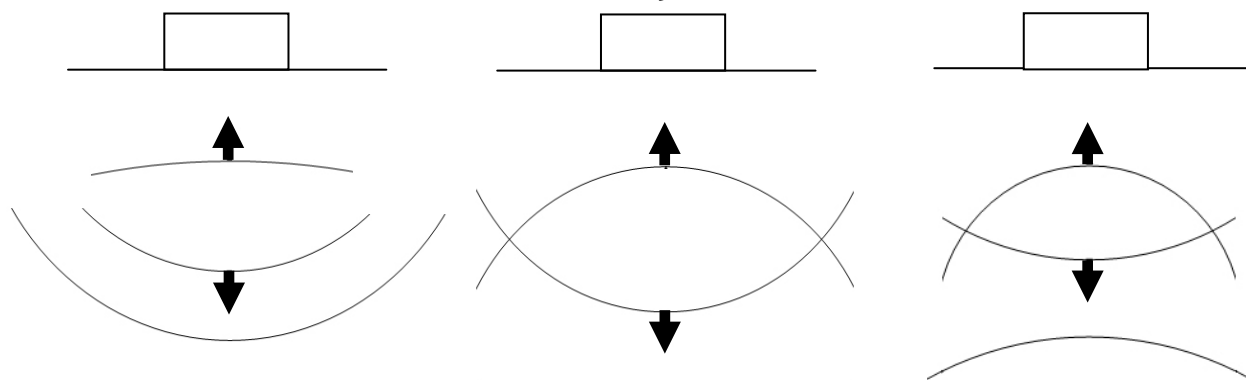


Рисунок 2.5 – Зависимость кривизны отраженного волнового фронта от соотношения между падающим на дефект волновым фронтом и радиусом кривизны отражающей поверхности дефекта

При падении сферического волнового фронта на вогнутую поверхность, отраженный волновой фронт будет близок к плоскому. При падении сферического волнового фронта на плоскую поверхность, фронт отраженной волны будет иметь тот же радиус кривизны, что и падающий. При отражении сферического волнового фронта от выпуклой поверхности, фронт отраженной волны будет иметь радиус кривизны больший, чем падающий на дефект фронт. Затем этот отраженный волновой фронт приходит на преобразователь с плоской апертурой. Рассмотрим случай, когда отраженный волновой фронт является сферическим. При его падении на пьезопластину преобразователя происходит сдвиг фаз между колебаниями поля в различных точках апертуры приемного преобразователя, наблюдается разность фаз между колебаниями поля в центре апертуры и на ее краях, так как колебания приходят на пьезопластину в разных фазах. Чем больше кривизна фронта, тем больше эта разность фаз. Эту разность фаз удобно интерпретировать, как изменение частоты. В настоящее время еще не построена теория, позволяющая вычислить изменение мгновенной частоты импульсного сигнала, отраженного от отражателей разной формы. Поэтому можно только перечислить основные факторы, влияющие на отклонение частоты – это соотношение формы волнового фронта падающей волны и формы отражателя, влияние дифракции и частотная зависимость коэффициента затухания.

### 2.3.2 Вейвлетный анализ акустических сигналов

*Вейвлетная функция* – это функция двух переменных, локализованная по времени и частоте, из которой путем растяжения и сжатия по временной оси можно получить базис для анализа функций.

Суть вейвлет-анализа состоит в разложении анализируемого сигнала по базисным функциям с последующей визуализацией распределения энергии или частоты исследуемого процесса во временной или частотной области [71, 72]. Основным преимуществом метода обработки импульсных сигналов на основе вейвлет-преобразования является возможность использования локализованных во времени самоподобных базисных функций.

Семейство вейвлетов или базисных функций вейвлет-преобразования определяется как

$$\Psi_{s\theta} = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\theta}{s}\right), \quad (2.3.1)$$

где  $s$  – масштабный коэффициент, который показывает во сколько раз увеличивается или уменьшается ширина базисной функции на временной оси по сравнению с исходной функцией  $\psi(t)$ ;  $\theta$  – параметр сдвига, характеризующий значение времени, на которое базисная функция сдвинута по временной оси от начала координат. Чем меньше  $s$ , тем более локальные и быстро изменяющиеся особенности сигнала могут быть проанализированы. Тогда коэффициенты вейвлет-преобразования (или вейвлет-спектр) функции  $f(t)$ , которая удовлетворяет условиям конечности энергии сигнала, определяется выражением

$$W(s, \theta) = W[f(t)] = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-\theta}{s}\right) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{s\theta}^*(t) dt. \quad (2.3.2)$$

Звездочка означает операцию комплексного сопряжения.

Распределение энергии анализируемого сигнала по временным масштабам, называемое обычно *скалограммой* или дисперсией вейвлет-преобразования, является важной характеристикой [73]. Выражение для него записывается как функция параметра  $s$  в виде

$$E_w(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|W(s, \theta)|^2}{|s|} d\theta \quad . \quad (2.3.3)$$

Максимумы скалограммы, как и максимумы спектра Фурье, соответствуют характерным временным масштабам процесса с наибольшей энергией колебаний. Одним из главных достоинств скалограмм является их устойчивость к помехам.

*Вейвлетный спектр* является источником как локальной, так и обобщенной информации о свойствах анализируемой зависимости. Он представляет собой диаграмму, на которой цветом или яркостью изображена относительная величина коэффициентов вейвлетного преобразования. На рисунке 2.6а приведен пример вейвлетного спектра развертки типа А в виде системы линий уровня, где по оси ординат отложены периоды осцилляций анализируемого сигнала. На рисунке можно видеть наличие двух ультразвуковых эхо-импульсов. Время их прихода соответствует 2.5 и 7.3 мкс [74].

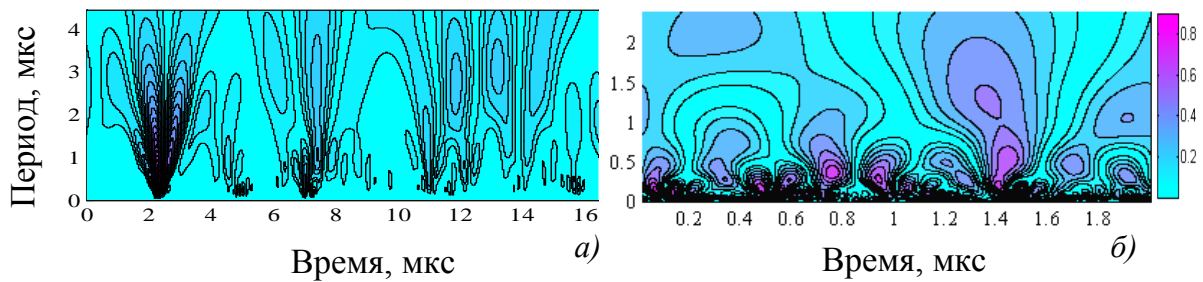


Рисунок 2.6 – Вейвлетный спектр: *а* – для ультразвуковой развертки типа А; *б* – для белого шума

На вейвлетном спектре белого шума, который для сравнения приведен на рисунке 2.6б, видно наличие сплошной темной дорожки внизу, состоящей из мелких дуг, что характерно для случайных сигналов [73].

Вейвлетный спектр позволяет проанализировать, какие частоты или периоды присутствуют в осцилляциях в те или иные промежутки времени, выявить изменение частот во времени или присутствие модуляции сигнала, биений, оценить наличие в сигнале помех. Методика построения вейвлетных спектров использована в диссертационной работе при обработке акустических сигналов. Построенный на основе использования непрерывного вейвлетного

преобразования алгоритм оценки мгновенной частоты обладает повышенной помехоустойчивостью.

### 2.3.3 Оценка мгновенной частоты на основе представлений об аналитическом сигнале и с использованием непрерывного вейвлетного преобразования

Алгоритм оценки мгновенной частоты на основе представлений об аналитическом сигнале был предложен Денисом Габором в 1946г.

Пусть имеется некоторый анализируемый сигнал  $s(t)$ , который является функцией времени  $t$ . Можно получить соответствующий ему комплексный аналитический сигнал  $\dot{z}(t)$ , используя преобразование Гильберта  $H[s(t)]$  [12]:

$$\dot{z}(t) = s(t) + i H[s(t)] ,$$

где

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau .$$

Мгновенная частота  $\tilde{f}(t)$  сигнала  $s(t)$  может быть найдена по формуле [12, 75]

$$\tilde{f}(t) = \text{Im} \left[ \frac{1}{\dot{z}(t)} \frac{d\dot{z}(t)}{dt} \right] . \quad (2.3.4)$$

Так как в формуле (2.3.4) присутствует оператор дифференцирования, то результат вычислений будет очень сильно зависеть от шума, присутствующего в анализируемом сигнале. Влияние шумов на результат вычислений можно снизить, используя методы численного дифференцирования, но есть и другой способ. Если провести модификацию формулы (2.3.4), используя непрерывное вейвлетное преобразование, можно получить более устойчивый результат [75, 76]. Для того чтобы оператор дифференцирования не вносил больших искажений в конечный результат, необходимо уменьшить уровень белого шума. В случае же применения вейвлетного спектра аналитического сигнала вклад шума сосредоточен в узкой

области, что позволяет проводить операцию дифференцирования, которая не будет вносить помехи в конечный результат вычислений.

Необходимо напомнить основные понятия непрерывного вейвлетного преобразования, которые будут использоваться в дальнейшем. Вейвлетный спектр аналитического сигнала  $z(t)$  может быть найден с помощью выражения (2.3.2) либо с помощью [77, 78, 79]:

$$\dot{W}_z(\xi, \theta) = \frac{\sqrt{|\xi|}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{Z}(\omega) \Psi^*(\xi\omega) \exp(i\theta\omega) d\omega, \quad (2.3.5)$$

где  $\psi(t)$  – вейвлет,  $\dot{\Psi}(\omega)$  и  $\dot{Z}(\omega)$  – спектры Фурье, соответствующие вейвлету  $\psi(t)$  и аналитическому сигналу  $z(t)$ ,  $\xi$  – масштабный коэффициент,  $\theta$  – параметр сдвига.

По известному вейвлетному спектру аналитического сигнала  $\dot{W}_z(\xi, \theta)$  можно получить выражение для мгновенной частоты:

$$\tilde{f}(\theta, \xi^*) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \left[ \frac{1}{\dot{W}_z(\xi^*, \theta)} \frac{d\dot{W}_z(\xi^*, \theta)}{d\theta} \right], \quad (2.3.6)$$

где  $\xi^* = \xi^*(\theta)$  – значение масштабного коэффициента  $\xi$ , соответствующее максимуму модуля вейвлетного спектра аналитического сигнала, то есть условию:  $|\dot{W}_z(\xi^*, \theta)| = \max\{|\dot{W}_z(\xi, \theta)|\}$ ,  $\theta$  – параметр сдвига вейвлетного преобразования, который аналогичен по смыслу переменной  $t$  в формуле (2.3.4). Для вычисления вейвлетного спектра по формуле (2.3.5) был использован МНАТ-вейвлет [71]:

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}\sqrt{\pi}} (1-t^2) \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right). \quad (2.3.7)$$

Чтобы продемонстрировать высокую помехоустойчивость метода оценки мгновенной частоты с использованием вейвлетного спектра аналитического сигнала, проведем расчеты вейвлетных спектров аналитического сигнала для некоторого произвольного частотно-модулированного (ЧМ) сигнала с добавлением аддитивного белого Гауссова шума различного уровня. Затем с использованием полученных вейвлетных спектров построим зависимости

мгновенной частоты от времени при различных отношениях сигнал/шум. Результаты расчетов представлены на рисунках 2.5, 2.6, 2.7.

Реальные сигналы, существующие в ультразвуковой дефектоскопии, имеют сложную частотную модуляцию. В качестве примера иллюстрирующего, как наш способ оценки мгновенной частоты способен воспроизвести сложный закон частотной модуляции, предлагается использовать тестовый пример, а именно сигнал с известным законом модуляции [76].

Предположим для примера, что у нас имеются некоторые частотно-модулированные (ЧМ) сигналы с гауссовой огибающей (рисунок 2.7а), угловая частота которого изменяется во времени по закону  $\omega(t) = 2\pi f(t) = \omega_0 + at + bt^2$ :

$$s(t) = S_0 \exp(-\alpha t^2) \cos\left(\omega_0 t + \frac{at^2}{2} + \frac{bt^3}{3}\right), \quad (2.3.8)$$

где  $S_0$  – амплитуда сигнала,  $\alpha$  – множитель, определяющий длительность сигнала,  $\omega_0$  – значение угловой частоты в момент времени  $t = 0$ ,  $a$ ,  $b$  – численные коэффициенты, задающие величину девиации частоты.

При расчете приведенного сигнала использовались следующие значения параметров:  $S_0 = 1$ ,  $\alpha = 2.3 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ ,  $f_0 = 5 \text{ МГц}$ ,  $a = 40 \cdot 10^{12} \text{ c}^{-2}$ ,  $b = 60 \cdot 10^{18} \text{ c}^{-3}$ .

На рисунке 2.7 приведены расчетные данные для случая, когда шум в эхосигнале полностью отсутствует.

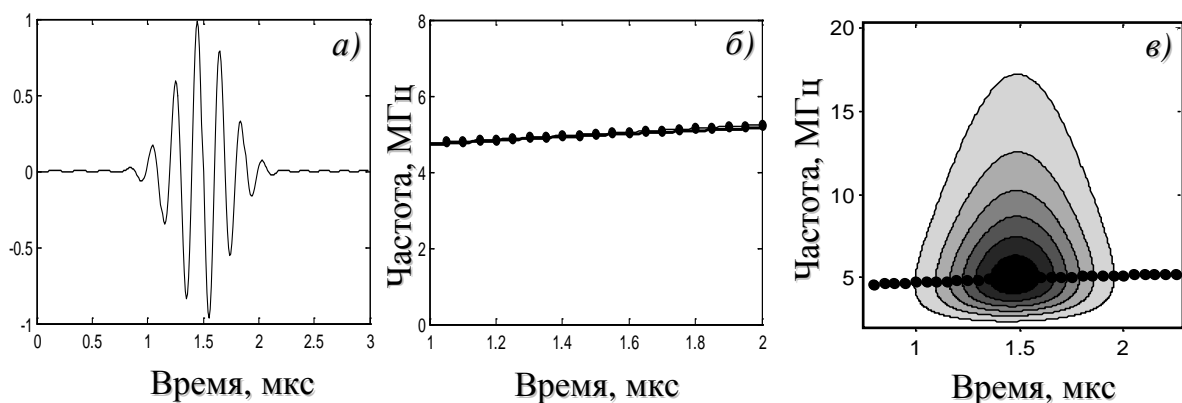


Рисунок 2.7 – Оценка мгновенной частоты в отсутствие шума на примере ЧМ сигнала с гауссовой огибающей: *а* – ЧМ сигнал с гауссовой огибающей в отсутствие белого гауссова аддитивного шума; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени; *в* – модуль вейвлетного спектра (черные точки)

Из графика зависимости мгновенной частоты от времени (рисунок 2.7б) видно, что в идеальном случае – в отсутствии шумов – значения мгновенной частоты, полученные по аналитическому сигналу (тонкая линия), по вейвлетному спектру (толстая линия) и теоретические значения (черные точки – точки, в которых измерялось значение мгновенной частоты по максимуму модуля вейвлетного спектра) практически совпадают. Сам вейвлетный спектр (рисунок 2.7в) не искажен. Таким образом, в отсутствии шумов не имеет значения, какой способ оценки мгновенной частоты выбрать.

Рассмотрим теперь тот же исходный ЧМ сигнал (рисунок 2.8а), но уже с добавлением белого аддитивного гауссова шума с отношением энергий сигнала и шума – 40 дБ для центральной части импульса. На фронтах, где это соотношение совсем другое, например, – 10 или – 15 дБ, оценка частоты по аналитическому сигналу оказывается неудовлетворительной. Из графика зависимости мгновенной частоты от времени (рисунок 2.8б) видно, что даже при столь малом уровне шума оценка мгновенной частоты по аналитическому сигналу невозможна, наблюдается большой разброс значений. Оценка мгновенной частоты по вейвлетному спектру аналитического сигнала дает результаты, хорошо согласующиеся с теоретическими значениями. Из сравнения рисунков 2.7в и 2.8в видно, что сам вейвлетный спектр практически не искажен в области значений частоты, где сосредоточена основная энергия сигнала (рисунок 2.8в).

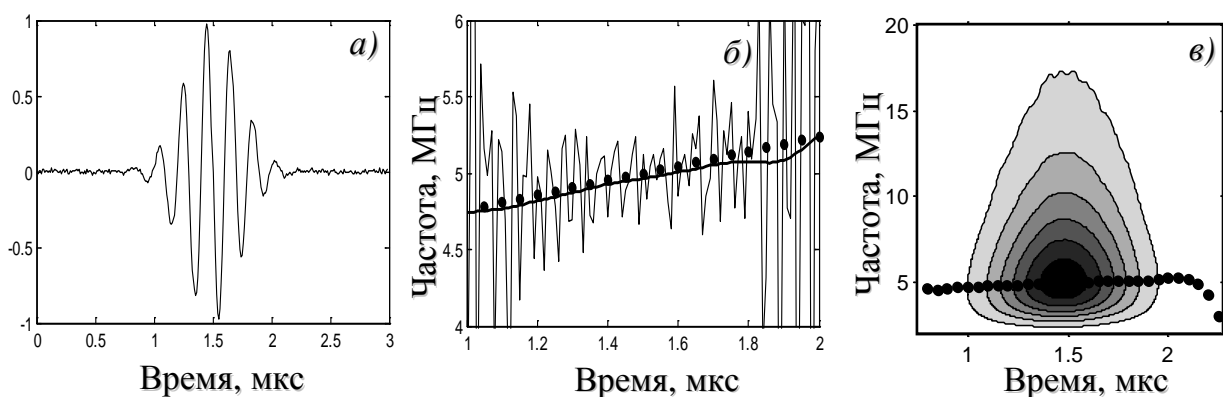


Рисунок 2.8 – Оценка мгновенной частоты при наличии белого аддитивного гауссова шума (отношение сигнал/шум-40дБ) на примере ЧМ сигналов с гауссовой огибающей:  
 а – ЧМ сигнал с гауссовой огибающей; б – зависимость мгновенной частоты от времени;  
 в – модуль вейвлетного спектра

Если уровень шумов, присутствующий на исходном ЧМ сигнале (рисунок 2.9*а*), достаточно большой (отношение сигнал/шум – 6 дБ), то из графика зависимости мгновенной частоты от времени (рисунок 2.9*б*) видно, что оценка мгновенной частоты по вейвлетному спектру (толстая линия) в пределах длительности импульса дает результаты, которые достаточно близки к теоретическим значениям. Оценка мгновенной частоты по аналитическому сигналу невозможна. Сам вейвлетный спектр искажен сильно лишь в области малых значений модуля вейвлетного спектра соответствующего высоким частотам (рисунок 2.9*в*).

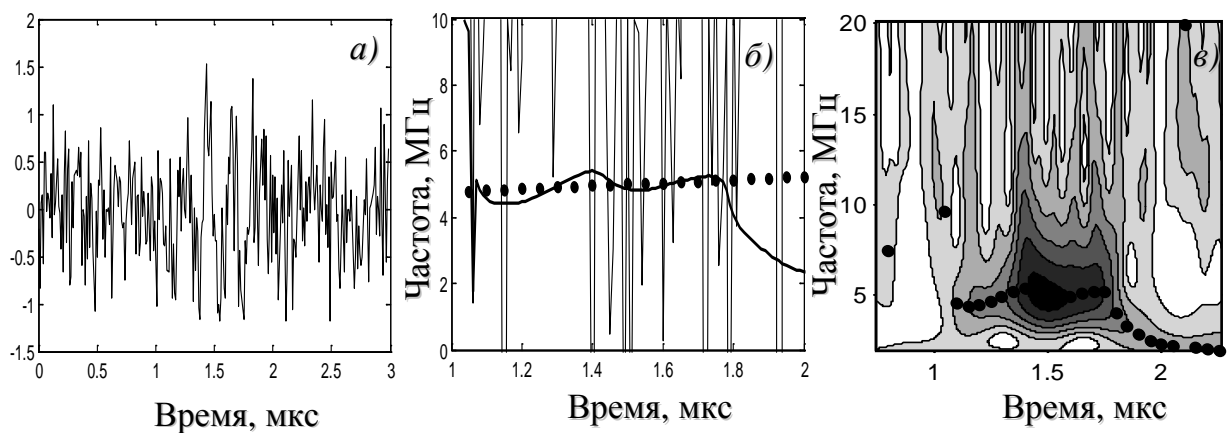


Рисунок 2.9 – Оценка мгновенной частоты при наличии белого аддитивного гауссова шума (отношение сигнал/шум – 6дБ) на примере ЧМ сигналов с гауссовой огибающей: *а* – ЧМ сигнал с гауссовой огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени; *в* – модуль вейвлетного спектра

Таким образом, из приведенных рисунков видно, что использование вейвлетного спектра аналитического сигнала для оценки мгновенной частоты недетектированного радиочастотного сигнала снижает влияние белого аддитивного Гауссова шума на результат измерений. В принципе улучшить оценку мгновенной частоты по аналитическому сигналу можно, применяя методы численного дифференцирования. Однако при использовании вейвлетного спектра достаточно точный результат получается сразу.



### 2.3.4 Постановка эксперимента и последующий анализ эхо-сигналов

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Выполнялось сканирование по поверхности образца с использованием совмещенного пьезоэлектрического преобразователя. Перемещая преобразователь вдоль средней линии поверхности образца, по наличию эхо-сигнала находили дефект (отражатель). Определяли положение ПЭП, при котором амплитуда эхо-сигнала была максимальна. Сохраняли развертку типа А недетектированного сигнала в памяти компьютера с целью последующей обработки и анализа. Поскольку мгновенная частота импульса может изменяться во времени в пределах импульса, то для получения оценок ее значений были выбраны три момента времени:  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_0$  – на фронте, срезе и в центральной части импульса соответственно. Значения мгновенной частоты в этих точках обозначим, как  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_0$ . Частоте  $f_1$  соответствует синий цвет на графиках, частоте  $f_2$  – зеленый цвет и частоте  $f_0$  – красный цвет. Точка  $t_0$  соответствует максимуму амплитуды огибающей. Моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  целесообразно выбрать таким образом, чтобы соответствующие значения амплитуды огибающей составляли 0.5 от максимума, поскольку при ее меньших значениях отношение сигнал/шум будет хуже, и получаемые результаты будут менее достоверными [86, 91].

Каждый полученный эхо-сигнал анализировался следующим образом:

- из исходного сигнала, изображенного на рисунке 2.10б, получаем аналитический сигнал, используя преобразование Гильберта;
- вычисляя модуль аналитического сигнала, получаем огибающую исходного сигнала, которая на рисунке 2.10б показана вместе с исходным сигналом;
- по огибающей находим моменты времени, соответствующие максимуму амплитуды огибающей (красный цвет на рисунке 2.10а) и половине ее максимального значения слева и справа от максимума (синий и зеленый цвет на рисунке 2.10а, соответственно);

- применяя непрерывное вейвлетное преобразование к аналитическому сигналу, находим данные по мгновенной частоте исходного сигнала в моменты времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_0$  (см. рисунок 2.10б);
- Используем эти значения  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_0$  мгновенной частоты в трех точках, соответствующих моментам времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_0$  для дальнейшего анализа.

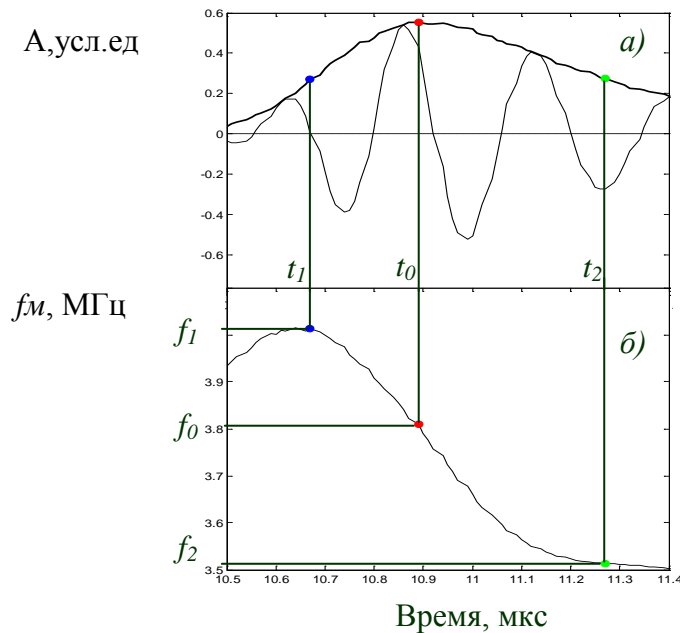


Рисунок 2.10 – Пример оценки мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от «сквозного бокового цилиндрического отверстия», (ПЭП П111-4): *a* – эхо-сигнал (А-скан) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени

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 [80]:

$$f_{r1} = \frac{f_0 - f_1}{f_n}, \quad f_{r2} = \frac{f_0 - f_2}{f_n}, \quad (2.3.9)$$

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  $t_0$ .

Нормированная девиация частоты $f_{r2}$	$f_b > f_{max}$ $f_c < f_{max}$	$f_c < f_{max}$ $f_b < f_{max}$
	$f_c > f_{max}$ $f_b > f_{max}$	$f_b < f_{max}$ $f_c > f_{max}$
	Нормированная девиация частоты $f_{r1}$	

Рисунок 2.11 – Схематичное изображение диаграммы на плоскости, где по осям отложены значения нормированных девиаций частоты:  $f_c$  – мгновенная частота эхо-сигнала на срезе,  $f_b$  – мгновенная частота на фронте,  $f_{max}$  – мгновенная частота в точке, где амплитуда огибающей имеет максимальное значение

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  $f_{r2}$  (рисунок 2.11). Для качественных результатов важно знать, в какую область диаграммы попадают точки, соответствующие тому или иному типу отражателя. Область диаграммы, соответствующая положительным значениям  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$ , относится к случаю, когда частота на фронте и на срезе импульса меньше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей. Область отрицательных значений  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  относится к случаю, когда частота на фронте и на срезе импульса больше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей. В области положительных значений  $f_{r1}$  и отрицательных значений  $f_{r2}$  частота на срезе больше, а частота на фронте меньше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей. В области же

отрицательных значений  $f_{r1}$  и положительных значений  $f_{r2}$  частота на срезе меньше, а частота на фронте больше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей.

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».

## 2.4 Выводы к главе 2

1. Показано, что задача оценки типа скрытых дефектов может быть решена с использованием ультразвукового эхо-метода неразрушающего контроля на основе применения единственного совмещенного пьезоэлектрического преобразователя, при одностороннем доступе к объекту контроля. Описана последовательность проведения эксперимента с последующим анализом отраженных сигналов.

2. Предложен новый информативный признак определения типа скрытого дефекта – мгновенная частота недетектированного радиочастотного сигнала. Показана физическая суть предложенного параметра.

3. Описан алгоритм оценки мгновенной частоты на основе применения непрерывного вейвлетного преобразования. Показана его эффективность и высокая помехоустойчивость по сравнению с алгоритмом оценки мгновенной частоты на основе представлений об аналитическом сигнале.

4. Выработан критерий оценки типа скрытых дефектов – соотношение между нормированными девиациями частоты – в виде диаграммы на плоскости, по осям которой отложены значения этих девиаций. Для получения качественной информации о типе дефекта на основе этой диаграммы важно знать, в какую

область диаграммы попадает точка, соответствующая тому или иному типу отражателя.

5. Используемый информативный признак не коррелирован с амплитудой, что обеспечивает повышение достоверности и точности предлагаемого способа. Результаты, получаемые предлагаемым способом, не зависят от качества контролируемой поверхности и качества акустического контакта.

6. Реализация данного способа не требует разработки специальной аппаратуры. Способ может быть реализован с использованием стандартной аппаратуры, которая широко используется в практике ультразвуковой дефектоскопии.

7. 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».

### **3. АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭХО-СИГНАЛОВ ОТ ИСКУССТВЕННЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ**

В этом разделе будут приведены результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей различной формы и от естественных дефектов в сварных швах, полученные экспериментальным путем. Для того чтобы подтвердить экспериментальные результаты теоретически, а также продемонстрировать возможность использования критерия оценки мгновенной частоты для классификации отражателей по форме, будет описан анализ частотных параметров эхо-импульса на выходе приемного преобразователя с круговой апертурой при его взаимодействии с акустической волной с криволинейным волновым фронтом. По результатам проведенных экспериментальных исследований и аналитических расчетов будет предложен новый способ оценки типа скрытых дефектов при реализации ультразвукового эхо-метода неразрушающего контроля, где в качестве информативного признака определения типа дефектов используются значения мгновенной частоты ультразвукового импульсного эхо-сигнала, соответствующие определенным моментам времени внутри импульса. Результаты данной главы опубликованы в работах [29, 30, 35, 36, 38, 75, 76, 80].

#### **3.1 Оценка частотных параметров эхо-сигналов от искусственных и естественных плоскостных отражателей, выходящих на поверхность**

Для оценки частотных параметров эхо-сигналов от плоскостных отражателей, выходящих на поверхность, измерения были проведены на образцах с искусственными отражателями следующих типов: зарубки с различной площадью плоской передней грани от  $1 \text{ мм}^2$  до  $8,75 \text{ мм}^2$ ; двугранные углы с различными углами раскрытия от  $56^\circ$  до  $90^\circ$  для острых углов и от  $90^\circ$  до  $125^\circ$  для тупых углов. Для того чтобы сравнить результаты, полученные на искусственных

и естественных отражателях, выходящих на поверхность, измерения были проведены на сварном шве с заранее известным типом дефекта – «непроваром» в корне шва, протяженным по всей длине шва. Образец выполнен из стали Ст 10, его толщина составляет 7 мм, ширина усиления сварного шва 11 мм. Тип дефекта был заранее известен из рентгеновской дефектограммы.

Генерация зондирующего импульса проводилась с использованием цифрового дефектоскопа PCUS-10. Излучение и прием ультразвуковых колебаний в случае искусственных отражателей производились наклонными совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями с рабочей частотой 5 МГц и углами ввода  $40^{\circ}$  и  $65^{\circ}$ . Для измерений на сварном шве использовался наклонный совмещенный ПЭП с частотой 5 МГц и углом ввода  $65^{\circ}$ .

Размещая ПЭП на средней линии поверхности образца с искусственными отражателями в виде зарубок и двугранных углов, проводилось сканирование преобразователем по поверхности. Определяя точку, где амплитуда эхо-сигнала от отражателя была максимальна, в памяти ПК сохраняли А-сканы (рисунки 3.1 и 3.2). Затем, используя алгоритм, описанный в пункте 2.3.1.3, эти А-сканы анализировали с целью оценки частотных параметров. Одним из качественных результатов является огибающая эхо-сигнала и зависимость мгновенной частоты от времени, которые для наглядности приведены на одном рисунке.

Из рисунка 3.1б следует, что для отражателей в виде зарубок значение мгновенной частоты  $f_0$ , определенной в момент времени, соответствующий максимуму амплитуды огибающей (красный цвет), больше значений  $f_1$  и  $f_2$  мгновенной частоты эхо-сигнала, определенной в моменты времени, соответствующие половине ее максимального значения справа и слева от максимума (синий и зеленый цвета, соответственно). Само же значение мгновенной частоты  $f_0$ , соответствующей максимуму амплитуды огибающей, близко к номинальному значению частоты пьезоэлектрического преобразователя, которое составляет 5 МГц.

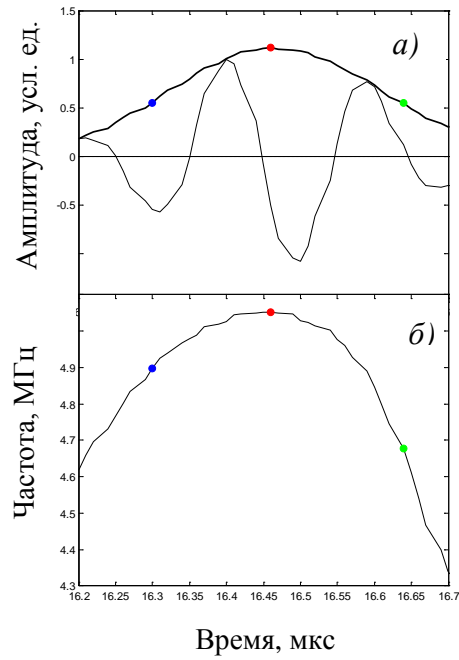


Рисунок 3.1 – Оценка мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от зарубки с площадью плоской передней грани  $8,75 \text{ мм}^2$ , (ПЭП – П121-5-40°-8): *а* – эхо-сигнал (А-скан) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени

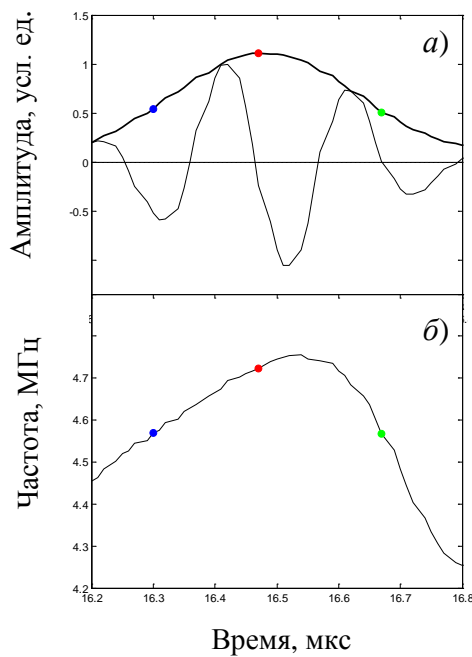


Рисунок 3.2 – Оценка мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от острого угла  $75^\circ$ , (ПЭП – П121-5-40°-8): *а* – эхо-сигнал (А-скан) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени



Для отражателей в виде острых двугранных углов (рисунок 3.2б) значение мгновенной частоты  $f_0$ , определенной в момент времени, соответствующий максимуму амплитуды огибающей (красный цвет), больше значений  $f_1$  и  $f_2$  мгновенной частоты эхо-сигнала, определенной в моменты времени, соответствующие половине ее максимального значения справа и слева от максимума (синий и зеленый цвета, соответственно). Таким образом наблюдается такое же соотношение частот, как и в случае с зарубками. При этом значение мгновенной частоты  $f_0$ , соответствующей максимуму амплитуды огибающей, имеет небольшое отклонение от номинального значения частоты пьезоэлектрического преобразователя 5 МГц.

В дальнейшем, используя значения мгновенных частот, соответствующих определенным моментам времени внутри импульса, были получены значения безразмерных параметров – нормированных девиаций частоты, определенных между центром, срезом и фронтом импульса (см. п. 2.3.1.3).

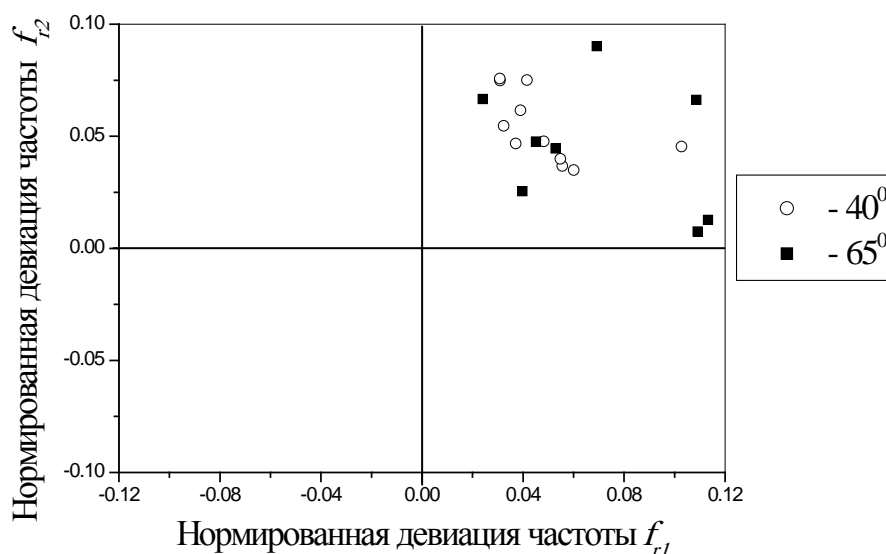


Рисунок 3.3 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от зарубок с различной площадью плоской передней грани, полученные наклонными совмещенными преобразователями с номинальной частотой 5 МГц: белый значок круга – угол ввода  $40^{\circ}$ ; черный значок квадрата – угол ввода  $65^{\circ}$

Результаты оценки частотных параметров эхо-импульсов показаны в виде диаграммы, построенной на плоскости, где по осям отложены значения

нормированных девиаций частоты. Качественным результатом в данном случае является то, в какую область диаграммы попадают точки, соответствующие этому типу отражателя.

Из результатов, представленных на рисунке 3.3, видно, что для отражателей в виде зарубок с различной площадью плоской передней грани точки, полученные при измерении с использованием пьезоэлектрических преобразователей с углами ввода  $40^{\circ}$  и  $65^{\circ}$ , группируются в одной области, соответствующей положительным значениям  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  в пределах от 0 до 0,12. Эта область соответствует случаю, когда частота на фронте и на срезе импульса меньше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей.

Интересно сравнить результаты, полученные для зарубок с различной площадью плоской передней грани, и результаты, полученные на двугранных углах с различными углами раскрытия (рисунок 3.4).

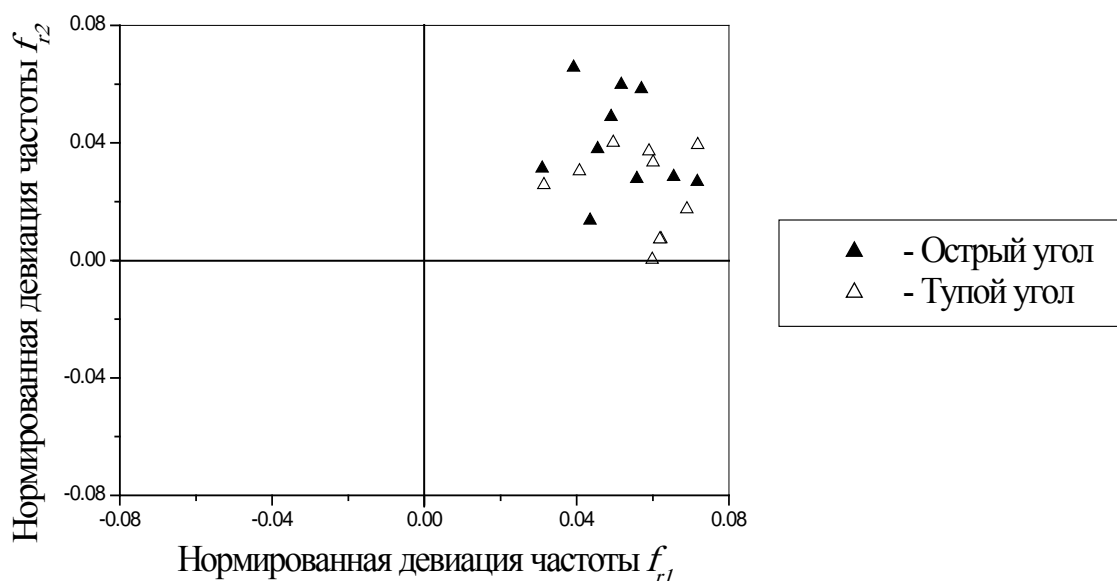


Рисунок 3.4 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от отражателей в виде острых двугранных углов – черный треугольник и тупых двугранных углов – белый треугольник, полученные наклонным совмещенным преобразователем с номинальной частотой 5 МГц углом ввода  $40^{\circ}$

Оба эти отражателя – плоскостные, но у зарубок линейный размер больше или равен длине волны, излучаемой ПЭП, а угол, на котором осуществляется отражение, всегда прямой. Для двугранных углов линейный размер в

значительной степени превышает длину волны, и угол, на котором происходит отражение, меняется от отражателя к отражателю.

На рисунке 3.4 показаны результаты оценки мгновенной частоты для тупых и острых двугранных углов с различными углами раскрытия. Измерения проводились наклонным совмещенным преобразователем с номинальной частотой 5 МГц и углом ввода  $40^\circ$ .

Из диаграммы, представленной на рисунке 3.4, видно, что для отражателей в виде острых и тупых двугранных углов точки графика группируются в одной области, ограниченной положительными значениями  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$ , когда частота на фронте и на срезе импульса меньше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей. Эта область близка к области, где концентрируются точки для отражателей в виде зарубок.

Для того чтобы оценить воспроизводимость результатов измерений мгновенной частоты, была получена зависимость мгновенной частоты от площади плоской передней грани зарубки (рисунок 3.5).

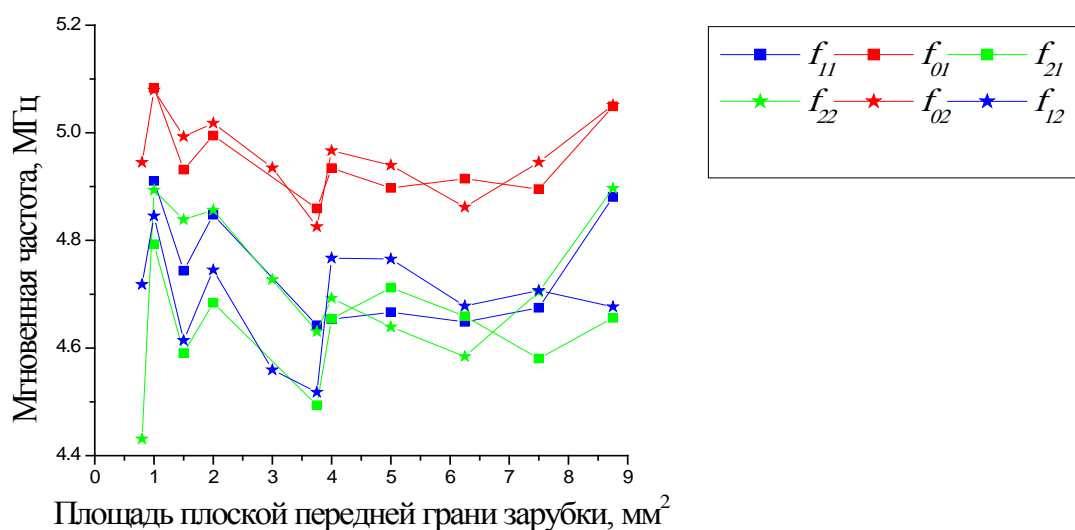


Рисунок 3.5 – Зависимость мгновенной частоты от площади плоской передней грани зарубки. Преобразователь наклонный совмещенный 5МГц, угол ввода  $40^\circ$

Результаты представлены в такой форме, поскольку это наиболее показательно для оценки случайной погрешности измерения мгновенной частоты. Измерения проводились дважды на одних и тех же отражателях наклонным совмещенным преобразователем с номинальной частотой 5 МГц и углом ввода

40°. Красные кривые – в точке, где амплитуда эхо-сигнала максимальна, зеленые – оценка мгновенной частоты в точке, где значение амплитуды равно половине ее максимального значения слева от максимума, синие – оценка мгновенной частоты в точке, где значение амплитуды равно половине ее максимального значения справа от максимума. Значок квадрата и звездочки соответствуют двум разным сериям измерений. Оценка мгновенной частоты показала, что данные, полученные в разных сериях измерений, практически совпадают. Отклонение для частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей, не превышает 0.1 МГц, то есть не больше 2%. Это демонстрирует воспроизводимость результатов оценки мгновенной частоты для данного типа отражателей.

Для того чтобы оценить информативность результатов, полученных на искусственных плоскостных отражателях, были проведены измерения на сварном шве с заранее известным из дефектограммы типом естественного дефекта – «непроваром» в корне шва (рисунок 3.6). Такой естественный дефект является плоскостным, выходящим на поверхность.

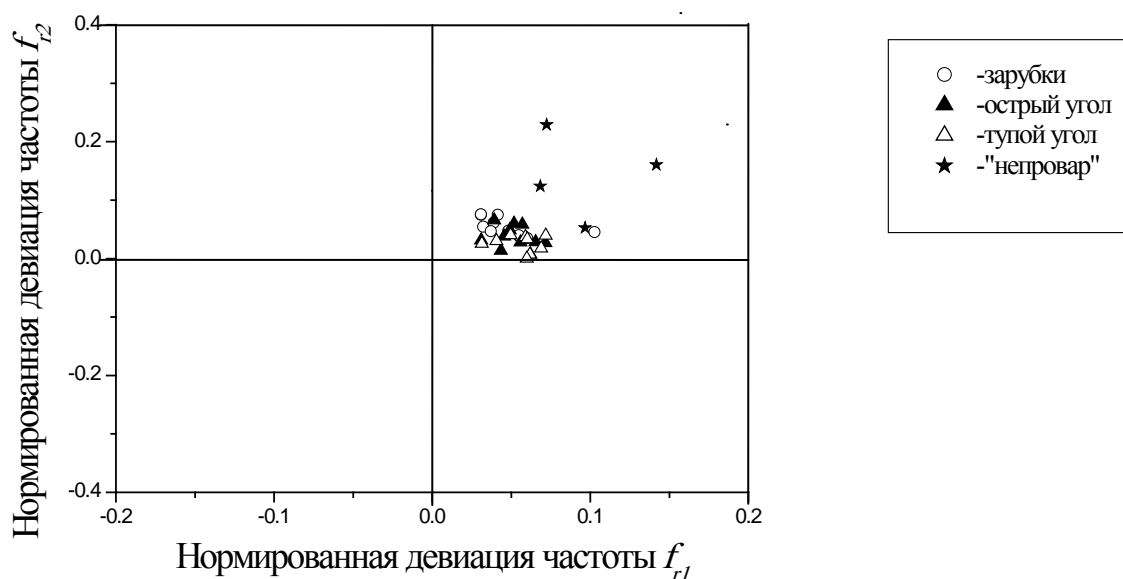


Рисунок 3.6 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от отражателей: зарубки с разной площадью плоской передней грани (белый значок круга); двугранные тупые (белый значок треугольника) и двугранные острые (черный значок треугольника) углы с различными углами раскрытия; естественный дефект – «непровар» в корне сварного шва (черный значок звездочки)

Измерения в данном случае проводились наклонным совмещенным ПЭП с частотой 5 МГц и углом ввода  $65^{\circ}$ . Осуществляя сканирование преобразователем вдоль сварного шва, по наличию эхо-сигнала находили скрытый дефект. Затем в точке, где амплитуда эхо-сигнала была максимальна, сохраняли в памяти ПК развертку типа А, которая использовалась в последующем для анализа частотных параметров. Для большей наглядности результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов, полученных от «непровара» в корне сварного шва, приведены на рисунок 3.10 совместно с результатами, полученными для искусственных плоскостных отражателей, выходящих на поверхность (зарубок и двугранных углов).

Из диаграммы (см. рисунок 3.6) видно, что точки, соответствующие плоскостным отражателям, выходящим на поверхность (зарубки, двугранные острые и тупые углы, «непровар» в корне сварного шва), концентрируются в одной области, где  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  принимают положительные значения, т.е. там, где частота на фронте и на срезе импульса меньше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей.

### **3.2 Оценка частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей типа «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» и «плоскодонное сверление»**

Была проведена оценка частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей типа «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» и «плоскодонное сверление». Для проведения экспериментальных исследований использовались образцы с наборами искусственных отражателей: «сквозные боковые цилиндрические отверстия» либо разного диаметра от 2 мм до 6 мм, находящиеся на одной глубине 30 мм, либо равного диаметра 2 мм, находящиеся на разной глубине от 25 мм до 45 мм; «плоскодонные сверления» либо разного диаметра от 2 мм до 6 мм, находящиеся на одной глубине 32 мм, либо равного диаметра 2 мм, находящиеся на разной глубине от 27 мм до 52 мм.

Генерация зондирующего импульса проводилась с использованием цифрового дефектоскопа PCUS-10. Излучение и прием ультразвуковых колебаний производились прямыми совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями с рабочей частотой 4 МГц и 2,5 МГц.

Размещая ПЭП на средней линии поверхности образца с искусственными отражателями, проводилось сканирование преобразователем по поверхности. Определяя точку, где амплитуда эхо-сигнала от отражателя была максимальна, в памяти ПК сохраняли А-сканы (рисунки 3.7 и 3.8). Затем, используя алгоритм, описанный в пункте 2.3.1.3, эти А-сканы анализировали с целью оценки частотных параметров. Одним из качественных результатов является огибающая эхо-сигнала и зависимость мгновенной частоты от времени, которые для наглядности приведены на одном рисунке.

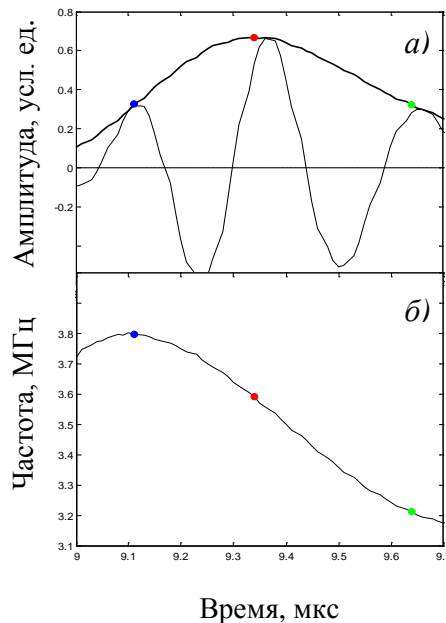


Рисунок 3.7 – Оценка мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от «сквозного бокового цилиндрического отверстия», (ПЭП – П111-4): *а* – эхо-сигнал (А-скан) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени

Из рисунка 3.7*б* следует, что для отражателей в виде «сквозных боковых цилиндрических отверстий» значение мгновенной частоты  $f_0$ , определенной в момент времени, соответствующий максимуму амплитуды огибающей (красный

цвет), лежит между значениями  $f_1$  и  $f_2$  мгновенной частоты эхо-сигнала, которые определены в моменты времени, соответствующие половине ее максимального значения справа и слева от максимума (синий и зеленый цвета, соответственно). А именно значение  $f_0$  больше значения мгновенной частоты на срезе импульса  $f_2$ , но меньше значения частоты на фронте  $f_1$ . Само же значение мгновенной частоты  $f_0$ , соответствующей максимуму амплитуды огибающей, немного отклоняется от номинального значения частоты пьезоэлектрического преобразователя, которое составляет 4 МГц.

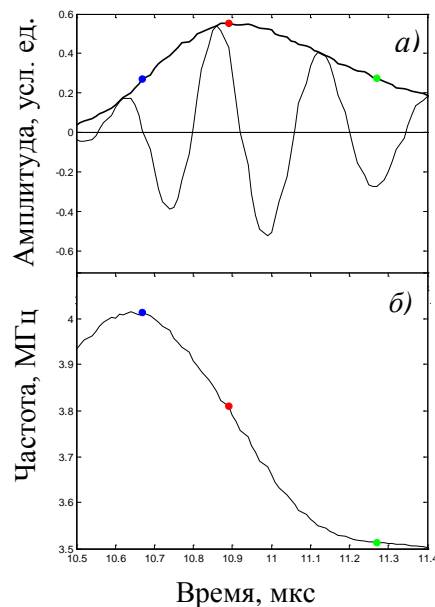


Рисунок 3.8 – Оценка мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от «плоскодонного сверления», (ПЭП – П111-4): *a* – эхо-сигнал (А-скан) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени

Для отражателей в виде «плоскодонных сверлений» (рисунок 3.8) значение мгновенной частоты  $f_0$ , определенной в момент времени, соответствующий максимуму амплитуды огибающей (красный цвет), лежит между значениями  $f_1$  и  $f_2$  мгновенной частоты эхо-сигнала, которые определены в моменты времени, соответствующие половине максимального значения амплитуды справа и слева (синий и зеленый цвета, соответственно). А именно, значение  $f_0$  больше значения мгновенной частоты на срезе импульса  $f_2$ , но меньше значения частоты на фронте  $f_1$ . В данном случае наблюдается такое же соотношение частот, как и в случае со

«сквозными боковыми цилиндрическими отверстиями». Значение мгновенной частоты  $f_0$ , соответствующей максимуму амплитуды огибающей, немного отклоняется от номинального значения частоты пьезоэлектрического преобразователя, которое составляет 4 МГц.

Далее, используя значения мгновенных частот, соответствующих определенным моментам времени внутри импульса, для этих двух типов отражателей были получены значения безразмерных параметров – нормированных девиаций частоты, определенных между центром, срезом и фронтом импульса (см. п. 2.3.1.3). Результаты оценки частотных параметров эхо-импульсов от отражателей в виде «сквозных боковых цилиндрических отверстий» и «плоскодонных сверлений» показаны в виде диаграмм, построенных на плоскости (рисунки 3.9 и 3.10, соответственно), где по осям отложены значения нормированных девиаций частоты. Чтобы на качественном уровне оценить тип отражателя необходимо определить, в какую область диаграммы попадают точки соответствующие этому типу отражателя. Для удобства «сквозные боковые цилиндрические отверстия» различного радиуса, лежащие на одной глубине обозначим СБЦО\_1, а «сквозные боковые цилиндрические отверстия» равного радиуса, лежащие на разной глубине – СБЦО\_2. Таким же образом «плоскодонные сверления» различного радиуса, лежащие на одной глубине обозначим ПС\_1, а «плоскодонные сверления» равного радиуса, лежащие на разной глубине – ПС\_2.

На рисунке 3.13 представлены результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от «сквозных боковых цилиндрических отверстий» СБЦО\_1 различного радиуса, лежащих на одной глубине, и от «сквозных боковых цилиндрических отверстий» СБЦО\_2 равного радиуса, лежащих на разной глубине. Измерения проводились прямым совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем с номинальной частотой 4 МГц.



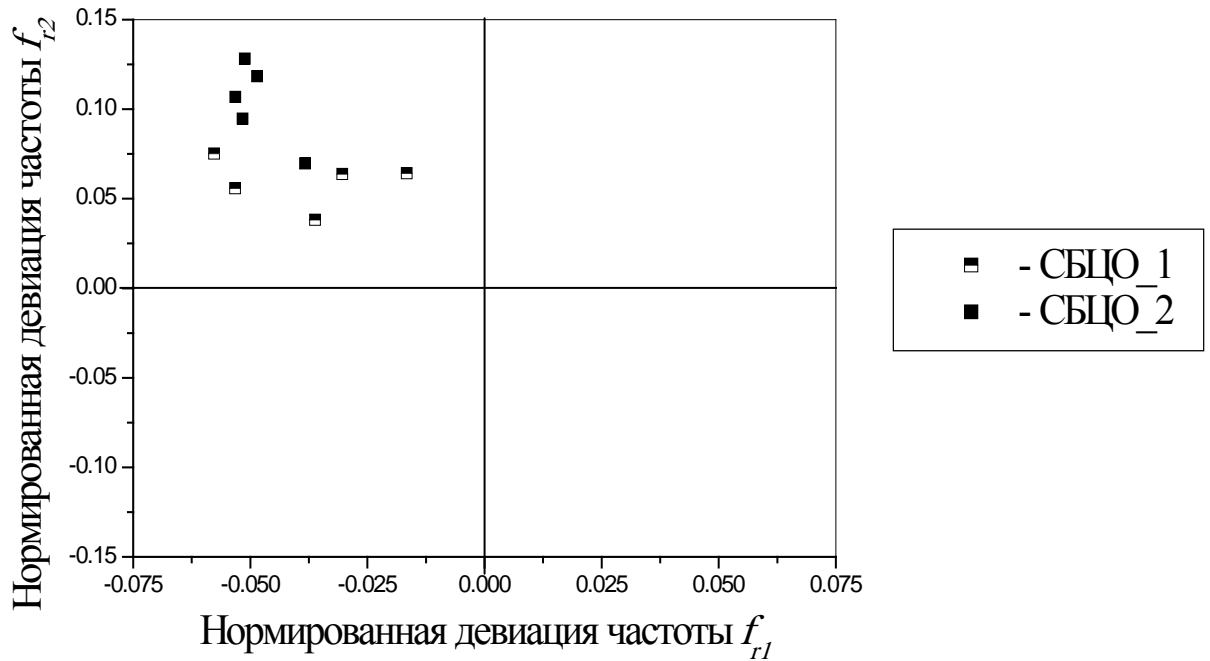


Рисунок 3.9 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от отражателей в виде «сквозных боковых цилиндрических отверстий» различного радиуса, находящихся на одной глубине СБЦО\_1, либо одинакового диаметра, находящихся на разной глубине СБЦО\_2, полученные ПЭП – П111-4

Из диаграммы (см. рисунок 3.9), видно, что как для «сквозных боковых цилиндрических отверстий» различного радиуса, находящихся на одной глубине, так и для «сквозных боковых цилиндрических отверстий» равного диаметра, находящихся на разной глубине, точки группируются в одной области диаграммы, где  $f_{r2}$  принимает положительные, а  $f_{r1}$  отрицательные значения. Эта область диаграммы соответствует случаю, когда частота на срезе импульса меньше, а частота на фронте больше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей.

На рисунке 3.10 представлены результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от «плоскодонных сверлений» ПС\_1 различного радиуса, лежащих на одной глубине, и от «сквозных боковых цилиндрических отверстий» ПС\_2 равного радиуса, лежащих на разной глубине. Измерения проводились прямым совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем с номинальной частотой 4 МГц.

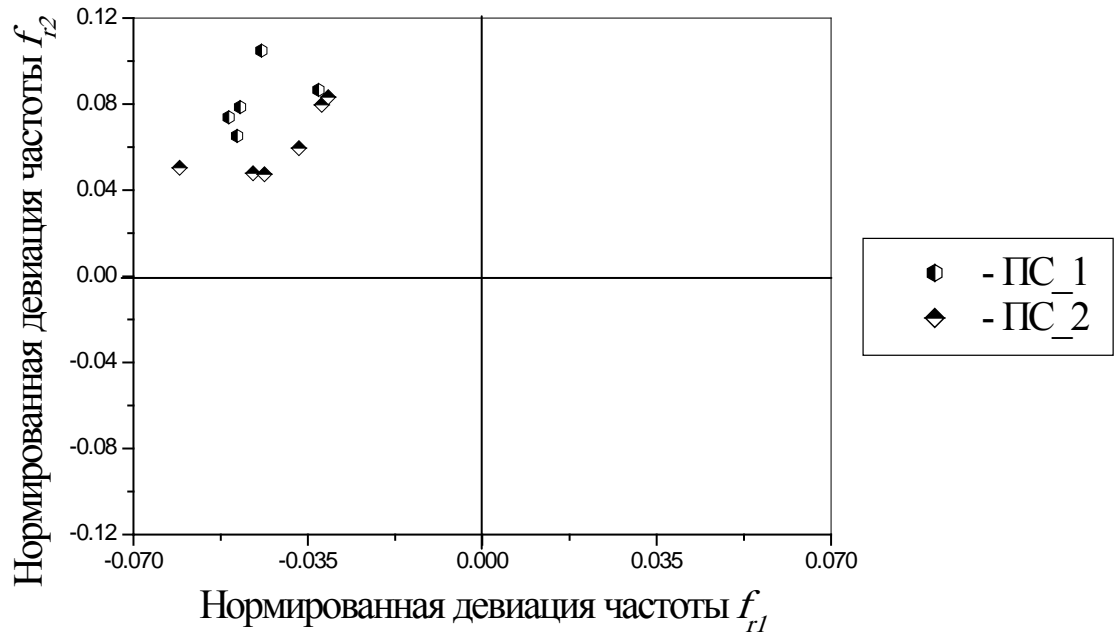


Рисунок 3.10 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от отражателей в виде «плоскодонных сверлений» различного радиуса, находящихся на одной глубине ПС\_1, либо одинакового радиуса, находящихся на разной глубине ПС\_2, полученные ПЭП – П111-4

Результаты, полученные для отражателей в виде «плоскодонных сверлений» (см. рисунок 3.10), которые можно отнести к плоскостным, не выходящим на поверхность, показывают, что точки, полученные как для «плоскодонных сверлений» разного диаметра, находящихся на одной глубине, так и для «плоскодонных отверстий» равного диаметра, находящихся на разной глубине, группируются в одной и той же области, соответствующей положительным значениям  $f_{r2}$  и отрицательным значениям  $f_{r1}$ . В данном случае значения параметра  $f_{r1}$  отрицательны, в отличие от плоскостных отражателей, выходящих на поверхность (п. 3.1). Эта область диаграммы соответствует случаю, когда частота на срезе импульса меньше, а частота на фронте больше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей.

Для того, чтобы оценить воспроизводимость полученных результатов при использовании преобразователей с различными параметрами, а в частности, с различными номинальными частотами и различной шириной диаграммы направленности, были проведены измерения на тех же искусственных

отражателях с использованием прямого совмещенного ПЭП с номинальной частотой 2,5 МГц и диаметром пьезопластины 17 мм.

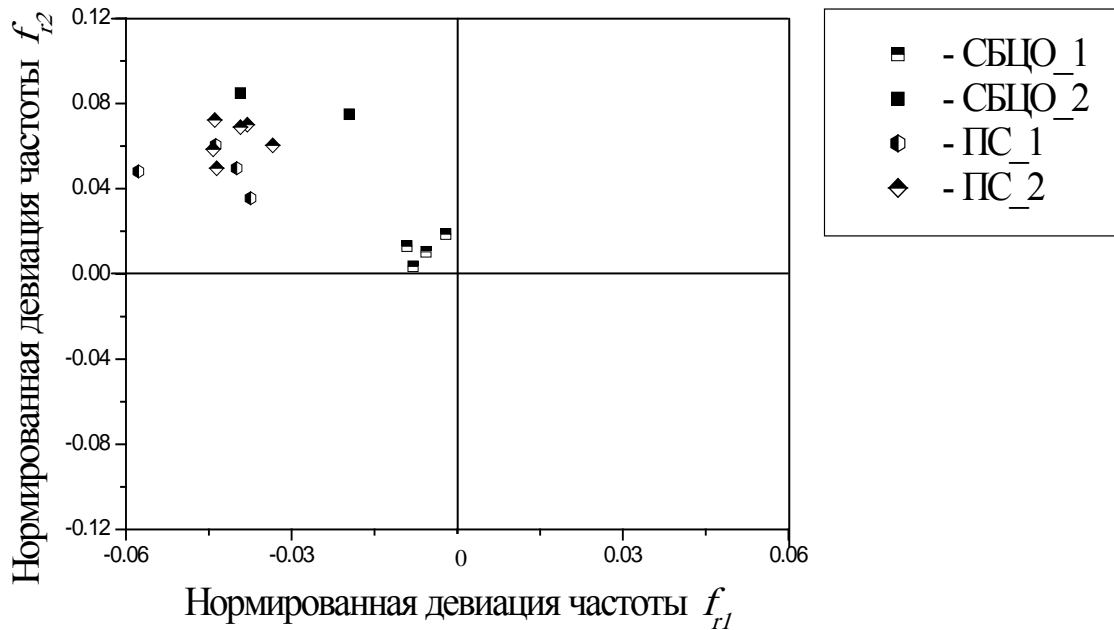


Рисунок 3.11 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от отражателей в виде «плоскодонных сверлений» различного радиуса, находящихся на одной глубине ПС\_1, либо одинакового радиуса, находящихся на разной глубине ПС\_2 и от отражателей в виде «сквозных боковых цилиндрических отверстий» различного радиуса, находящихся на одной глубине СБЦО\_1, либо одинакового диаметра, находящихся на разной глубине СБЦО\_2, полученные ПЭП – П111-2,5

Из диаграммы (рисунок 3.11), видно, при измерении с использованием ПЭП с частотой 2,5 МГц точки, соответствующие данным отражателям, также как и в случае ПЭП с частотой 4 МГц, группируются в области диаграммы, где  $f_{r2}$  принимает положительные, а  $f_{r1}$  отрицательные значения. Эта область диаграммы соответствует случаю, когда частота на срезе импульса меньше, а частота на фронте больше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей. Таким образом, наблюдается воспроизводимость результатов при использовании широкополосных ПЭП с различными параметрами. Можно сделать вывод о том, что критерий оценки мгновенной частоты для классификации отражателей по форме применим в случае использования любой широкополосной аппаратуры, которая используется в практике ультразвукового контроля.

### 3.3 Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от плоской донной поверхности и вогнутой донной поверхности

Оценка частотных параметров эхо-сигналов была проведена для отражателей типа плоская донная поверхность и вогнутая донная поверхность. В данном случае линейные размеры отражателей в значительной степени превышают длину ультразвуковой волны и поперечный размер пучка.

Генерация зондирующего импульса проводилась с использованием цифрового дефектоскопа PCUS-10. Излучение и прием ультразвуковых колебаний производились прямым совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями с рабочей частотой 4 МГц для донной поверхности и наклонным совмещенными пьезоэлектрическими преобразователями с рабочей частотой 5 МГц и углом ввода  $65^{\circ}$  для вогнутой поверхности.

При измерениях на плоской донной поверхности прямой совмещенный ПЭП с частотой 4 МГц размещался на средней линии поверхности образца. Перемещая преобразователь вдоль этой средней линии, мы последовательно сохраняли в памяти ПК А-сканы донных сигналов (порядка пяти А-сканов).

При измерениях на вогнутой плоской донной поверхности наклонный совмещенный ПЭП с номинальной частотой 5 МГц и углом ввода  $65^{\circ}$  размещался в центре поверхности ввода образца, так что длина пути ультразвука была максимальна. Именно в этой точке сохраняли А-скан донного сигнала в памяти ПК.

Затем, используя алгоритм, описанный в пункте 2.3.1.3, А-сканы от прямой и вогнутой донной поверхности анализировали с целью оценки частотных параметров. Одним из качественных результатов является огибающая эхо-сигнала и зависимость мгновенной частоты от времени, которые для наглядности приведены на одном рисунке.

На рисунке 3.12. приведены результаты оценки мгновенной частоты для плоской донной поверхности.

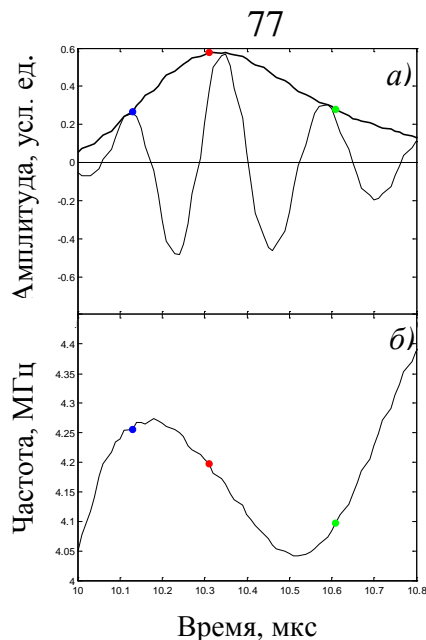


Рисунок 3.12 – Оценка мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от плоской донной поверхности, (ПЭП – П111-4): *а* – эхо-сигнал (А-скан) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени

Из рисунка 3.12б следует, что для плоской донной поверхности значение мгновенной частоты  $f_0$ , определенной в момент времени, соответствующий максимуму амплитуды огибающей (красный цвет), лежит между значениями  $f_1$  и  $f_2$  мгновенной частоты эхо-сигнала, которые определены в моменты времени, соответствующие половине ее максимального значения справа и слева от максимума (синий и зеленый цвета, соответственно). А именно значение  $f_0$  больше значения мгновенной частоты на срезе импульса  $f_2$ , но меньше значения частоты на фронте  $f_1$ . Само же значение мгновенной частоты  $f_0$ , соответствующей максимуму амплитуды огибающей, практически совпадает с номинальным значением частоты пьезоэлектрического преобразователя, которое составляет 4МГц.

В дальнейшем, используя значения мгновенных частот, соответствующих определенным моментам времени внутри импульса, были получены значения безразмерных параметров – нормированных девиаций частоты, определенных между центром, срезом и фронтом импульса (см. п. 2.3.1.3). Результаты оценки частотных параметров эхо-импульсов показаны в виде диаграммы, построенной на плоскости, где по осям отложены значения нормированных девиаций частоты.

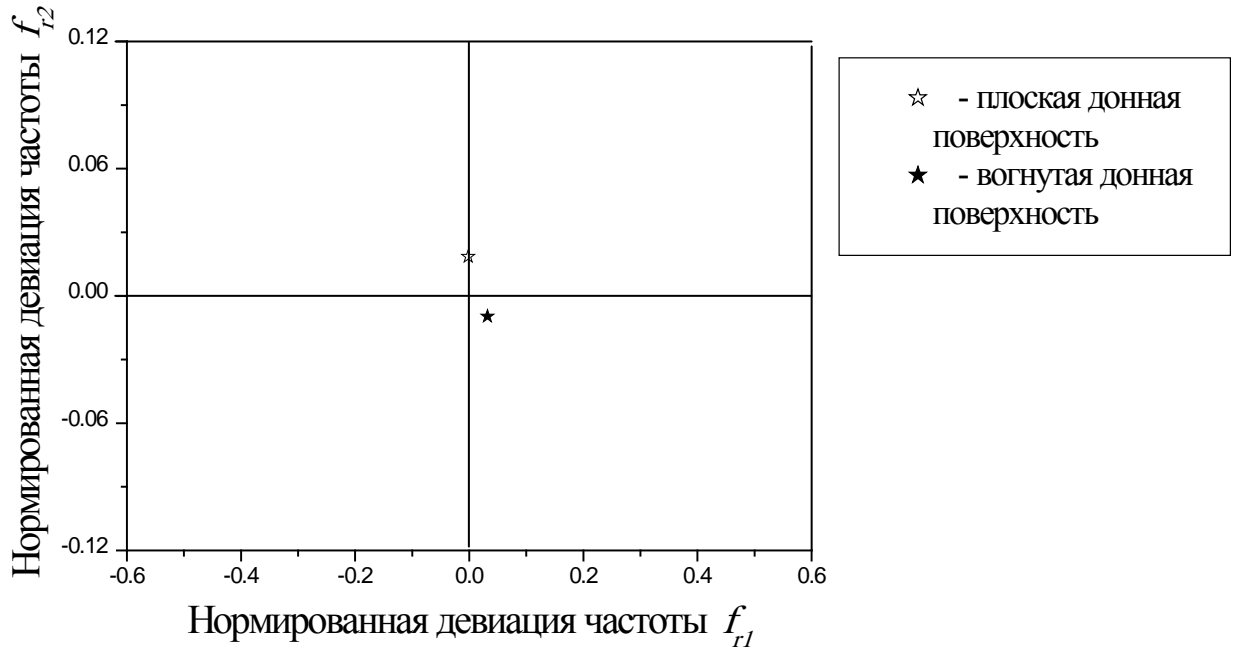


Рисунок 3.13 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от плоской (белый значок звездочки) и вогнутой (черный значок звездочки) донной поверхности

Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от плоской и вогнутой донной поверхности (рисунок 3.13), 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. При отражении сферического волнового фронта от донной вогнутой и плоской поверхности кривизна отраженного фронта будет мала. Следовательно, будет происходить незначительных сдвиг фаз между значениями поля в различных точках апертуры приемного преобразователя. Это в свою очередь, объясняет незначительное изменение мгновенной частоты эхо-сигнала.

### 3.4 Критерий оценки типа скрытого дефекта

Чтобы продемонстрировать возможность классификации отражателей по форме на основе использования оценки мгновенной частоты эхо-сигнала, приведем обобщенную диаграмму нормированных девиаций частоты (рисунок 3.14). Она позволит провести сравнительный анализ частотных параметров эхо-

сигналов от различных типов искусственных отражателей и естественного дефекта типа «непровар» в корне сварного шва и, на основе полученных качественных результатов, выработать критерий оценки типа скрытого дефекта.

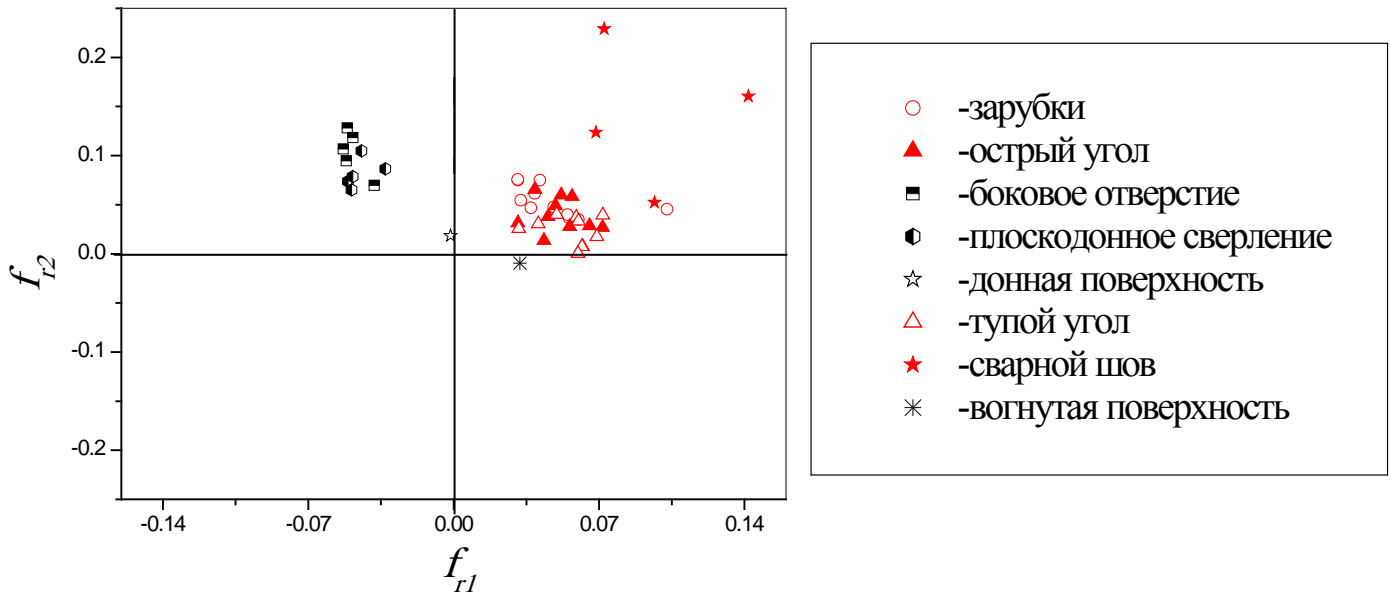


Рисунок 3.14 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от следующих отражателей: зарубки с разной площадью плоской передней грани; тупые и острые двугранные углы с различными углами раскрытия; «сквозные боковые цилиндрические отверстия»; «плоскодонные сверления»; плоская донная поверхность; вогнутая донная поверхность и естественный дефект «непровар» в корне сварного шва

Из экспериментальных результатов, полученных с использованием цифрового дефектоскопа PCUS-10 и совмещенных пьезоэлектрических преобразователей (см. рисунок 3.14), следует, что для плоскостных отражателей, выходящих на поверхность, значения  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  положительны во всем диапазоне измерений. Для плоскостных отражателей, не выходящих на поверхность,  $f_{r2}$  принимает положительные, а  $f_{r1}$  отрицательные значения, как и для «сквозных боковых цилиндрических отверстий».

На основе анализа представленных на рисунке 3.14 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 отличить плоскостные отражатели, выходящие на поверхность (зарубки, двугранные углы, «непровары» 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 выделять эхо-сигналы от такого рода дефектов, хотя, разумеется, с его помощью невозможно точно восстановить форму отражателя.

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

### **3.5 Приближенный анализ частотных параметров импульсного возбуждения приемного преобразователя с круговой апертурой волной с криволинейным волновым фронтом**

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на искусственных и естественных отражателях, показали, что при отражении ультразвукового сигнала от отражателей различной формы возможно изменение его частотных параметров. Чтобы подтвердить экспериментальные результаты теоретически, были выполнены исследования частотных параметров импульсных сигналов, получаемых на выходе приемного пьезоэлектрического преобразователя с круговой апертурой при взаимодействии с ним акустической волны с криволинейным волновым фронтом. Исследования были выполнены с использованием приближенных методов анализа пространственной структуры поля, основанных на представлениях геометрической акустики.

Рассмотрим сферический волновой фронт, падающий на плоский приемный преобразователь с круговой апертурой радиуса  $a$ . Как показано на рисунке 3.15, волна распространяется вдоль оси  $Oz$ , расстояние между излучателем и приемником равно  $Z$ , радиус кривизны волнового фронта –  $R$ .

На рисунке 3.15б сплошной и пунктирной линиями схематично показаны два сферических фронта, соответствующих различным фазам колебания волнового процесса в некоторый момент времени. Очевидно, что различные участки апертуры приемного преобразователя подвергаются воздействию колебаний с разными фазами. Сигнал на выходе приемного преобразователя является результатом сложения колебаний во всех точках на поверхности

апертуры. В частности, в случае плоского волнового фронта, падающего нормально на поверхность приемного преобразователя, происходит синфазное сложение колебаний во всех точках апертуры.

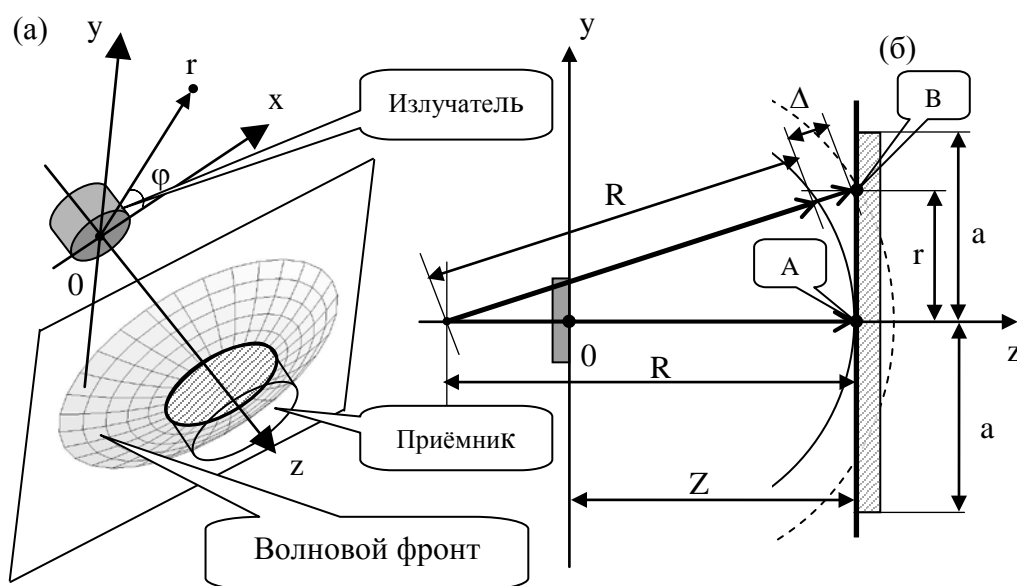


Рисунок 3.15 – Геометрия задачи. Взаимодействие сферического волнового фронта с круговой апертурой приемного преобразователя

Известно [81], что радиус кривизны волнового фронта зависит от расстояния между излучателем и приемником, формы и геометрических размеров излучателя, скорости распространения волны в среде и частоты. Очевидно, что амплитуда и фаза сигнала на выходе приемного преобразователя определяются радиусом кривизны волнового фронта. Следовательно, они будут зависеть и от частоты:  $R = R(\omega)$ , где  $\omega$  – круговая частота. Таким образом, при взаимодействии с криволинейным волновым фронтом, приемный преобразователь с плоской апертурой является частотным фильтром.

Введем комплексный коэффициент преобразования  $\dot{k}(\omega)$  такой системы следующим образом. Рассмотрим отношение сигналов на выходе приемного преобразователя, соответствующих сферическому и плоскому волновым фронтам и определим разность фаз между колебаниями в точках А и В, отмеченных на рисунке 3.15б. Она равна  $k\Delta(r)$ , где  $k = \frac{\omega}{c}$  – волновое число,  $c$  – фазовая скорость

волны,  $\Delta(r)$  – радиальное расстояние между волновыми фронтами в зависимости от радиальной координаты  $r$  точки В. Согласно рисунку 3.15б,  $R(\omega) + \Delta(r) = \sqrt{R^2(\omega) + r^2}$ . Тогда  $k_{\Delta}(r) = \frac{\omega}{c} \left( \sqrt{R^2(\omega) + r^2} - R(\omega) \right)$ . Учитывая, что сферический волновой фронт симметричен относительно оси  $Oz$ , получим следующее выражение для комплексного коэффициента преобразования:

$$\dot{K}(\omega) = \frac{\int_0^a r \exp\left(i \frac{\omega}{c} \sqrt{R^2(\omega) + r^2}\right) dr}{\int_0^a r dr} \exp\left(-i \frac{\omega}{c} R(\omega)\right). \quad (3.1)$$

Вычисляя интегралы в (3.1), получим формулу

$$\dot{K}(\omega) = \frac{2c}{\omega a^2} \left\{ i \left[ R(\omega) - \sqrt{R^2(\omega) + a^2} \exp\left(i \frac{\omega}{c} \left( \sqrt{R^2(\omega) + a^2} - R(\omega) \right) \right) \right] - \frac{c}{\omega} \left[ 1 - \exp\left(i \frac{\omega}{c} \left( \sqrt{R^2(\omega) + a^2} - R(\omega) \right) \right) \right] \right\}. \quad (3.2)$$

Зависимость комплексного коэффициента преобразования от нормированной круговой частоты  $(\omega a)/c$ , построенная с использованием выражения (3.2), представлена на рисунке 3.16а. Заметим, что для плоского волнового фронта  $R(\omega) \rightarrow \infty$  и  $\dot{K}(\omega) = 1$ .

Рассмотрим импульсный сигнал с гауссовой огибающей

$$s(t) = s_0 \exp\left(-\alpha^2 t^2\right) \cos(\omega_0 t + \phi_0), \quad (3.3)$$

где  $s_0$  – амплитуда сигнала,  $\alpha$  – константа, определяющая длительность сигнала,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  – несущая частота,  $\phi_0$  – начальная фаза несущего колебания.

Фурье-спектр сигнала (3.3) можно определить с использованием формулы

$$\dot{S}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(i\omega t) dt. \quad (3.4)$$

Подставляя (3.3) в (3.4), получим следующее выражение для Фурье-спектра

$$\dot{S}(\omega) = \frac{s_0 \pi}{2} \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{(\omega + \omega_0)^2}{4\alpha^2}\right) + \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\alpha^2}\right) \right] \cos \phi_0 + i \left[ \exp\left(-\frac{(\omega + \omega_0)^2}{4\alpha^2}\right) - \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\alpha^2}\right) \right] \sin \phi_0 \right\}. \quad (3.5)$$

Определим зависимость радиуса кривизны волнового фронта от частоты в виде

$$R(\omega) = \xi \cdot \frac{\omega a^2}{2c} \cdot \frac{2Zc}{\omega a^2} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{2Zc}{\omega a^2} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (3.6)$$

Данное выражение следует из параболической теории дифракции [81]. При  $\xi=1$  формула (3.6) задает радиус кривизны волнового фронта при гауссовом распределении поля на апертуре излучателя. Другие законы распределения поля изменяют значения радиуса кривизны, что учтено в выражении (3.6) введением эмпирического коэффициента формы излучателя  $\xi$ .

Комплексный аналитический сигнал [12] на выходе приемного преобразователя можно записать в виде обратного преобразования Фурье с учетом комплексного коэффициента преобразования  $\dot{K}(\omega)$  и фазового множителя, учитывающего расстояние  $Z$  между излучателем и приемником:

$$z_u(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \dot{S}(\omega) \dot{K}(\omega) \exp \left[ i \left( \frac{Z}{c} - t \right) \omega \right] d\omega. \quad (3.7)$$

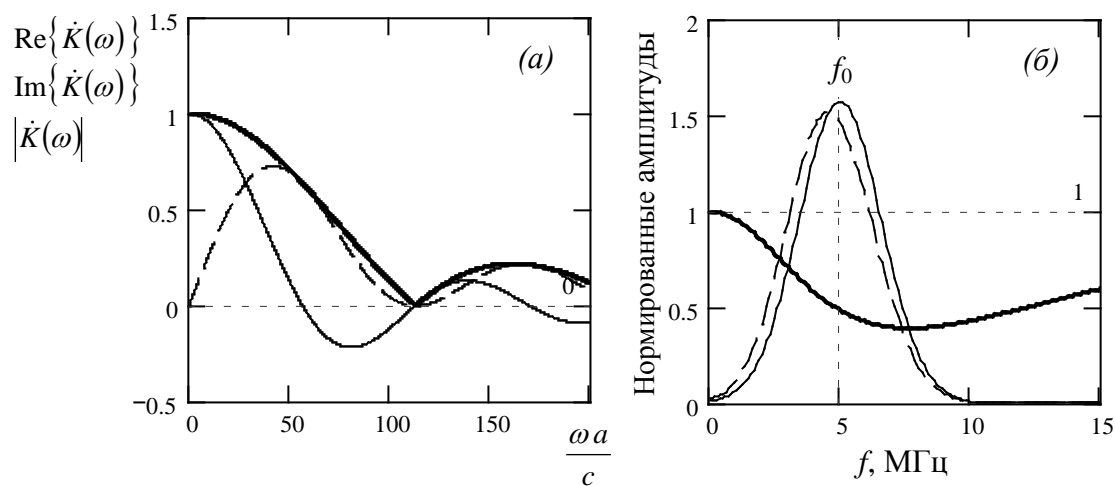


Рисунок 3.16 – Зависимость комплексного коэффициента преобразования от нормированной круговой частоты (сплошная линия – вещественная часть, пунктирная линия – мнимая часть, жирная сплошная линия – модуль) – (а); модули спектров излученного сигнала (сплошная линия), сигнала на выходе приемного преобразователя (пунктирная линия), модуль комплексного коэффициента преобразования (жирная сплошная линия) – (б)

Рассчитаем форму принятого сигнала для импульса волны с несущей частотой  $f_0 = 5$  МГц, распространяющейся в среде со скоростью  $c = 5900$  м/с. Сигнал принимается преобразователем с радиусом  $a = 1.6$  мм при расстоянии между излучателем и приемником  $Z = 5$  мм. Для расчетов будем использовать следующие значения параметров:  $\phi_0 = \pi/4$ ,  $\alpha = 7 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ,  $\xi = 0.1$ .

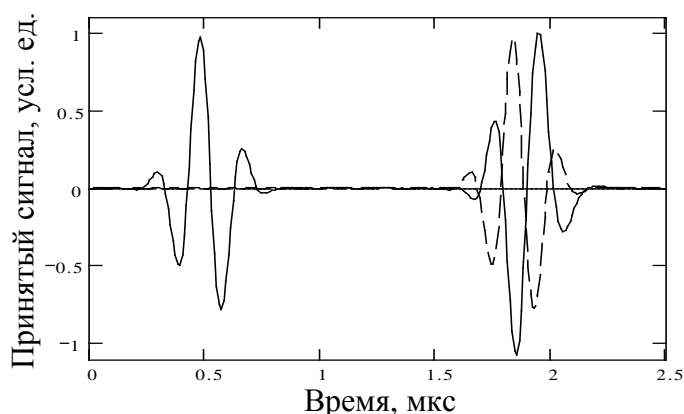


Рисунок 3.17 – Импульсные сигналы: излученный (слева) и полученный на выходе приемного преобразователя (справа). Пунктиром показан сигнал на выходе приемного преобразователя, соответствующий плоскому волновому фронту

Используя соотношение (3.7), определим сигнал на выходе приемного преобразователя  $u(t) = \text{Re}\{\dot{z}_u(t)\}$ . Результат представлен на рисунке 3.17, где для сравнения также показан сигнал на выходе приемного преобразователя, соответствующий плоскому волновому фронту. Очевидно, что влияние кривизны волнового фронта приводит к изменению формы сигнала и появлению дополнительной временной задержки. Кроме того, согласно рисунку 3.16б, частота максимума спектра на выходе приемного преобразователя меньше, чем у спектра исходного сигнала.

Определим временную зависимость мгновенной частоты сигнала  $u(t)$ , которую можно найти с использованием аналитического сигнала (3.7), по формуле [75]

$$\tilde{f}(t) = \frac{1}{2\pi} \text{Im} \left\{ \frac{1}{z_u(t)} \frac{d z_u(t)}{dt} \right\}. \quad (3.8)$$

Результат представлен на рисунке 3.18а, где также показана огибающая сигнала на выходе приемного преобразователя и обозначены три момента времени [75]:  $t_0$ , соответствующий положению максимума огибающей, а также  $t_1$  и  $t_2$ , являющиеся координатами точек, в которых величина огибающей составляет половину от максимального значения и располагающиеся, соответственно, слева и справа от  $t_0$ .

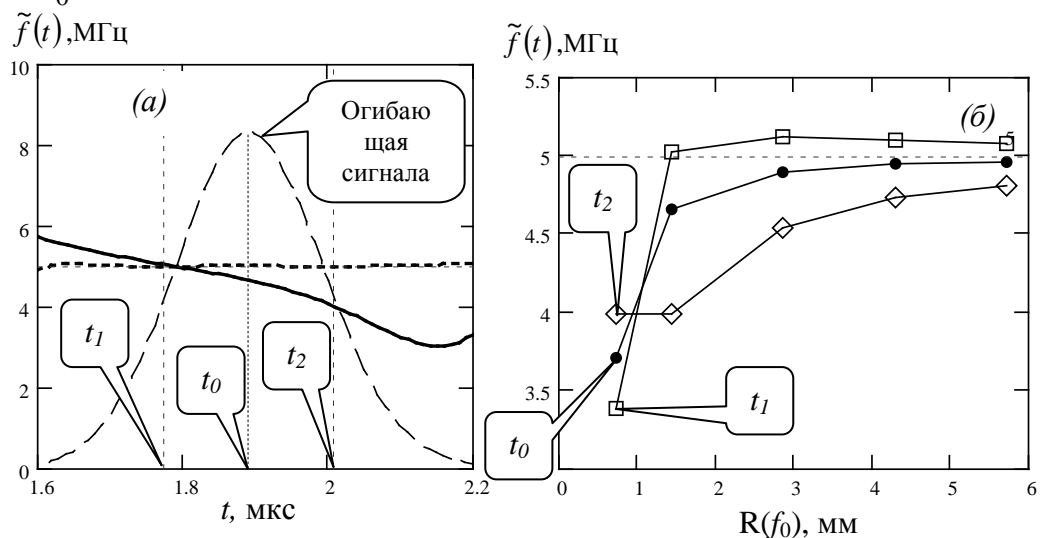


Рисунок 3.18 – Зависимость мгновенной частоты сигнала, полученного на выходе приемного преобразователя (сплошная линия): а – от времени; б – от радиуса кривизны волнового фронта, соответствующие моментам времени  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$

На рисунке 3.18б представлены зависимости значений мгновенной частоты от радиуса кривизны волнового фронта при  $f = f_0$ , которые соответствуют моментам времени  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ . Пунктиром на рисунке 3.18а показана зависимость, соответствующая плоскому волновому фронту.

Заметим, что данные параметры предлагается использовать для классификации отражателей по частотным характеристикам эхо-сигналов в задачах ультразвуковой дефектоскопии [75, 82].

Показано, 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.

### 3.6 Выводы к главе 3

1. По результатам экспериментальных исследований зависимости мгновенной частоты от типа искусственных отражателей и естественных дефектов в сварных швах, а также на основе построенной аналитической модели, объясняющей зависимость мгновенной частоты от типа отражателя, предложен новый способ оценки типа скрытых дефектов при реализации ультразвукового эхо-метода неразрушающего контроля.

2. Показано, что выработанный критерий оценки типа скрытого дефекта – соотношение между нормированными девиациями частоты – позволяет уверенно отличать плоскостные отражатели, выходящие на поверхность (зарубки, двугранные углы, «непровары» сварного шва) от других типов отражателей. При этом зарубки и двугранные углы, моделируют очень 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.

3. Полученные результаты необходимо учитывать и при практическом применении эхо-импульсного метода ультразвукового неразрушающего контроля [83], поскольку пренебрежение эффектом отклонения частоты от номинального значения может привести к нарушению требований стандартов [8] по допуску на рабочую частоту пьезоэлектрического преобразователя.

4. Новый способ оценки типа скрытых дефектов с использованием мгновенной частоты недетектированного радиочастотного эхо-сигнала, разработанный 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 09.01.2013г. на изобретение «Способ определения типа дефекта в металлургических изделиях».



## **4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ТИПА ОТРАЖАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ И МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЭХО-СИГНАЛОВ**

Вопрос определения типа скрытого дефекта может быть решен посредством ультразвуковой компьютерной томографии. Для того, чтобы сравнить результаты оценки типа отражателей, полученные томографическим методом, с результатами, полученными на основе использования оценки мгновенной частоты эхо-сигнала, в данной главе в виде «томограмм» будут представлены результаты визуализации искусственных и естественных отражателей различной формы. Эти «томограммы» получены с использованием универсального портативного ультразвукового дефектоскопа-томографа A1550 IntroVisor. «Томограммы» представляют собой двумерное изображение внутреннего сечения объема образцов и позволяют, при определенных условиях, судить о форме, расположенных в этих образцах, искусственных и естественных отражателей. В данной главе будут рассмотрены ограничения использования ультразвуковой компьютерной томографии для оценки типа отражателя. Результаты данной главы опубликованы в работе [32, 100].

### **4.1 Возможности ультразвуковой компьютерной томографии**

#### **4.1.1 Ультразвуковой дефектоскоп A1550 IntroVisor**

A1550 IntroVisor (рисунок 4.1) – универсальный портативный ультразвуковой дефектоскоп-томограф с цифровой фокусировкой антенной решетки и томографической обработкой данных для контроля металлов и пластмасс [5, 6].

A1550 IntroVisor представляет собой достаточно легкий и удобный в использовании портативный прибор, предназначенный для решения задач ультразвуковой дефектоскопии металлов и пластмасс. Данный дефектоскоп-

томограф обеспечивает быстрый, наглядный и достоверный поиск дефектов благодаря визуализации внутренней структуры объекта контроля в виде изображения сечения в режиме реального времени. Это существенно упрощает и делает более доступной интерпретацию полученной информации по сравнению с обычным дефектоскопом [28].



Рисунок 4.1 – Ультразвуковой дефектоскоп A1550 IntroVisor

К преимуществам такого дефектоскопа можно отнести высокую эффективность и быстроту. Дефектоскоп обеспечивает подробное документирование полученных результатов, позволяет осуществить визуализацию внутренней структуры объекта контроля в режиме реального времени с частотой смены изображения 25 кадров в секунду. При этом скорость сканирования вдоль сварного соединения может достигать 50 мм/с. Данный прибор позволяет проводить ультразвуковой контроль вдоль линии сварного шва без поперечного сканирования. Это обеспечивается большим размером апертуры антенных решеток и сканированием виртуальным фокусом на дальние расстояния, что существенно сокращает время на подготовку околошовной поверхности сварных соединений, повышая производительность контроля. Результаты визуализации внутренней структуры объекта контроля в таком дефектоскопе представляются в виде наглядного и достоверного изображения сечения – «томограмма» – в режиме реального времени с удобными шкалами

расстояния и глубины, что существенно упрощает и делает более доступной интерпретацию полученной информации. В приборе предусмотрена регулировка масштаба изображения в достаточно широких пределах: от обзора 250 мм до 5 мм на весь экран. Кроме того, с помощью такой системы можно осуществлять автоматические и ручные измерения уровней сигналов, координат и размеров дефектов, расстояний между образцами несплошностей по экрану.

Высокая достоверность контроля – это еще одно из достоинств цифрового дефектоскопа-томографа **A1550 IntroVisor**. Наилучшее пространственное разрешение, максимальная чувствительность по всей визуализируемой области, высокая производительность контроля, чувствительность к различным типам несплошностей, а так же отображение образов вертикально-ориентированных дефектов обеспечивается в данном случае принципом цифровой (вычислительной) фокусировки антенной решетки (ЦФА) с получением «томограмм» сфокусированных в каждую точку сечения.

Прибор является достаточно простым в настройке и использовании. Интерфейс дефектоскопа имеет простое и удобное МЕНЮ, интуитивный интерфейс с клавишами быстрого доступа к основным настройкам и параметрам, а также оперативное переключение между режимами ТОМОГРАФ и ДЕФЕКТОСКОП с соответствующей заменой антенной решетки на классический преобразователь. Можно оперативно выбрать и установить параметры рабочей конфигурации под каждый конкретный объект контроля.

Дефектоскоп имеет возможность работы в режиме томографа – «томограмма», в режиме классического дефектоскопа (А-скан), а так же в режиме сканирования вдоль линии сварного шва (С-скан) с последующей записью полученных результатов в память прибора. Небольшими габаритными размерами при весе всего 1,9 кг и быстросменным литиевым аккумулятором на 8 часов работы обеспечивается портативность прибора. Благодаря большому цветному дисплею обеспечивается представление, как графического образа сечения, так и результатов измерения координат и уровней сигналов. В дефектоскопе-томографе **A1550 IntroVisor** предусмотрена энергонезависимая память, позволяющая

записывать «томограммы» и эхо-сигналы с возможностью просмотра на ПК без специального программного обеспечения. В системе обеспечивается связь по USB для вывода записанных данных на внешний компьютер, а так же создано специализированное программное обеспечение для приема данных из прибора, дальнейшей обработки, документирования в виде «томограмм» и эхо-сигналов с параметрами контроля и последующего архивирования [28].

На рисунке 4.2 показан интерфейс цифрового дефектоскопа-томографа в режиме «ТОМОГРАФ». Данная «томограмма» получена на образце с искусственными отражателями типа «зарубка» с площадью плоской передней грани  $8,5 \text{ мм}^2$ . По осям координат на этих и последующих изображениях по вертикали отложена глубина залегания отражателя относительно поверхности ввода, по горизонтали – координата вдоль поверхности сканирования. Цветом определены амплитуды излученных сигналов. «Ноль» по горизонтали соответствует середине апертуры антенной решетки.

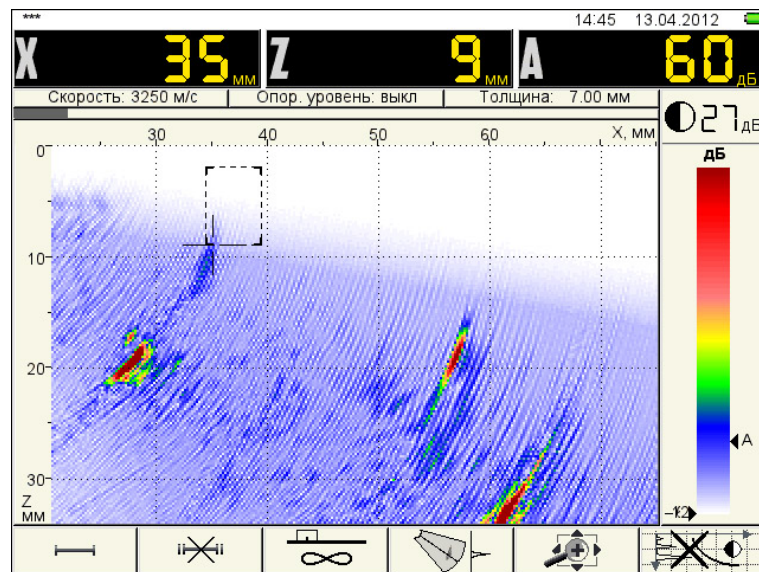


Рисунок 4.2 – Интерфейс цифрового дефектоскопа-томографа A1550 IntroVisor в режиме «ТОМОГРАФ». «Томограмма» получена на образце с искусственным отражателем типа «зарубка»

#### 4.1.2 Фазированные антенные решетки

Ультразвуковая компьютерная томография реализуется на основе применения фазированных антенных решеток (рисунок 4.3) с управляемыми фазами или разностями фаз волн, излучаемых и принимаемых её элементами. Благодаря возможности управления фазами такие решетки позволяют формировать необходимую диаграмму направленности (ДН) ФАР (например, остронаправленную ДН-луч) при разнообразных расположениях излучателей. Кроме этого управление фазами позволяет изменять направление луча неподвижной ФАР для быстрого сканирования – качания луча и управлять формой ДН в определённых пределах, изменяя ширину луча, интенсивность боковых лепестков и т.д. Перечисленные свойства ФАР, к которым также можно отнести возможность применять для управления ФАР современные средства автоматики и ЭВМ, обеспечивают им перспективность и широкое использование в неразрушающем контроле [84].



Рисунок 4.3 – Фазированная антенная решетка *M9060 4.0V0R40X10CL* – 16-элементная АР продольных волн с центральной рабочей частотой 4 МГц и сектором обзора  $\pm 30^\circ$

С томографом A1550 IntroVisor используются следующие ФАР, ориентированные на различные области применения:

- *M9060 4.0V0R40X10CL* – 16-элементная АР продольных волн с центральной рабочей частотой 4 МГц и сектором обзора  $\pm 30^\circ$ . Применяется для контроля основного тела металлических и пластиковых конструкций;
- *M9065 4.0V60R40X10CS* – 16-элементная АР поперечных волн с центральной рабочей частотой 4 МГц и сектором обзора от  $30^\circ$  до  $80^\circ$ . Применяется для контроля сварных швов (в том числе аустенитных). Особенностью данной АР является отсутствие большой преломляющей призмы.

## 4.2 Исследуемые образцы

Для проведения экспериментальных исследований с использованием цифрового дефектоскопа A1550 IntroVisor в режиме «ТОМОГРАФ» на основе применения фазированных антенных решеток, в основном были выбраны образцы с наборами тех же искусственных и естественных отражателей (см. рисунок 2.2), на которых были проведены измерения цифровым дефектоскопом PCUS-10:

- зарубки с разной площадью плоской передней грани от  $1 \text{ мм}^2$  до  $8,75 \text{ мм}^2$  (см. рисунок 2.2а);
- двугранные углы с различными углами раскрытия от  $56^\circ$  до  $90^\circ$  для острых углов и от  $90^\circ$  до  $125^\circ$  для тупых углов (см. рисунок 2.2б);
- плоская ступенчатая донная поверхность образца;
- вогнутая донная поверхность образца СОЗ (см. рисунок 2.2г);
- «сквозные боковые цилиндрические» отверстия либо разного диаметра от 2 мм до 6 мм, находящиеся на одной глубине 30 мм (см. рисунок 2.2д), либо равного диаметра 2 мм, находящиеся на разной глубине от 25 мм до 45 мм (см. рисунок 2.2е);
- «плоскодонные сверления» либо разного диаметра от 2 мм до 6 мм, находящиеся на одной глубине 32 мм (см. рисунок 2.2ж), либо

равного диаметра 2 мм, находящиеся на разной глубине от 27 мм до 52 мм (см. рисунок 2.2з).

Для сравнительного анализа результатов, полученных на искусственных и естественных отражателях, измерения были проведены на сварном шве с заранее известным типом дефекта – «непроваром» в корне стыкового сварного шва, протяженным по всей длине шва (см. рисунок 2.3). Образец выполнен из стали Ст 10, его толщина составляет 7 мм, ширина усиления сварного шва 11 мм. Тип дефекта был заранее известен из рентгеновской дефектограммы.

### **4.3 Результаты визуализации искусственных и естественных отражателей**

На рисунке 4.4а и 4.4б показаны результаты визуализации – «томограммы» – искусственных отражателей типа «сквозное боковое цилиндрическое отверстие» и «плоскодонное сверление», соответственно. Измерения проводились 16-элементной фазированной антенной решеткой с прямыми преобразователями, номинальная рабочая частота которой 4 МГц. Апертура решетки в плоскости визуализации (активная апертура) приблизительно равна 40 мм. Диаметр отверстий в том и другом случае составлял 2 мм и 4 мм, «сквозные боковые цилиндрические отверстия» находятся на глубине 30 мм, а «плоскодонные сверления» на глубине 32 мм. Таким образом, линейные размеры отражателей больше длины ультразвуковой волны, которая в данном случае составляет 1,475 мм. Так же на рисунке виден сигнал от донной поверхности образца. По осям координат на этих и последующих изображениях по вертикали отложена глубина залегания отражателя относительно поверхности ввода, по горизонтали – координата вдоль поверхности сканирования. Цветом определены амплитуды излученных сигналов. «Ноль» по горизонтали соответствует середине апертуры антенной решетки. Полученные «томограммы» говорят о том, что по результатам ультразвуковой компьютерной томографии вполне достоверно восстанавливается форма «плоскодонного сверления» (см., например, рисунок 4.4.б). В данном

случае характерные линейные размеры отражателя больше длины ультразвуковой волны, а также отсутствуют многократные отражения зондирующего сигнала от поверхностей отражателя, так как отражающая поверхность имеет достаточно простую форму. В случае же со «сквозным боковым цилиндрическим отверстием» форма отражателей, отображаемая дефектоскопом на «томограммах» (см., например, рисунок 4.4.а) немного отличается от реальной. Это обусловлено тем, что геометрия отражателя немного сложнее, чем в случае «плоскодонного сверления», происходят дополнительные переотражения зондирующего сигнала от поверхности отражателя, имеющего немного более сложную пространственную ориентацию.

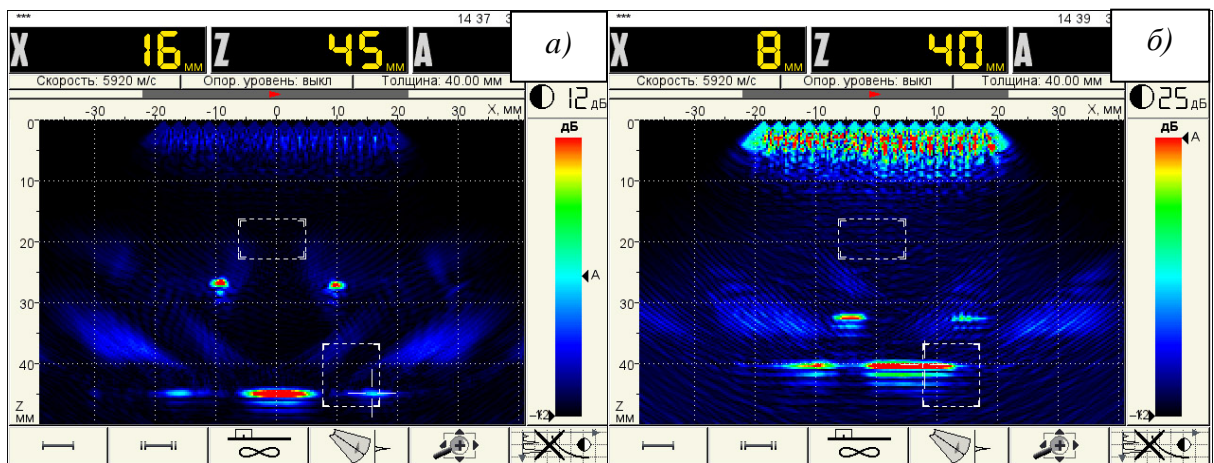


Рисунок 4.4 – Результаты визуализации: а – «сквозные боковые цилиндрические отверстия»; б – «плоскодонные сверления»

Результаты оценки мгновенной частоты для данного типа отражателей (см, например, рисунки 3.13 и 3.14) показали, что при линейных размерах отражателей близких к длине ультразвуковой волны точки на диаграмме группируются во втором квадранте по направлению от начала координат, что характерно для расположенных внутри образцов отражателей с простой геометрией поверхности.

На рисунке 4.5а и 4.5б показаны результаты визуализации – «томограммы» – искусственных отражателей типа – ступенчатая поверхность образца и вогнутая поверхность образца СОЗ, соответственно. Ступеньки находятся на глубине 40 мм и 35 мм. Радиус кривизны образца СОЗ составляет 55 мм. В том и другом



случае линейные размеры отражателей много больше длины ультразвуковой волны. Измерения также проводились 16-элементной фазированной антенной решеткой с прямыми преобразователями, номинальная рабочая частота которой 4 МГц. Полученные «томограммы» говорят о том, что по результатам ультразвуковой компьютерной томографии достаточно точно восстанавливается форма вогнутой и ступенчатой донной поверхности. В данном случае характерные линейные размеры отражателей значительно превышают длину ультразвуковой волны и отсутствуют многократные отражения зондирующего сигнала от поверхностей отражателя, так как форма отражающей поверхности достаточно простая.

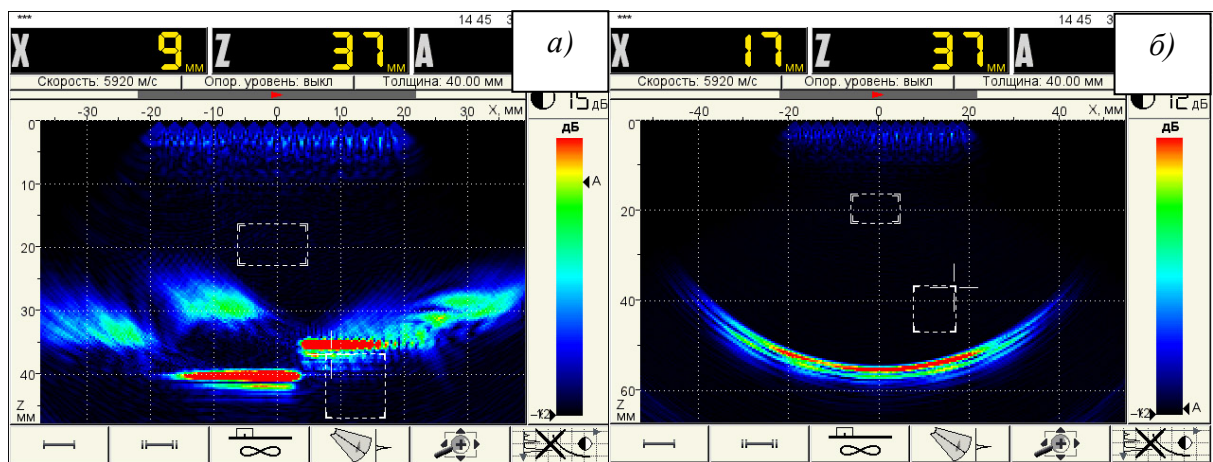


Рисунок 4.5 – Результаты визуализации: *а* – плоская ступенчатая поверхности; *б* – вогнутая поверхность

Результаты оценки мгновенной частоты для данного типа отражателей (см, например, рисунок 3.17 (пункт 3.4) показали, что значения параметров  $f_{r1}$  и  $f_{r2}$  для эхо-сигналов, полученных от отражателей, линейные размеры которых значительно превышают длину ультразвуковой волны, близки к нулю. Соответствующие им точки лежат на диаграмме вблизи от начала координат.

На рисунке 4.6а и 4.6б показаны результаты визуализации – «томограммы» – искусственных отражателей типа – зарубка и двугранный угол (рисунок 4.6а), и острый угол  $29,5^\circ$  (рисунок 4.6б). Линейные размеры отражателей и для зарубки и для двугранного угла больше длины ультразвуковой волны, которая в случае фазированной антенной решетки поперечных ультразвуковых волн равна 0.8 мм.

Измерения проводились 16-элементной фазированной антенной решеткой поперечных ультразвуковых волн, настроенной на частоту 4 МГц. Апертура решетки в плоскости визуализации (активная апертура) приблизительно равна 40 мм. Сектор обзора был выбран от  $33^{\circ}$  до  $75^{\circ}$  (по отношению к нормали к поверхности объекта контроля). По осям координат на этих и последующих изображениях отложены миллиметры. «Ноль» по горизонтали соответствует середине апертуры антенной решетки.

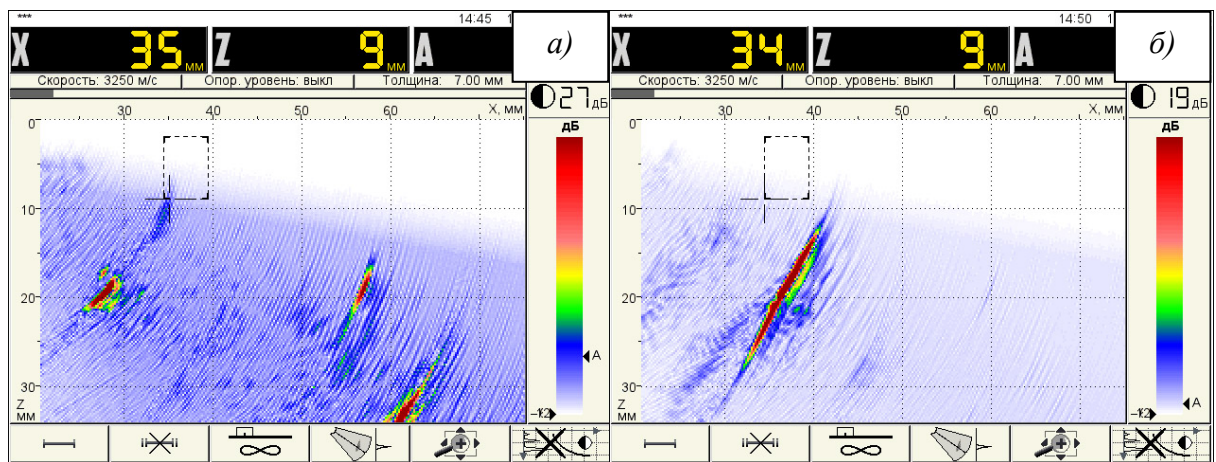


Рисунок 4.6 – Результаты визуализации: *а* – зарубка; *б* – острый угол  $29,5^{\circ}$

Полученные результаты ультразвуковой компьютерной томографии свидетельствуют о том, что форма зарубки и двугранного угла, отображаемая дефектоскопом на «томограммах» (см., например, рисунки 4.6*а* и 4.6*б*) существенно отличается от реальной. В случае зарубки характерные линейные размеры отражателя немного больше длины ультразвуковой волны, в случае же двугранного угла эти размеры в значительной степени превышают длину волны. Однако и в том и в другом случае геометрия отражающей поверхности достаточно сложная и, как следствие, происходят многократные отражения зондирующего сигнала от поверхностей отражателя, обусловленные сложной пространственной ориентацией отражателей. То есть в случае таких уголкового отражателей, как зарубка и двугранный угол, которые являются плоскостными выходящими на поверхность, восстановление формы по результатам компьютерной томографии затруднено.

Результаты оценки мгновенной частоты для, выходящих на поверхность, плоскостных отражателей типа зарубок и двугранных углов (см., например, рисунок 3.10) показали, что, если поверхности отражателя имеют существенно различную пространственную ориентацию, которая приводит к многократному взаимодействию зондирующего сигнала с отражателем, то точки на диаграмме перемещаются в первый квадрант по направлению от начала координат. Это, в свою очередь, позволяет достоверно отличить плоскостные отражатели, выходящие на поверхность, от других типов отражателей типа «сквозных боковых цилиндрических отверстий» и «плоскодонных сверлений», точки для которых группируются во втором квадранте диаграммы.

Для того чтобы сравнить данные, полученные на искусственных и естественных плоскостных отражателях, выходящих на поверхность, на рисунке 4.7а и 4.7б показаны результаты визуализации – «томограммы» – естественного дефекта – «непровара» в корне шва, протяженного по всей длине шва. Измерения проводились также наклонной фазированной антенной решеткой на частоте 4 МГц. Сектор обзора был выбран узкий от  $80^{\circ}$  до  $85^{\circ}$ , чтобы исключить лишние отражения из «томограммы». Такой тип естественного дефекта также относится к плоскостным отражателям, выходящим на поверхность. Полученные результаты ультразвуковой компьютерной томографии свидетельствуют о том, что восстановление формы такого естественного дефекта, как в случае с зарубкой и двугранным углом, неточное. Очень сложно, исходя из отображаемого дефектоскопом изображения дефекта, судить о его типе. В данном случае характерные линейные размеры отражателя больше длины ультразвуковой волны, а геометрия отражающей поверхности достаточно сложная. По этой причине происходят многократные отражения зондирующего сигнала от поверхностей отражателя, обусловленные сложной пространственной ориентацией отражателя. То есть в этом случае восстановление формы по результатам компьютерной томографии также затруднено.

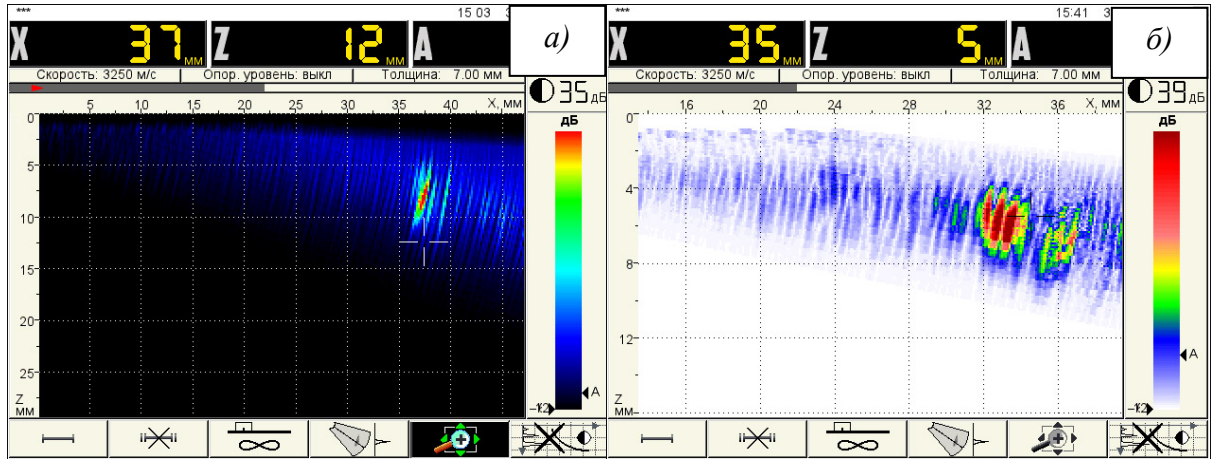


Рисунок 4.7 – Результаты визуализации «непровара» в корне сварного шва

Результаты оценки мгновенной частоты для «непровара» в корне сварного шва (см. рисунок 3.10) показали, что точки на диаграмме перемещаются в первый квадрант по направлению от начала координат, поскольку, как и в случае с зарубками и двугранными углами, поверхности отражателя имеют существенно различную пространственную ориентацию, которая приводит к многократному взаимодействию зондирующего сигнала с отражателем.

Таким образом, 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» (см., например, рисунки 4.6, 4.7) отличается от реальной.

#### 4.4 Выводы к главе 4

1. Сравнительный анализ результатов оценки типа искусственных отражателей и естественных дефектов в сварных швах, полученных с использованием компьютерной томографии в виде «томограмм», с результатами, полученными на основе использования критерия оценки мгновенной частоты эхо-сигнала, показал, что визуализация отражателя, достоверно отражающая его реальную геометрическую форму, возможна при условии, что его характерные линейные размеры больше длины ультразвуковой волны и отражающая поверхность имеет достаточно простую форму, исключая возможность многократного взаимодействия зондирующего сигнала с отражателем. Последнему условию не удовлетворяют, в частности, отражатели типа зарубок и двугранных углов, которые являются моделями трещин, выходящих на поверхность, «непроваров» в корне сварных швов, представляющих собой чрезвычайно опасный вид дефектов, которые должны обязательно выявляться при проведении неразрушающего контроля изделий. 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. Таким образом, применение предложенного нами способа классификации отражателей на основе использования оценок мгновенной частоты эхо-сигналов позволяет повысить достоверность распознавания дефектов типа трещин, выходящих на поверхность, непроваров в корне сварных швов.

2. В отличие от компьютерной томографии, предложенный в диссертационной работе способ позволяет определить тип дефекта с использованием стандартной аппаратуры, используемой в практике ультразвуковой дефектоскопии.

## **5. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ**

В данной главе будут 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 отверстия» и «сквозного бокового цилиндрического отверстия».

Результаты данной главы опубликованы в работе [31, 101].

### **5.1 Жаропрочные сплавы на никелевой основе. Особенности эксплуатации и контроля изделий из жаропрочных сплавов**

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 [85]. Такие элементы конструкции работают при высоких температурах и нагрузках. Они имеют переменное сечение с наличием большого количества концентраторов напряжений: каналы охлаждения, крепежные отверстия, замки лопаток и т.д. При эксплуатации детали подвергаются воздействию длительных растягивающих статических напряжений при суммарном влиянии термических напряжений и вибрационных нагрузок, что приводит к образованию усталостных трещин. Также на стабильность структуры сплава отрицательно влияет «заброс» температуры, который представляет собой ее кратковременное повышение с выходом из интервала рабочих температур.

В настоящее время в качестве основных жаропрочных материалов, которые обеспечивают высокие эксплуатационные качества турбин, используются никелевые сплавы [86], структура которых образована сложнелегированным твердым раствором на основе никеля и дисперсными частицами интерметаллидной упрочняющей фазы  $\text{Ni}_3\text{Al}$  ( $\gamma'$ -фаза). Основные требования, предъявляемые к материалам этих деталей: высокая прочность во всём диапазоне рабочих температур; высокая пластичность как при длительном, так и при кратковременном нагружении; высокая коррозионная стойкость; технологичность; сопротивляемость малоциклового усталости.

Сплавы, которые содержат менее 30 % упрочняющей фазы, относятся к деформируемым. При большем количестве упрочняющей  $\gamma'$ -фазы детали изготавливают с помощью литья. Присутствие в сплаве  $\gamma'$ -фазы повышает жаропрочность, однако увеличение ее содержания приводит к тому, что сплавы приобретают склонность к образованию горячих трещин при штамповке, сварке и термической обработке.

В данной главе будут рассматриваться литейные сплавы с объемной долей  $\gamma'$ -фазы выше 40 %. Поликристаллические турбинные лопатки используют для стационарных установок (600-900 °С). Монокристаллические лопатки являются наиболее перспективными для авиационных двигателей (1000-1150 °С).

Образование трещин может происходить в процессе изготовления изделий. Одна из причин – металлургические дефекты [87, 88]. Однако наиболее интересной является задача выявления трещин, возникших в процессе эксплуатации изделия [89, 90, 91]. В связи с нарастающей тенденцией продления сроков эксплуатации детали после того, как выработан ее ресурс, заявленный заводом-изготовителем, особо актуальным становится вопрос неразрушающего контроля. В этом случае трещины, не выявленные своевременно, могут стать причиной аварии.

В качестве примера можно привести аварийное разрушение рабочей лопатки газовой турбины ГТЭ-45-3 производства ОАО «Турбоатом» мощностью

до 180 МВт, которая эксплуатировалась на Якутской ГРЭС. Лопатка была изготовлена из сплава ХН60КМВЮБ (ЭП-800), с объемной долей  $\gamma'$ -фазы 40 % [92]. Разрушение произошло после наработки 38260 ч (4 года 4.5 мес.; 84 пуска) при температуре 850 °С, срок эксплуатации, заявленный заводом изготовителем, был 27000 ч.

В принципе, ультразвуковой контроль позволяет обнаруживать опасные дефекты. Одним из примеров применения ультразвукового метода для контроля жаропрочных материалов является Ступинская металлургическая компания, где применяется УЗК для контроля штампованных заготовок из жаропрочных сплавов [93].

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 будут рассмотрены вопросы выявляемости искусственных отражателей в монокристаллических жаропрочных сплавах, разрешающей способности и соотношения сигнал/шум, как необходимые начальные этапы построения технологии контроля. Также будет приведен пример выявления реального дефекта в детали из поликристаллического сплава. Исследования по данной теме проводятся на базе ранее проведенного подробного изучения акустических свойств моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов, как модельных тройных сплавов, так и изготавливаемых промышленностью [94-96]. Данные о модулях упругости, скоростях упругих волн и коэффициентах затухания будут использованы в данной главе.



## 5.2 Приготовление образцов и выполнение экспериментов

Исследования проводились на 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 табл. 5.1 приведены данные о химическом составе сплавов. Объемная доля  $\gamma'$ -фазы в промышленных сплавах приведена по [96].

Лопатка из сплава ЧС-70В была изготовлена в промышленных условиях. Металлографическое исследование этой лопатки выявило структуру литого сплава с крупными зернами (от 100 до 800 мкм).

Таблица 5.1 – Химический состав сплавов

Сплав	Ni	C	Cr	Ti	Al	W	Co	Mo	Si	Количество $\gamma'$ -фазы, об. %
ЦНК-8МП	63.1	0.02	12.0	4.1	4.2	7.0	9.1	0.5	–	47
ВКНА-4У	74.5	≤0.02	5.2	1.0	8.8	2.3	4.1	5.0	–	90
ЧС70-В	57.0	0.10	16.0	4.8	3.0	5.5	11.0	2.0	<0.4	45

Сплавы ЦНК-8МП и ВКНА-4У выплавлены в вакуумной дуговой печи в атмосфере гелия в отделе прецизионной металлургии ИФМ УрО РАН. Литые поликристаллические образцы предварительно подвергались гомогенизирующему отжигу в вакууме в течение 24 ч при 1000 °С. Металлографическое исследование образцов выявило в них области размером порядка 1000 мкм с близкой ориентацией дендритных стволов, которые в значительной степени разориентированы друг относительно друга. Выполнен статистический анализ объектов ростовой структуры. Характерный размер структурных элементов, равный расстоянию между вторичными ветвями дендритов  $d$ , составляет 20 мкм для сплава ЦНК-8МП. В ростовой структуре образца сплава ВКНА-4У выявлены более крупные элементы:  $d=100$  мкм.

Монокристаллические образцы исследованных сплавов получали методом направленной кристаллизации (метод Бриджмена). В этом случае скорость кристаллизации была 1 мм/мин., градиент на фронте кристаллизации 80 %/см. Образцы имеют дендритную структуру и находятся в литом состоянии. Средняя длина объекта ростовой структуры для ВКНА-4У – 125 мкм, отношение длины отдельного объекта к его ширине составляет 3. Для сплава ЦНК-8МП Расстояние между вторичными ветвями дендритов  $d$  – около 20 мкм. Внутренняя структура трех образцов показана на рисунке 5.1. Средний размер частиц упрочняющей интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы в сплавах ЦНК-8МП и ЧС-70В – 0.4 мкм. В сплаве ВКНА-4У он достигает 1 мкм. Эти объекты являются слишком маленькими для того, чтобы выявляться при акустических исследованиях в использованном интервале частот.

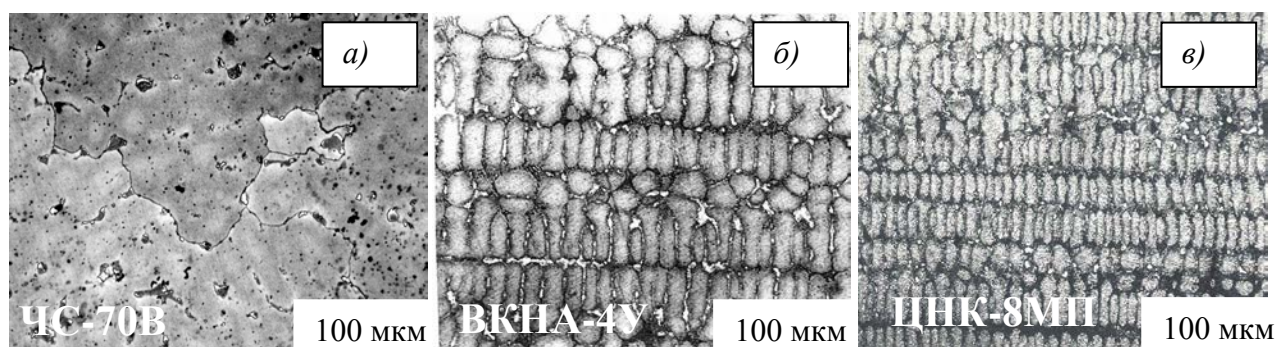


Рисунок 5.1 – Микроструктура: *a* – поликристаллического образца, вырезанного из турбинной лопатки (сплав ЧС-70В); *б* – монокристаллического образца ВКНА-4У; *в* – монокристаллического образца ЦНК-8МП

Для проведения экспериментальных исследований на электроискровом станке из средней части слитков вырезали образцы размером 10x14x8 мм. В последующем проводилась шлифовка граней. Полученные образцы для акустических измерений имели две параллельные плоскости. Именно с этих шлифованных параллельных плоскостей возбуждались и принимались волны. Длина акустического пути для последовательности ультразвуковых эхо-импульсов составляла от 0.8 до 8 см. Измерения проводились с использованием поперечных волн на частоте 2 МГц и с использованием продольных волн на

частотах 5 и 15 МГц. Для генерации продольных волн применялись прямой преобразователь L15M фирмы «Krautkrämer» с рабочей частотой  $f = 15$  МГц и раздельно-совмещенный преобразователь П112-5,0 с рабочей частотой 5 МГц с диаметром пластины 8 мм. Измерения скоростей и коэффициентов затухания были выполнены с использованием цифрового дефектоскопа PCUS-10. По точному измерению времени распространения импульсов определялись скорости волн. При этом погрешность измерения скоростей волн – около 0.5 %. По относительному уменьшению амплитуды эхо-импульсов, прошедших различное расстояние в материале, измерялся коэффициент затухания. Погрешность измерений коэффициента затухания зависит от количества эхо-импульсов, на которых выполнены измерения, от точности, с которой производились измерения амплитуды, от плоскопараллельности границ образца и от других факторов.

Исследуемые образцы схематически изображены на рисунке 5.2. Указано также расположение преобразователей и схемы прозвучивания, которые были реализованы в данной работе. Измерения проводились на четырех образцах с искусственными отражателями, два из которых из сплава ЦНК-8МП и два из сплава ВКНА-4У. В одном монокристаллическом образце из сплава ВКНА-4У дисковой формы и диаметром 20 мм был изготовлен плоскодонный отражатель диаметром 2 мм. Этот образец и варианты расположения преобразователей при измерениях показаны на рисунке 5.2, образец №1. Нормаль к плоским поверхностям образца соответствовала кристаллографической оси [100]. Другой образец из сплава ВКНА-4У имел две плоскопараллельные грани, рисунок 5.2, образец № 2, схема 3. Отражателем служило отверстие диаметром 2 мм. Из-за высокой твердости исследуемых материалов выполнить отражатели сверлением затруднительно, поэтому они были получены с помощью лазерной резки. Два образца из сплава ЦНК-8МП имели одинаковую форму и размеры. Один был изготовлен из монокристалла, а второй – из поликристалла. Расположение преобразователей при работе с этими образцами показано на рисунке 5.2, образец № 2, схема 1 и схема 2. В этих образцах искусственным отражателем было сквозное отверстие диаметром 2 мм. Оно было сделано на станке СН-144

электроискровым методом с точечным электродом. В ультразвуковом контроле за отражателем этого типа закрепилось название «сквозное боковое цилиндрическое отверстие».

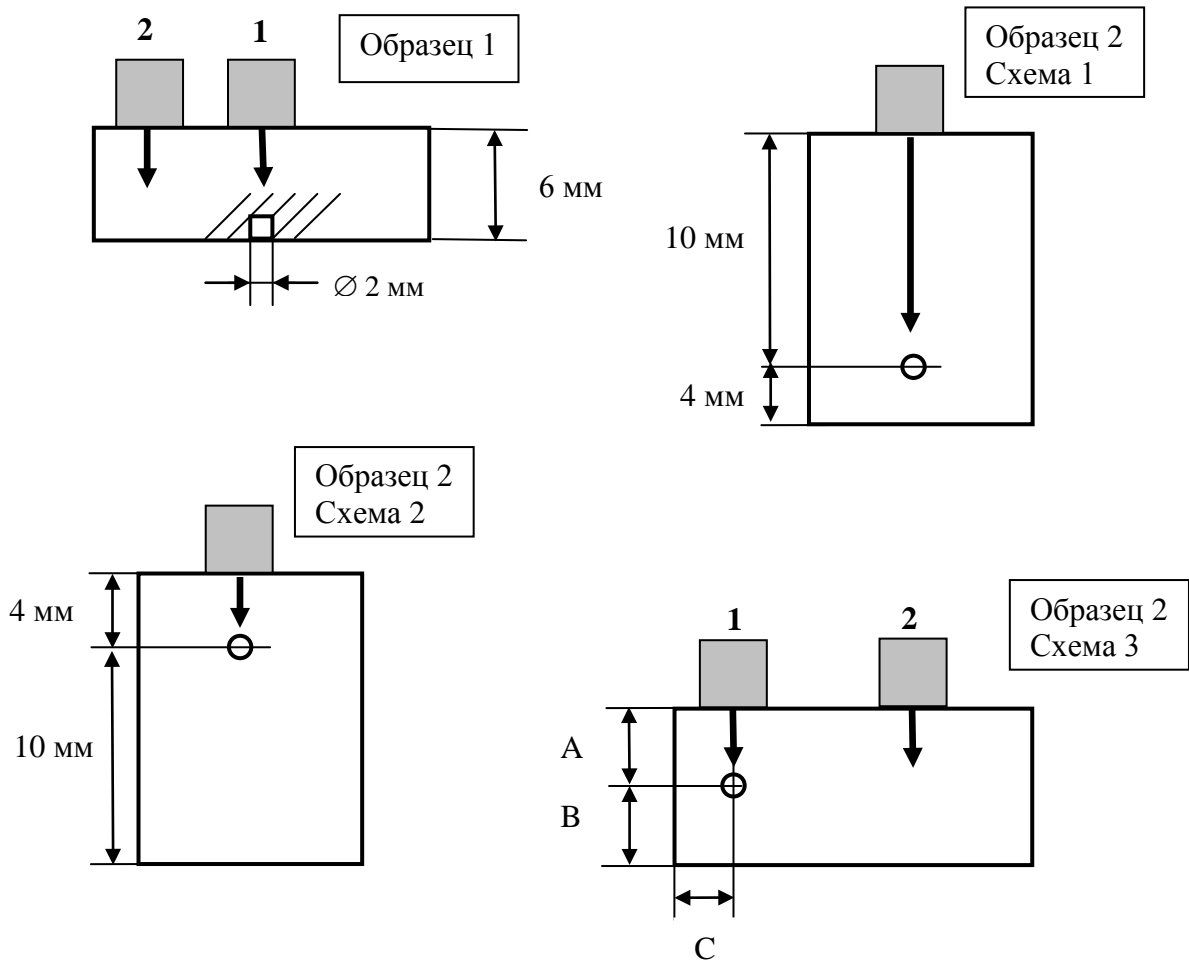


Рисунок 5.2 – Схематическое изображение образцов с искусственными отражателями и схемы прозвучивания

Экспериментально полученные в [94-96] значения скоростей продольных и поперечных волн  $s_l$ ,  $s_t$  для монокристаллов сплавов ЦНК-8МП, ВКНА-4У, а также некоторых других промышленных жаропрочных сплавов на никелевой основе приведены в таблице 5.2. Направление распространения волны указывает волновой вектор  $q$ . В направлении  $q // [110]$  указано также направление поляризации сдвиговых колебаний  $u$ . Для остальных вариантов направления распространения указывать направление поляризации нет необходимости, так как в направлениях  $[100]$  и  $[111]$  в кубическом кристалле скорость волн не зависит от

поляризации. В таблице 5.3 приведены значения модулей упругости  $c_{ij}$  и плотность монокристаллов  $\rho$ . Данные измерения коэффициентов затухания для продольных и поперечных волн  $\alpha_l, \alpha_t$  приведены в таблице 5.4.

Приведем выражения для вычисления скоростей распространения ультразвуковых волн через соответствующие модули упругости [97]. В случае продольной ультразвуковой волны для трех направлений распространения [111], [110], [100] соотношения для вычисления скоростей можно записать в виде формул (5.2.1), (5.2.2), (5.2.3):

$$\rho(C_{[111]}^l)^2 = \frac{1}{2}(C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44})/3, \quad (5.2.1)$$

$$\rho(C_{[110]}^l)^2 = \frac{1}{2}(C_{11} + C_{12} + 2C_{44}), \quad (5.2.2)$$

$$\rho(C_{[100]}^l)^2 = C_{11}. \quad (5.2.3)$$

где  $C^l$  – скорость распространения продольной волны,  $\rho$  – плотность вещества,  $C_{ij}$  – динамические модули упругости.

В случае распространения поперечных волн необходимо учесть различные направления смещения (поляризации), которые должны быть перпендикулярны направлению распространения. Для сдвиговой волны, распространяющейся вдоль оси [100], при любом направлении смещения соотношение для вычисления модуля упругости будет иметь вид (5.2.4):

$$\rho(C_{[100]}^t)^2 = C_{44}. \quad (5.2.4)$$

Таким образом, скорость распространения сдвиговой ультразвуковой волны вдоль осей четвертого порядка не зависит от поляризации. От поляризации также не зависит скорость распространения ультразвуковой волны вдоль оси [111]. Выражение для ее вычисления приведено в виде формулы (5.2.5):

$$\rho(C_{[111]}^t)^2 = \frac{1}{3}(C_{11} - C_{12} + C_{44}). \quad (5.2.5)$$

В случае направления распространения [110] вектор смещения может быть ориентирован в разных направлениях. К примеру, для направлений смещения [001] и [110] соотношения для вычисления скоростей сдвиговых волн имеют вид выражений (5.2.6) и (5.2.7):

$$\rho(C_{[110]}^{[001]})^2 = C_{44}, \quad (5.2.6)$$

$$\rho(C_{[110]}^{[110]})^2 = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}), \quad (5.2.7)$$

Формула для расчета фактора анизотропии  $A$  имеет следующий вид:

$$A = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}}. \quad (5.2.8)$$

Таблица 5.2 – Скорости упругих волн в монокристаллах промышленных жаропрочных сплавов [94-96], км/с

Материал	Продольные волны			Поперечные волны			
	$q//[100]$	$q//[110]$	$q//[111]$	$q//[100]$	$q // [110]$		$q// [111]$
					$u//[100]$	$u // [1\bar{1}0]$	
ЭИ-437Б	5.45	–	6.50	3.84	–	–	2.93
ЦНК-8МП литой	5.46	6.28	–	4.03	3.97	2.37	–
ЦНК-8МП отожженны й	5.48	6.30	–	3.94	4.03	2.35	–
ЖС-36	5.36	6.18	–	3.88	3.78	2.29	–
ВКНА-4У	5.08	6.04	–	3.75	3.78	2.21	–
$Ni_{75}Al_{19}Nb_6$	5.56	6.42	–	4.08	4.04	2.34	–

Таблица 5.3 – Модули упругости, плотность и фактор анизотропии в монокристаллах жаропрочных сплавов [94-96]

Материал	Модули упругости, ГПа			Плотность, г/см <sup>3</sup>	Фактор анизотро- пии $A$
	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{44}$		
ЭИ-437Б	234	149	116	7.87	2.73
ЦНК-8МП литой	252	140	137	8.46	2.42
ЦНК-8МП отожженный	254	152	131	8.46	2.57
ЖС-36	249	152	130	8.65	2.68
ВКНА-4У	215	145	117	8.35	3.34
Ni <sub>75</sub> Al <sub>19</sub> Nb <sub>6</sub>	240	141	129	7.75	2.8

Таблица 5.4 – Затухание упругих волн в монокристаллах на частоте  $f = 15$  МГц [94-96], дБ/см

Материал	Продольные волны			Поперечные волны			
	$q$ // [100]	$q$ // [110]	$q$ // [111]	$q$ // [100]	$q$ // [110]		$q$ // [111]
					$u$ // [100]	$u$ // [1 $\bar{1}$ 0]	
ЭИ-437Б	1.83±0.1	–	1.3±0.15	2.6±0.4	–	–	2.8±0.4
ЦНК-8МП литой	2.26±0.3	1.4±0.15	–	1.1±0.2	1.7±0.3	2.3±0.3	–
ЦНК-8МП отожженны й	2.7±0.3	1.8±0.2	–	1.6±0.3	0.85±0.1	1.5±0.3	–
ЖС-36	2.8±0.4	2.1±0.3	–	1.1±0.2	1.2±0.2	3.3±0.4	–
ВКНА-4У	4.3±0.3	2.5±0.2	–	2.1±0.3	1.5±0.3	1.6±0.3	–
Ni <sub>75</sub> Al <sub>19</sub> Nb <sub>6</sub>	3.7±1.0	0.6±0.2	–	1.8±0.3	1.7±0.3	1.6±0.3	–

В работах [94-96] были выполнены измерения с поликристаллическими образцами, некоторые результаты приведены в таблице 5.5. Для сплавов ЖС-36,

$Ni_{75}Al_{19}Nb_6$  и сплава ВКНА-4У получены данные о скоростях волн, коэффициентах затухания и модулях упругости. Данные об акустических свойствах моно- и поликристаллов могут быть полезными при разработке методик ультразвукового контроля изделий из этих материалов.

Таблица 5.5 – Скорости упругих волн, коэффициенты затухания и модули упругости в поликристаллических образцах [94-96]

Материал	$s_l$ , км/с	$\alpha_l$ , дБ/см	$s_t$ , км/с	$\alpha_t$ , дБ/см	Модуль Юнга $E$ , ГПа	Модуль сдвига $G$ , ГПа
ЖС36	6.03	13.3	3.31	–	246	94.8
$Ni_{75}Al_{19}Nb_6$	6.04	5.5	–	–	–	–
ВКНА-4У	6.18	1.2	3.76	1.9	249	118

### 5.3 Поглощение и скорость ультразвука

Для измерения акустических свойств монокристаллических и поликристаллических образцов сплавов ЦНК-8МП и ЧС-70 с помощью дефектоскопа PCUS-10 были получены развертки типа А. Пример разверток для моно- и поликристаллических образцов сплава ЦНК-8МП показан на рисунке 5.3. Измерения выполнены на продольных волнах прямым преобразователем с частотой 15 МГц. Четкая картина эхо-импульсов с малым уровнем шумов и ложных сигналов получена на монокристаллическом образце при усилении  $K_{yc} = 49$  дБ (см. рисунок 5.3а). На рисунке 5.3б показана картина эхо-импульсов для поликристаллического образца на той же частоте 15 МГц. Для получения достаточной амплитуды эхо-импульсов коэффициент усиления пришлось увеличить до 76 дБ. В результате на рисунке 5.3б кроме картины затухающих импульсов видны еще и шумоподобные сигналы, представляющие собой отражения ультразвука от элементов структуры материала и электрические шумы. Поэтому на рисунке 5.3б приведена еще и расшифровка, показывающая номера



эхо-сигналов. Значения скоростей продольных волн и коэффициентов затухания в сплаве ЦНК-8МП, полученные на частотах 5 и 15 МГц, приведены в таблице 5.6. Скорость продольных упругих волн в поликристаллическом сплаве ЧС-70 оказалась равной  $s_l = 6.06$  км/с.

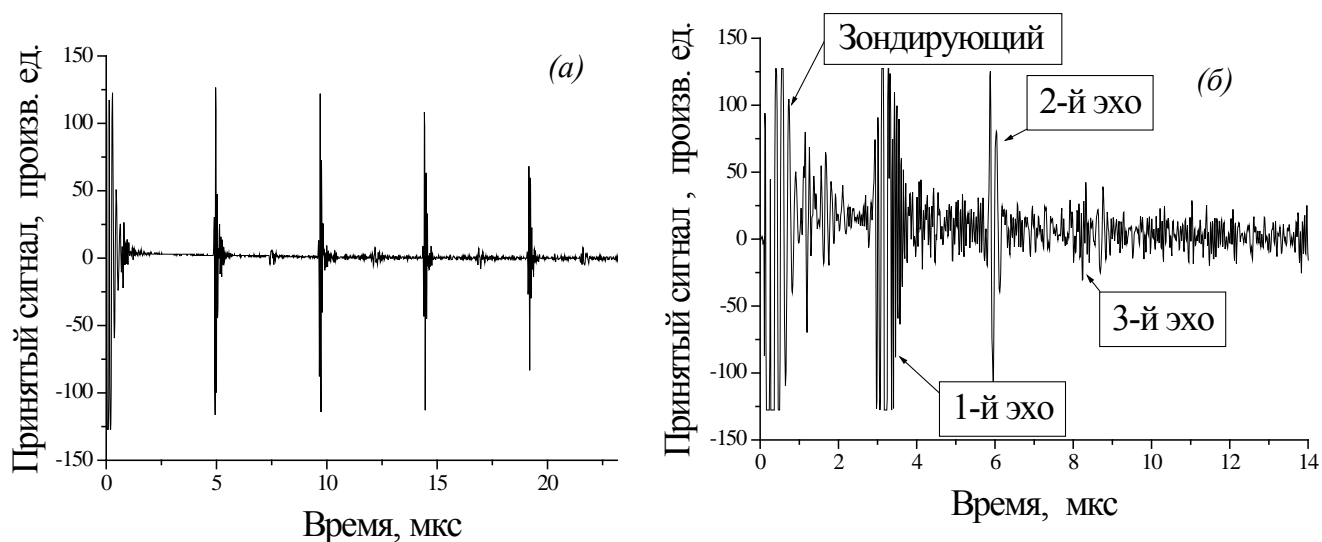


Рисунок 5.3 – Картина эхо-импульсов в сплаве ЦНК-8МП на частоте  $f = 15$  МГц:

*a* – монокристалл,  $K_{yc} = 49$  дБ; *б* – поликристалл,  $K_{yc} = 76$  дБ

Таблица 5.6 – Скорости волн и коэффициенты затухания в сплаве ЦНК-8МП

Тип образца	Частота $f$ , МГц	$K_{yc}$ , дБ	$S_l$ , км/с	$\alpha_l$ , дБ/см
монокристалл	15	45	5.88	2.4
монокристалл	5	38	5.89	2.1
поликристалл	15	66	5.56	6.2

Величина коэффициентов затухания в промышленных сплавах ЦНК-8МП и ЖС-36 оказалась весьма значительной, что может затруднить построение эффективной технологии ультразвукового контроля. Сравнивая данные коэффициентов затухания для моно- и поликристаллических образцов, можно сделать вывод, что в ряде случаев затухание в поликристаллах намного выше. Причиной этого служит высокая анизотропия упругих свойств жаропрочных сплавов на никелевой основе, изученная в работах [94, 95]. Данные о факторе

упругой анизотропии сплавов  $A$  приведены в таблице 5.3. Результатом высокой анизотропии является интенсивное рассеяние ультразвука на границах зерен и других элементах структуры поликристаллов. В первую очередь, для рассеяния ультразвука важны элементы, сопоставимые по размеру с длиной волны (0.39 мм на частоте  $f = 15$  МГц при скорости  $s_l = 5.88$  км/с). Например, в монокристаллах сплава типа ВКНА есть элементы ростовой структуры с размером 0.12 мм.

#### 5.4 Выявление дефектов

Рассмотрим возможность выявления искусственных отражателей и дефектов в моно- и поликристаллических жаропрочных никелевых сплавах. Ультразвуковая дефектоскопия монокристаллических материалов имеет существенные особенности [98]. При работе с монокристаллами необходимо учитывать, что при наклонном падении ультразвуковой волны на границу образца в анизотропном материале одновременно возникают, как правило, три упругие волны. Соотношение амплитуд между волнами, углы преломления и поляризация этих волн зависят от нескольких обстоятельств, в число которых входят угол падения и направление поляризации падающей волны по отношению к осям монокристалла. В принципе, возможны два подхода при разработке технологии УЗК. Первый состоит в детальном учете анизотропии кристалла и выработке условий, когда анизотропия помогает выбрать желаемые характеристики волны в материале. Это эффективный, но очень трудоемкий путь, требующий знания упругих констант монокристаллов и выполнения предварительной экспериментальной работы. Вторым подходом является выбор только нормального падения волн на границу монокристалла с дальнейшим распространением ультразвука вдоль кристаллографической оси достаточно высокого порядка. Например, в кристалле кубической симметрии это должны быть оси не ниже второго порядка. Этот более простой подход возможен, только если нормаль к поверхности образца совпадает с осью симметрии кристалла. В этой работе мы будем следовать второму подходу. В этом случае при нормальном падении не

происходит трансформации волн, и не происходит видимого преломления лучей. Как правило, поперечные волны вырождены по поляризации, то есть скорость волны не зависит от направления поляризации в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.

Сначала изложим результаты, полученные на образцах из сплава ВКНА-4У. Развертки типа А, показывающие выявление искусственного отражателя типа «плоскодонное отверстие» диаметром 2 мм (см. образец №1 на рисунке 5.2), представлены на рисунке 5.4. Измерения выполнены с монокристаллическим образцом при направлении распространения вдоль оси [100] кристалла. На рисунке 5.4а показаны результаты при установке прямого преобразователя в положение 2, когда ось излучения преобразователя проходит вдали от отражателя. Измерения выполнены на частоте 15 МГц при коэффициенте усиления  $K_{yc} = 44$  дБ. На рисунке виден зондирующий импульс и два эхо-импульса. На рисунке 5.4б показана развертка типа А, полученная при установке того же преобразователя в положение 1 прямо над отражателем. В этом случае между зондирующим и 1-м донным эхо-сигналом, а также между 1-м и 2-м донными эхо-сигналами присутствуют импульсы, отраженные от искусственного отражателя (помечены как «Дефект» на рисунке 5.4б). При выбранных параметрах контроля обеспечивается надежное выявление искусственного отражателя и хорошая лучевая разрешающая способность. На рисунке 5.4в показана развертка типа А, полученная при установке в положение 1 над отражателем раздельно-совмещенного преобразователя с частотой 5 МГц. На этой более низкой частоте тоже виден отраженный от «плоскодонного отверстия» сигнал, но разрешающей способности оказалось недостаточно для надежного определения его характеристик.

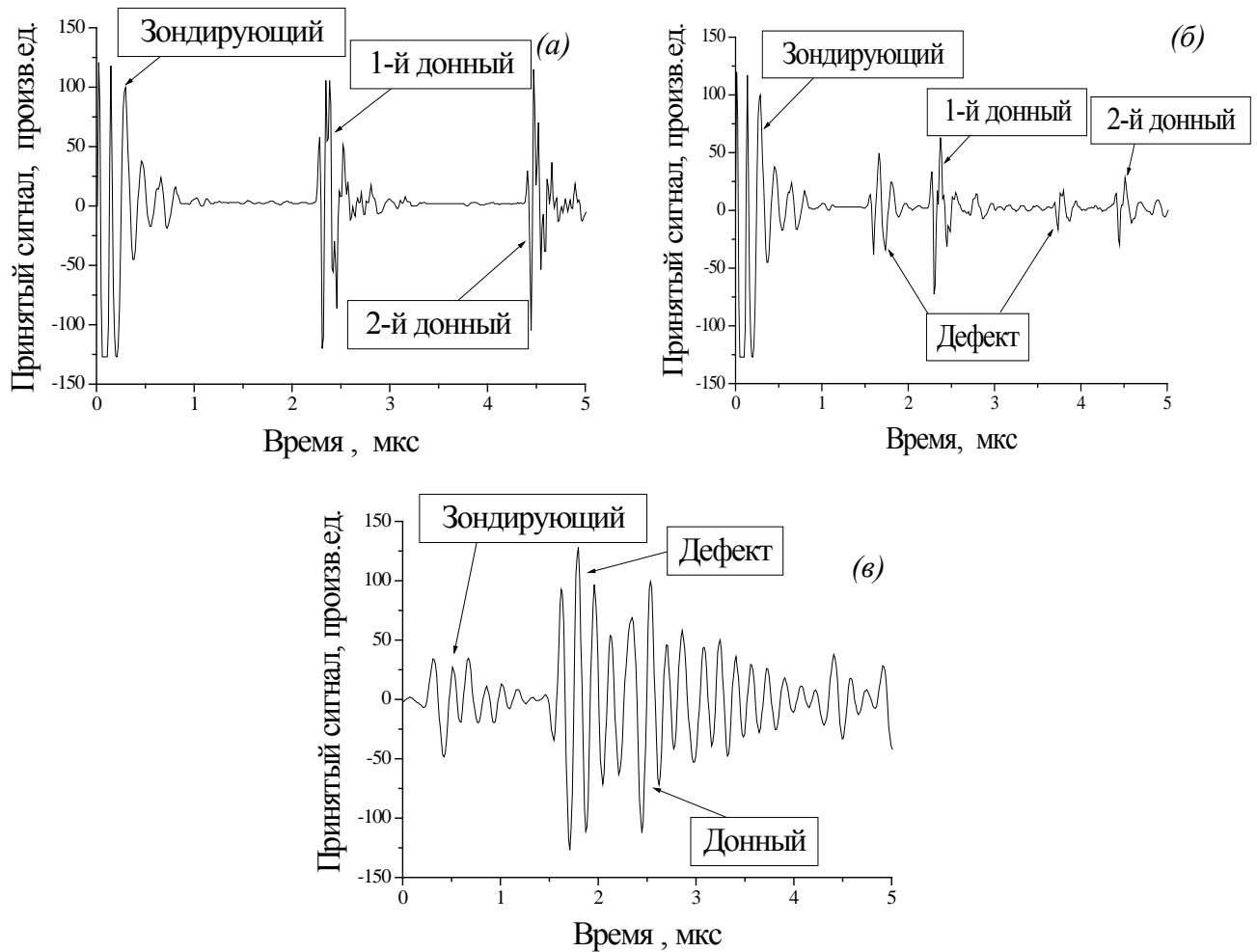


Рисунок 5.4 – Развертки типа А, показывающие выявление искусственного отражателя в образце из сплава ВКНА дисковой формы ( $K_{ус} = 44$  дБ): *а* – вдали от отражателя, положение преобразователя 2, прямой преобразователь,  $f = 15$  МГц; *б* – над отражателем, положение преобразователя 1, прямой преобразователь,  $f = 15$  МГц; *в* – над отражателем, положение преобразователя 1, раздельно-совмещенный преобразователь,  $f = 5$  МГц

Определим теперь, на каком минимальном расстоянии можно обнаружить дефект типа «плоскодонное отверстие», если его диаметр меньше, чем 2 мм. С этой целью выполним расчет соответствующих АРД – диаграмм, которые связывают амплитуду отраженного от дефекта сигнала с расстоянием, на котором расположен дефект, и его диаметром.

Для расчета АРД-диаграмм для дефекта типа «плоскодонное отверстие» при использовании прямого совмещенного пьезоэлектрического преобразователя с круговой апертурой воспользуемся методикой, изложенной в [99]. Обозначим

радиусы преобразователя и отражателя, как  $a$  и  $b$ . Амплитуды излученного и отраженного от дефекта сигналов:  $A_0$  и  $A_r$ . Определим нормированную амплитуду отраженного сигнала в виде  $\Delta A_r = \frac{A_r}{\pi a^2 A_0}$ . Согласно [99], формула для

расчета  $\Delta A_r$  может быть записана, как

$$\Delta A_r = 2 \int_0^\infty \int_0^\infty J_1(ka) J_1(\lambda a) S(k, \lambda) \exp[i(v_l + w_l)d] d\lambda dk \quad , \quad (5.4.1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $d$  – расстояние между поверхностью образца, на которой расположен преобразователь, и плоской поверхностью «плоскодонного

отверстия»,  $v_l = \sqrt{\left(\frac{\omega}{s_l}\right)^2 - k^2}$ ,  $w_l = \sqrt{\left(\frac{\omega}{s_l}\right)^2 - \lambda^2}$ ,

$$S(k, \lambda) = \int_0^b r J_0(kr) J_0(\lambda r) dr = \begin{cases} \frac{b}{k^2 - \lambda^2} [kJ_1(kb)J_0(\lambda b) - \lambda J_0(kb)J_1(\lambda b)] & , \lambda \neq k \\ \frac{b^2}{2} [J_0^2(kb) + J_1^2(kb)] & , \lambda = k \end{cases} .$$

Нормированная амплитуда донного сигнала, т.е. сигнала, отраженного от плоскости, расположенной параллельно поверхности, на которой расположен преобразователь, на расстоянии  $d$  от нее, может быть определена по формуле [99]

$$\Delta A_r = 2 \int_0^\infty \frac{J_1^2(ka)}{k} \exp[i2v_l d] dk \quad . \quad (5.4.2)$$

На рисунке 5.5а представлены результаты расчетов АД-диаграмм для различных значений параметра  $\beta$ , задаваемого соотношением:  $\beta = b/a$ . По оси абсцисс отложено нормированное расстояние между отражателем и преобразователем  $\delta = d/d_{NF}$ , где  $d_{NF} = fa^2/s_l$  – размер ближней зоны преобразователя с круговой апертурой. По оси ординат отложен логарифм нормированной амплитуды отраженного сигнала –  $\delta A_r^0 = 20 \lg \Delta A_r$ , где параметр  $\Delta A_r$  рассчитывается по формулам (5.4.1) и (5.4.2).

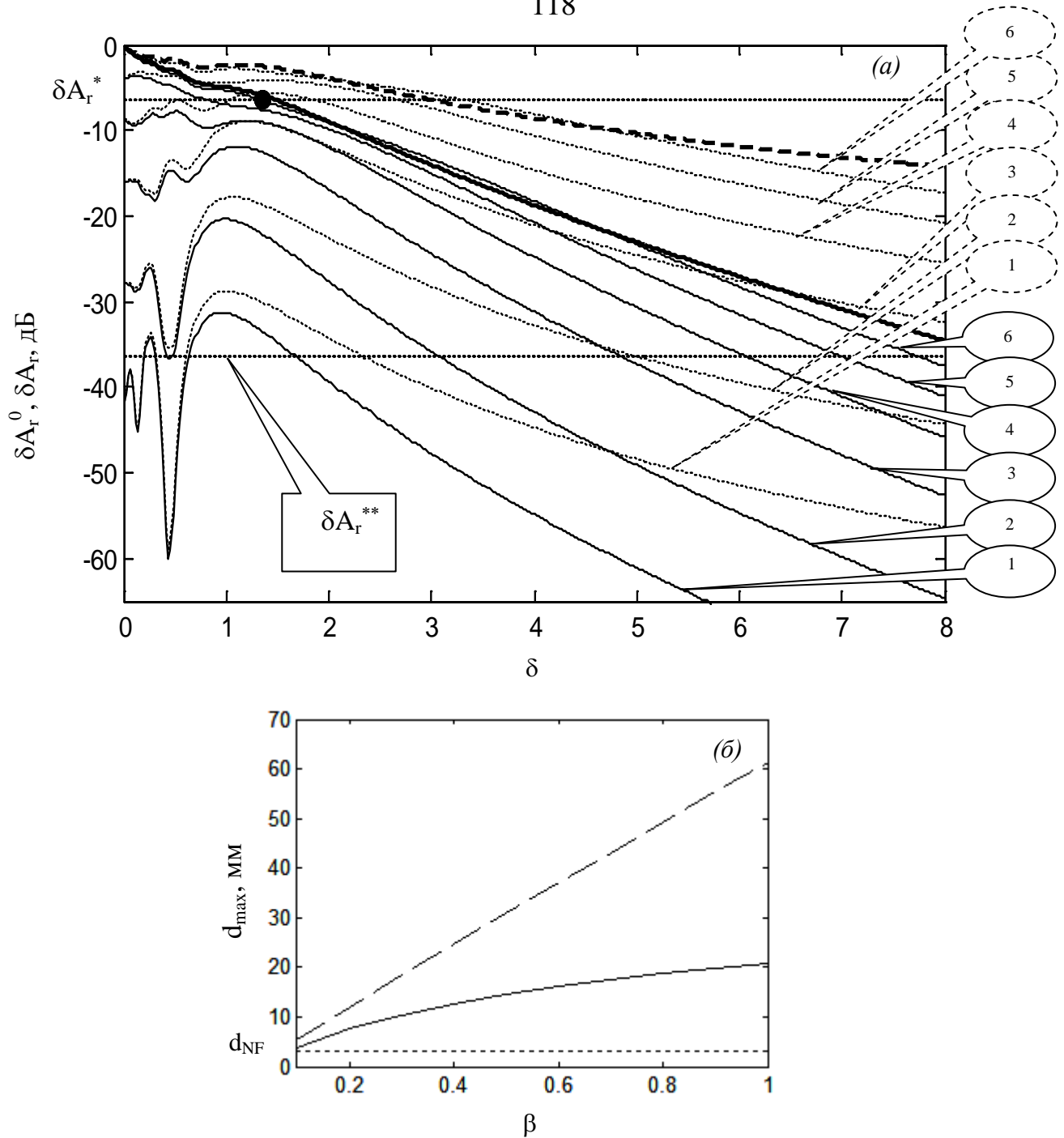


Рисунок 5.5 – Оценка выявляемости дефекта типа «плоскодонное отверстие» в образце из сплава ВКНА дисковой формы: *a* – безразмерные АРД – диаграммы. Значения параметра  $\beta$ : (1) – 0.1; (2) – 0.2; (3) – 0.4; (4) – 0.6; (5) – 0.8; (6) – 1.0. Жирные линии соответствуют донному сигналу; *b* – Зависимость максимального расстояния, при котором отраженный от отверстия сигнал может быть принят ультразвуковым дефектоскопом при максимально возможном значении коэффициента усиления от параметра  $\beta$ . Сплошные линии соответствуют зависимостям, построенным с учетом затухания в среде, пунктирные – без учета затухания

Для корректной оценки амплитуды отраженного сигнала необходимо также учесть затухание упругих волн в среде, что можно сделать, используя измеренный экспериментально коэффициент затухания упругих волн. Предполагая, что  $\eta$  не зависит от частоты, можно записать следующее выражение для логарифма нормированной амплитуды отраженного сигнала:

$$\delta A_r = \delta A_r^0 - 2\eta d = 20 \lg \Delta A_r - 2\alpha_{NF} \delta \quad ,$$

где  $\eta_{NF} = \eta d_{NF}$  – затухание, которое испытывает ультразвуковая волна при прохождении в среде расстояния, равного размеру ближней зоне преобразователя. Множитель 2 учитывает пробег волны к отражателю и обратно.

При выполнении нами экспериментальных исследований были реализованы следующие параметры задачи:  $a = 1$  мм,  $b = 1$  мм,  $d = 4$  мм,  $s_l = 5080$  м/с,  $\eta = 4.3$  дБ/см,  $f = 15$  МГц. При этом  $d_{NF} = 2.95$  мм и  $\eta_{NF} = 1.27$  дБ. Соответствующие значения параметров:  $\beta^* = 1$ ,  $\delta^* = 1.36$  и  $\delta A_r^* = -6,48$  дБ, обозначены на рисунке 5.5а точкой, через которую проведена пунктирная линия. Другая такая линия соответствует значению  $\delta A_r^{**} = \delta A_r^* - 30$ , которое меньше на 30 дБ. Это запас по коэффициенту усиления, который может быть реализован в типовом ультразвуковом дефектоскопе. Данная величина была выбрана, исходя из следующих соображений. Поскольку мы выполняли измерения при  $K_{yc} = 44$  дБ, а характерное значение максимального коэффициента усиления, при котором можно выполнять измерения примерно равно 70 дБ, то искомый запас по коэффициенту усиления как раз равен 30 дБ.

Пересечения нижней пунктирной линии с кривыми АРД – диаграмм, соответствующих различным значениям параметра  $\beta$ , определяют значения параметра  $\delta$ , равные  $\delta_{\max}$  – максимальному значению нормированного расстояния, при котором отраженный сигнал может быть принят ультразвуковым дефектоскопом при максимально возможном значении коэффициента усиления. Построенная зависимость  $d_{\max} = \delta_{\max} d_{NF}$  от  $\beta$  приведена на рисунке 5.5б. По ней, при известном значении радиуса преобразователя  $a$ , можно оценить

максимальное расстояние, при котором еще можно обнаружить дефект типа «плоскодонное отверстие» с радиусом, равным  $b = a\beta$ . Например, предположим, что  $b = 0.5$  мм. Тогда  $\beta = 0.5$ , и согласно зависимости, построенной на рисунке 5.5б,  $d_{\max} \approx 13$  мм.

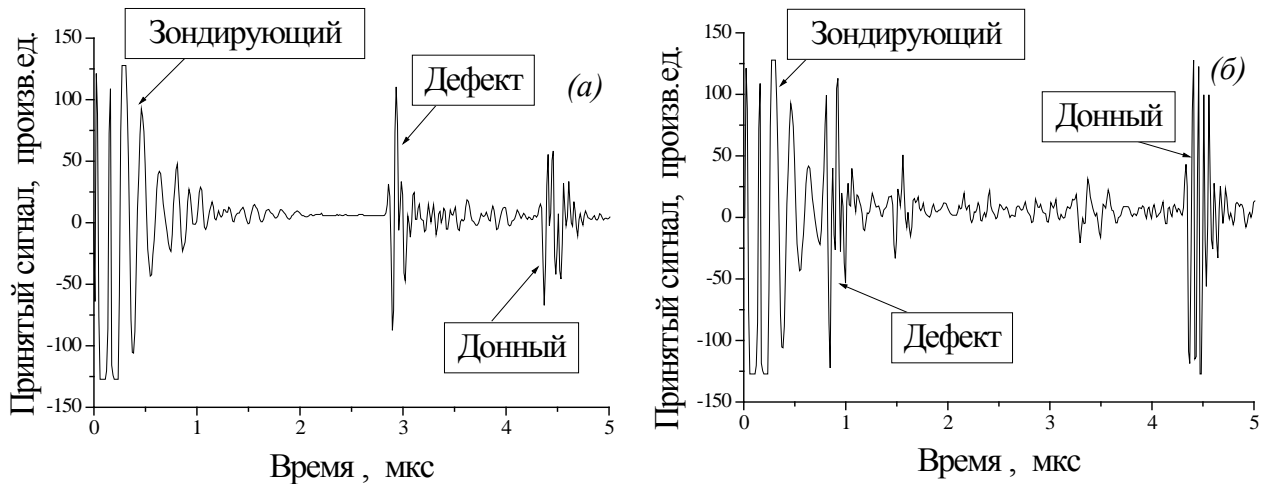


Рисунок 5.6 – Развертки типа А, показывающие выявление искусственного отражателя в образце из сплава ВКНА в форме параллелепипеда: *a* – над отражателем, образец №2, схема прозвучивания 1; *б* – над отражателем, образец №2, схема прозвучивания 2

Выявление искусственного отражателя типа “боковое сверление” диаметром 2 мм в образце из монокристалла сплава ВКНА-4У в форме параллелепипеда показано на рисунке 5.6. Здесь также выбрано направление распространения ультразвука вдоль оси [100] кристалла. Во всех случаях на рисунке 5.6 частота  $f = 15$  МГц, коэффициент усиления  $K_{yc} = 60$  дБ. На рисунке 5.6а показана развертка типа А при расположении прямого преобразователя для образца №2, схема 1 на рисунке 5.2. На рисунке 5.6б показана развертка типа А при расположении прямого преобразователя по схеме 2. Отличие этих вариантов в том, что на рисунке 5.6а выбраны благоприятные условия выявления отражателя, а на рисунке 5.6б отражатель находится достаточно близко к мертвой зоне преобразователя. Как видно, в обоих случаях зафиксировано уверенное выявление отражателя. На рисунке 5.6в и 5.6г показаны результаты измерений образца №2 по схеме 3 на рисунке 5.2. Развертка на рисунке 5.6в получена при



расположении преобразователя 2, когда ось излучения проходит вдали от отражателя. Как и следовало ожидать, на развертке (рисунок 5.6в) виден только слабый импульс, отраженный от искусственного отражателя. На развертке (рисунок 5.6г) отраженный от искусственного отражателя импульс выявлен отчетливо. Различие между условиями измерений на рисунках 5.6а и 5.6б, с одной стороны, и рисунках 5.6в и 5.6г с другой, состоит в разном расстоянии от поверхности ввода до отражателя и от отражателя до донной поверхности. Выявление этого отражателя раздельно-совмещенным преобразователем на частоту 5 МГц оказалось возможным только при достаточном удалении отражателя от поверхности ввода. На рисунке 5.7 показана развертка типа А, полученная при установке раздельно-совмещенного преобразователя для образца №2, схема 1.

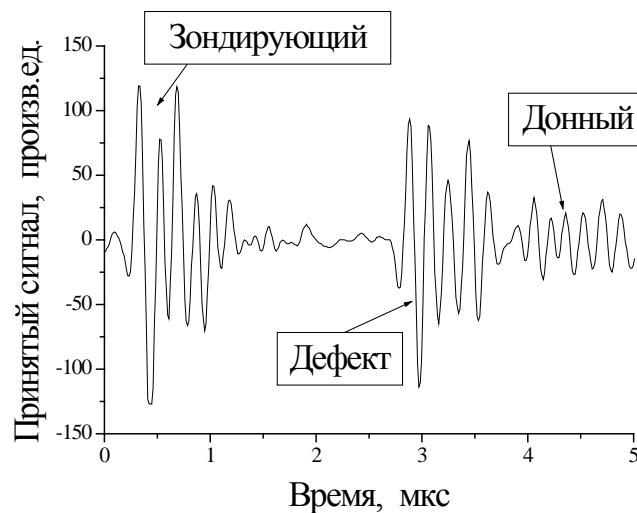


Рисунок 5.7 – Выявление отражателя в образце из сплава ВКНА раздельно-совмещенным преобразователем. Образец №2 схема прозвучивания 1,  $f = 5$  МГц,

$$K_{yc} = 55 \text{ дБ}$$

Перейдем к изложению результатов измерений на моно- и поликристаллических образцах из сплава ЦНК-8МП. Развертка типа А, полученная для монокристаллического образца №2 по схеме 2 на рисунке 5.2, показана на рисунке 5.8. Использован раздельно-совмещенный преобразователь на частоту 5 МГц.

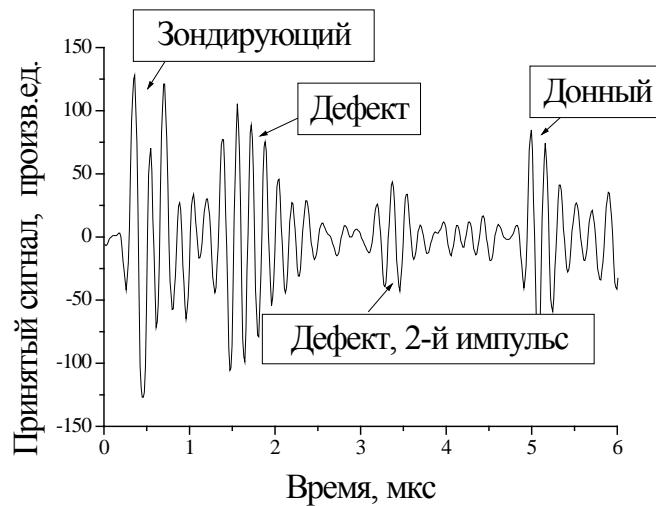


Рисунок 5.8 – Развертка типа А, показывающая выявление искусственного отражателя типа бокового сверления в монокристаллическом образце из сплава ЦНК-8МП раздельно-совмещенным преобразователем. Прозвучивание образца №2 по схеме 2,  $f = 5$  МГц,  $K_{yc} = 54$  дБ

В зоне контроля между зондирующим и донным импульсами отчетливо видны два эхо-импульса, отраженные от искусственного отражателя. В поликристаллическом образце из сплава ЦНК-8МП оказывается возможным выявление отражателей, только из-за значительного затухания коэффициент усиления приходится увеличить до 70 дБ. Действительно, из данных таблицы 6 следует, что на частоте 15 МГц коэффициент затухания продольных волн в монокристаллическом образце составляет 2.4 дБ/см, а в поликристаллическом – 6.2 дБ/см. Рисунок 5.9 показывает развертки типа А при использовании прямого и раздельно-совмещенного преобразователя и разных вариантах расположения отражателя. На рисунок 5.9а использована схема 1 для образца №2 на рисунке 5.2. Применен прямой преобразователь на частоту 15 МГц. Сигнал от искусственного отражателя выявлен отчетливо, однако амплитуда донного эхо-сигнала оказалась малой, вероятно из-за большого затухания. Это указывает на снижение уровня браковки в конце зоны контроля и на необходимость применения системы ВРЧ для компенсации этого даже при небольшой толщине объекта контроля 10 мм. Выявление отражателя с помощью раздельно-совмещенного преобразователя на

частоту 5 МГц иллюстрируют рисунки 5.9б и 5.9в. На рисунке 5.9б использована схема прозвучивания 1 для образца №2, показанная на рисунке 5.2, а на рисунке 5.9в – схема прозвучивания 2. В обоих случаях зафиксировано уверенное выявление дефекта раздельно-совмещенным преобразователем. Был выбран коэффициент усиления  $K_{ус} = 54$  дБ.

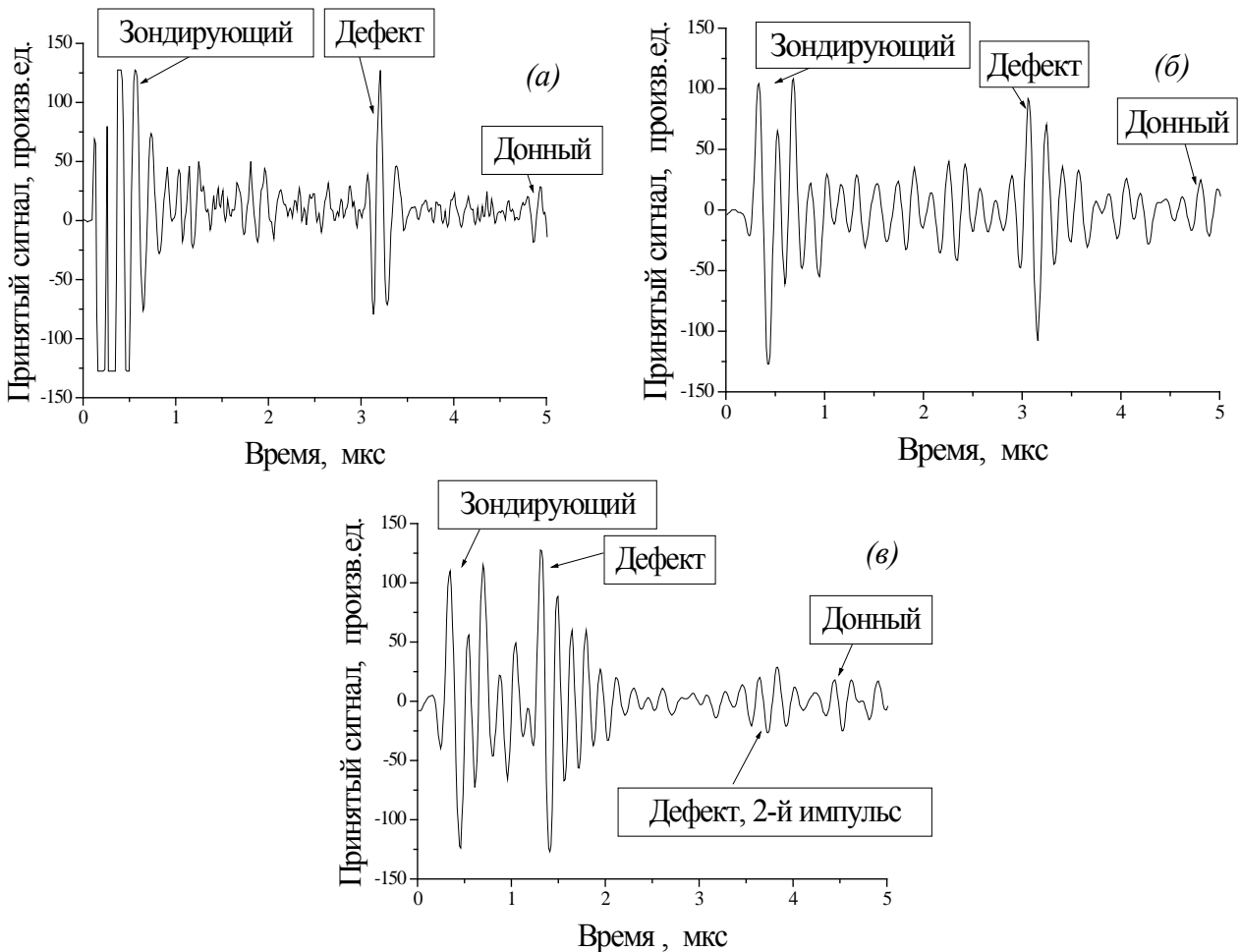


Рисунок 5.9 – Развертки типа А, показывающие выявление искусственного отражателя в поликристаллическом образце из сплава ЦНК-8МП: *а* – схема прозвучивания 1 для образца №2, прямой преобразователь,  $f = 15$  МГц; *б* – схема прозвучивания 1 для образца №2, раздельно-совмещенный преобразователь,  $f = 5$  МГц; *в* – схема прозвучивания 2 для образца №2, раздельно-совмещенный преобразователь,  $f = 5$  МГц

В качестве примера выявления дефекта в изделии рассмотрим материалы исследования лопатки турбины Якутской ГРЭС. Лопатка эксплуатировалась на установке ГТЭ-45-3 при температуре 880 °С, наработка составила 9390 ч, 17

теплосмен. Изученная нами лопатка сломалась от удара осколков лопатки 1-й ступени, разрушившейся в процессе эксплуатации из-за возникновения усталостных трещин. После аварии до полной остановки вращения продолжалось в течение 20 мин.

Известно [85], что наиболее повреждаемыми в процессе эксплуатации элементами рабочей лопатки являются:

- входная кромка пера, подверженная длительному действию статических растягивающих напряжений и знакопеременным напряжениям при вибрации диска,

- верхний край торцевой поверхности замка, жестко закрепленного на диске турбины; деформация его происходит в стесненных условиях.

В результате возникают усталостные трещины, схема расположения которых на лопатке показана на рисунке 5.10. Эти поверхностные дефекты являются дополнительными концентраторами напряжений и ускоряют разрушение турбинной лопатки. Нарушение сплошности также может приводить к неравномерности температурного поля внутри детали.

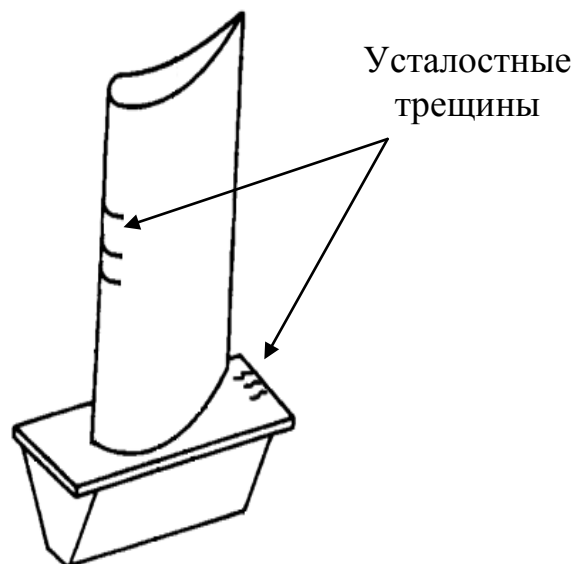


Рисунок 5.10 – Схема типичного расположения усталостных трещин на лопатке

Общий вид лопатки после разрушения и отдельно фрагмент с усталостными трещинами на торцевой части замка показаны на рисунке 5.11. В данном образце

трещины имеют длину от 3 до 15 мм с раскрытием практически по всей длине на 0.2-0.4 мм. Одна из трещин более крупная, длиной 10 мм с раскрытием в устье 1-2 мм, Возможность выявления этой трещины будет исследована дальше.

Для выявления дефекта был использован наклонный преобразователь типа П121-5,0-65<sup>0</sup> с рабочей частотой 5 МГц и углом ввода 65<sup>0</sup> (по стали). Поскольку для исследования был предоставлен обломок лопатки после разрушения, возможность установки преобразователя и сканирования была ограничена. Оказалось возможным установить преобразователь только в такое положение, когда акустическая ось излучения в лопатке была приблизительно параллельна плоскости трещины. Это расположение неблагоприятно для эффективного контроля. Однако и в этом случае оказалось возможным обнаружить сигнал от дефекта.

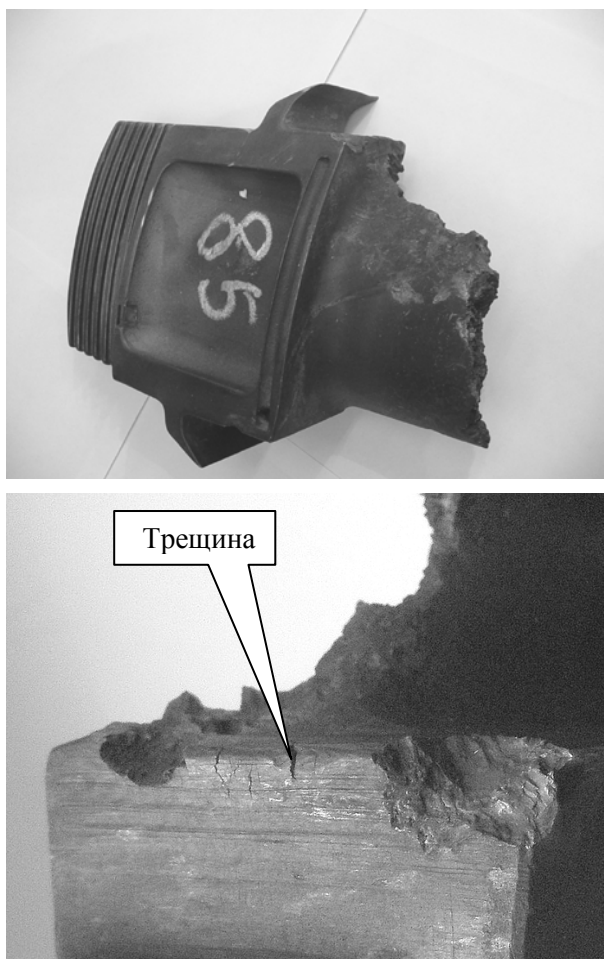


Рисунок 5.11 – Фото участка сломанной лопатки и ее фрагмент с трещиной

Развертка типа А показана на рисунке 5.12. Сигнал от трещины находится на участке развертки с задержкой 26-27 мкс от начала. Амплитуда отраженного сигнала лишь в 1.5-2 раза больше, чем амплитуда шумоподобных сигналов, присутствующих на развертке, и не связанных с трещиной. Установить принадлежность трещине отмеченного на рисунке 5.12 сигнала удалось путем изменения в небольших пределах угла падения пучка на трещину. Амплитуда сигнала резко уменьшалась, если ось пучка отводили в сторону от трещины. Кроме того, измеренное время задержки сигнала соответствует расчетному для отраженного от трещины сигнала.

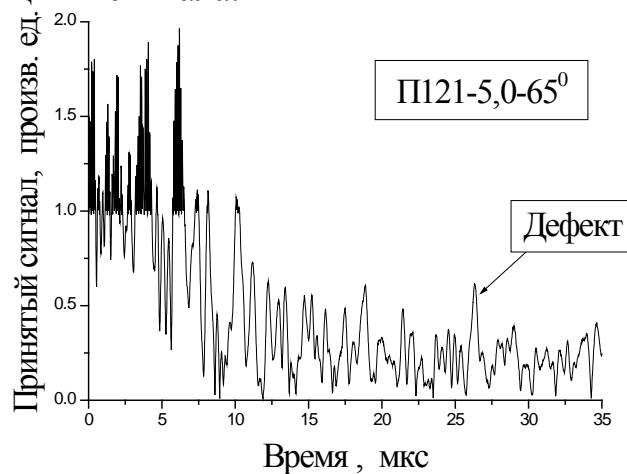


Рисунок 5.12 – Развертка типа А, показывающая выявление трещины на лопатке.

Частота 5 МГц, преобразователь П121-5,0-65<sup>0</sup>

### **5.5 Оценка частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей расположенных в образцах из жаропрочных сплавов на никелевой основе**

В рамках решения задачи оценки типа скрытого дефекта 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.

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны два образца из монокристаллического жаропрочного сплава с отражателями в виде

«сквозного бокового цилиндрического отверстия» диаметром 2 мм, для которого прозвучивание осуществлялось с разных граней образца (см. рисунок 5.2) и «плоскодонное сверление» диаметром 2 мм, находящееся на глубине 4 мм. Измерения также проводились на образце из поликристаллического жаропрочного сплава с отражателем в виде «сквозного бокового цилиндрического отверстия» диаметром 2 мм, для которого, как и в случае монокристалла, прозвучивание осуществлялось с разных граней образца (см. рисунок 5.2). Генерация зондирующего импульса проводилась с использованием цифрового дефектоскопа PCUS-10. Излучение и прием ультразвуковых колебаний производились прямым совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем с номинальной частотой 15 МГц.

Размещая ПЭП на средней линии поверхности образца с искусственными отражателями, проводилось сканирование преобразователем по поверхности. Определяя точку, где амплитуда эхо-сигнала от отражателя была максимальна, в памяти ПК сохраняли А-сканы (рисунок 5.13).

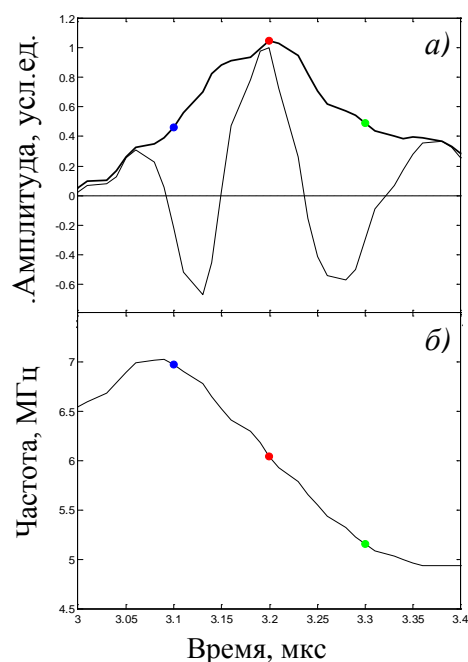


Рисунок 5.13 – Оценка мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от «сквозного бокового цилиндрического отверстия», расположенного в образце из поликристаллического жаропрочного сплава: *а* – эхо-сигнал (А-сканы) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени

Затем, используя алгоритм, описанный в пункте 2.3.1.3, эти А-сканы анализировали с целью оценки частотных параметров. Одним из качественных результатов является огибающая эхо-сигнала и зависимость мгновенной частоты от времени, которые для наглядности приведены на одном рисунке.

Из рисунка 5.13б следует, что для отражателя в виде «сквозного бокового цилиндрического отверстия», расположенного в образце из поликристаллического жаропрочного сплава, значение мгновенной частоты  $f_0$ , определенной в момент времени, соответствующий максимуму амплитуды огибающей (красный цвет), лежит между значениями  $f_1$  и  $f_2$  мгновенной частоты эхо-сигнала, которые определены в моменты времени, соответствующие половине ее максимального значения справа и слева от максимума (синий и зеленый цвета, соответственно). А именно, значение  $f_0$  больше значения мгновенной частоты на срезе импульса  $f_2$ , но меньше значения частоты на фронте  $f_1$ . Само же значение мгновенной частоты  $f_0$ , соответствующей максимуму амплитуды огибающей, существенно отклоняется от номинального значения частоты пьезоэлектрического преобразователя, которое составляет 15 МГц.

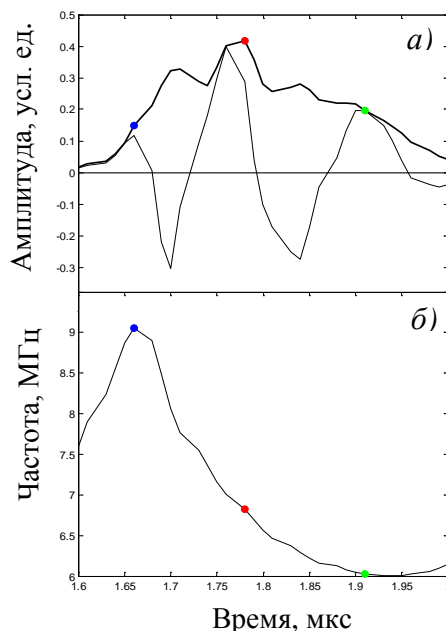


Рисунок 5.14 – Оценка мгновенной частоты эхо-сигнала, отраженного от «плоскодонного сверления», расположенного в образце из монокристаллического жаропрочного сплава: *а* – эхо-сигнал (А-сканы) с огибающей; *б* – зависимость мгновенной частоты от времени



Таким образом, для «плоскодонного сверления», расположенного в образце из монокристаллического жаропрочного сплава (рисунок 5.14), наблюдается соотношение мгновенных частот такое же, как в случае «сквозных боковых цилиндрических отверстий», расположенных в образцах из моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов. Значение  $f_0$  больше значения мгновенной частоты на срезе импульса  $f_2$ , но меньше значения частоты на фронте  $f_1$ , а значение мгновенной частоты  $f_0$  в значительной степени отклоняется от значения рабочей частоты пьезоэлектрического преобразователя – 15 МГц.

Далее, используя значения мгновенных частот, соответствующих определенным моментам времени внутри импульса, для этих отражателей были получены значения безразмерных параметров – нормированных девиаций частоты, определенных между центром, срезом и фронтом импульса (см. п. 2.3.1.3). Результаты оценки частотных параметров эхо-импульсов от отражателей в виде «сквозных боковых цилиндрических отверстий» и «плоскодонных сверлений», расположенных в образцах из моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов, показаны в виде диаграмм, построенных на плоскости (см. рисунки 3.13 и 3.14, соответственно), где по осям отложены значения нормированных девиаций частоты. Качественная оценка типа отражателя зависит от того, в какой области диаграммы группируются точки, соответствующие данному типу отражателя.

На рисунке 5.15 представлены результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от «сквозного бокового цилиндрического отверстия», расположенного в образцах из моно- и поликристаллического жаропрочного сплава при различных схемах сканирования (см. рисунок 5.2), и от «плоскодонного сверления», расположенного в образце из монокристаллического жаропрочного сплава. Измерения проводились прямым совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем с номинальной частотой 15 МГц.

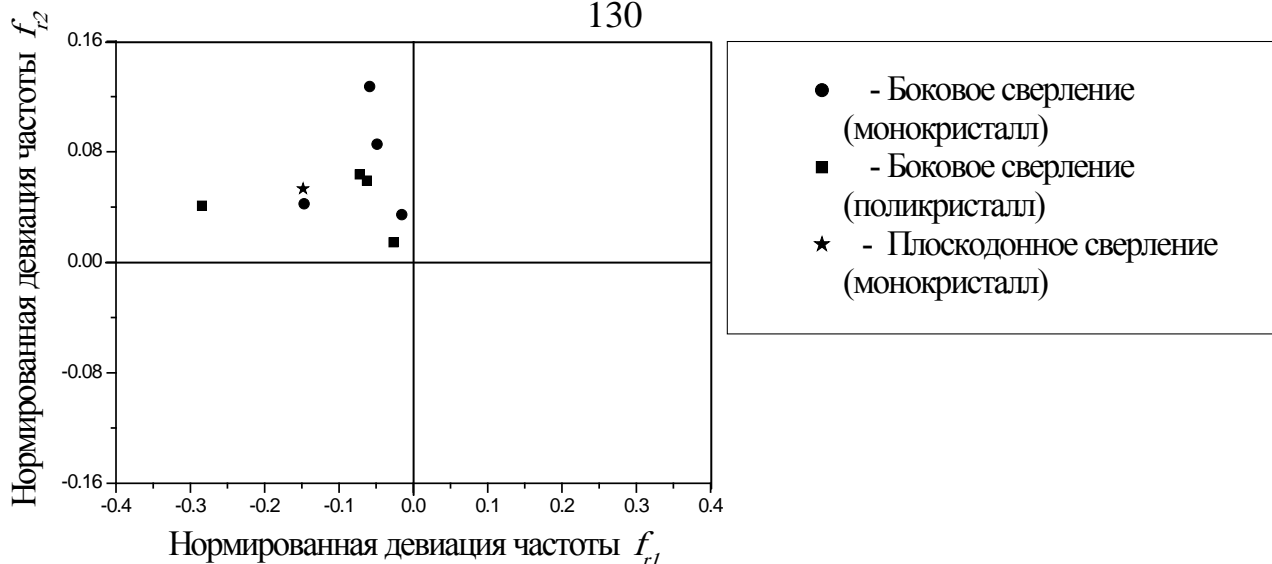


Рисунок 5.15 – Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от «сквозного бокового цилиндрического отверстия», расположенного в образцах из моно- и поликристаллического жаропрочного сплава при различных схемах сканирования, и от «плоскодонного сверления», расположенного в образце из монокристаллического жаропрочного сплава

Из диаграммы (рисунок 5.15), видно, что для «сквозного бокового цилиндрического отверстия», расположенного в образцах из моно- и поликристаллического 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. Эта область диаграммы соответствует случаю, когда частота на срезе импульса меньше, а частота на фронте больше частоты, соответствующей максимуму амплитуды огибающей. Таким образом данные результаты качественно подтверждают результаты, полученные для «сквозных боковых цилиндрических отверстий» и «плоскодонных сверлений», описанные в главе 3.

## 5.6 Выводы к главе 5

1. Проведенное исследование акустических свойств моно- и поликристаллических жаропрочных сплавов показало, что коэффициенты

затухания в поликристаллическом состоянии значительно больше, чем в монокристаллическом.

2. Исследование возможности выявления искусственных отражателей типа «плоскодонное отверстие» и «боковое сверление» в моно- и поликристаллических образцах, а также реального дефекта в лопатке из поликристаллического жаропрочного сплава показало, что при правильном выборе схемы прозвучивания и параметров контроля можно добиться хорошей выявляемости дефектов в таких материалах.

3. При построении методик ультразвукового контроля необходимо учитывать, что в случае поликристаллов анизотропия приводит к очень высокому затуханию ультразвуковых волн в материале, поэтому разработка методик контроля поликристаллических жаропрочных никелевых сплавов заключается в выборе таких параметров контроля, которые с учетом высокого затухания позволят уверенно выделять сигналы от дефектов. В случае монокристаллов анизотропия приводит к тому, что при наклонном падении ультразвуковой волны на поверхность монокристалла в его объеме распространяется сразу три собственные объемные ультразвуковые волны в различных направлениях. Чтобы избавиться от влияния трансформированных объемных ультразвуковых волн при контроле изделий из таких материалов необходимо создавать условия для нормального падения упругих волн на границу монокристалла с дальнейшим распространением ультразвука вдоль кристаллографической оси достаточно высокого порядка.

4. Результаты оценки частотных параметров эхо-сигналов от искусственных отражателей в виде «сквозного бокового цилиндрического отверстия», расположенного в образцах из моно- и поликристаллического жаропрочного сплава, и для «плоскодонного сверления», расположенного в образце из монокристаллического жаропрочного сплава качественно подтвердили результаты, полученные для таких отражателей на сталях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, выходящие на поверхность, от других отражателей. Данные, полученные на искусственных 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, подтверждают результаты, полученные ранее для сталей.

**ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ**

- НК – неразрушающий контроль;
- УЗК – ультразвуковой контроль;
- ЗЭМ – зеркальный эхо-метод;
- ИР – индикатриса рассеяния;
- ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;
- ФАР – фазированная антенная решетка;
- УЗСП – ультразвуковой спектральный метод;
- АЭС – атомная электростанция;
- ТЭС – теплоэлектростанция;
- СО – стандартный образец;
- РУЗК – ручной ультразвуковой контроль;
- УЗСП – ультразвуковой спектральный метод;
- ЧМ – частотно-модулированный;
- ЦФА – цифровая фокусировка антенн;
- СБЦО – сквозное боковое цилиндрическое отверстие;
- ПС – плоскодонное сверление.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Гурвич, А.К. Неразрушающий контроль рельсов [Текст] / А.К. Гурвич – М.: Транспорт. – 1983. – 325с.
2. Ультразвуковой контроль материалов [Текст] / Справочник: Под общ. ред. Й. Крауткремер, Г. Крауткремер – М.: Металлургия. – 1991. – 752 с.
3. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля [Текст] / И.Н. Ермолов – М: Машиностроение. – 1981.
4. Алешин, Н.П. Методы акустического контроля металлов [Текст] / Н.П. Алешин, В.Е. Белый, А.Х. Вовилкин и др. – М: Машиностроение. – 1989.
5. Щербинский, В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений [Текст] / В.Г. Щербинский – М: Машиностроение. – 2005.
6. Ринкевич, А.Б. Физические основы и методы акустического контроля [Текст] / А.Б. Ринкевич, Я.Г. Смородинский, Ю.А. Гулло – Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания. – 2007 г. – с. 132.
7. ГОСТ 23829-85 Контроль акустический. Термины и определения – М: Государственный комитет СССР по стандартам. – 1986г. – 16 с.
8. ГОСТ 14782–86 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые – М: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – 1986.
9. ГОСТ 23702–90 Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний – М.: Госстандарт СССР. – 1991. – 57 с.
10. Щербаков, А.А. Определение эффективной частоты эхо-импульса ультразвуковых преобразователей [Текст] / А.А. Щербаков, В.Н. Данилов // Дефектоскопия. – 1998. – № 4. – С. 23-31.
11. Данилов, В.Н. К определению частоты колебаний при ультразвуковом контроле [Текст] / В.Н. Данилов, И.Н. Ермолов, А.А. Щербаков // Дефектоскопия. – 2003. – № 3. – С. 3-11.
12. Вайнштейн, Л.А. Разделение частот в теории колебаний и волн [Текст] / Л.А. Вайнштейн, Д.Е. Вакман – М.: Наука. – 1983. – 288 с.

13. Перов, Д.В. Применение вейвлетов для анализа ультразвуковых полей, детектированных лазерным интерферометром. Основные принципы вейвлетного анализа [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич // Дефектоскопия. – 2001. – № 12. – С. 55-66.
14. Астафьева, Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения [Текст] / Н.М. Астафьева // Успехи физ. наук. – 1996. – Т. 166, №11. – С. 1145-1170.
15. Френкс, Л. Теория сигналов [Текст] / Л. Френкс – М.: Сов. радио. – 1974. – 344 с.
16. Перов, Д.В. Вейвлетный анализ акустических полей и сигналов в ультразвуковой дефектоскопии [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич // Дефектоскопия. – 2005. – №.2. – С. 43-54.
17. Щербинский, В.Г. Новый информативный признак характера дефектов при ультразвуковом контроле [Текст] / В.Г. Щербинский, В.Е. Белый // Дефектоскопия. – 1975. – № 3. – С. 27-36.
18. Whittaker, I. S. Ultrasonic detection and measurements of defects in stainless steel [Текст] / I. S. Whittaker, T. J. Iessop // Brit J. of NDT. – 1981. – No. 6. – P. 293-303.
19. Гурвич, А.К. Индикатрисы рассеяния как источник дополнительной информации о выявленных дефектах [Текст] / А.К. Гурвич, Л.И. Кузьмина // Дефектоскопия. – 1970. – № 6. – С. 47-56.
20. Вopilкин, А.Х. Дифракционные методы в ультразвуковом неразрушающем контроле [Текст] / А.Х. Вopilкин – М.: изд. НТО «Приборпром». – 1989. – 73 с.
21. Перевалов, С.П. Изучение геометрических и акустических характеристик эрозионных отражателей [Текст] / С.П. Перевалов // Дефектоскопия. – 1994. – № 9. – С. 15-31.
22. Бархатов, В.А. Применение оконных функций в задачах распознавания ультразвуковых сигналов [Текст] / В.А. Бархатов // Дефектоскопия. – 2010. – №10. – С. 3-10.

23. Данилов, В.Н. Моделирование работы пьезопреобразователей с сухим точечным контактом в режиме излучения [Текст] / В.Н. Данилов, А.А. Самокрутов // Дефектоскопия. – 2003. – № 8. – С. 11–23.
24. Самокрутов, А.А. Ультразвуковая эхо-томография металлоконструкций. Состояние и тенденции [Текст] / А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 1. – С. 50–59.
25. Базулин, Е.Г. Восстановление изображения дефектов методом C-SAFT по эхо-сигналам, измеренным антенной матрицей в режиме тройного сканирования. [Текст] / Е.Г. Базулин // Дефектоскопия. – 2012. – №1. – С. 3-19.
26. Вынесено положительное решение о выдаче патента по заявке Регистрационный № 2013191982 на изобретение «Способ определения типа дефекта в металлургических изделиях».
27. Зацепин, А.Ф. Ультразвуковая система измерений PCUS-10 [Текст] / А.Ф. Зацепин, В.С. Кортов, А.А. Чудинов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2004. – 40 с.
28. Акустические Контрольные Системы. Приборы для неразрушающего контроля металлов, пластмасс, бетона. Разработка, производство, поставка [<http://acsys.ru/production/>]
29. 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.
30. 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.
31. 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.

32. Перов, Д.В. Примеры визуализации дефектов с использованием многоэлементных преобразователей [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немилова // XXV сессия Российского акустического общества. – М.: ГЕОС. – 2012. – Т. 2. – С. 45-48.

33. 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.

34. Перов, Д.В. Возможность классификации отражателей акустических волн по частотным характеристикам эхоимпульсов [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немилова // III Российская научно-техническая конференция “Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций”. – Екатеринбург. – 2007. – С. 39.

35. 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. Немилова // XXV сессия Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, – 2012. – Т. 1. – С. 216-219.

36. Ринкевич, А.Б. Взаимодействие ультразвуковых импульсных сигналов с отражателями различного вида в упругой среде [Текст] / А.Б. Ринкевич, О.В. Немилова, Д.В. Перов // XXIII Уральская конференция «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами». – Курган. – 2006. – С. 17.

37. Перов, Д.В. Влияние формы отражателей ультразвуковых волн на частотные характеристики эхо-импульсов [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.В. Немилова // V Российская научно-техническая конференция “Ресурс и диагностика материалов и конструкций”. – Екатеринбург. – 2011. – С. 62-63.

38. 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.

39. 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.

40. Румянцев, С.В. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. [Текст] / С.В. Румянцев – М: Энергоиздат. – 1982г.

41. Баннов, М.Д. Сварка и резка материалов: Учеб. пособие [<http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/quality/radiation/>] [Текст] / М.Д. Баннов, Ю.В. Казаков, М.Г. Козулин и др. – М.: Издательский центр «Академия». – 2010. – 400 с.

42. Терещенко, С.А. Методы вычислительной томографии [Текст] / С.А.Терещенко – М.: Физматлит. – 2004. – 320 с.

43. Новокрещенов, В.В. Организация контроля качества продукции. Радиационный и ультразвуковой контроль: Учебное пособие по курсу "Физические основы неразрушающих способов контроля" по направлению "Технологические машины и оборудование" [Текст] / В.В. Новокрещенов, В.К. Драгунов – М.: МЭИ. – 2001. – 122 с.

44. Клюев, В.В. Приборы для неразрушающего контроля [Текст] / В.В. Клюев – М.: Машиностроение. – 1986. – Т. 2. – С. 351.

45. Щербинский, В.Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений строительных конструкций [Текст] / В.Г. Щербинский, Н.П. Алешин – М.: Стройиздат. –1976. – С. 158.

46. Гребенников, В.В. Эхо-зеркальный способ ультразвукового контроля с трансформацией упругих волн [Текст] / В.В. Гребенников, Н.И. Лебедев // Дефектоскопия. – 1979. – № 10. – С. 73-79.

47. Щербинский, В.Г. Эхо-зеркальный ультразвуковой метод обнаружения и распознавания дефектов сварных швов [Текст] / В.Г. Щербинский, В.Е. Белый – М.: Машиностроение. – 1980. – С. 40.

48. Гурвич, А.К. Исследование способов измерения условной высоты дефектов при сканировании наклонным искателем [Текст] / А. К. Гурвич, Л.И. Кузьмина // Дефектоскопия. – 1970. – № 6. – С. 57-65.
49. Гурвич, А.К. Сравнительная оценка способов измерения условной протяженности дефектов [Текст] / А. К. Гурвич, В.А. Щукин // Дефектоскопия. – 1970. – № 6. – С. 65-70.
50. Круг, Г.А. Принципы построения систем измерения и оценки условной протяженности дефектов при автоматическом ультразвуковом контроле сварных соединений [Текст] / Г.А. Круг, В.А. Яблоков // Дефектоскопия. – 1970. – №6. – С. 71-75.
51. Вopilкин, А.Х. Волны дифракции и их применение в ультразвуковом неразрушающем контроле [Текст] / А.Х. Вopilкин // Дефектоскопия. – 1985. – №1. – С. 20-34, –№ 2. – С. 72-85.
52. Вopilкин, А.Х. Экспериментальное исследование ультразвукового спектрального метода определения характера дефектов [Текст] / А.Х. Вopilкин, И.Н. Ермолов, В.Г. Стасеев // Дефектоскопия. – 1977. – № 6. – С. 40-53.
53. Вopilкин, А.Х. Теоретическое исследование ультразвукового спектрального метода определения характера дефектов [Текст] / А.Х. Вopilкин, И.Н. Ермолов, В.Г. Стасеев // Дефектоскопия. – 1977. – № 6. – С. 75-84.
54. Сухоруков, В.В. Акустические методы контроля [Текст] / под ред. В.В. Сухорукова, И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов, – М.: Высшая школа. – 1991. – 283 с.
55. Дымкин, Г.Я. Физические основы ультразвуковой дефектоскопии [Текст] / под общ. ред. Г.Я. Дымкина, С.Р. Цокум, – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения. – 1997. – 102с.
56. Базулин, Е.Г. Восстановление изображения дефектов методом C-SAFT по эхо-сигнала, измеренным матрицей в режиме тройного сканирования [Текст] / Е.Г. Базулин // Дефектоскопия. – 1975. – № 3. – С. 27-36.
57. Braconnier, D. Detailed Study of Inspecting Thick Parts Using Large Aperture Phased Arrays and DDF [Текст] / D. Braconnier, S. Okuda, G. Dao // 7<sup>th</sup>

International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. Yokohama, Japan. – 12-15 May. – 2009.

58. Базулин, Е.Г. Применение ультразвуковой антенной решетки для регистрации эхо-сигналов методом двойного сканирования для получения изображений дефекта [Текст] / Е.Г. Базулин, А.С. Голубев, С.А. Коколев // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 18-32.

59. Bulavinov, A. Quantitative ultrasonic Testing of Pressurized Components Using Sampling Phased Arrays [Текст] / A.Bulavinov, M. Dalichow, M. Kroning, J.H. Kurz, F. Walte, K. Reddy // Proc. National Seminar on Non-destructive Evaluation. Hyderabad. – 7-9 December. – 2006. – P. 437-448.

60. Ковалев, А.В. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. помехи и пространственная селекция [Текст] / А.В. Ковалев, В.Н. Козлов, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин, Н.Н. Яковлев // Дефектоскопия. – 1990. – № 2. – С. 29-41.

61. Плис, А.И., Бабин М.В., Железняков В.А. К вопросу о пространственном восстановлении структуры акустических источников [Текст] / А.И. Плис, М.В. Бабин, В.А. Железняков // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т2, №2, – С. 83-86.

62. Hanstead, P.D. A new technique for ultrasonic imaging [Текст] / P.D. Hanstead // Brit. J.NDT. – 1979. – V 21, №4, – P. 212-213.

63. Magginness, M. G. Ultrasonic imaging in solids [Текст] / M.G. Magginness, L. Kay // Radio a. Electron. Engine. –1971. – V. 41, No 2. – P. 91 – 93.

64. Вopilкин, А.Х. Ультразвуковая дефектометрия металлов с применением голографических методов [Текст] / А.Х. Вopilкин, В.Г. Бадалян, Е.Г. Базулин, – Москва: ООО НПЦ "Эхо +" Год. – 2008. – С. 27-28.

65. Система контроля с использованием ФАР-технологии «3D Focus-UT» [[http://www.hitachi.com/rev/field/powersystems/\\_icsFiles/afieldfile/2009/04/28/r2009\\_02\\_107.pdf](http://www.hitachi.com/rev/field/powersystems/_icsFiles/afieldfile/2009/04/28/r2009_02_107.pdf)]

66. Gottfried, S. COMPAS-XXL – A novel phased array system with extended capabilities [[http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_03\\_28.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_03_28.pdf)] / S. Gottfried, P. Roy, D. Elmar, B. Lukas, D. Wolfram, A. Karl.

67. Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems [http://www.izfp-d.fraunhofer.de/english-izfp-d/events/archive.html.]
68. Научно-технический центр «Эксперт». Неразрушающий контроль. [http://www.ntcexpert.ru/uc/ultrazvukovye-piezojelektricheskie-preobrazovateli]
69. РД РОСЭК-001-96 Машины грузовые. Конструкции металлические. Контроль ультразвуковой. Основные положения, – М.: Российская экспертная компания по объектам повышенной опасности РосЭК. – 1996. – 62с.
70. Перов, Д.В. Вейвлетный анализ сверхдлиннопериодных сейсмических осцилляций [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, О.А. Кусонский // Сборник трудов XVI Сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС. – 2005. – Т. 1. – С. 279-282.
71. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам [Текст] / И. Добеши, – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”. – 2001. – 464 с.
72. Дремин, И.М. Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование [Текст] / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. –Т. 171, № 5. – С. 465-501.
73. Mallat, S.A. Wavelet toue of siglan processing [Текст] / S.A. Mallat, – San diego, USA: Academic Press. – СА. – 1998. – 630р.
74. Перов, Д.В. Применение вейвлетов для анализа ультразвуковых полей, детектированных лазерным интерферометром. Обнаружение и локализация дефекта в монокристалле алюминия [Текст] / Д.В. Перов // Дефектоскопия. – 2001. – № 12. – С. 67-79.
75. 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.
76. Rinkevich, A.B. Comparison of frequency features of pulse echoes from different reflectors [Текст] / A.B. Rinkevich, O.V. Nemytova, D.V. Perov // ISRN Mechanical Engineering. – 2011. – 371514.
77. Короновский, А.А., Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения [Текст] / А.А. Короновский, А.Е. Храмов – М.: Физматлит. – 2003. – 176 с.

78. Перов, Д.В. Применение вейвлетов для анализа ультразвуковых полей, детектированных лазерным интерферометром. Основные принципы вейвлетного анализа [Текст] / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич // Дефектоскопия. – 2001. – № 12. – С. 55-66.
79. Perov, D.V. Using the different types of wavelet transform for analyzing acoustic fields and signals in elastic media [Текст] / D.V. Perov, A.B. Rinkevich // In "New Research on Acoustics"; – Weiss B.N.; – Ed.; – Nova Science Publishers: Hauppauge. – NY. – 2008. – P. 65-109.
80. 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.
81. Кайно, Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов [Текст] / Г. Кайно. – М.: Мир. – 1990. – 656 с.
82. Perov, D.V. Acoustic pulse signal diffraction from different reflectors in an elastic medium [Текст] / D.V. Perov, A.B. Rinkevich // Insight. – 2008. – V. 50, No 4, – P. 216-217.
83. Королев, М.В. Эхо-импульсные толщиномеры [Текст] / М.В. Королев, – М.: Машиностроение. – 1980. – 111 с.
84. Вендик, О. Г., Антенны с немеханическим движением луча [Текст] / О.Г. Вендик. – М.: Радио и связь. – 1965. – 360 с.
85. Фролов, В.В. Турбины тепловых и атомных электрических станций [Текст] / под общей ред. В.В. Фролова и А.Г. Костюка. – М.: МЭИ. – 2002.
86. Строганов, Г.Б. Литейные жаропрочные сплавы для газовых турбин [Текст] / Г.Б. Строганов., В.М. Чепкин. – М.: ОНТИ, МАТИ. – 2000. – 128 с.
87. Кононов, С.А. Трещины в штамповках жаропрочных никелевых сплавов и технологические методы борьбы с ними [Текст] / С.А. Кононов, Б.А. Колачев // Цветная металлургия. – 2001. – № 3.
88. Шоршоров, М. Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов [Текст] / М.Х. Шоршоров, А.А. Ерохин, Т.А. Чернышова и др. – М.: “Машиностроение”. – 1973. – 224 с.

89. Reed, P.A.S. Fatigue Crack Path Prediction in UDIMET 720 Nickel-Based Alloy Single Crystals [Текст] / P.A.S. Reed, X.D. Wu, I. Sinclair // Met. Mat. Trans. – 2000. – V. 31A. – 2000. – P. 109.
90. Habicht, W. Investigation of Nickel-Based Alloys Exposed to Supercritical Water Environments [Текст] / W. Habicht, N. Boukis, G. Franz, E. Dinjus // Microchim. Acta. – 2004. – V. 145. – P. 57-62.
91. Пименова, Г.П. Образование дефектов в лопастях из-за коррозии при повышенной температуре [Текст] / Г.П. Пименова, О.И. Марусий, И.А. Маковецкая, Б.А. Грязнов // Проблемы прочности. – 1981. – № 12. – С. 32-35.
92. Казанцева, Н.В. Структурные изменения в жаропрочном сплаве ЭП-800 при динамическом нагружении [Текст] / Н.В. Казанцева, Н.И. Виноградова, Н.Н. Степанова, Е.П. Романов, А.Н. Пирогов, Г.Г. Винокуров, С.П. Яковлева // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 8. – С. 10-16.
93. Ломберг, Б.С. Новый качественный уровень дисков сплава ЭИ742-ИД для новых и модернизации существующих ГТД [Текст] / Б.С. Ломберг, С.А. Кононов, А.С. Перевозов // Труды международной научно-технической конференции “Научные идеи С.Т.Кишкина и современное материаловедение”, – М: ВИАМ. – 25-26 апреля. – 2006. – 378с.
94. Ринкевич, А.Б. Упругие волны в монокристаллах жаропрочных сплавов на никелевой основе [Текст] / А.Б. Ринкевич, Н.Н. Степанова, Д.П. Родионов, В.А. Сазонова // ФММ. – 2003. – Т. 96, № 2 – С. 114-122.
95. Ринкевич, А.Б. Акустические свойства монокристаллов  $Ni_3Al$ , легированных кобальтом и ниобием [Текст] / А.Б. Ринкевич, Н.Н.Степанова, А.М. Бурханов // ФММ. – 2006. – Т. 102, № 6. – С. 632-636.
96. Ринкевич, А.Б. Скорость упругих волн и модули упругости жаропрочных сплавов на никелевой основе и сплава 60Н21 [Текст] / А.Б. Ринкевич, Н.Н. Степанова, Д.П. Родионов // ФММ. – 2008. – Т. 105, № 5. – С.541-548.
97. Шутилов, В.А. Основы физики ультразвука [Текст] / под ред. В.А. Шутилова, – Л.: Ленинградский университет. – 1980. – 280с.

98. Rinkevich, A.B. Elastic energy distribution in aluminum single crystal. [Текст] / A.B. Rinkevich, Ya.G. Smorodinsky // *Nondestructive Testing and Evaluation*. – 2002. – V. 18, № 3-4. – P. 159-170.
99. Данилов, В.Н. К вопросу о расчете АРД-диаграмм. [Текст] / В.Н. Данилов, И.Н. Ермолов // *Дефектоскопия*. – 2000. – № 7. – С. 35-43.
100. 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.
101. 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.